

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **ПРОЄКТУВАННЯ ТА АНАЛІЗ АВТОНОМНОЇ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ ЗМІННОГО ТА
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ ДАЧНОГО БУДИНКУ**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-41
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Коцюра М. М.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) Куземко Н.А.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) Мовчан Л.Т.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Коваль В.П.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) Золотий Р.З.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Коцюрі Михайлу Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування та аналіз автономної фотоелектричної системи живлення змінного та постійного струму для дачного будинку

Керівник роботи к.т.н., доц. Куземко Н.А.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «31» грудня 2025 року № 4/7-1162.

2. Термін подання студентом завершеної роботи до 20.06.2026

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Структура та принцип роботи автономної фотоелектричної системи

2. Електричне навантаження житлового будинку

3. Компоненти проєктованої фотоелектричної системи

4. Імітаційна модель системи

5. Результати моделювання

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1. Дачний будинок

2. Годинні графіки навантаження

3. Середньомісячна сонячна радіація

4. Блок-схема фотоелектричної акумуляторної системи живлення в будинку

5. Імітаційна модель системи у MATLAB/Simulink

6. Потужність, напруга та струм фотоелектричної батареї

7. Напруга, струм і потужність на навантаженні

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Безпека життєдіяльності, основи охорони праці</i>	<i>Гурик О.Я. к.т.н., доцент кафедри МТ</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Мовчан Л.Т., к.т.н., доц. кафедри ЕІ</i>		

7. Дата видачі завдання _____ 02.01.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд за напрямком кваліфікаційної роботи	з 19.04.2026 по 25.04.2026	
2	Підготовка основної частини пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	з 25.04.2026 по 21.05.2026	
3	Підготовка розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці»	з 21.05.2026 по 23.05.2026	
4	Складання переліку використаних літературних джерел	з 23.05.2026 по 24.05.2026	
5	Підготовка вступу, висновків, змісту, реферату	з 24.05.2026 по 28.05.2026	
6	Підготовка, оформлення та друк графічного матеріалу кваліфікаційної роботи	з 28.05.2026 по 01.06.2026	
7	Отримання відгуку та рецензії на кваліфікаційну роботу, підготовка доповіді на захист	з 01.06.2026 по 05.06.2026	

Студент _____
(підпис)

Коцюра М. М.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Куземко Н.А.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Проектування та аналіз автономної фотоелектричної системи живлення змінного та постійного струму для дачного будинку».

Метою роботи є проектування та аналіз автономної фотоелектричної системи живлення змінного та постійного струму для дачного будинку з використанням сучасних програмних засобів імітаційного та математичного моделювання.

Проведено аналітичний огляд сучасних технологій автономних фотоелектричних систем, зокрема фотоелектричних модулів, акумуляторних батарей, контролерів заряду та інверторів, порівняти їхні характеристики та обґрунтувати вибір компонентів. Виконано проектування автономної фотоелектричної системи для конкретного дачного будинку: визначити енергетичні потреби об'єкта, проаналізувати сонячні ресурси регіону, підібрати компоненти системи та оптимізувати її конфігурацію в програмному забезпеченні HOMER Pro та BEopt. Розроблено імітаційну модель запроєктованої системи в середовищі MATLAB/Simulink, розрахувати параметри підвищувального перетворювача постійного струму з MPPT-контролером та провести моделювання роботи системи за різних режимів навантаження.

Ключові слова: ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СТАНЦІЯ, АКУМУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ

ЗМІСТ

ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Аналіз сонячного потенціалу України та доцільність використання фотоелектричних систем	8
1.2 Структура та принцип роботи автономної фотоелектричної системи	8
1.3 Фотоелектричні модулі: типи, характеристики та критерії вибору	9
1.4 Акумуляторні батареї для фотоелектричних систем.....	11
1.5 Контролери заряду: MPPT чи PWM.....	13
1.6 Інвертори для автономних фотоелектричних систем.....	14
1.7 Методика розрахунку та підбору компонентів автономної фотоелектричної системи	14
1.8 Аналіз економічної доцільності та строків окупності.....	15
1.9 Використання постійного струму в житлових електромережах	17
1.10 Висновки до розділу	18
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	20
2.1 Будова та технічні характеристики будинку	20
2.2 Оцінка навантаження на будинок.....	21
2.3 Електричне навантаження житлового будинку в програмі VEopt.....	22
2.4 Вибір місця розташування та електричне навантаження	25
2.5 Ресурси сонячного випромінювання.....	26
2.6 Компоненти проектованої фотоелектричної системи з аккумуляторною батареєю	27
2.6.1 Фотоелектричний модуль.....	27
2.6.2 Блок акумуляторних батарей	28

2.7 Моделювання та результати, отримані за допомогою NOMER PRO.....	30
2.8 Висновки до розділу	33
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	36
3.1 Імітаційна модель системи.....	36
3.2 Характеристики фотоелектричної батареї.....	37
3.3 Система акумуляторних батарей	39
3.4 Підвищувальний перетворювач та система відстеження точки максимальної потужності для фотоелектричних систем	41
3.4.1 Підвищувальний перетворювач.....	41
3.4.2 Відстеження точки максимальної потужності (MPPT).....	42
3.5 Результати моделювання.....	42
3.6 Висновки до розділу	44
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	46
4.1 Інструктажі з охорони праці	46
4.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	53

ВСТУП

Актуальність теми. Теперішні умови життя ставить перед енергетичною галуззю України низку викликів, пов'язаних із децентралізацією електропостачання, зростанням частки відновлюваних джерел енергії та необхідністю забезпечення енергонезалежності окремих споживачів. Сонячна енергетика є одним із найперспективніших напрямів вирішення цих завдань. За даними НКРЕКП, сонячні електростанції забезпечують близько 75% виробництва електроенергії з відновлюваних джерел в Україні, а кількість об'єктів сонячної генерації постійно зростає.

Особливого значення набуває проєктування автономних фотоелектричних систем для об'єктів, віддалених від централізованих електромереж, зокрема для дачних будинків. Територія України характеризується високим сонячним потенціалом — середньорічна інсоляція варіюється від 950 до 1500 кВт·год/м², що створює сприятливі умови для ефективної роботи таких систем. Крім того, сучасний розвиток напівпровідникової техніки та поширення побутових приладів, що працюють на постійному струмі, відкривають нові можливості для застосування мереж постійного струму поряд із традиційними мережами змінного струму, що дозволяє підвищити загальний ККД системи та зменшити капітальні витрати.

Використання автономних фотоелектричних систем з комбінованим живленням змінного та постійного струму дає змогу відмовитися від дороговартісного підключення до централізованої мережі, забезпечити енергетичну незалежність об'єкта та зменшити вуглецевий слід. Це робить тему проєктування та аналізу таких систем актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору для спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Мета кваліфікаційної роботи: проєктування та аналіз автономної фотоелектричної системи живлення змінного та постійного струму для дачного

будинку з використанням сучасних програмних засобів імітаційного та математичного моделювання.

Відповідно до даної мети ставляться такі завдання:

1. Провести аналітичний огляд сучасних технологій автономних фотоелектричних систем, зокрема фотоелектричних модулів, акумуляторних батарей, контролерів заряду та інверторів, порівняти їхні характеристики та обґрунтувати вибір компонентів.

2. Виконати проектування автономної фотоелектричної системи для конкретного дачного будинку: визначити енергетичні потреби об'єкта, проаналізувати сонячні ресурси регіону, підібрати компоненти системи та оптимізувати її конфігурацію в програмному забезпеченні HOMER Pro та BEopt.

3. Розробити імітаційну модель запроєктованої системи в середовищі MATLAB/Simulink, розрахувати параметри підвищувального перетворювача постійного струму з MPPT-контролером та провести моделювання роботи системи за різних режимів навантаження.

Структура роботи. Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 67 арк. формату А4, графічна частина – 20 аркушів презентації.

Кваліфікаційна робота виконана відповідно до вимог [1].

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Аналіз сонячного потенціалу України та доцільність використання фотоелектричних систем

Сонячна енергетика в Україні демонструє стійку динаміку розвитку незважаючи на зовнішні виклики. За даними НКРЕКП, станом на квітень 2024 року в Україні функціонує близько 1400 об'єктів сонячної генерації різної потужності, а сонячні електростанції забезпечують близько 75% загального обсягу виробництва електроенергії з відновлюваних джерел [2]. Інсоляція в Україні варіюється від 1100 до 1450 кВт·год/м² на рік, що робить всю територію країни придатною для розміщення сонячних електростанцій.

Середньорічна сонячна інсоляція на горизонтальній поверхні для Києва становить приблизно 1050-1100 кВт·год/м², для південних регіонів (Одеса, Миколаїв, Херсон) цей показник досягає 1300-1450 кВт·год/м²[3]. Оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів для умов Києва становить 30-35° при південній орієнтації, що забезпечує максимальну річну енергогенерацію.

Використання автономних фотоелектричних систем для дачних будинків є особливо актуальним з огляду на відсутність необхідності підключення до централізованої електромережі, енергетичну незалежність та зменшення вуглецевого сліду. Згідно з дослідженням Greenpeace, середньорічний рівень сонячної інсоляції (DNI) в Україні становить від 950 до 1500 кВт·год/м², причому найвищі показники характерні для південних областей [3].

1.2 Структура та принцип роботи автономної фотоелектричної системи

Автономна фотоелектрична система являє собою комплекс технічних засобів, призначений для перетворення сонячної радіації на електричну енергію змінного та постійного струму без підключення до зовнішньої електромережі.

Основними компонентами такої системи є фотоелектричні модулі, контролер заряду, акумуляторна батарея та інвертор [4-7].

Принцип роботи системи полягає в наступному: фотоелектричні модулі перетворюють сонячну радіацію на електричний струм постійного напрямку. Контролер заряду регулює процес зарядки акумуляторної батареї, запобігаючи її перезаряду та глибокому розряду. Інвертор перетворює постійний струм з акумуляторної батареї на змінний струм стандартної частоти 50 Гц та напруги 230 В для живлення побутових приладів [4].

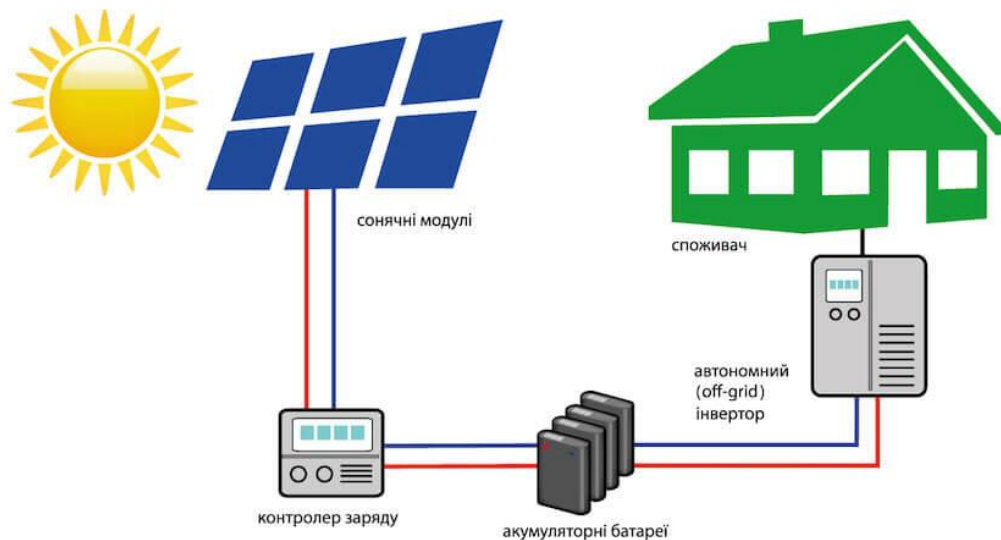


Рисунок 1.1 - Структурна схема автономної фотоелектричної системи

Сучасні автономні системи можуть мати архітектуру DC-зв'язку (DC-coupled) або AC-зв'язку (AC-coupled). У системі з DC-зв'язком сонячний постійний струм надходить безпосередньо від масиву до контролера заряду MPPT, потім до акумуляторної батареї, а інвертор живить навантаження змінного струму. Такий підхід забезпечує вищу загальну ефективність через меншу кількість перетворень енергії.

1.3 Фотоелектричні модулі: типи, характеристики та критерії вибору

Фотоелектричний модуль (сонячна панель) є первинним перетворювачем сонячної енергії в електричну [8-11]. Сучасний ринок пропонує модулі на

основі монокристалічного кремнію, полікристалічного кремнію та тонкоплівкових технологій. Монокристалічні модулі демонструють найвищу ефективність перетворення, яка досягає 22-23% для серійних виробів [12].

Зокрема, монокристалічні панелі Longi Solar серії Ні-МО демонструють ефективність до 22,5% та потужність до 585 Вт, що робить їх оптимальним вибором для систем з обмеженою площею монтажу [12]. Висока ефективність дозволяє отримати більшу енергогенерацію на одиницю площі, що є критичним фактором для дачних будинків з обмеженою даховою поверхнею.

Основні параметри фотоелектричних модулів різних технологій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Порівняльні характеристики фотоелектричних модулів різних технологій

Параметр	Монокристалічні	Полікристалічні	Тонкоплівкові
ККД, %	20-23	16-19	10-13
Потужність модуля, Вт	400-700	300-550	100-400
Температурний коефіцієнт, %/°C	-0,35...-0,40	-0,40...-0,45	-0,20...-0,30
Термін служби, років	25-30	25-30	15-20
Вартість за Вт, USD	0,25-0,40	0,20-0,30	0,30-0,50

Вихідна потужність фотоелектричного модуля безпосередньо залежить від рівня сонячної інсоляції. При стандартних тестових умовах (STC: інсоляція 1000 Вт/м², температура 25°C, АМ 1.5) модуль номінальною потужністю 550 Вт генерує саме цю потужність. Однак у реальних умовах потужність змінюється залежно від інтенсивності сонячного випромінювання та температури комірок [11,13].

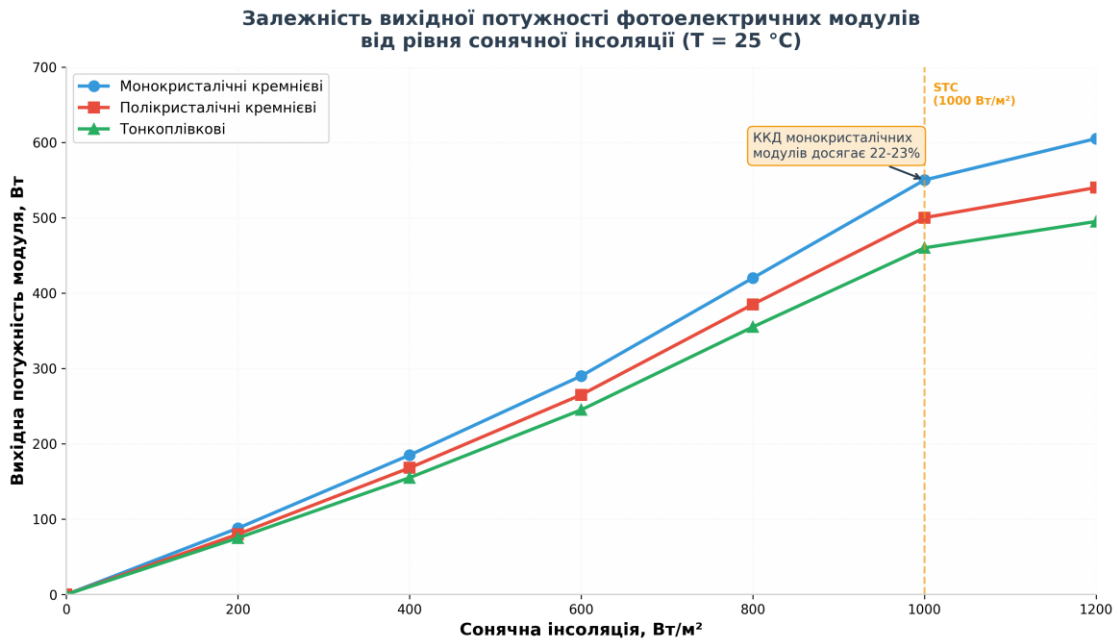


Рисунок 1.2 - Залежність вихідної потужності фотоелектричних модулів від рівня сонячної інсоляції (T = 25°C)

Важливим параметром є температурний коефіцієнт потужності, який для кремнієвих модулів становить від $-0,35$ до $-0,45\%/^{\circ}\text{C}$. Це означає, що при підвищенні температури комірки на кожні 10°C вище 25°C потужність модуля зменшується на $3,5-4,5\%$ [13]. Для умов українського літа, коли температура комірок може перевищувати $60-70^{\circ}\text{C}$, це призводить до зниження вихідної потужності на $12-20\%$ від номіналу.

1.4 Акумуляторні батареї для фотоелектричних систем

Акумуляторна батарея є критичним компонентом автономної фотоелектричної системи, що забезпечує накопичення електричної енергії, виробленої в світлий час доби, та її використання в нічний час або в періоди низької сонячної активності. Вибір типу акумулятора суттєво впливає на ефективність, надійність та економічність всієї системи [14-16].

Серед сучасних технологій акумуляторних батарей для фотоелектричних систем найбільшого поширення набули AGM та літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) батареї. LiFePO_4 характеризується високою ефективністю заряду-

розряду (ККД 95-98%), значною глибиною розряду (до 90-100% від ємності), тривалим ресурсом (4000-7000 циклів) та високим рівнем безпеки [8].



Рисунок 1.3 - Порівняльні характеристики акумуляторних технологій для фотоелектричних систем

У порівнянні з традиційними свинцево-кислотними акумуляторами, LiFePO₄ батареї мають значні переваги: ресурс циклів більший у 5-8 разів, ККД вищий на 10-15%, глибина розряду може досягати 90% проти 50% для свинцево-кислотних [17,18]. Хоча початкова вартість літєвих батарей вища, їх вартість за цикл експлуатації значно нижча завдяки тривалому терміну служби.

Розрахунок необхідної ємності акумуляторної батареї виконується за формулою [19]:

$$Q = (E \times A) / (V \times DoD \times \eta_{inv} \times \eta_{cable})$$

де E - добова потреба в енергії, Вт·год;

A - кількість днів автономності;

V - номінальна напруга системи, В;

DoD - допустима глибина розряду;

η_{inv} - ККД інвертора;

η_{cable} - ККД кабельної системи.

1.5 Контролери заряду: MPPT чи PWM

Контролер заряду є ключовим елементом автономної фотоелектричної системи, що виконує функції регулювання процесу зарядки акумуляторної батареї, захисту від перезаряду та глибокого розряду, а також оптимізації роботи фотоелектричного масиву. Сучасні контролери використовують технології MPPT (Maximum Power Point Tracking) або PWM (Pulse Width Modulation) [20,21,22].

MPPT контролери використовують складні алгоритми для постійного відстеження точки максимальної потужності фотоелектричного масиву та адаптації робочої точки для забезпечення максимального відбору енергії. Контролери MPPT можуть приймати більш високу вхідну напругу від панелей і перетворювати її на більш низьку напругу, вищий струм для зарядки батареї, з ефективністю перетворення понад 95% [20].

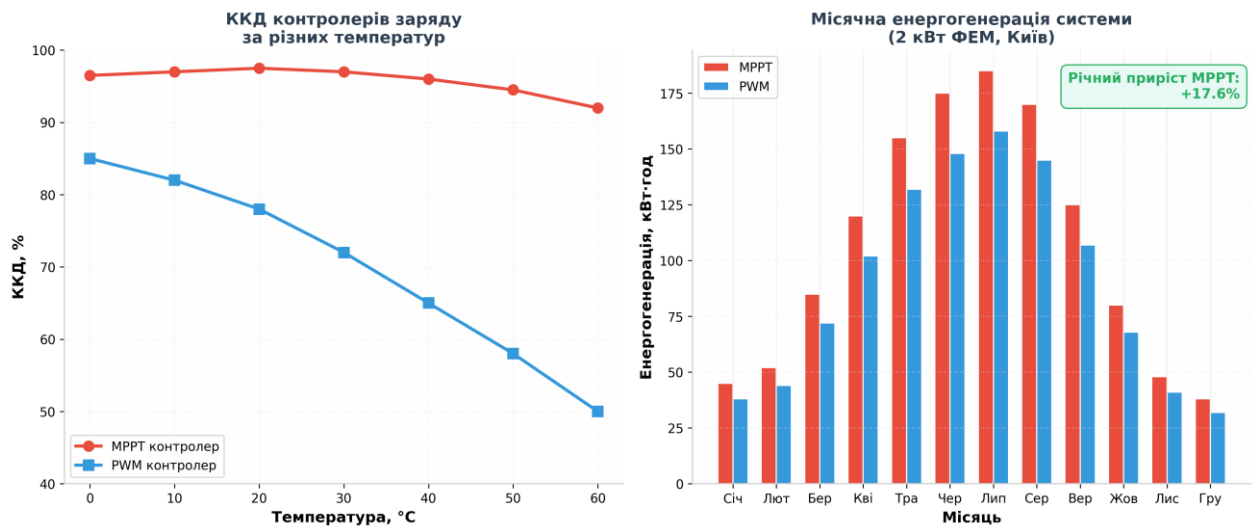


Рисунок 1.4 - Порівняння характеристик MPPT та PWM контролерів заряду

Дослідження Schmid та Behrendt [23] демонструє, що використання MPPT контролерів дозволяє досягти економії вартості системи в діапазоні 4,0-8,6% порівняно з PWM контролерами. Це досягається завдяки зменшенню необхідної встановленої фотовольтаїчної потужності на 31,2-38,6% та ємності акумуляторної батареї на 2,8-8,8%.

Для вибору контролера заряду необхідно розрахувати максимальний струм фотоелектричного масиву та напругу акумуляторної батареї. Згідно з методикою [20], номінальний струм контролера визначається як:

$$I_{ctrl} = (P_{panels} / V_{battery}) \times 1,25,$$

де коефіцієнт 1,25 відповідає запасу надійності 25%.

1.6 Інвертори для автономних фотоелектричних систем

Інвертор забезпечує перетворення постійного струму акумуляторної батареї в змінний струм стандартної частоти та напруги для живлення побутових приладів. Сучасні гібридні інвертори поєднують функції зарядного пристрою, інвертора та системи керування, забезпечуючи ККД понад 95% [15].

При виборі інвертора необхідно враховувати номінальну та пікову потужність навантаження, тип вихідної хвилі (синусоїдальна форма є обов'язковою для чутливої електроніки), ККД перетворення, наявність вбудованого МРРТ контролера та сумісність з типом акумуляторної батареї [20].

Потужність інвертора визначається за формулою:

$$P_{inv} = P_{load} \times 1,25,$$

де P_{load} - сумарна потужність усіх приладів, що можуть працювати одночасно, а коефіцієнт 1,25 забезпечує запас для пускових струмів індуктивних навантажень.

Для типового дачного будинку з добовим споживанням 5-8 кВт·год достатньо інвертора потужністю 3-5 кВт.

1.7 Методика розрахунку та підбору компонентів автономної фотоелектричної системи

Проектування автономної фотоелектричної системи починається з аналізу енергетичних потреб об'єкта. Необхідно скласти перелік усіх

електроприладів з вказівкою їх потужності та тривалості роботи, розрахувати добове енергоспоживання [24].

Розрахунок потужності фотоелектричного масиву виконується за формулою:

$$P_{pv} = E / (H \times \eta_{system}),$$

де E - добове енергоспоживання, Вт·год;

H - середньодобова сонячна інсоляція для найгіршого місяця, пік-сонячних годин;

η_{system} - загальний ККД системи (зазвичай 0,65-0,75).

Для умов наприклад Києва середньодобова інсоляція в найгірший місяць (грудень) становить приблизно 0,6-0,8 пік-сонячних годин на день при оптимальному куті нахилу. Таким чином, для покриття добового споживання 5 кВт·год необхідна встановлена потужність фотоелектричного масиву:

$$P_{pv} = 5000 / (0,7 \times 0,7) \approx 10\ 200 \text{ Вт.}$$

Важливим етапом є розрахунок кількості послідовно та паралельно з'єднаних модулів. Напряга системи заряду акумуляторів (12, 24 або 48 В) визначає конфігурацію з'єднання. Для систем потужністю понад 1 кВт рекомендується використання номінальної напруги 48 В, що зменшує струми та втрати в кабелях [20].

1.8 Аналіз економічної доцільності та строків окупності

Економічна доцільність впровадження автономної фотоелектричної системи залежить від вартості компонентів, вартості альтернативних джерел електропостачання та умов експлуатації. Капітальні витрати типової системи потужністю 3-5 кВт для дачного будинку становлять 15000-25000 доларів США [25].

Структура капітальних витрат автономної системи наступна: акумуляторна батарея - 30-35%, фотоелектричні модулі - 25-30%, інвертор - 15-20%, контролер заряду - 5-8%, монтажні конструкції та кабельна продукція - 10-15%, роботи з монтажу - 5-10% [25]. Акумуляторна батарея є найдорожчим компонентом, що суттєво впливає на загальну вартість системи.

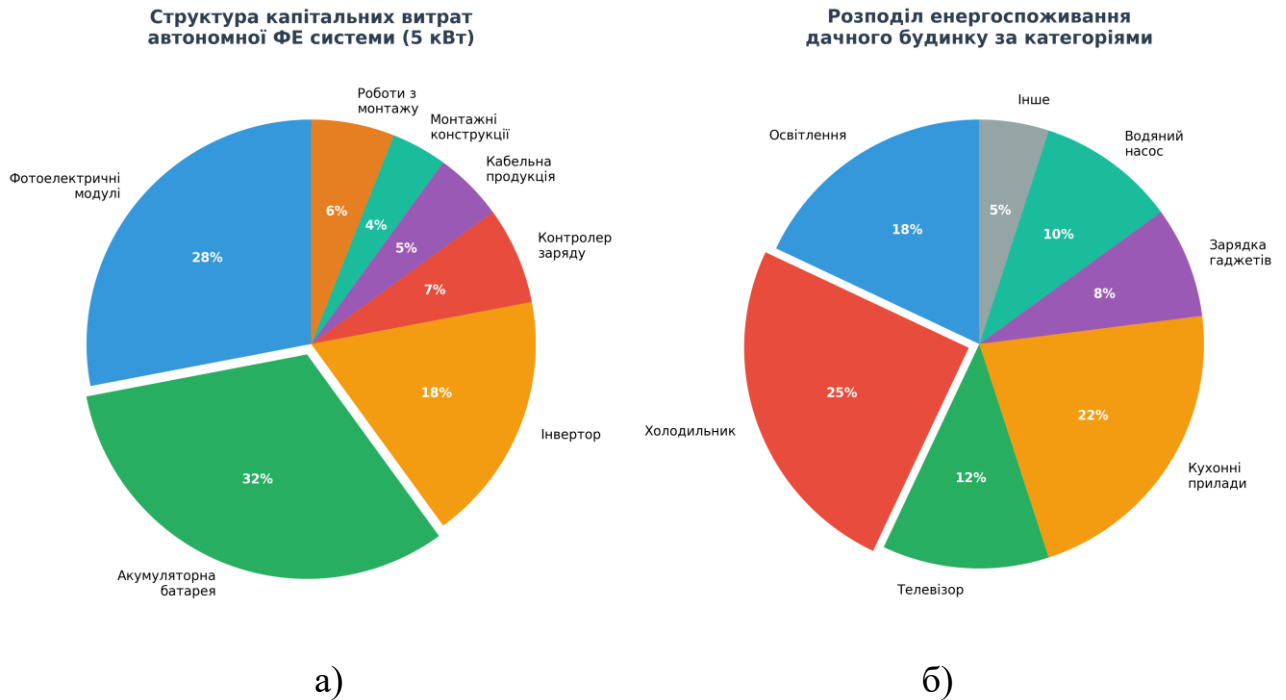


Рисунок 1.5 - Структура капітальних витрат автономної ФЕ системи (а) та розподіл енергоспоживання дачного будинку (б)

При середньозваженій вартості електроенергії 2,5-4 грн/кВт·год та річній генерації 4000-6000 кВт·год системою 5 кВт, річна економія становить 10000-24000 грн. Враховуючи строк служби фотоелектричних модулів 25 років та акумуляторної батареї LiFePO4 10-15 років, період окупності системи становить 8-12 років.

Після окупності система забезпечує практично безкоштовну електроенергію протягом 10-15 років (з урахуванням заміни акумуляторної батареї). Загальний рівень вартості електроенергії (LCOE) для автономної системи становить 0,15-0,35 USD/кВт·год, що є конкурентним показником порівняно з іншими джерелами електропостачання.

1.9 Використання постійного струму в житлових електромережах

У цьому розділі наведено огляд розвитку використання джерел енергії та досліджень, пов'язаних із застосуванням постійного струму, а також його переваг порівняно з джерелами змінного струму. Наприкінці 1880-х — на початку 1890-х років між прихильниками змінного та постійного струму точилася конкурентна боротьба за передачу електричної енергії, відома як «війна» або «битва струмів». Зрештою, для передачі електроенергії на великі відстані було обрано змінний струм завдяки можливості використання високих напруг, що означає менший струм i , відповідно, менші втрати в лініях електропередачі. Внаслідок значного розвитку напівпровідникової промисловості, сьогодні різні побутові прилади працюють на постійному струмі. Змінний струм з електромережі перетворюється на постійний за допомогою внутрішніх трансформаторів у пристроях або адаптерах. Фотоелектричні системи вважаються одним із джерел чистої енергії, що безпосередньо виробляють постійний струм. Втрати при перетворенні змінного струму на постійний можуть сягати 30%.

Крім того, відсутність необхідності в інверторі знижує капітальні витрати. У роботі [26] було запропоновано логарифмічну формулу для визначення найбільш ефективної конструкції сонячної енергетичної системи, що включає варіант системи живлення змінним або постійним струмом. Результати показали економічну ефективність фотоелектричної системи для житлових будинків із великою часткою навантажень постійного струму. Системи розподілу змінного та постійного струму в житловому середовищі середньостатистичної сім'ї були порівняні за допомогою розробленої математичної структури з урахуванням визначальних факторів, що впливають на продуктивність, таких як архітектура будинку та розподіл навантаження. Аналіз було проведено за допомогою програми Electrical Transient Analyzer Program (ETAP). Після проведення порівнянь при номінальній напрузі 220 В з різними напругами постійного струму для типового розміру дроту 4 за

американським стандартом (AWG) результати показали, що 48 В постійного струму є на 4% ефективнішим, ніж 380 В постійного струму, та приблизно на 9% ефективнішим, ніж 220 В змінного струму. Отже, для ізольованих будинків 48 В постійного струму є найкращим рішенням. Воно є безпечним і здатним забезпечити роботу більшості побутових навантажень. На сьогоднішній день на ринку широко доступні прилади, що працюють на постійному струмі [27].

1.10 Висновки до розділу

1. Розглянуто структуру автономної фотоелектричної системи, яка складається з фотоелектричних модулів, контролера заряду, акумуляторної батареї та інвертора. Визначено, що архітектура DC-зв'язку забезпечує вищу загальну ефективність порівняно з AC-зв'язком завдяки меншій кількості перетворень енергії.
2. Проведено порівняльний аналіз фотоелектричних модулів різних технологій.
3. Проведено порівняльний аналіз характеристик акумуляторних технологій.
4. Виконано порівняння контролерів заряду MPPT та PWM. Встановлено, що MPPT-контролери забезпечують економію вартості системи 4,0–8,6% за рахунок зменшення необхідної фотовольтаїчної потужності на 31,2–38,6% та ємності акумуляторної батареї на 2,8–8,8%.
5. Окреслено вимоги до інвертора автономної системи. Для дачного будинку з добовим споживанням 5–8 кВт·год достатньо гібридного інвертора потужністю 3–5 кВт з синусоїдальною вихідною напругою та ККД понад 95%.
6. Опрацьовано методику розрахунку компонентів автономної фотоелектричної системи.
7. Проаналізовано економічну доцільність впровадження фотоелектричної системи. Капітальні витрати типової автономної системи потужністю 3–

5 кВт становлять 15000–25000 USD, період окупності — 8–12 років, а рівень вартості електроенергії (LCOE) — 0,15–0,35 USD/кВт·год.

8. Розглянуто перспективи використання постійного струму в житлових електромережах. Встановлено, що номінальна напруга 48 В постійного струму є приблизно на 9% ефективнішою порівняно з 220 В змінного струму, що дає змогу знизити капітальні витрати за рахунок відмови від інвертора для частини навантаження.
9. Отримані в аналітичному розділі результати створюють теоретичну та методичну основу для проектування в другому розділі кваліфікаційної роботи конкретної автономної фотоелектричної системи живлення змінного та постійного струму для дачного будинку з урахуванням географічного розташування та енергетичних потреб.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Будова та технічні характеристики будинку

Це дослідження присвячене проектуванню автономної сонячної енергетичної системи для дачних будинків. Для ілюстрації структури енергоспоживання у віддалених районах було обрано будинок, загальна площа якого становить 59,25 м². На рисунку 2.1 показано фасад будинку, що є об'єктом електрифікації. Будівля складається з трьох кімнат, кухні, ванної кімнати та невеликого передпокою. Вікна будинку розташовані на трьох фасадах, що сприяє покращенню вентиляції та освітлення в будівлі. Площа всіх вікон у кімнатах становить по 1,00 м², за винятком ванної кімнати, де вона становить близько 0,5 м². У кухні є двері з вікном, які слугують виходом на задній двір. Розміри кімнат та їх площі наведено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.1 - Дачний будинок

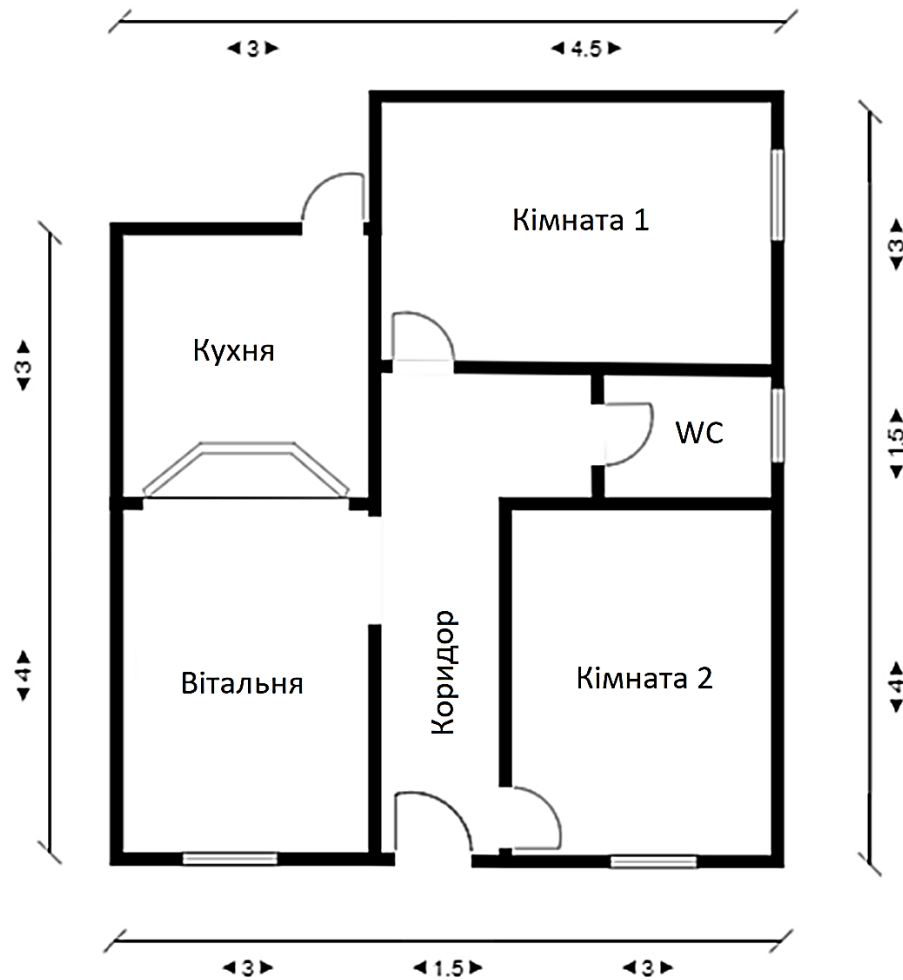


Рисунок 2.2 - План поверху будинку

2.2 Оцінка навантаження на будинок

Навантаження в дачному будинку є мінімальним, оскільки воно відповідає базовим потребам у електроенергії. У таблиці 2.1 наведено типові побутові прилади в дачному будинку, такі як світлодіодні лампи, холодильники, водяні насоси, водонагрівачі, телевізори та вентилятори. Білизну сушать на відкритому повітрі. Пропан використовується для приготування їжі та, за потреби, для опалення взимку. Тому такі навантаження не враховуються при проектуванні системи.

Таблиця 2.1 - Оцінка навантаження типового будинку

№	Предмет	Кількість	Потужність (Вт)	Загальна потужність (Вт)
1	Світлодіодна лампа	10	7	70
2	Вентилятор	3	20	60
3	Водонагрівач	1	450	450
4	Холодильник	1	100	100
5	Телевізор	1	49	49
6	Інше	3	100	300

Енергія (кВт·год) розраховується шляхом множення споживання енергії (у кіловатах) на кількість годин споживання. Час роботи залежить від типу приладів та мети їх використання. На споживання в житлових приміщеннях впливають кліматичні умови протягом різних пір року. Температура повітря та коливання тривалості дня і ночі мають вирішальне значення для роботи деяких побутових приладів. Оскільки побутові прилади не можуть працювати одночасно, а навантаження змінюється залежно від пори року, для розрахунку споживання електроенергії в будинку потрібен надійний метод, який розглядається в наступному розділі.

2.3 Електричне навантаження житлового будинку в програмі VEopt

Програма VEopt (Building Energy Optimization Software) — це проста у використанні програма для моделювання житлових будівель, що дозволяє визначати та оцінювати оптимальні стратегії з метою підвищення економічної ефективності та енергозбереження. Це безкоштовна програма, розроблена в США, яка дозволяє моделювати як існуючі, так і нові будівлі. Вона вважається однією з програм, що дають надійні результати в енергетичному моделюванні [28]. Для використання програмного забезпечення VEopt для виконання

моделювання необхідні такі параметри, як орієнтація будівлі, теплова маса, товщина стін, затінення вікон тощо.

Для досягнення бажаних результатів у програмі VEорт необхідно ввести низку параметрів щодо об'єкта, що досліджується. До цих параметрів належать вікно геометрії для проектування будинку, кількість кімнат та розміри. Будівля в цьому дослідженні складається з трьох кімнат, ванної кімнати та кухні, загальна площа будинку становить 59,25 м², підвалу та гаража немає, як показано на рисунку 2.3. Для правильного теплового аналізу було введено загальну площу вікон та дверей.

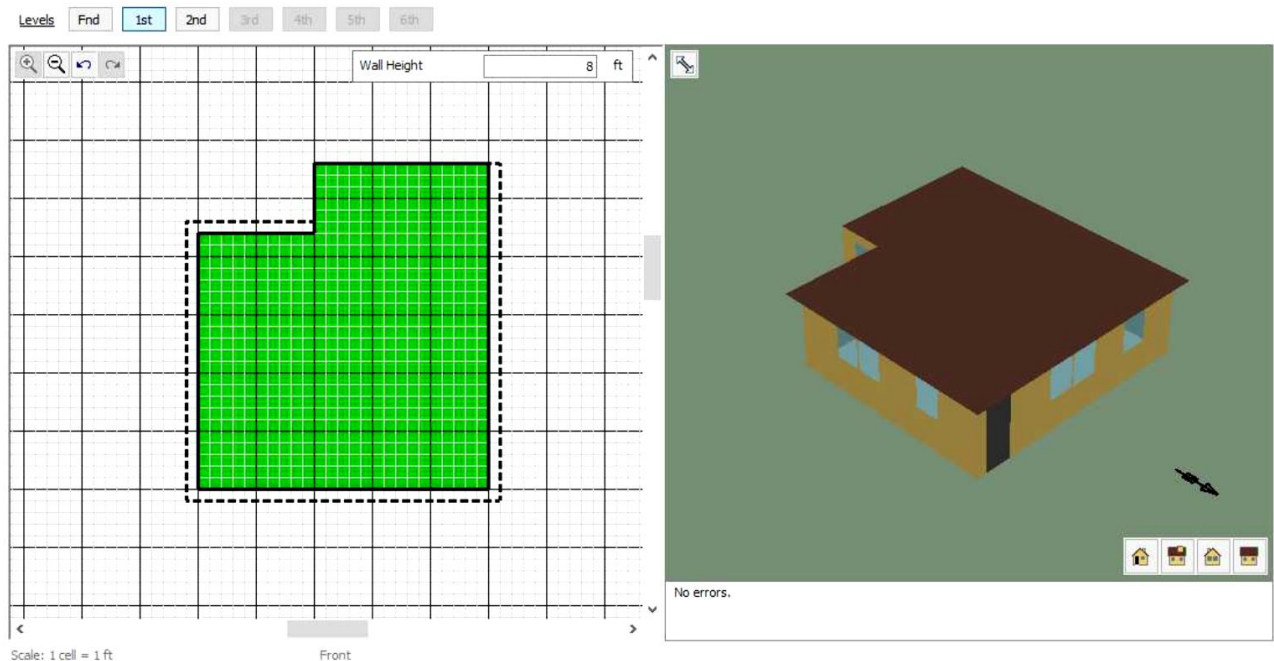


Рисунок 2.3 - Геометрія будинку в програмі VEорт

Цей екран дозволяє проектувальнику намалювати будівлю відповідно до її розмірів, кількості поверхів та типу даху. Після цього технічні характеристики будинку визначаються шляхом вибору таких параметрів, як орієнтація, стіни, стеля, вікна, двері, підлога та все, що стосується будівлі.

На рисунку 2.4 показано файл годинного навантаження для будівлі за рік. Як можна помітити, споживання енергії дещо вище в листопаді, грудні, січні та лютому через тривалість ночі взимку, що призводить до збільшення використання освітлення та водонагрівача в холодну погоду. Крім того, у

будинку немає кондиціонера, що означає менше споживання електроенергії влітку.

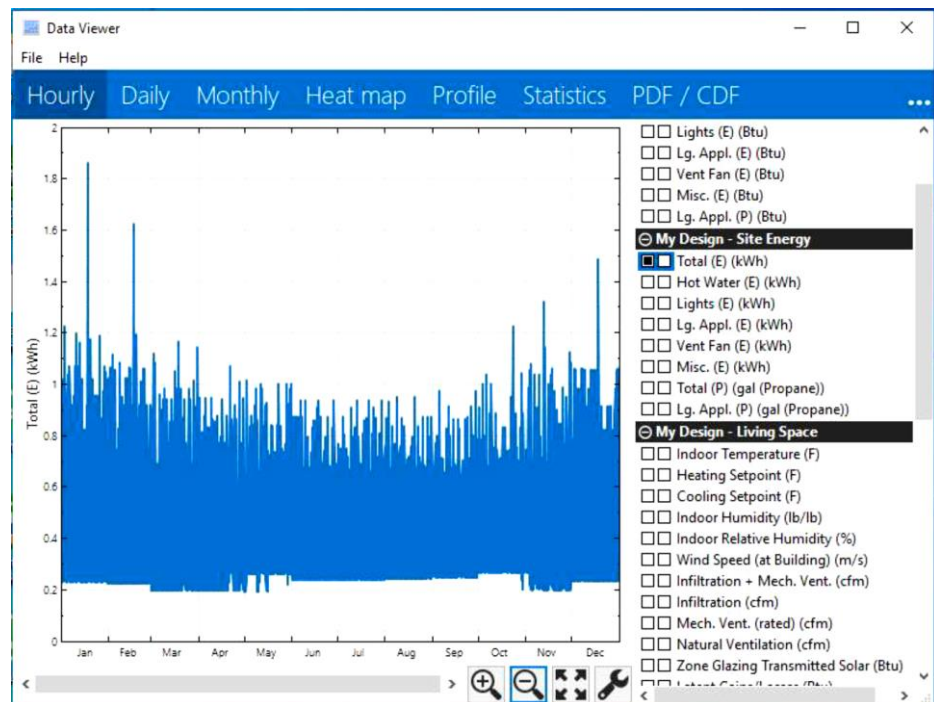


Рисунок 2.4 - Годинні графіки навантаження за рік у програмі VEорт

На рисунку 2.5 показано файл годинного навантаження за місяцями для будинку. Пікове навантаження припадає приблизно на 20:00 незалежно від обраного місяця, оскільки більшість побутових дій відбувається ввечері.

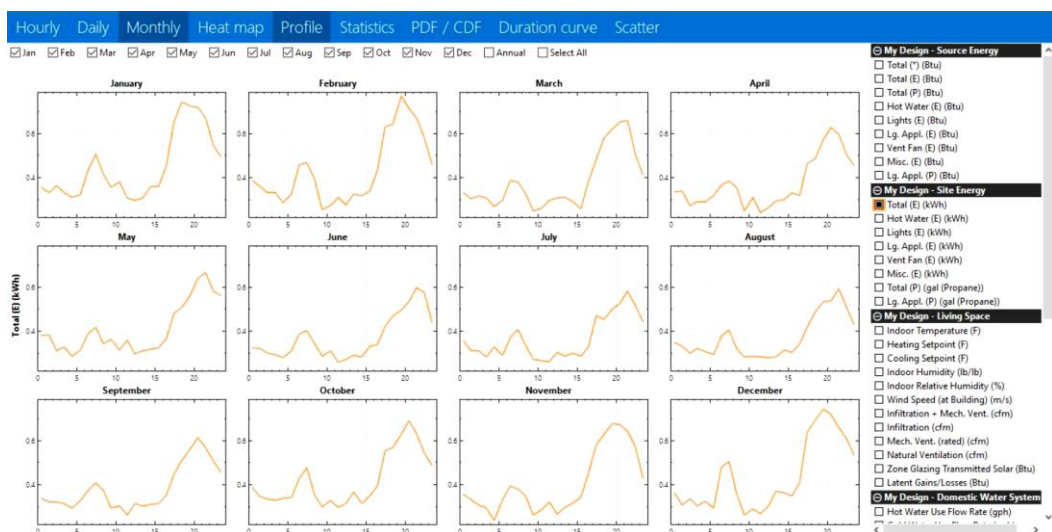


Рисунок 2.5 - Годинні графіки навантаження за місяцями у програмі VEорт

2.4 Вибір місця розташування та електричне навантаження

В якості прикладу було розглянуто дачний будинок, розташований поблизу м.Тернопіль. Визначення енергетичних потреб домогосподарства є необхідною умовою для проектування пропонованої фотоелектричної системи з акумуляторною батареєю. Річне споживання енергії було оцінено шляхом моделювання теплового режиму будинку в програмному забезпеченні VEорте, як описано в розділі 2.3. На основі результатів моделювання було встановлено, що енергоспоживання за рік (365 днів) становить 3 491 кВт·год, а щоденне енергоспоживання — 9,6 кВт·год/день. Типовий добовий графік навантаження будинку показано на рисунку 2.6.

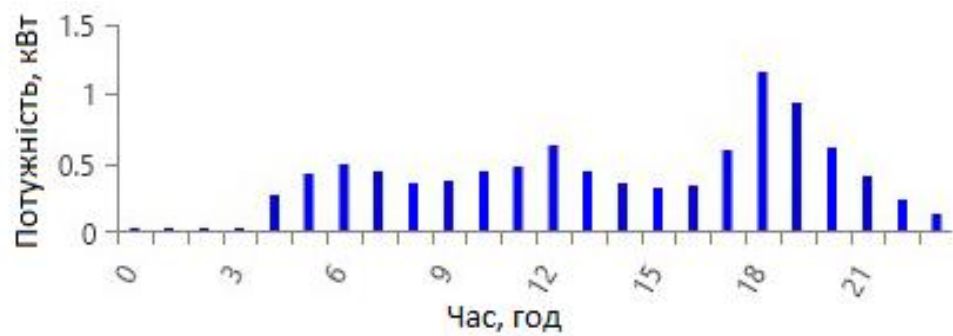


Рисунок 2.6 - Типовий добовий графік навантаження будинку

Годинний графік навантаження на місяць та середнє навантаження на місяць житлового навантаження, згенеровані HOMER PRO, показані на рисунках 2.7 та 2.8 відповідно.

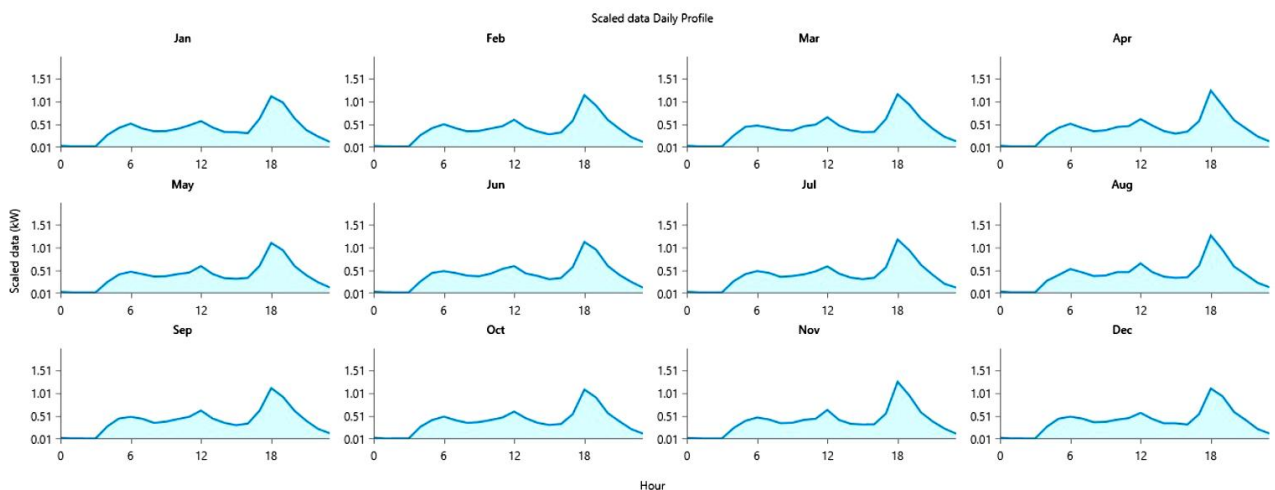


Рисунок 2.7 – Годинні графіки навантаження на місяць в HOMER PRO

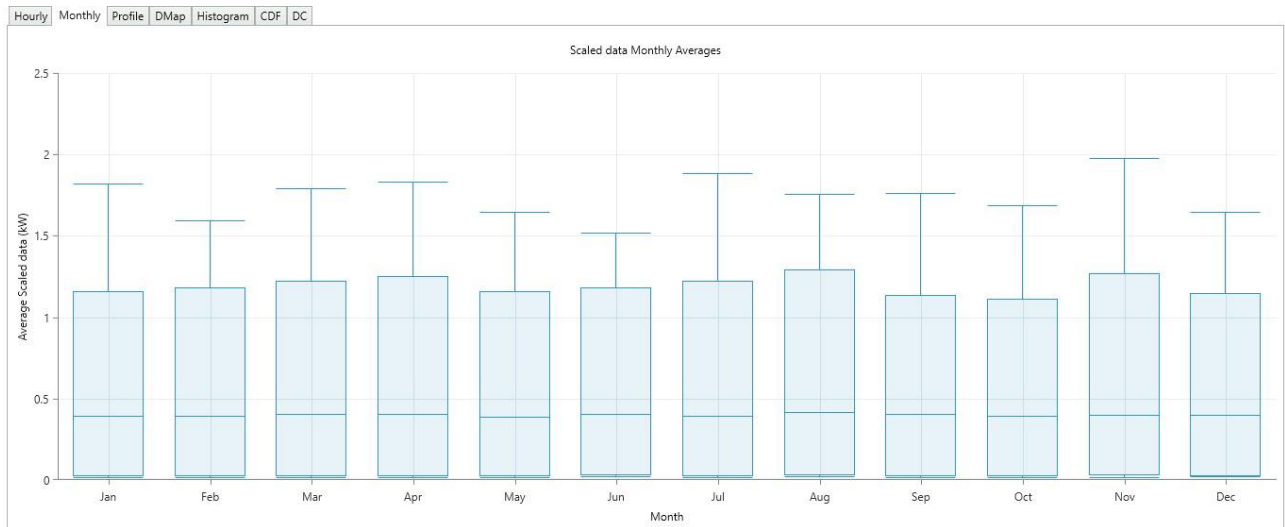


Рисунок 2.8 - Середнє навантаження на місяць житлового навантаження в HOMER PRO

Типовий добовий графік навантаження у віддаленій місцевості показано на рисунку 2.6. Попит на електроенергію змінюється протягом дня, причому пікове навантаження припадає на період з 17:00 до 20:30. Оскільки досліджуване навантаження було суто побутовим, зазвичай члени сім'ї вранці або вдень перебувають поза домом. З іншого боку, більшість побутових справ виконується ввечері, що збільшує попит на електроенергію.

2.5 Ресурси сонячного випромінювання

Як показано на рисунку 2.9, дані про сонячні ресурси були отримані в програмному забезпеченні HOMER Pro шляхом вибору місця розташування запропонованої системи. Середньорічне сонячне випромінювання становить 5,44 кВт·год/м²/день. Індекс ясності коливається в діапазоні від 0,509 до 0,705.

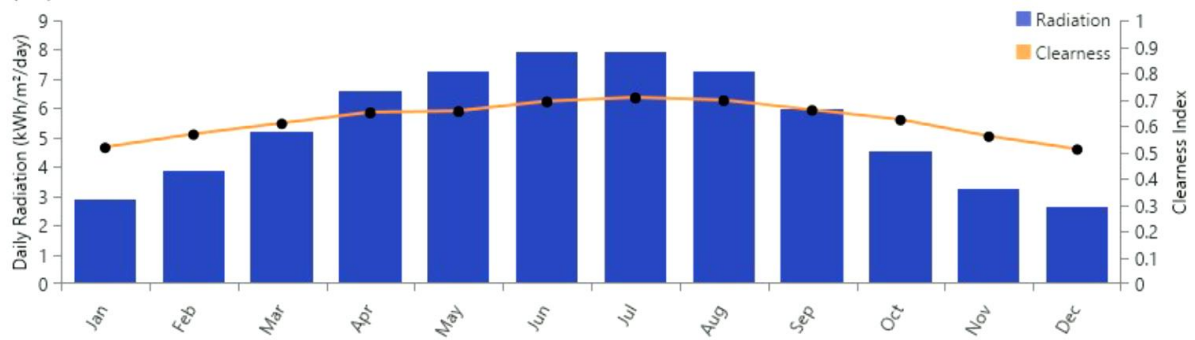


Рисунок 2.9 - Середньомісячна сонячна радіація у вибраній локації в програмі HOMER PRO

2.6 Компоненти проектованої фотоелектричної системи з акумуляторною батареєю

2.6.1 Фотоелектричний модуль

Фотоелектричні панелі складаються з набору сонячних елементів, виготовлених з напівпровідникового матеріалу. Пряме сонячне світло перетворюється на електричну енергію шляхом поглинання світла напівпровідником, що збільшує енергію електронів всередині елемента, після чого енергія цих електронів передається з внутрішньої частини елемента до зовнішнього контуру і знову повертається до сонячного елемента [29,30]. Для цього проекту було обрано фотоелектричну панель (CANADIAN SOLAR MAXPOWER CS6U-325P 325W POLY SOLAR PANEL), кожна з них складається з 72 елементів..

Існує багато параметрів, пов'язаних із сонячною панеллю, які слід визначити перед моделюванням системи в програмі HOMER. Як показано на рисунку 2.11, потужність панелі становить 0,35 кВт, ціна кожної панелі —84 долари.

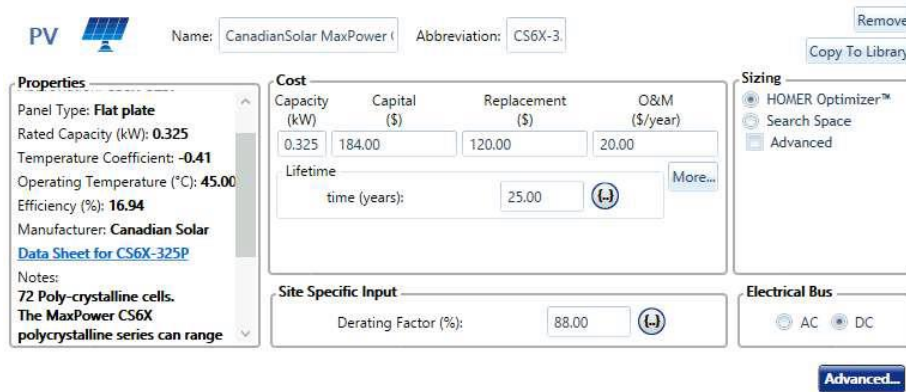


Рисунок 2.11 - Параметри фотоелектричної панелі в програмному забезпеченні HOMER PRO

2.6.2 Блок акумуляторних батарей

AGM акумулятори є однією з систем накопичення енергії, що використовуються у поєднанні з сонячними фотоелектричними системами. Технологія накопичення енергії має фундаментальне значення для забезпечення електропостачання споживачів у періоди негоди та вночі в автономних фотоелектричних системах. Незважаючи на те, що технологія свинцево-кислотних акумуляторів була винайдена понад 100 років тому, вона й досі вважається однією з найнадійніших систем накопичення енергії, а акумулятори цього типу відомі своєю тривалою експлуатаційною тривалістю. Крім того, їх можна використовувати протягом тривалого періоду, що сягає тисяч циклів, за умови дотримання відповідних умов експлуатації, що вимагає:

- Вибору відповідної кількості акумуляторів, що відповідають навантаженню, яке потрібно зарядити;
- Уникнення глибокого розрядження, щоб рівень розрядження не перевищував 50% DOD;
- Не зберігати та не залишати акумулятори в режимі глибокого розрядження протягом тривалого часу;
- Замінювати електроліт у батареях згідно з підготовленим графіком;
- Уникати перевантаження та дотримуватися меж ємності системи

зберігання;

– Створити відповідне місце для зберігання акумуляторної системи з хорошою вентиляцією та діапазоном температур від 20 до 40 °С.


Для цього дослідження було обрано AGM акумулятор 12 В, 219 А·год (SSIG 12205). Цей тип акумулятора характеризується:

– Високим рівнем безпеки завдяки використанню кальцієвої решітки для зменшення викидів газів, а також робочим тиском в одному напрямку для запобігання пожежам;

– Ефективним заряджанням, де нижчий внутрішній опір сприяє збільшенню струму розряду;

– Ідеальною конструкцією з чудовими характеристиками, що забезпечує більшу гнучкість при використанні цього типу акумулятора.

Окрім згаданих вище характеристик, акумулятори вважаються одними з найбільш поширених компонентів для накопичення енергії в побутових сонячних електростанціях. Для отримання напруги 48 В постійного струму ланцюг системи накопичення містить чотири акумулятори напругою 12 В і ємністю 219 А·год. На рисунку 2.12 наведено кількість, вартість, витрати на заміну, а також щорічні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування. Крім того, кількість кіл та напруга шини вибираються в середовищі інтерфейсу моделювання HOMER PRO.

STORAGE  Name: Trojan SAGM 12 205 Abbreviation: SAGM 1 Remove Copy To Library

Properties
Kinetic Battery Model
 Nominal Voltage (V): 12
 Nominal Capacity (kWh): 2.63
 Maximum Capacity (Ah): 219
 Capacity Ratio: 0.0385
 Rate Constant (1/hr): 14.4
 Roundtrip efficiency (%): 85
 Maximum Charge Current (A): 41
 Maximum Discharge Current (A): 1
 Maximum Charge Rate (A/Ah): 1
www.trojanbattery.com
 Deep Cycle Solar AGM Battery
 Trojan Battery Compan

Cost

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	425.00	400.00	20.00

Lifetime throughput (kWh): 2,285.1 More...

Sizing
 HOMER Optim
 Search Space
 Advanced

Site Specific Input
 String Size: 4 Voltage: 48 V
 Initial State of Charge (%): 80.00 (-)
 Minimum State of Charge (%): 20.00 (-)
 Minimum storage life (yrs): 5.00 (-) Mainten

Рисунок 2.12 - Параметри акумулятора в програмному забезпеченні HOMER

PRO

Програмне забезпечення HOMER Pro було використано для аналізу та вивчення доцільності використання фотоелектричних систем у забезпеченні навантажень постійного струму. Була обрана шина постійного струму 48 В через її високу ефективність серед інших значень напруги постійного струму для побутових навантажень. Були обрані фотоелектричні панелі потужністю 325 Вт кожна та акумулятори AGM 12 В, 229 А·год. Моделювання проводиться в програмному забезпеченні HOMER Pro для визначення оптимальних розмірів компонентів фотоелектричної акумуляторної системи. Схема запропонованої акумуляторної системи показана на рисунку 2.13.



Рисунок 2.13 - Схематична діаграма запропонованої фотоелектричної системи з акумуляторною батареєю

2.7 Моделювання та результати, отримані за допомогою HOMER PRO

Програмне забезпечення HOMER Pro враховує різні типи сонячних панелей та акумуляторних батарей для визначення найбільш економічно ефективної системи, яка повністю задовольняє потреби в навантаженні в процесі моделювання. Можливі конфігурації та результати були отримані на основі введених даних. Найбільш оптимальна система обирається на основі чистої теперішньої вартості (NPC) та вартості енергії (COE), а також здатності покрити проектне навантаження. Результати оптимізації в HOMER PRO

представлені на рисунку 2.14.

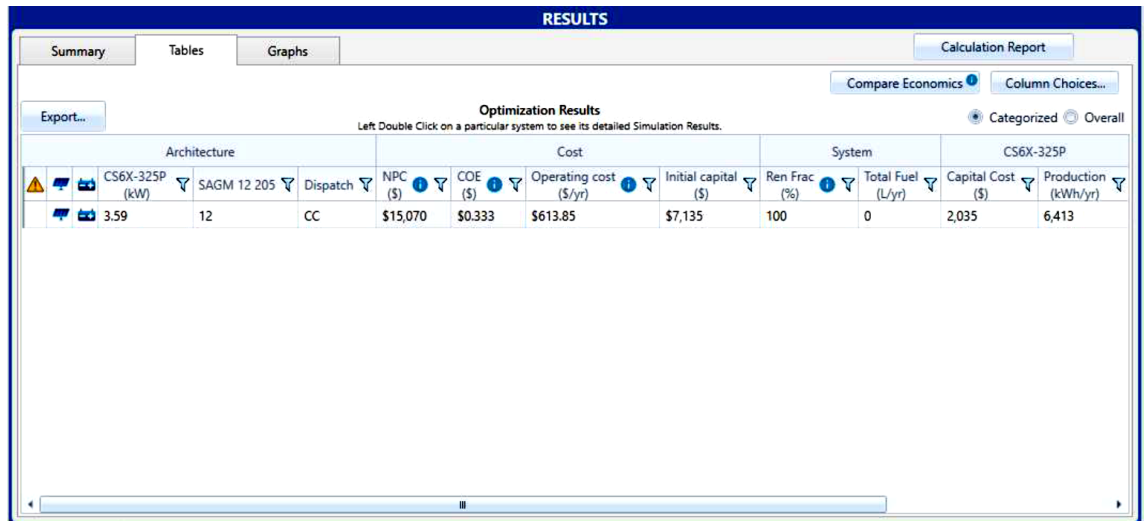


Рисунок 2.14 - Результати оптимізації в програмному забезпеченні HOMER PRO

Результати оптимізації HOMER Pro чітко показують, що бажані компоненти системи, які виробляють 3,59 кВт, складаються з 12 фотоелектричних панелей потужністю 325 Вт кожна та 12 батарейних блоків акумуляторів напругою 12 В, ємністю 219 А·год для зберігання надлишку виробленої електроенергії та живлення навантаження вночі та за поганої погоди. Результати моделювання розміру кола, стану заряду та щоденної потужності фотоелектричної системи показано на рисунках 2.15 та 2.16.

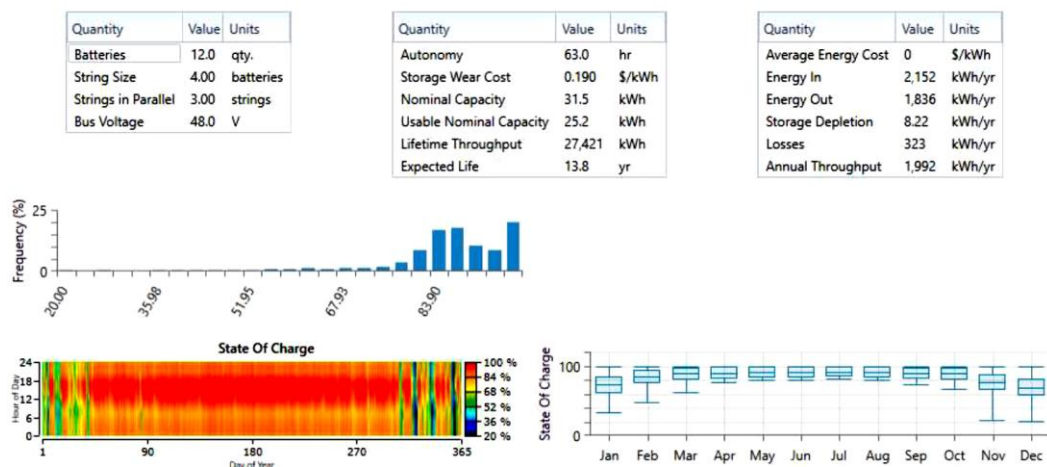


Рисунок 2.15 - Результати для використовуваного акумуляторного блоку запропонованої фотоелектричної системи з акумуляторною батареєю

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	3.59	kW
Mean Output	0.732	kW
Mean Output	17.6	kWh/d
Capacity Factor	20.4	%
Total Production	6,413	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	3.58	kW
PV Penetration	183	%
Hours of Operation	4,383	hrs/yr
Levelized Cost	0.0581	\$/kWh

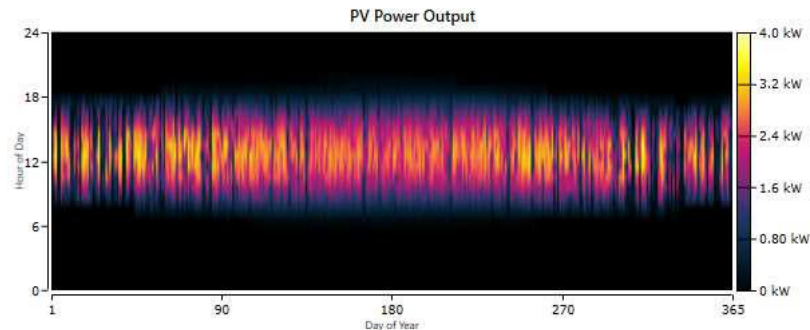


Рисунок 2.16 - Щоденна потужність фотоелектричної системи за рік у програмі HOMER PRO

На рисунку 2.17 показано середньомісячне виробництво енергії фотоелектричною панеллю. У нашому регіоні сонячна радіація має найбільший потенціал влітку — у травні, червні, липні та серпні; потім вона дещо зменшується протягом решти року. Отже, електроенергії, виробленої запропонованою фотоелектричною системою, в основному вистачає для покриття потреб цього будинку. Надлишок електроенергії становить 2595 кВт·год/рік.

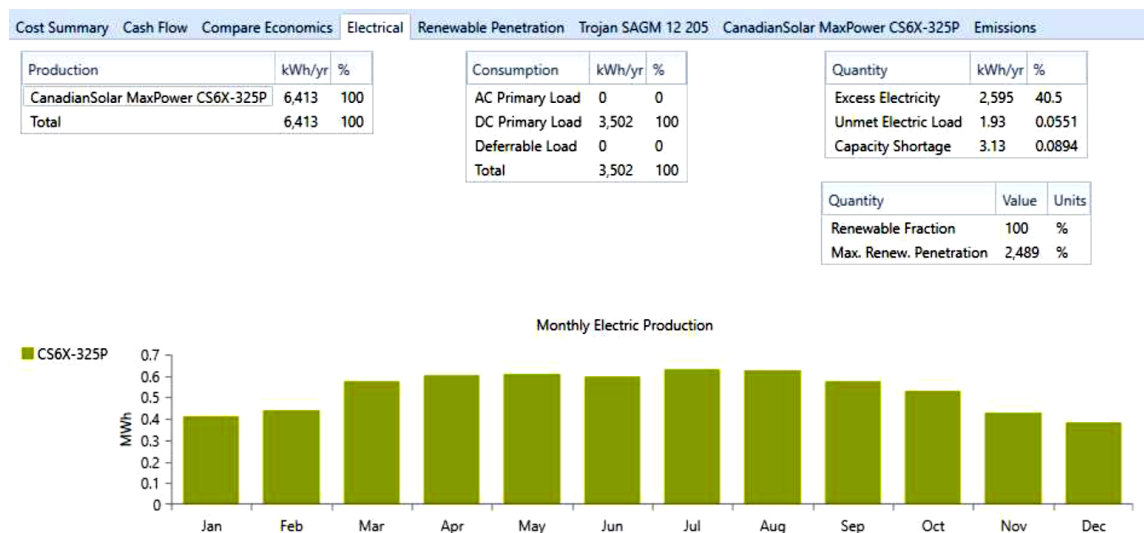


Рисунок 2.17 - Щомісячне виробництво енергії запропонованою фотоелектричною системою

Пропонована схема електромонтажу фотоелектричної акумуляторної системи наведена на рисунку 2.18. Побутова техніка, така як холодильник, морозильна камера, водяний насос та водонагрівач, підключена безпосередньо до мережі постійного струму напругою 48 В. Понижуючий перетворювач знижує напругу до 12 В постійного струму для живлення лампочок та невеликих електронних навантажень, таких як телевізор, вентилятори тощо. Слід зазначити, що в наш час широко використовуються прилади на постійному струмі та лампочки.

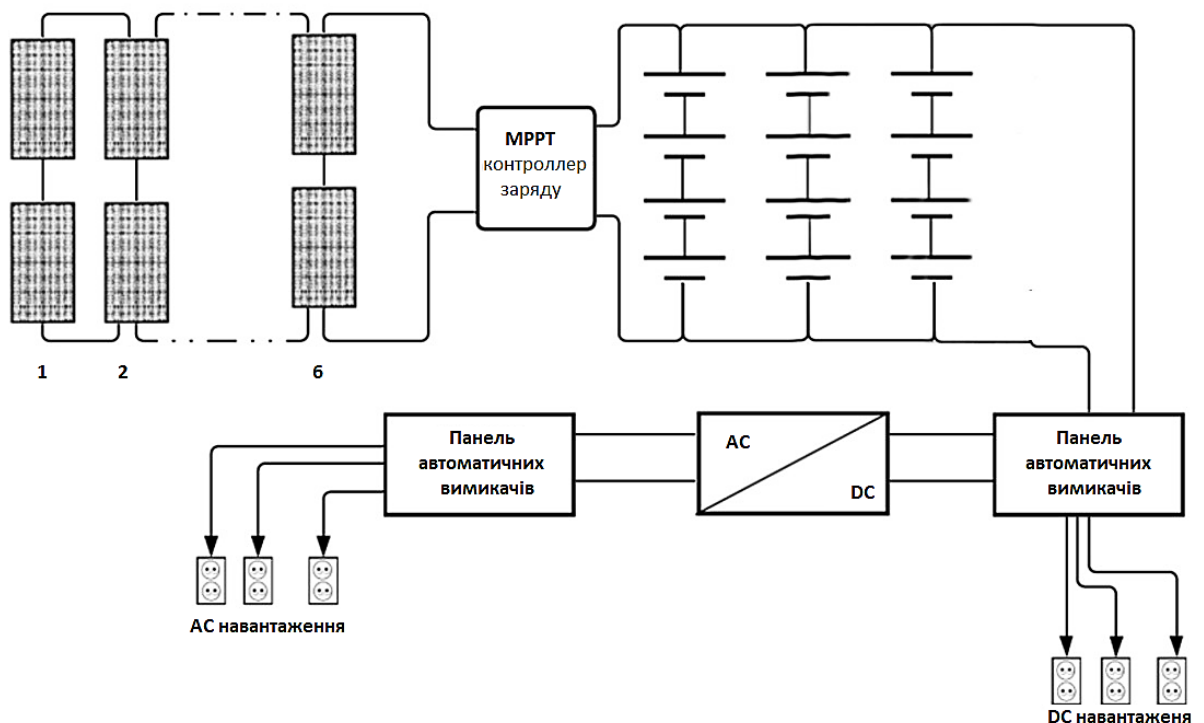


Рисунок 2.18 - Блок-схема фотоелектричної акумуляторної системи живлення в будинку

2.8 Висновки до розділу

Визначено об'єкт проектування – дачний будинок загальною площею 59,25 м², розташований поблизу м. Тернопіль, який складається з трьох кімнат, кухні, ванної кімнати та передпокою.

Проведено оцінку електричного навантаження будинку. Сумарна встановлена потужність побутових приладів, до складу яких входять

світлодіодне освітлення, вентилятори, водонагрівач, холодильник, телевизор та інші пристрої. Приготування їжі та опалення здійснюється за допомогою пропану, тому ці навантаження не враховуються при проектуванні.

Шляхом енергетичного моделювання будинку в програмному забезпеченні VEopt отримано річне енергоспоживання об'єкта – 3491 кВт·год/рік, що відповідає середньодобовому споживанню 9,6 кВт·год.

Проаналізовано сонячні ресурси місця розташування будинку. Середньодобове сонячне випромінювання становить 5,44 кВт·год/м²/день, індекс ясності коливається в діапазоні 0,509–0,705.

Обґрунтовано вибір компонентів проекрованої системи: фотоелектричні панелі Canadian Solar CS6U-325P потужністю 325 Вт кожна та AGM акумулятори SSIG 12205 номінальною напругою 12 В та ємністю 219 А·год. Для живлення навантаження обрано шину постійного струму напругою 48 В як оптимальну за співвідношенням ефективності та безпеки.

Виконано оптимізацію системи в програмному забезпеченні HOMER Pro за критерієм мінімальної чистої теперішньої вартості (NPC) та вартості енергії (COE). Оптимальна конфігурація складається з 12 фотоелектричних панелей (загальна потужність 3,9 кВт) та 12 акумуляторів.

Результати моделювання в HOMER Pro підтверджують, що запропонована фотоелектрична система повністю покриває енергетичні потреби будинку протягом року.

Проаналізовано щомісячну динаміку генерації електроенергії. Максимальне виробництво енергії спостерігається з травня по серпень, що збігається з періодом найвищої сонячної активності в регіоні.

Розроблено структурну схему системи електропостачання будинку, яка передбачає крім змінної напруги 230 В подвійну мережу: навантаження постійного струму напругою 48 В (холодильник, водяний насос, водонагрівач) підключено безпосередньо до шини, а для живлення освітлення та малопотужної електроніки (12 В) використовується понижуючий DC/DC

перетворювач. Такий підхід мінімізує втрати на перетворення та підвищує загальний ККД системи.

3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Імітаційна модель системи

Останнім часом для перевірки або вивчення процедури чи рекомендованої конструкції все частіше використовують саме симуляцію проектування, а не фізичні випробування. Одним із таких методів є підхід «Модельно-орієнтоване проектування» (MBD). Динамічна модель реалізується в симуляційній програмі з метою її модифікації. Немає необхідності проводити випробування конструкції на наземних стендах, що означає зниження витрат та скорочення термінів реалізації. У підході «Модельно-орієнтований дизайн» модель системи зосереджується на наборі процедур, включаючи визначення вимог до системи, збір необхідних даних та підготовку проектів. Запропонована конфігурація розробляється шляхом моделювання та тестування за допомогою відповідного інтегрованого середовища розробки (IDE) для визначення того, чи відповідає цей проект заздалегідь визначеним умовам. Істотною перевагою MBD є спрощення проектування та швидка модифікація без використання фізичного об'єкта, що зменшує витрати та час.

Крім того, це дає нам можливість порівнювати різні моделі, що допомагає проектувальнику прийняти остаточне проектне рішення. Простота роботи з графічним інтерфейсом для проектування систем полегшує залучення користувачів, які не мають досвіду роботи з цим підходом до проектування. Представлення проекту у вигляді діаграм та графіків вважається найкращим способом для інженерів зрозуміти роботу. У цій дипломній роботі для моделювання запропонованої фотоелектричної акумуляторної системи використовувалося середовище MATLAB/Simulink, як показано на рисунку 3.1.

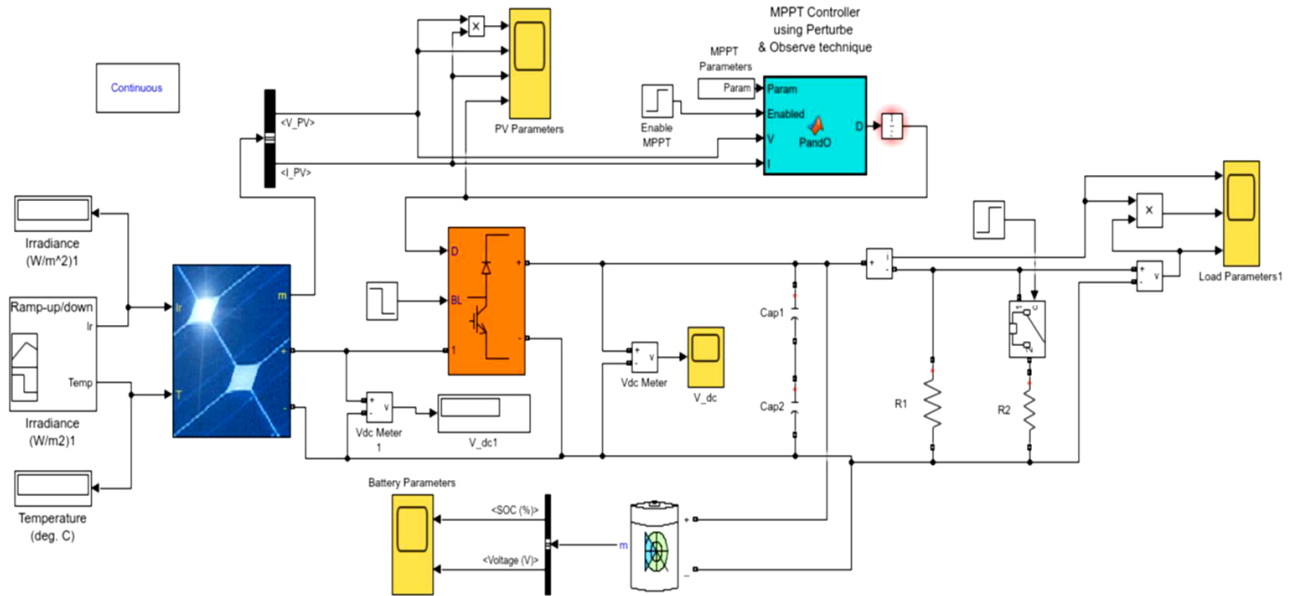


Рисунок 3.1 – Імітаційна модель системи у MATLAB/Simulink

3.2 Характеристики фотоелектричної батареї

Результати HOMER PRO довели, що запропонована система повинна складатися з 12 фотоелектричних панелей типу CANADIAN SOLAR MAXPOWER CS6U-325P 325W POLY SOLAR PANEL 72 cells. Фотоелектрична батарея складається з 6 паралельних з'єднань та 2 послідовних модулів. На рисунку 3.2 показано конфігурацію фотоелектричного модуля та спосіб його підключення.

Фотоелектрична батарея реалізована в MATLAB шляхом вибору відповідного блоку з бібліотеки Simulink. Параметри блоку були задані даними, такими як напруга холостого ходу, напруга в точці максимальної потужності, температурний коефіцієнт тощо, взятими з технічного паспорта модуля. На рисунку 3.3 показано блок параметрів фотоелектричної батареї.

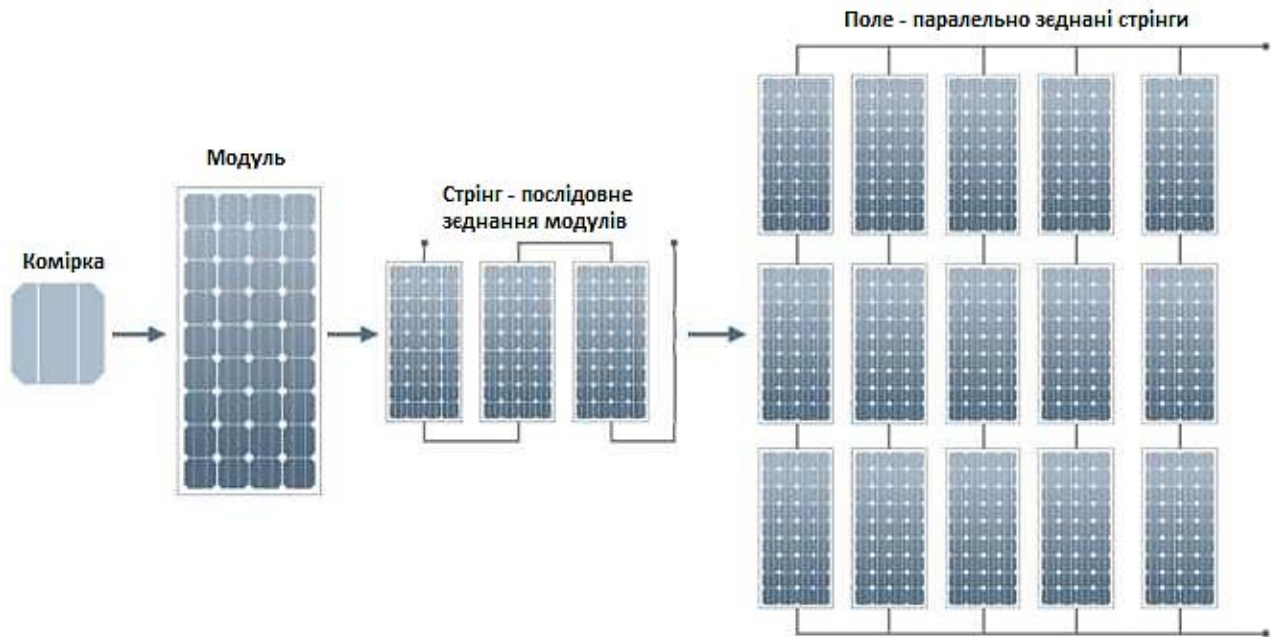


Рисунок 3.2 - Конфігурація фотоелектричного модуля та спосіб його підключення [33]

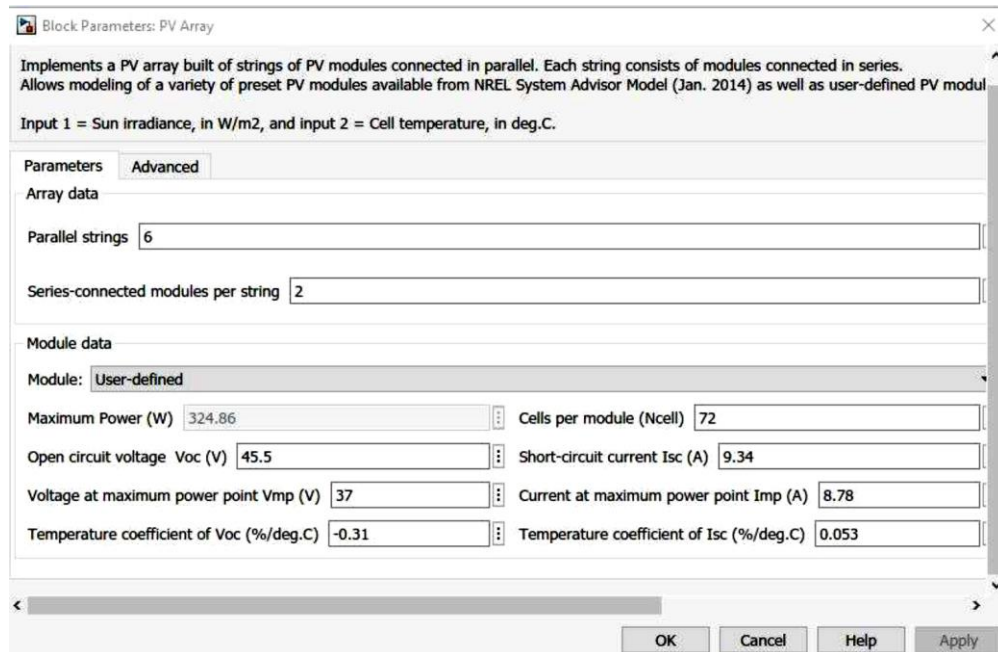


Рисунок 3.3 - Параметри фотоелектричної батареї запропонованої системи

Вихідна потужність сонячної панелі істотно змінюється залежно від інтенсивності сонячного випромінювання та температури навколишнього середовища – криві фотоелектричної характеристики використовуваних панелей за різних значень інтенсивності випромінювання та температури

наведено на рисунках 3.4 та 3.5.

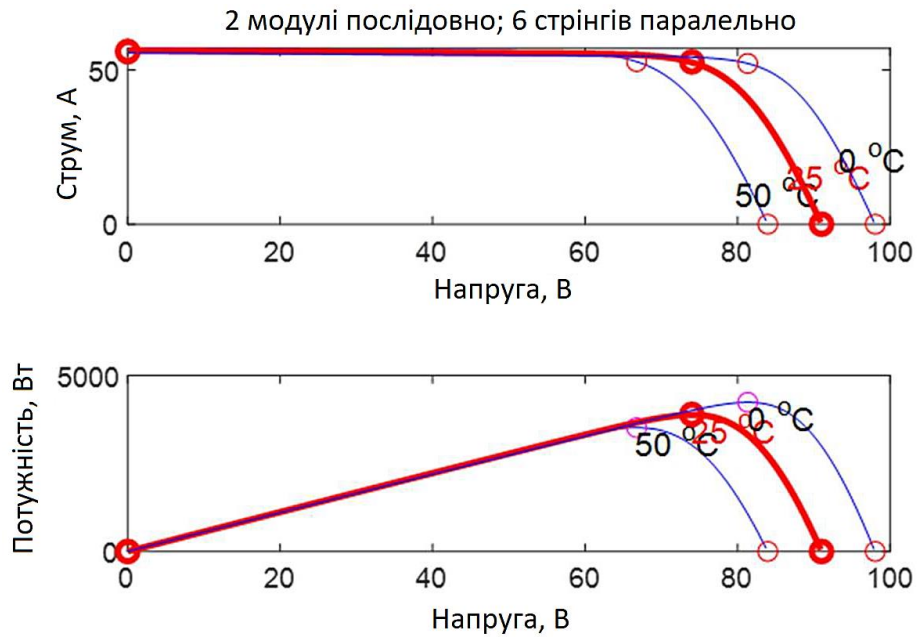


Рисунок 3.4 - Характеристичні криві фотоелектричної батареї при різних температурах у MATLAB/SIMULINK

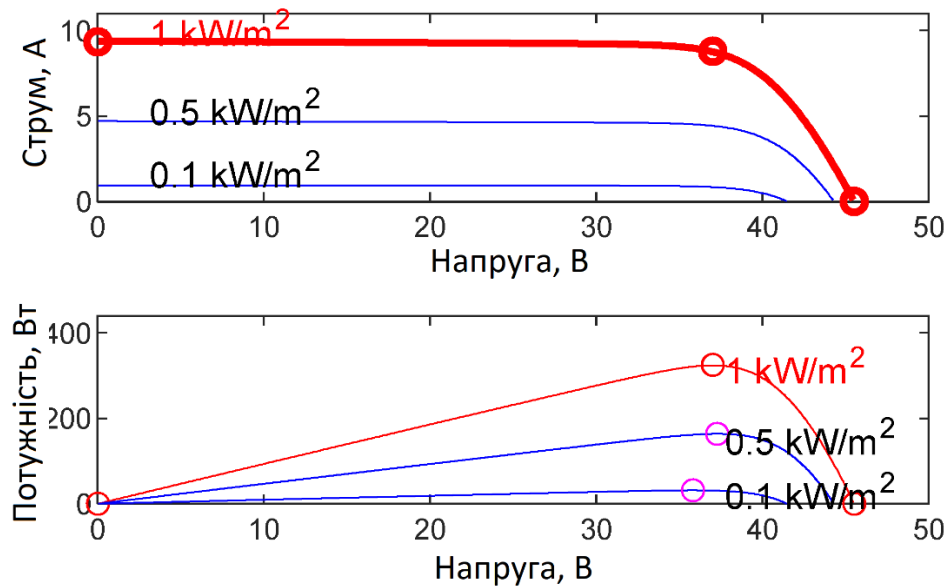


Рисунок 3.5 - Характеристичні криві фотоелектричної батареї при різній інтенсивності сонячного випромінювання у MATLAB/SIMULINK

3.3 Система акумуляторних батарей

Система акумуляторних батарей складається з 12 батарей, 12 В – 219 А·год, чотири з яких підключені послідовно, а потім з'єднані паралельних

три кола. Глибину розряду (DOD) у циклі експлуатації та графіки саморозряду можна побачити на рисунках 3.6 та 3.8 відповідно.

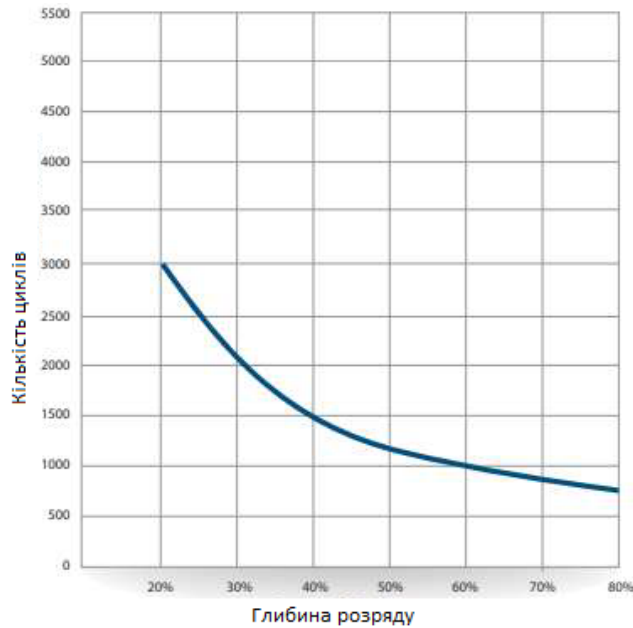


Рисунок 3.6 - Залежність ступеня розряду (DOD) від терміну експлуатації в стаціонарних умовах

Параметри блоку акумуляторної батареї в SIMULINK були задані такими даними, як номінальна напруга, номінальна ємність, початковий ступінь заряду та час відгуку запропонованої акумуляторної системи, як показано на рисунку 3.7.

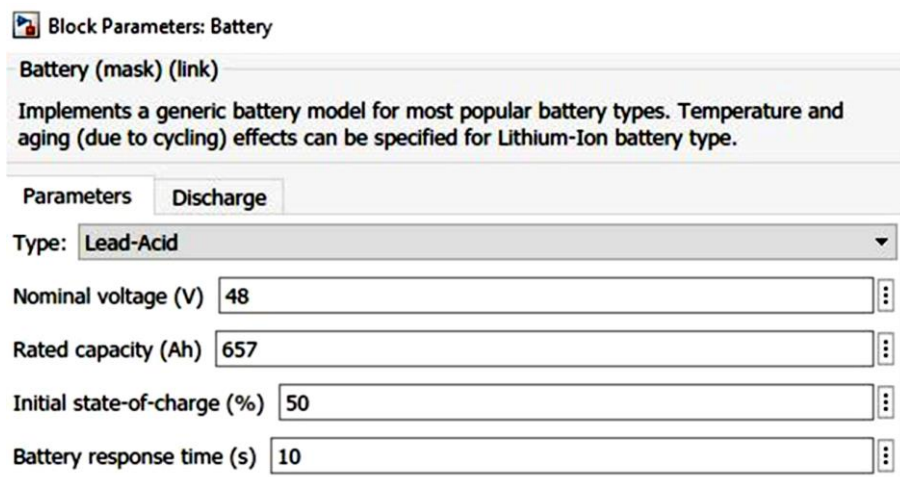


Рисунок 3.7 - Параметри батарейного блоку запропонованої системи

3.4 Підвищувальний перетворювач та система відстеження точки максимальної потужності для фотоелектричних систем

3.4.1 Підвищувальний перетворювач

Перетворювач постійного струму (DC-DC) підключається між фотоелектричним модулем та навантаженням для підвищення та підтримки нелінійної напруги постійного струму, що генерується фотоелектричними панелями, у межах заданих меж, а також для заряджання акумуляторної системи. Основними параметрами підсилюючого перетворювача є відстеження точки максимальної потужності (MPPT), імпульсна широтна модуляція (PWM), котушка індуктивності та конденсатор. Рівняння (3.1) та (3.2) для підсилюючого перетворювача використовуються для визначення значень вхідних та вихідних конденсаторів наступним чином [31]:

$$C_{in} \geq \frac{I_{max} \cdot D_{max}}{0,02 \cdot [(1 - D_{max}) \cdot V_{in} \cdot F_{sw}]} \quad (3.1)$$

$$C_{out} \geq I_{max} \cdot D_{max} \cdot \Delta V \cdot F_{sw} \quad (3.2)$$

де D_{max} - максимальний коефіцієнт заповнення;

F_{sw} - частота перемикання;

ΔV - пульсація напруги.

На рисунку 3.8 показано блок підвищувального перетворювача в SIMULINK.

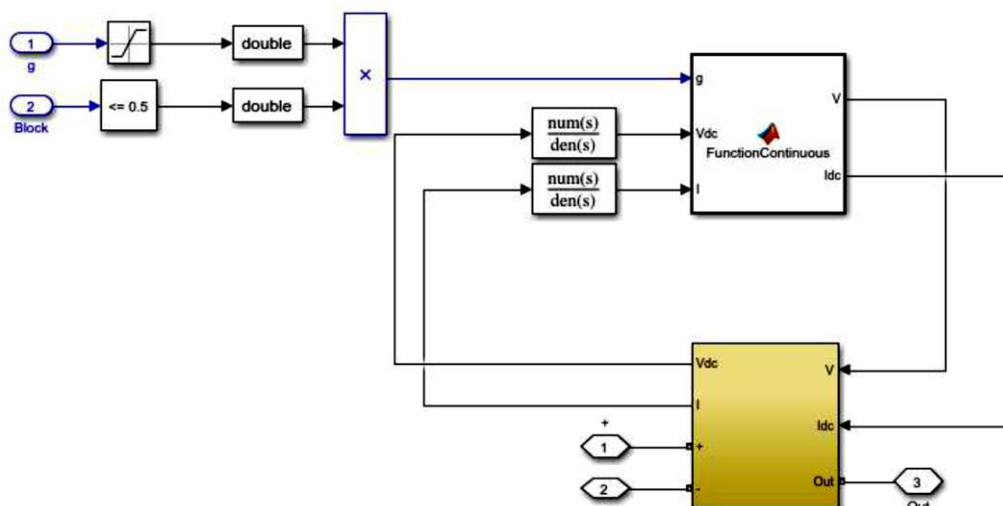


Рисунок 3.8 - Підвищувальний перетворювач у MATLAB/SIMULINK

3.4.2 Відстеження точки максимальної потужності (MPPT)

Управління алгоритмом є важливим етапом MPPT, який має вирішальне значення для збільшення або зменшення коефіцієнта заповнення, що керує MOSFET, щоб забезпечити генерацію сонячними панелями максимально можливої потужності з урахуванням сонячного випромінювання та коливань температури. У цій конструкції для реалізації технології MPPT використовується метод «perturb and observe» (збурення та спостереження) шляхом регулювання коефіцієнта заповнення підвищувального перетворювача. Це один із широко використовуваних методів, при якому напруга та струм подаються на функцію, що обробляє значення коефіцієнта заповнення відповідно до наступного рівняння:

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (3.3)$$

де D - коефіцієнт заповнення;

V_i - вхідна напруга;

V_o - вихідна напруга.

Вихідна напруга є майже постійною; зміни коефіцієнта заповнення стабілізують коливання вхідної напруги, оскільки це забезпечує стабільність струму. Алгоритм визначає точку, в якій можна відстежувати точку максимальної потужності, отже:

$$P_{\max} = I_{\max} \cdot V_{\max} \quad (3.4)$$

Ідея цього методу полягає у виборі опорної напруги та постійній зміні вихідної напруги для зменшення коливань потужності. MPPT використовує доступну максимальну вихідну потужність фотоелектричної системи.

3.5 Результати моделювання

На роботу фотоелектричної акумуляторної системи значний вплив мають зміни температури та сонячної радіації, тому вихідна потужність системи

пов'язана з підвищувальним перетворювачем постійного струму (DC/DC) з контролером відстеження точки максимальної потужності (MPPT). У нашій моделі контролера реалізовано метод збурення та керування для регулювання робочого циклу алгоритму MPPT, який підтримує вихідну напругу постійного струму на рівні 48 В та подає її на навантаження та акумуляторну батарею. Акумуляторна батарея не використовується, коли потужність фотоелектричної батареї відповідає навантаженню будинку. Тому основним завданням акумуляторної батареї є живлення навантажень уночі та в похмуру погоду. Стан заряду (SOC) акумуляторної батареї та вихідні дані фотоелектричної батареї представлені на рисунках 3.9 та 3.10 відповідно.

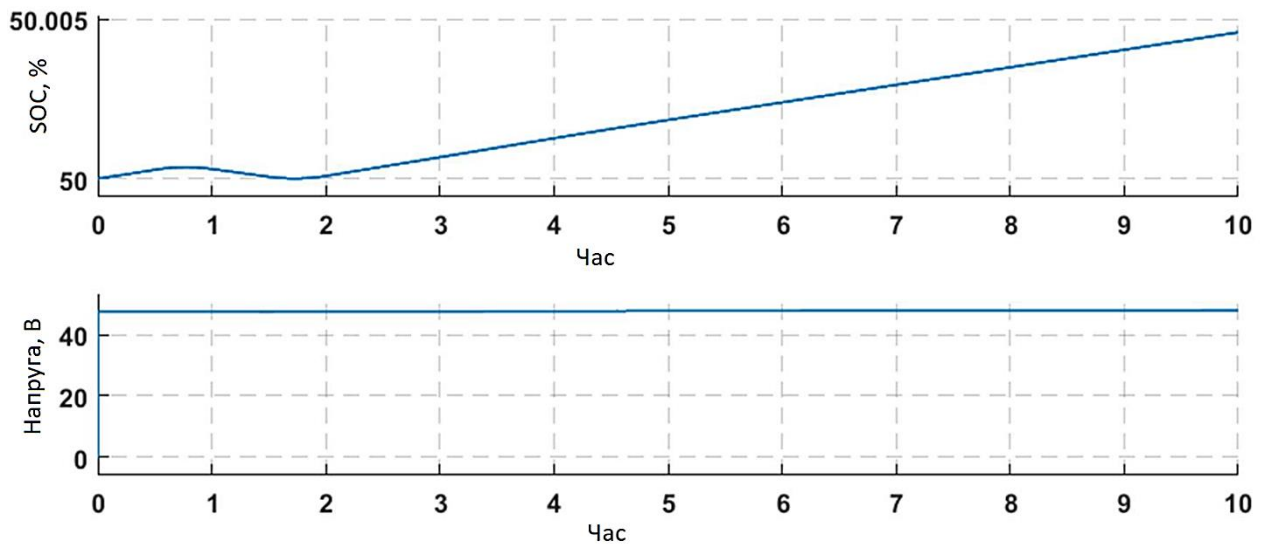


Рисунок 3.9 - Стан заряду та напруга акумуляторної батареї

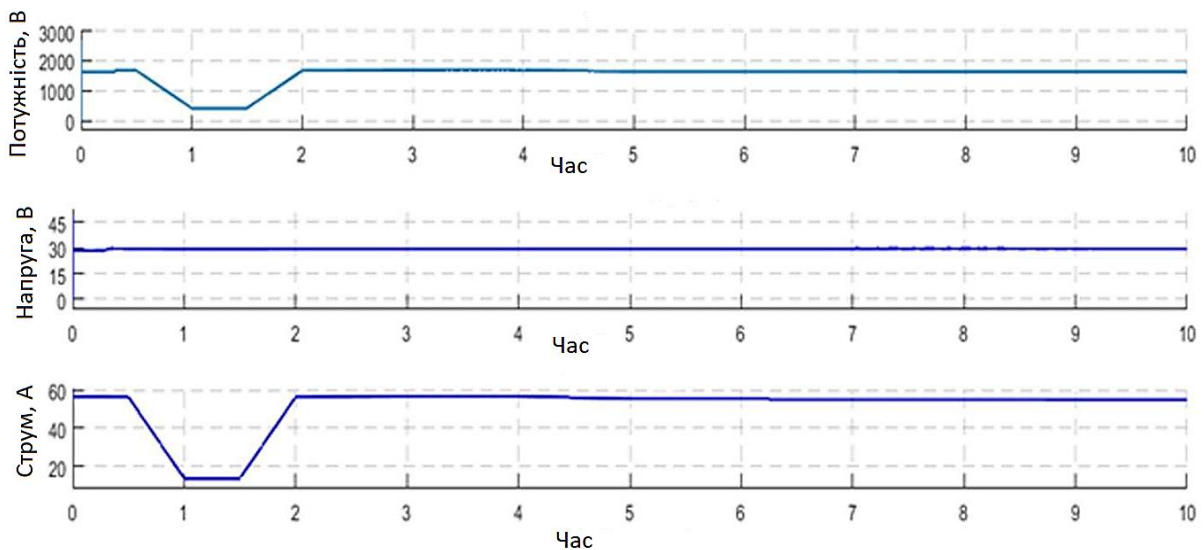


Рисунок 3.10 - Потужність, напруга та струм фотоелектричної батареї.

Навантаження будинку було розділено для застосування двох сценаріїв до запропонованої системи з метою забезпечення її стабільності при різних вимогах до навантаження. Фотоелектрична система була підключена з половинним та повним навантаженням. Незважаючи на різницю в навантаженні, кінцева бажана вихідна потужність системи виявилася стабільною на рівні напруги 48 В постійного струму, як показано на рисунку 3.11.

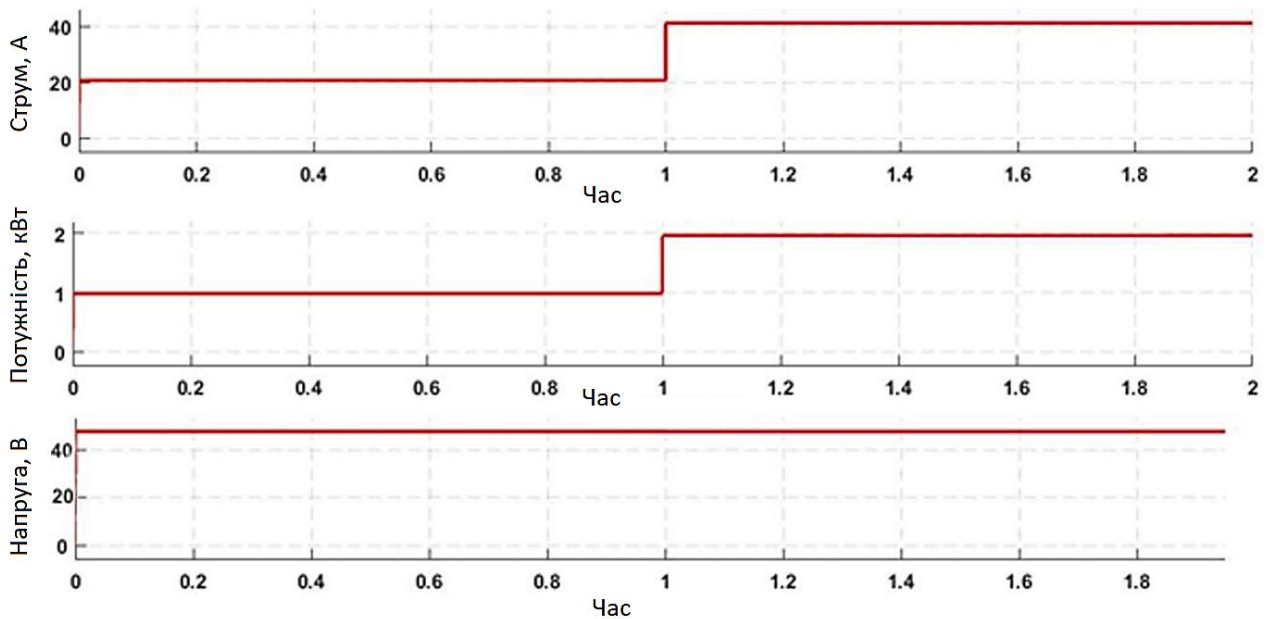


Рисунок 3.11 - Напруга, струм і потужність на навантаженні

3.6 Висновки до розділу

1. Розроблено імітаційну модель автономної фотоелектричної системи живлення постійного струму в середовищі MATLAB/Simulink з використанням підходу Model-Based Design.

2. Змодельовано систему фотоелектричних батарей, яка складається з 12 панелей Canadian Solar CS6U-325P потужністю 325 Вт.

3. Змодельовано систему акумуляторних батарей із 12 елементів AGM типу (12 В, 219 А·год), з'єднаних за схемою 4 послідовно × 3 паралельно, що забезпечує номінальну напругу 48 В та загальну ємність 657 А·год. Визначено залежність глибини розряду від терміну експлуатації.

4. Розраховано та змодельовано підвищувальний перетворювач постійного струму (DC-DC boost converter) із застосуванням алгоритму відстеження точки максимальної потужності MPPT за методом «збурення та спостереження» (perturb and observe). Розрахункові значення вхідного та вихідного конденсаторів визначено з урахуванням максимального коефіцієнта заповнення, частоти перемикання та допустимої пульсації напруги.

5. Результати моделювання підтверджують, що система стабілізує вихідну напругу на рівні 48 В постійного струму незалежно від змін сонячної радіації та температури. MPPT-контролер забезпечує відстеження точки максимальної потужності, що підвищує загальну ефективність енергонакопичення.

6. Запропонована система продемонструвала стабільну роботу як при повному, так і при половинному навантаженні будинку. Вихідна напруга залишається стабільною на рівні 48 В, що підтверджує коректність розрахунку параметрів підвищувального перетворювача та якості алгоритму MPPT.

7. Стан заряду (SOC) акумуляторної батареї підтримується в межах, що забезпечують тривалий термін служби. Акумуляторна батарея автоматично підключається для живлення навантаження вночі та в похмуру погоду, коли потужності фотоелектричних панелей недостатньо.

8. Імітаційне моделювання в MATLAB/Simulink підтвердило працездатність запроєктованої автономної фотоелектричної системи живлення постійного струму та її придатність для забезпечення електропостачання дачного будинку з урахуванням добового графіку навантаження та кліматичних умов регіону.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий [32].

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;
- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;
- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві.

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами

або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт - понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних

об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку [32].

Електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1 %, а в смертельному - біля 15-20 %. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80 % електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пащ тою понад 1 кВ, - до 20-30 %.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групу з електробезпеки.

В порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначати наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

– струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання;

– електротравми можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробі повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

– розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз сонячного потенціалу України та встановлено, що середньорічна інсоляція варіюється в діапазоні 950-1500 кВт·год/м², що створює сприятливі умови для ефективної роботи автономних фотоелектричних систем на всій території країни.

2. Виконано порівняльний аналіз компонентів автономних фотоелектричних систем.

3. Встановлено, що номінальна напруга 48 В постійного струму є приблизно на 9% ефективнішою порівняно з 220 В змінного струму для житлових навантажень. Це дає змогу знизити капітальні витрати за рахунок відмови від інвертора для частини навантаження та мінімізувати втрати на перетворення енергії.

4. Визначено енергетичні потреби об'єкта проектування - дачного будинку загальною площею 59,25 м², розташованого поблизу м. Тернопіль. Шляхом енергетичного моделювання в програмному забезпеченні VEort отримано річне енергоспоживання 3491 кВт·год/рік, що відповідає середньодобовому споживанню 9,6 кВт·год. Пікове навантаження припадає на період 17:00-20:30.

5. Проаналізовано сонячні ресурси вибраної локації та встановлено, що середньодобове сонячне випромінювання становить 5,44 кВт·год/м²/день, а індекс ясності коливається в діапазоні 0,509-0,705. Цього достатньо для ефективної роботи проєктованої фотоелектричної системи протягом року.

6. Оптимізовано конфігурацію автономної фотоелектричної системи в програмному забезпеченні HOMER Pro за критерієм мінімальної чистої теперішньої вартості (NPC). Оптимальна конфігурація складається з 12 фотоелектричних панелей Canadian Solar CS6U-325P (загальна потужність 3,9 кВт) та 12 акумуляторів AGM SSIG 12205 (48 В, 657 А·год).

7. Розроблено імітаційну модель проєктованої системи в середовищі MATLAB/Simulink. Розраховано та промодельовано підвищувальний

перетворювач постійного струму з МРРТ-контролером за методом "збурення та спостереження". Результати моделювання підтвердили стабілізацію вихідної напруги на рівні 48 В постійного струму незалежно від змін сонячної радіації та температури.

8. Підтверджено стабільну роботу запропонованої системи при різних рівнях навантаження - як при повному, так і при половинному. Стан заряду (SOC) акумуляторної батареї підтримується в межах, що забезпечують тривалий термін служби. Акумуляторна батарея автоматично підключається для живлення навантаження вночі та в похмуру погоду.

9. Розроблено структурну схему системи електропостачання будинку з комбінованим живленням постійного струму: навантаження 48 В (холодильник, водяний насос, водонагрівач) підключено безпосередньо до шини, а для освітлення та малопотужної електроніки (12 В) використовується понижуючий DC/DC перетворювач. Такий підхід мінімізує втрати на перетворення та підвищує загальний ККД системи. Передбачено розетки на напругу 220 В для підключення навантаження змінного струму.

10. Отримані результати доводять технічну доцільність та працездатність запроєктованої автономної фотоелектричної системи живлення змінного та постійного струму для дачного будинку. Запропонована система може бути використана як базова для проєктування аналогічних систем електрозабезпечення для інших віддалених об'єктів малої потужності.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.
2. Потенціал розвитку альтернативної енергетики України в умовах європейської інтеграції / А.Г. Кінчієв, В.М. Краснюк // Економіка та держава. - 2025. - №1. - С. 15-24.
3. Ukraine - Solar irradiation and PV power potential maps / World Bank Global Solar Atlas. - 2026. - Режим доступу: <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0040466/ukraine-solar-irradiation-and-pv-power-potential-maps>
4. Коваль В.П. Інтегрування електроавтомобіля у систему електроживлення будинку // В.П. Коваль, к.т.н. доц; А.В. Слободян; К.В. Слободян / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 36-37.
5. Коваль В.П. Фотоелектрична станція для забезпечення власних потреб // В.П. Коваль, Д.Ф.Паловці, Abul Kalam Azad / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С .
6. Філюк Я. О. Автономне живлення зовнішнього освітлення з використанням світлодіодних джерел світла / Ярослав Філюк, Вадим Коваль // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та

прикладні проблеми сучасних технологій», 19–21 травня 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — С. 191-192.

7. Енергоощадна інтелектуальна система керування механічною системою / Богдан Оробчук, Іван Сисак, Ярослав Осадца, Вадим Коваль, Сергій Бабюк // МММТЕС, 22-23 листопада 2022 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2022. — С. 128–130.

8. Measuring device for photovoltaic modules electrical characteristics testing / Vadym Koval, Bogdan Orobchuk, Nataliia Kuzemko, Gao Lijin // ICAAEIT 2021, 15-17 December 2021. — Tern.: TNTU, Zhytomyr «Publishing house „Book-Druk“» LLC, 2021. — P. 14–19.

9. Коваль В.П. Автоматизована вимірювальна установка для дослідження електричних характеристик фотоелектричних модулів / В.П. Коваль, Б.Я. Оробчук, Я.М. Осадца, Л.М. Костик // Вісник Хмельницького національного університету – 2022. - №5. – С.168–173

10. Грицюк М.Я. Переваги концентруючих фотоелектричних електростанцій // М.Я. Грицюк; В.П. Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 29-30.

11. Коваль В. Залежність енергоефективності сонячних елементів від експлуатаційних факторів / В. Коваль // Збірник тез доповідей XVII наукової конференції ТНТУ ім. Івана Пулюя, 20-21 листопада 2013 року. — Т. : ТНТУ, 2013. — Том I : Природничі науки та інформаційні технології. — С. 53.

12. Топ-5 сонячних панелей 2026 / Xolar. - 2026. - Режим доступу: <https://xolar.com.ua/blog/top-5-sonyachnyh-panelej/>

13. Іме А.Н. Підвищення ефективності сонячних панелей шляхом використання водяного охолодження/Аях Нсікак Іме, В.П. Коваль//Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та

студентів „Актуальні задачі сучасних технологій —, 25-26 листопада 2020 року.— Т.: ТНТУ, 2020.—Том 2.— С. 80–81

14. Гнатюк В.В. Роль систем зберігання електроенергії для енергосистеми // В.В. Гнатюк; В.І. Кузьмич; В.П.Коваль / Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій", присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 28-29 травня 2025 року – Тернопіль. ТНТУ ім.І.Пулюя, 2025. – С. 21-22.

15. Робота фотоелектричної станції на основі гібридного інвертора з різною ємністю системи накопичення електроенергії. Коваль, В., Оробчук, Б., Буняк, О., Гетманюк, В. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 343(6(1), (2024). С. 208-214. Галузь науки: технічні (17.03.2020)

16. Коваль В.П. Вплив ємності акумулятора на ефективність роботи фотоелектричної станції//В.П.Коваль / Інноваційні технології в світлотехніці та електроенергетиці : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 16–17 трав. 2024 р. / Нац. акад. наук вищ. освіти України, Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Нац. наук. центр «Ін-т метрології» [та ін.]. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – С. 75-77.

17. Акумуляування електроенергії у автономних освітлювальних установках / В.П.Коваль, В.А. Андрійчук, К.М.Козак// Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції «Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи», 23-27 лютого 2015 р., Тернопіль, Яремче (УКРАЇНА) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2015.– С. 98-99.

18. Керя Ю.Б. Роль системи накопичення енергії у електроенергетичній системі //Ю.Б.Керя, В.П.Коваль /Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XI міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів,

(Тернопіль, 7–8 груд. 2022.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – С. 68.

19. Selecting and Sizing Solar System Components / EE Power. - 2023. - Режим доступу: <https://eepower.com/technical-articles/selecting-and-sizing-solar-system-components/>

20. MPPT Solar Charge Controllers: Sizing, Selection & Wiring / GreenLancer. - 2026. - Режим доступу: <https://www.greenlancer.com/post/mppt-solar-charge-controllers>

21. Коваль В. П. Енергоефективність системи позиціонування фотоелектричних батарей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, Ю. О. Пилипчук // Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 16-17 листопада 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — Том 3. — С. 139.

22. Понтус О.В. Особливості проектування та введення в експлуатацію промислової сонячної електростанції // О.В. Понтус, Р.А. Карпишин, В.П.Коваль / Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи: матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль, 29-31 травня 2024) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2024. – С 19-21.

23. Schmid F., Behrendt F. Optimal sizing of Solar Home Systems: Charge controller technology and its influence on system design // Sustainable Energy Technologies and Assessments. - 2021. - Vol. 45. - P. 101198. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101198>

24. Selecting and Sizing Solar System Components / EE Power. - 2023. - Режим доступу: <https://eepower.com/technical-articles/selecting-and-sizing-solar-system-components/>

25. El-houari H. et al. Design, Simulation, and Economic Optimization of an Off-Grid Photovoltaic System for Rural Electrification // Energies. - 2019. - Vol. 12, No. 24. - P. 4735. - DOI: <https://doi.org/10.3390/en12244735>

26. Shimomachi, K., Hara, R., & Kita, H. (2015, November). Comparison between DC and AC microgrid systems considering ratio of DC load. In 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) (pp. 1-4). IEEE.
27. Siraj, K., & Khan, H. A. (2020). DC distribution for residential power networks—A framework to analyze the impact of voltage levels on energy efficiency. *Energy Reports*, 6, 944-951.
28. U. of water Loo, “Energy, Building Software, Optimization BEopt tutorial,” 2020
29. Коваль В. П. Суміщене електропостачання від поновлювальних джерел енергії / Вадим Коваль // Матеріали IV Міжнародної науково технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп’ютерних технологій— присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, 20-21 червня 2019 року. — Т. : ФОП Паляниця В. А., 2019. — С. 294.
30. Герега С. Збільшення ефективності використання сонячних панелей / Степан Герега, Вадим Коваль, Ярослав Філюк // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.
31. Faisal, S. F. S. (2012). Model of grid connected photovoltaic system using Matlab/Simulink. *Journal of Electrical Engineering*, 12(2), 12-12.
32. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.