Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
Кафедра “Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент”

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“___“ _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему

Дослідження ефективності впровадження фотоелектричних станцій на комунальному підприємстві "Міськсвітло"
Study of the effectiveness of the implementation of photovoltaic power plants at the municipal enterprise “Misksvitlo”

Виконав здобувачка вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕНМ-23Мз
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
_____Олександр СКІБІНСЬКИЙ
«____»_____2024 р.
Керівник роботи
к.т.н., доцент
_____Іван САВЕЛЕНКО
«_____»_____2024 р.
Рецензент _____
_____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет *Центр заочної та дистанційної освіти*
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 *Енергетичний менеджмент*

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри
_____ *Плєшков П.Г.*
«_____»_____2024 р.

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

Скібінський Олександр Іванович
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) *Дослідження ефективності впровадження фотоелектричних станцій на комунальному підприємстві "Міськсвітло"*
Study of the effectiveness of the implementation of photovoltaic power plants at the municipal enterprise "Misksvitlo"

2. Керівник роботи (проекту) *Савеленко Іван Валодимирович, к.т.н., доцент*
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту *10.12.2024 р.*

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)
Метою роботи є Метою роботи є удосконалення системи керування автономним живленням освітлювальних установок, дослідження енергетичних характеристик сонячних батарей та акумулюючих систем і використання їх в системах зовнішнього освітлення, а також дослідження впливу кліматичних умов на енергетичний потенціал сонячного випромінювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	*к.т.н, доц. Савеленко І.В.*		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ.*	*10.10.24*	
2	*Теоретичні основи використання фотоелектричних станцій*	*17.10.24*	
3	*Визначення енергетичного потенціалу сонячного випромінювання*	*22.10.24*	
4	*Моделювання режимів роботи фотоелектричної установки в системі освітлення*	*28.11.24*	
5	*Розрахунок економічної ефективності автономного зовнішнього освітлення*	*30.11.24*	
6	*Охорона праці*	*3.12.24*	
7	*Оформлення пояснювальної записки та презентації роботи*	*10.12.24*	

Дата видачі завдання
«____» _____2024 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання
«____» _____2024 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Скібінський О. **Дослідження ефективності впровадження фотоелектричних станцій на комунальному підприємстві "Міськсвітло"**

Study of the effectiveness of the implementation of photovoltaic power plants at the municipal enterprise “Misksvitlo”

Спеціальність 141 - «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». - ОПП «Електротехнічні системи електроспоживання». - Центральноукраїнський національний технічний університет. - м. Кропивницький, 2024 р.

Магістерська робота присвячена дослідженню теоретичних, технічних і економічних аспектів використання фотоелектричних станцій (ФЕС) у системах автономного зовнішнього освітлення.

В роботі розглянуто основи функціонування ФЕС, сучасний стан і перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні. Особлива увага приділена екологічним і економічним перевагам використання фотоелектричних станцій. Проаналізовано конструктивні особливості систем зовнішнього освітлення, зокрема джерел автономного живлення та накопичувальних батарей.

Виконано оцінцку енергетичного потенціалу сонячного випромінювання. Проведено дослідження потоку сонячного випромінювання на широті м. Кропивницький, проаналізовано вплив хмарності на густину енергії сонячного випромінювання. Виконано моніторинг енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для населених пунктів Центральноукраїнського регіону.

Проведене моделювання режимів роботи фотоелектричної установки для систем зовнішнього освітлення. Проведено розрахунок параметрів фотоелектричної енергетичної системи, обґрунтовано техніко-економічний вибір обладнання для забезпечення ефективності її роботи.

Результати дослідження демонструють, що використання фотоелектричних станцій у системах автономного зовнішнього освітлення є перспективним напрямом розвитку енергетики. Однак для досягнення максимальної ефективності необхідно враховувати кліматичні, технічні та економічні аспекти.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ, АВТОНОМНЕ ЖИВЛЕННЯ, СИСТЕМИ ОСВІТЛЕННЯ.

ABSTRACT

SKIBINSKYI O. Study of the effectiveness of the implementation of photovoltaic power plants at the municipal enterprise “Misksvitlo”

Дослідження ефективності впровадження фотоелектричних станцій на комунальному підприємстві "Міськсвітло"

Specialty 141 - "Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics". - Educational and Professional Program "Electrical Systems of Power Consumption". - Central Ukrainian National Technical University. - Kropyvnytskyi, 2024.

The master's thesis focuses on the theoretical, technical, and economic aspects of using photovoltaic power stations (PVS) in autonomous outdoor lighting systems.

The study examines the fundamentals of PVS operation, the current state, and the prospects for the development of solar energy in Ukraine. Particular attention is given to the environmental and economic advantages of photovoltaic power stations. The structural features of outdoor lighting systems are analyzed, including autonomous power sources and energy storage batteries.

An assessment of the solar radiation energy potential has been performed. A study of the solar radiation flux at the latitude of Kropyvnytskyi was conducted, analyzing the impact of cloudiness on the energy density of solar radiation. Monitoring of the solar radiation energy potential for the settlements in the Central Ukrainian region has been carried out.

The operational modes of the photovoltaic installation for outdoor lighting systems were modeled. The parameters of the photovoltaic energy system were calculated, and a techno-economic justification for the equipment selection to

ensure its efficiency was provided.

The research results demonstrate that using photovoltaic power stations in autonomous outdoor lighting systems is a promising direction for energy development. However, achieving maximum efficiency requires considering climatic, technical, and economic factors.

ENERGY EFFICIENCY, ENERGY AUDIT, PHOTOVOLTAIC POWER STATIONS, AUTONOMOUS POWER SUPPLY, LIGHTING SYSTEMS.

ЗМІСТ

ВСТУП 10

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ 15

1.1. Загальні принципи роботи фотоелектричних станцій 15

1.2. Сучасний стан і перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні 17

1.3. Екологічні та економічні переваги використання фотоелектричних станцій 20

1.4 Використання альтернативних джерел енергії в системах зовнішнього освітлення 22

1.5. Аналіз систем зовнішнього освітлення з фотоелектричними станціями 24

1.5. Джерела автономного живлення фотоелектричних станцій в системах освітлення 28

1.4. Накопичувальні батареї для фотоелектричних станцій в системах освітлення 32

Висновки до розділу 37

2. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ 38

2.1. Дослідження потоку сонячного випромінювання 38

2.2. Аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання на широті м. Кропивницький 40

2.3. Вплив ступеню хмарності на густину енергії сонячного випромінювання 46

2.4. Моніторингу енергетичного потенціалу сонячного випромінювання населених пунктів Центральноукраїнського регіону України 55

Висновки до розділу 58

3. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ В СИСТЕМІ ОСВІТЛЕННЯ 59

3.1. Розрахунок фотоелектричної енергетичної установки для зовнішнього освітлення 59

3.2. Техніко-економічнеобгрунтування вибору фотоелектричної енергетичної установки 62

Висновки до розділу 66

4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОГО ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ 67

4.1. Аналіз ефективності роботи автономної фотоелектричної установки для зовнішнього освітлення 67

Висновки до розділу 75

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 76

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ 78

ДОДАТКИ..... 84

Додаток А 85

ОХОРОНА ПРАЦІ 85

А.1 Заходи по охороні праці та техніки безпеки 85

А.2. Розрахунок заземлення 88

ВСТУП

Енергетична криза, зростання вартості енергоресурсів та екологічні виклики змушують шукати нові шляхи забезпечення енергетичної безпеки. Відновлювані джерела енергії, зокрема фотоелектричні станції, стають важливим інструментом у досягненні сталого розвитку. Їх впровадження не лише сприяє економії коштів, а й дозволяє мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Сучасні фотоелектричні станції характеризуються високим рівнем енергоефективності, тривалим терміном експлуатації (до 25–30 років) та зменшенням капітальних витрат завдяки інноваційним технологіям у виробництві сонячних панелей. Протягом останніх років спостерігається стрімке зниження вартості фотоелектричних модулів, а також збільшення їхньої продуктивності. Такі технології, як монокристалічні та перовскітні панелі, стали важливими елементами розвитку галузі. Згідно з даними міжнародних досліджень, глобальна потужність фотоелектричних станцій зросла на 20–25% щороку, що свідчить про їхню конкурентоспроможність на енергетичних ринках.

Фотоелектричні станції (ФЕС) різних виробників відзначаються значною різноманітністю технологій і технічних характеристик. Це дозволяє споживачам обрати найоптимальніше обладнання відповідно до конкретних умов експлуатації, кліматичних особливостей та економічних обмежень. У цій роботі розглянуто основні технічні параметри, які визначають вибір ФЕС, а також їхні відмінності залежно від виробника.

Фотоелектричні модулі є основою будь-якої ФЕС. Різні виробники пропонують модулі, виготовлені за такими основними технологіями:

Монокристалічні модулі (Monocrystalline):

Ефективність: 18-23%.

Переваги: Висока продуктивність за обмеженої площі.

Естетичний зовнішній вигляд (чорні панелі).

Тривалий термін служби (25-30 років).

Недоліки: Висока вартість.

Виробники: SunPower, LONGi Solar, JA Solar.

Полікристалічні модулі (Polycrystalline):

Ефективність: 15-19%.

Переваги:

Нижча вартість у порівнянні з монокристалічними модулями.

Менші витрати на виробництво.

Недоліки:

Зниження продуктивності при високих температурах.

Виробники: Trina Solar, Canadian Solar.

Тонкоплівкові модулі (Thin-film):

Ефективність: 10-15%.

Переваги:

Гнучкість і легкість.

Висока ефективність при слабкому освітленні.

Недоліки:

Менша довговічність.

Вимагають більше площі для розташування.

Виробники: First Solar, Sharp Solar.

Сучасні виробники інтегрують у свої рішення низку технологічних інновацій:

PERC (Passivated Emitter Rear Cell):Забезпечує підвищену ефективність завдяки кращому відбиттю світла. Використовується в монокристалічних і полікристалічних модулях (LONGi Solar, JA Solar).

HJT (Heterojunction Technology): Комбінація кристалічних і тонкоплівкових технологій. Низький коефіцієнт деградації модулів.

Основні виробники: Panasonic, REC Solar. Двосторонні модулі (Bifacial):

Генерація енергії з обох сторін модуля.

Ефективність підвищується на 5-25% за рахунок відбитого світла.

Використовується для великих станцій із високим альбедо (Trina Solar, Jinko Solar).

Основними характеристиками, що впливають на вибір ФЕС, є:

Потужність модуля:Діапазон: від 250 Вт до понад 600 Вт.

Більші модулі ідеально підходять для промислових станцій.

Температурний коефіцієнт:

Визначає зниження продуктивності при підвищенні температури.

Монокристалічні модулі мають найкращі показники (до -0,3% °C).

ККД (коефіцієнт корисної дії):

Монокристалічні модулі демонструють найвищий ККД. Полікристалічні та тонкоплівкові модулі мають нижчі показники. Провідні виробники забезпечують збереження 80-90% продуктивності через 25-30 років експлуатації.

Модулі, які забезпечують стабільну генерацію енергії навіть за хмарної погоди.

Однак, попри позитивні тенденції, існує ряд викликів, пов'язаних з інтеграцією сонячних станцій у локальну енергетичну інфраструктуру. До них належать залежність від погодних умов, складності зберігання електроенергії та потреба в додаткових інвестиціях у супутню інфраструктуру.

Аналіз літератури показує, що дослідники зосереджують увагу на кількох аспектах впровадження фотоелектричних станцій. У деяких роботах підкреслюється значення інновацій у матеріалах, таких як перовскіт, що дозволяють збільшити коефіцієнт перетворення сонячної енергії до 25–30%.

Згідно з дослідженнями, в Україні вартість генерації 1 кВт·год сонячної енергії вже наближається до рівня традиційних джерел енергії завдяки підтримці "зеленого" тарифу.

Разом з тим, окремі роботи вказують на ризики недооцінки витрат на обслуговування та деградацію панелей, що може вплинути на довгострокову економічну доцільність. Крім того, вітчизняні джерела здебільшого недостатньо висвітлюють питання інтеграції сонячних станцій в український енергетичний баланс, що потребує додаткових досліджень.

Метою даної магістерської роботи є дослідження ефективності впровадження фотоелектричних станцій на комунальному підприємстві "Міськсвітло". Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

аналіз сучасного стану енергоспоживання підприємства;

обґрунтування доцільності використання фотоелектричних станцій;

визначення енергетичного потенціалу сонячного випромінювання розробка техніко-економічного обґрунтування проекту;

оцінка екологічного та соціального впливу впровадження фотоелектричних станцій.

Об'єктом дослідження є діяльність комунального підприємства "Міськсвітло" у сфері забезпечення міського освітлення. Предметом дослідження виступає процес впровадження фотоелектричних станцій як одного з ефективних методів зниження витрат на електроенергію та підвищення енергетичної автономності.

У ході виконання роботи використано комплекс методів:

теоретичні методи аналізу літературних джерел для вивчення теоретичних основ фотоелектричних технологій;

статистичний аналіз для оцінки енергоспоживання та фінансових витрат підприємства;

економіко-математичні методи для розрахунку ефективності впровадження проекту;

моделювання для прогнозування довгострокових результатів впровадження фотоелектричних станцій.

Таким чином, дана робота спрямована на створення практичних рекомендацій для комунального підприємства "Міськсвітло" щодо інтеграції сучасних відновлюваних технологій, які сприятимуть зменшенню енергетичних витрат та забезпеченню екологічної стійкості.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

1.1. Загальні принципи роботи фотоелектричних станцій

Фотоелектричні станції (ФЕС) — це системи, які використовують сонячну енергію для виробництва електроенергії за допомогою фотоелектричних елементів. Основу таких станцій складають сонячні панелі, які перетворюють світлову енергію на постійний електричний струм завдяки фотоелектричному ефекту.

Основні компоненти ФЕС:

- Сонячні модулі
- Інвертори
- Системи зберігання енергії.
- Контролери заряду.

Фотоелектричні станції (ФЕС) складаються з кількох компонентів, кожен із яких виконує важливу роль у процесі перетворення сонячної енергії на електричну. Ретельний підбір і оптимальна інтеграція цих елементів забезпечують стабільну роботу системи та високу ефективність енергознімання.

Сонячні модулі є основним елементом ФЕС, що відповідає за перетворення сонячного випромінювання на постійний електричний струм за допомогою фотоелектричного ефекту. Сучасні модулі класифікуються на три основні типи: монокристалічні, полікристалічні та плівкові.

Монокристалічні модулі виготовляються з цільного кристала кремнію, що забезпечує їхню високу ефективність (18–24%) та компактність. Водночас вони характеризуються вищою вартістю. Полікристалічні модулі, виготовлені з кількох кристалів кремнію, мають нижчий коефіцієнт корисної

дії (15–18%) та доступнішу ціну. Плівкові модулі, створені на основі тонкошарових матеріалів (аморфний кремній, кадмій телурид), відзначаються меншою вартістю виробництва, однак їхній ККД не перевищує 14%.

Технічні характеристики модулів включають потужність від 250 до 600 Вт, напругу відкритого кола в межах 30–45 В та струм короткого замикання 8–15 А. Їх конструкція відповідає міжнародним стандартам (IEC 61215) щодо стійкості до механічних навантажень і впливу довкілля.

Інвертори забезпечують перетворення постійного струму, виробленого сонячними панелями, на змінний, що використовується в побутових або промислових мережах. Залежно від призначення, інвертори поділяються на мережеві, автономні та гібридні. Мережеві інвертори працюють у синхронізації з електромережею, тоді як автономні використовуються у віддалених районах із системами зберігання енергії. Гібридні інвертори поєднують переваги обох типів.

Основними характеристиками інверторів є їхня номінальна потужність (1–1000 кВт), ККД (95–99%), діапазон вхідної напруги (150–1000 В) та рівень захисту (IP65 для зовнішньої установки). Сучасні інвертори оснащуються функціями віддаленого моніторингу, а також системами захисту від перенапруги та перегріву.

Системи зберігання енергії, або акумулятори, забезпечують накопичення надлишкової енергії, виробленої ФЕС, для її подальшого використання в періоди низької сонячної активності. У ФЕС найчастіше застосовуються свинцево-кислотні, літій-іонні та твердотільні акумулятори.

Свинцево-кислотні акумулятори мають невисоку вартість, однак поступаються за терміном служби (5–10 років) та ефективністю заряд-розряд (80–85%). Літій-іонні акумулятори, які працюють до 10–15 років, забезпечують високу енергоємність і ККД (90–95%). Твердотільні

акумулятори є новітньою технологією з найвищою щільністю енергії, однак вони поки що залишаються дорогими та менш доступними.

Контролери заряду є критично важливими для регулювання процесу зарядження акумуляторів. Вони захищають систему від перевантажень і недозаряду, що значно подовжує термін служби акумуляторів.

Розрізняють два основні типи контролерів: PWM (імпульсна широтно-модульована) та MPPT (оптимізація за максимальною потужністю). Контролери MPPT є більш ефективними, дозволяючи збільшити продуктивність системи на 20–30%. Їхній ККД може сягати 98%, а діапазон вхідної напруги — до 600 В.

Системи монтажу, кабелі, з’єднання та системи моніторингу є важливими складовими ФЕС. Монтажні системи забезпечують оптимальне розташування панелей, а трекери дозволяють відстежувати рух сонця для максимального збору енергії. Кабелі типу PV1-F мають підвищену термостійкість і мінімальні втрати енергії, що підвищує ефективність роботи системи.

Ключовою характеристикою ФЕС є їхній коефіцієнт перетворення, який визначає, який відсоток сонячної енергії перетворюється на електричну.

1.2. Сучасний стан і перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні

Сонячна енергетика є одним із динамічних секторів відновлюваної енергетики у світі. В Україні розвиток цієї галузі стимулюється впровадженням "зеленого" тарифу та законодавчим регулюванням, спрямованим на залучення інвестицій. Станом на 2023 рік, сумарна потужність встановлених ФЕС перевищила 9 ГВт.

Сонячна енергетика в Україні розвивається як перспективна галузь, здатна забезпечити екологічно чисту енергію та сприяти енергетичній незалежності країни. Її розвиток обумовлений низкою факторів, які впливають на швидкість впровадження та ефективність функціонування сонячних електростанцій (СЕС).

Україна має сприятливі природні умови для розвитку сонячної енергетики, особливо в південних регіонах. Середня річна кількість сонячного випромінювання становить від 1000 до 1400 кВт·год/м² на рік залежно від регіону. Найвищий потенціал спостерігається в Одеській, Херсонській, Запорізькій областях, а також у Криму, де кількість сонячних днів на рік перевищує 250.

Географічне розташування дозволяє використовувати як стаціонарні, так і рухомі трекерні системи для максимального збору сонячної енергії. Крім того, застосування сучасних технологій, таких як двосторонні сонячні модулі, значно підвищує ефективність використання природного потенціалу.

Розвиток сонячної енергетики в Україні значною мірою залежить від державної політики у сфері підтримки відновлюваних джерел енергії. Одним із ключових механізмів є впровадження "зеленого тарифу", що забезпечує гарантовану закупівлю електроенергії, виробленої з поновлюваних джерел, за підвищеними цінами.

Для приватних домогосподарств, які встановлюють малі сонячні станції, існують спрощені умови підключення до мережі, а також можливість продажу надлишкової енергії за вигідними умовами. Урядові програми субсидування дозволяють зменшити витрати на встановлення СЕС, що стимулює як малий бізнес, так і приватних осіб до впровадження сонячних систем.

Попри це, необхідність реформування законодавства щодо довгострокового прогнозування тарифів та умов підтримки є важливим аспектом для залучення інвесторів у цю галузь.

Технологічний прогрес відіграє вирішальну роль у зростанні доступності сонячних енергетичних рішень. Останнє десятиліття характеризується значним зниженням вартості сонячних панелей, інверторів та інших компонентів СЕС. Наприклад, за даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), ціна сонячних модулів знизилася більш ніж у 80% порівняно з 2010 роком.

Сучасні інновації, такі як двосторонні модулі, плівкові панелі та MPPT-контролери, дозволяють значно підвищити ефективність збору енергії навіть за несприятливих погодних умов. Також активно впроваджуються системи зберігання енергії на основі літій-іонних акумуляторів, що дозволяє зменшити залежність від періодів низької сонячної активності.

Важливою перевагою є розвиток цифрових рішень для моніторингу та управління СЕС, що забезпечують підвищення їхньої ефективності та оптимізацію витрат.

Незважаючи на значний потенціал і сприятливі умови для розвитку сонячної енергетики в Україні, галузь стикається з низкою проблем, які гальмують її подальший прогрес. Основними викликами є нестабільність політики підтримки, обмеженість енергетичної інфраструктури та висока залежність від імпортного обладнання.

Політична та регуляторна непередбачуваність є одним із найбільших бар’єрів для розвитку сонячної енергетики. Зміни у законодавстві, пов’язані з переглядом умов "зеленого тарифу" або затримками в розрахунках за вироблену електроенергію, створюють невизначеність для інвесторів.

Скасування державних програм підтримки, недостатня прозорість механізмів аукціонів і слабка нормативна база для розвитку малих приватних електростанцій підривають довіру до галузі. Як наслідок, інвестори віддають перевагу ринкам із більш передбачуваними умовами, що уповільнює темпи зростання сонячної енергетики в Україні.

Енергетична інфраструктура України, зокрема мережі передачі та розподілу електроенергії, не завжди готова до інтеграції нових сонячних електростанцій. У деяких регіонах, особливо з високим потенціалом для сонячної енергетики, існує проблема перевантаження електромереж, що ускладнює підключення нових об’єктів.

Оновлення мереж потребує значних інвестицій, але відсутність чіткої державної стратегії щодо модернізації інфраструктури обмежує можливості для масштабування виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Затримки з погодженням технічних умов підключення та недостатня пропускна здатність мереж негативно впливають на рентабельність проектів.

Українська сонячна енергетика значною мірою залежить від імпортного обладнання, зокрема сонячних модулів, інверторів, акумуляторів та інших компонентів. Основні постачальники обладнання – Китай, Німеччина, Південна Корея та інші країни.

1.3. Екологічні та економічні переваги використання фотоелектричних станцій

Фотоелектричні станції (ФЕС) як джерело відновлюваної енергії мають суттєві переваги порівняно з традиційними способами виробництва електроенергії. Їх використання не лише сприяє зменшенню шкідливого впливу на довкілля, але й забезпечує вагомі економічні вигоди.

Однією з головних екологічних переваг ФЕС є відсутність викидів парникових газів, таких як CO_2, CH_4 або N_2O, під час генерації електроенергії. На відміну від традиційних електростанцій, що працюють на викопних видах палива, сонячні станції не використовують процеси спалювання, які є головним джерелом забруднення атмосфери. Згідно з дослідженнями Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії

(IRENA), кожна встановлена мегават-година (МВт·год) сонячної енергії зменшує викиди CO_2 в середньому на 0,5–0,8 тонни.

ФЕС дозволяють знизити споживання вугілля, нафти та природного газу, що сприяє зменшенню глобального попиту на ці ресурси. Це не лише сприяє енергетичній незалежності, але й зменшує екологічні ризики, пов’язані з видобутком, транспортуванням та спалюванням викопних видів палива.

У процесі експлуатації ФЕС характеризуються мінімальним впливом на природні екосистеми. Відсутність рухомих механізмів знижує рівень шумового забруднення, а встановлення станцій на дахах будівель або у вже змінених ландшафтах дозволяє уникнути впливу на природні середовища існування.

Однак важливо зазначити, що вплив на екосистеми може виникати на етапі виробництва сонячних панелей, пов’язаного з використанням рідкоземельних металів та хімічних компонентів. Тому розвиток екологічно чистих технологій виробництва компонентів ФЕС є пріоритетом для галузі.

Встановлення ФЕС дозволяє значно зменшити витрати на закупівлю електроенергії з централізованої мережі. Для домогосподарств і підприємств це означає зменшення енергетичних рахунків, особливо в умовах зростання цін на електроенергію.

Незважаючи на високі початкові інвестиції, ФЕС мають низькі експлуатаційні витрати, пов’язані з відсутністю палива та мінімальними вимогами до обслуговування. Термін служби сучасних сонячних модулів перевищує 25 років, а період окупності часто становить 5–10 років залежно від масштабу проекту та наявності державної підтримки.

Розвиток сонячної енергетики сприяє створенню нових робочих місць у виробництві, монтажі та обслуговуванні обладнання. Згідно з даними IRENA, у 2023 році галузь забезпечила понад 4,5 мільйона робочих місць у всьому світі, і ця кількість продовжує зростати.

Сонячна енергетика дозволяє уникнути коливань цін, характерних для ринків викопного палива. Після завершення встановлення станції її експлуатаційні витрати залишаються стабільними, що забезпечує прогнозованість енергетичних витрат для споживачів.

1.4 Використання альтернативних джерел енергії в системах зовнішнього освітлення

Сьогодні питання раціонального використання природних ресурсів, оптимізації енергоспоживання та впровадження екологічних технологій у міських інфраструктурах набуває особливої актуальності. Зростаючий інтерес до відновлювальних джерел енергії ставить за мету зменшення залежності від традиційних енергоресурсів і перехід до сталого розвитку. Одним із важливих напрямків цієї трансформації є застосування альтернативної енергетики в системах зовнішнього освітлення міст, що дозволяє суттєво скоротити витрати на електроенергію, підвищити надійність роботи освітлювальних мереж і забезпечити комфорт мешканцям населених пунктів.

Використання фотоелектричних станцій (ФЕС) як джерела енергії для зовнішнього освітлення має значні переваги. Завдяки здатності генерувати електроенергію безпосередньо з сонячного випромінювання, ФЕС дозволяють мінімізувати витрати на експлуатацію та знизити викиди парникових газів. Це сприяє екологізації міських територій та підвищенню рівня енергетичної незалежності громад.

Згідно зі статистичними даними профільних організацій, міські системи освітлення в Україні потребують значної модернізації. Впровадження ФЕС може стати одним із рішень для подолання існуючих проблем, зокрема зменшення витрат на енергоресурси та підвищення

надійності роботи мереж. Інтеграція сонячної енергетики в міські інфраструктури відкриває можливість для створення автономних освітлювальних систем, які не залежать від централізованих мереж і можуть ефективно функціонувати навіть у віддалених районах.

У даній роботі значну увагу буде приділено системам зовнішнього освітлення міста Кропивницький та населеним пунктам Кіровоградської області. Світлотехнічні характеристики систем зовнішнього освітлення міста Кропивницький за період 2019–2021 років, відповідно до даних КП «Міськсвітло», наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Споживання енергії системою освітлення в м. Кропивницькому

Місяць	2019 рік		2020 рік		2021 рік	
	Wос кВтгод	Сума з ПДВ, *грн.*	*Wос кВтгод*	Сума з ПДВ, *грн.*	*Wос кВтгод*	Сума з ПДВ, *грн.*
Січень	378479	225327,04	358080	180065,7	361028	138800,69
Лютий	331628	201369,16	326007	163241,64	288645	114195,69
Березень	262031	272128,08	245677	145104,78	248674	108175,15
Квітень	247283	316615,55	251398	160638,82	229125	107629,49
Травень	191166	262124,78	162687	115891,79	195455	106541,96
Червень	155271	211035,27	147566	100053,98	155642	84374,01
Липень	122452	172147,9	124275	82617,39	146096	78886,81
Серпень	154740	221415,26	154256	103010,13	145116	76264,01
Вересень	234089	335650,68	222651	151490,3	207923	112283,15
Жовтень	261248	390603,54	233795	153409,52	245428	127206,15
Листопад	332402	507049,73	293809	177976,43	275132	130552,6
Г рудень	354216	534651,44	315762	190560,12	269110	129418,98
Всього	3025005	3650118,43	2835963	1724060,6	2767374	1314328,6

У 2021 році в місті Кропивницький було спожито приблизно 3 млн кВт·год електроенергії для забезпечення зовнішнього освітлення. Цей показник зріс на 0,19 млн кВт·год (6 %) порівняно з 2020 роком, а також на 0,26 млн кВт·год (8,5 %) у порівнянні з 2019 роком. При цьому витрати на електроенергію, використану для зовнішнього освітлення, у 2021 році збільшилися на 1,926 млн грн (52 %) і досягли 3,65 млн грн. Динаміку цих змін відображено на рисунку 1.1.

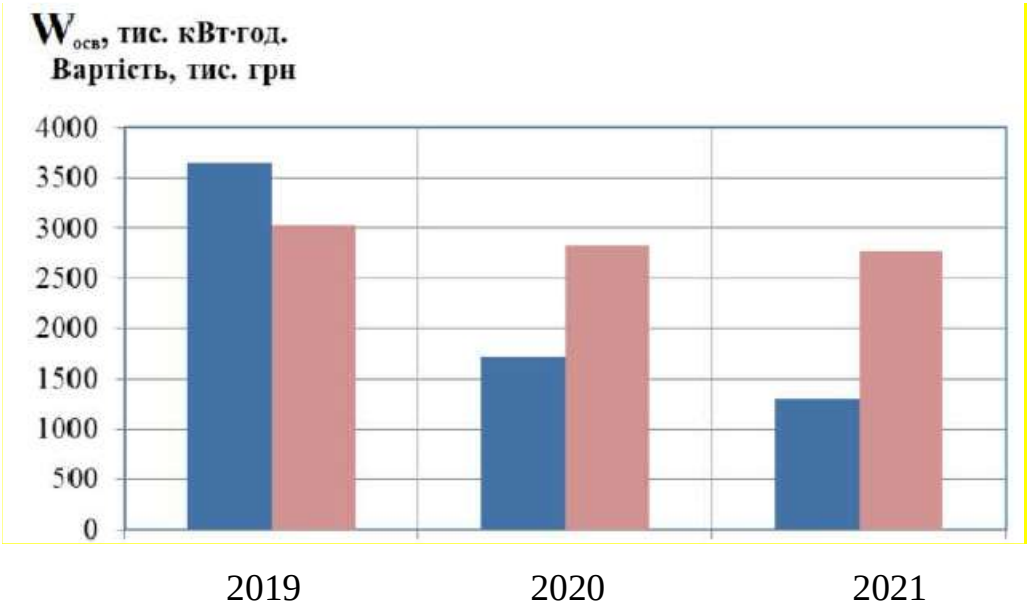


Рис. 1.1. Графік зміни річної енергії, спожитої зовнішнім освітленням та її вартість для м. Кропивницького

1.5. Аналіз систем зовнішнього освітлення з фотоелектричними станціями

На сучасному етапі розвитку освітлювальних технологій значну увагу приділяють використанню світлодіодних освітлювальних установок (ОУ) з автономними джерелами енергії. В Україні існує багато локацій, де потреба у

вуличному, садово-парковому або дорожньому освітленні залишається актуальною, але підключення до центральних мереж електропостачання є ускладненим або неможливим. Для вирішення таких завдань дедалі частіше застосовуються автономні освітлювальні системи, які використовують енергію з альтернативних джерел.

Сьогодні автономні світильники на базі сонячних батарей виробляються багатьма компаніями, які пропонують ефективні та інноваційні рішення для зовнішнього освітлення.

Компанія Shenzhen Shinehui Technology Co. спеціалізується на виготовленні інтегрованих світлодіодних установок для вуличного освітлення, які працюють від сонячних батарей. Зовнішній вигляд одного з таких пристроїв представлено на рисунку 1.2[6].

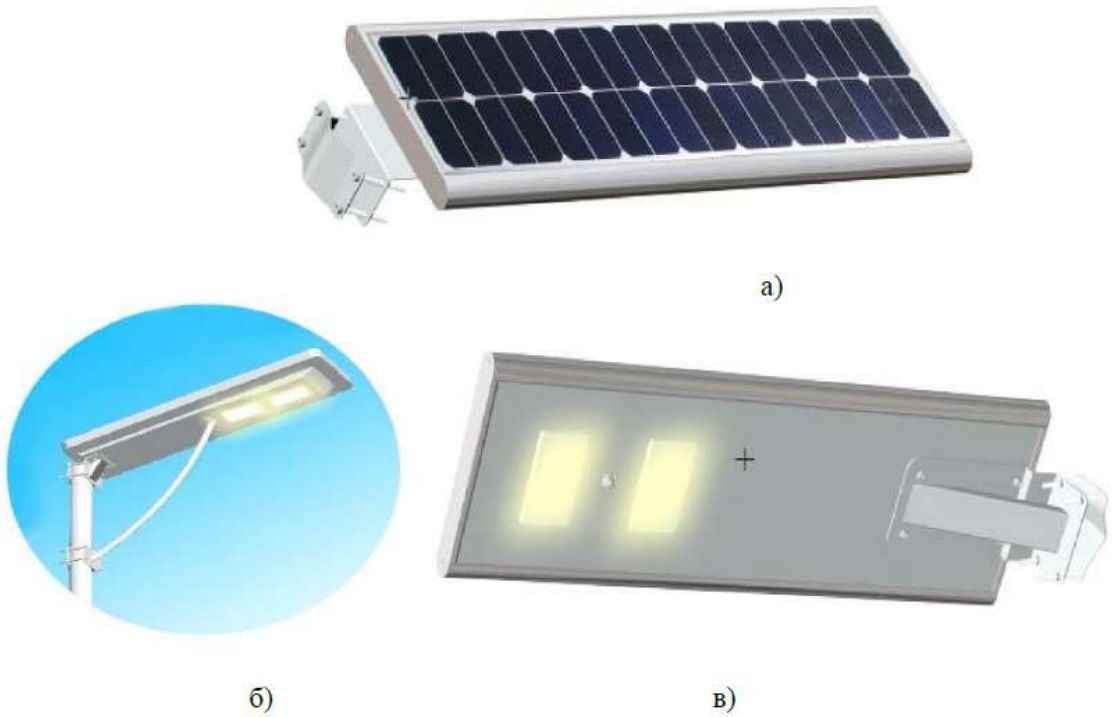


Рис. 1.2. Інтегрована вулична освітлювальна установка з сонячною батареєю: а) Сонячна батарея; б) Приклад монтажу на опору; в) Вигляд знизу на світлодіодні модулі і датчик руху

Автономна система освітлення створена як ефективна альтернатива традиційним вуличним світильникам, що живляться від електромережі. Вона ідеально підходить для використання на об’єктах, де підключення до централізованого електропостачання ускладнене або неможливе. Такі системи є незамінними для освітлення автомобільних доріг за межами населених пунктів, зупинок громадського транспорту у віддалених районах, а також об’єктів, розташованих далеко від існуючих електромереж. Крім того, вони ефективно застосовуються для освітлення вулиць, прибудинкових територій, автомобільних стоянок, пішохідних переходів та інших зон, де потрібне автономне освітлення [7].

Для підвищення енергоефективності та зручності можливе використання світильників із вбудованими датчиками руху, які мають радіус дії 12–15 метрів. Такі датчики забезпечують автоматичне включення освітлення лише за необхідності, що значно економить енергію.

На рисунку 1.3 представлено зовнішній вигляд автономної освітлювальної системи «Сонячна електростанція Sun Shines 100/65», яка демонструє сучасний підхід до вирішення завдань освітлення у віддалених або складнодоступних місцях.



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд установки Sun Shines

Компанія Towersun-128, EPS-soltec [8] спеціалізується на виробництві освітлювальних систем, які працюють на основі сонячної енергії. Такі установки призначені для використання в умовах, де підключення до електромережі є неможливим або недоцільним. Особливістю цих систем є застосування восьми сонячних модулів, які розташовуються вертикально один над одним, що дозволяє забезпечити високу ефективність навіть при недостатньому або розсіяному сонячному освітленні.

Освітлювальні установки TOWERSUN оптимально підходять для застосування на житлових вулицях, пішохідних доріжках, автостоянках та інших об'єктах міської інфраструктури. Їх інноваційний дизайн і технологічні характеристики дозволяють забезпечити надійне та енергоефективне освітлення незалежно від умов навколишнього середовища.

На рисунку 1.4 представлено зовнішній вигляд фотоелектричної установки Towersun-128, EPS-soltec, яка є прикладом сучасного підходу до використання відновлюваної енергії для потреб автономного освітлення.



Рис. 1.4. Фотоелектрична установка Towersun-128

Світлодіодна вулична освітлювальна установка на сонячних батареях є ідеальним рішенням для місць, де відсутній доступ до електричних мереж, але потрібне стабільне освітлення навіть за умов слабкого сонячного світла. Завдяки міцній кубічній конструкції з алюмінію, оснащеній 2x4 фотоелектричними модулями, система ефективно генерує енергію навіть за розсіяного світла, що особливо актуально для регіонів із несприятливими погодними умовами.

Інноваційний дизайн із перпендикулярним розташуванням сонячних модулів запобігає накопиченню снігу взимку, що забезпечує безперебійну роботу установки у будь-який сезон. Крім того, система енергозбереження дозволяє підтримувати функціонування освітлення протягом кількох ночей поспіль навіть за несприятливих погодних умов [8].

Згідно з європейським стандартом DIN EN13201, освітлювальна установка TOWERSUN відповідає необхідним показникам освітленості, що робить її оптимальним вибором для використання на житлових вулицях, другорядних дорогах і автостоянках. Її надійність і адаптивність дозволяють забезпечити якісне освітлення навіть у найскладніших умовах експлуатації.

Інноваційні автономні рішення стають все більш затребуваними у містах і сільській місцевості, сприяючи зниженню енергетичної залежності та підвищенню якості освітлення в умовах віддаленості від магістральних мереж.

1.5. Джерела автономного живлення фотоелектричних станцій в системах освітлення

Для забезпечення автономного живлення систем зовнішнього освітлення населених пунктів у роботі [9] було запропоновано використовувати фотоелектричні модулі типу КВ50/12-М, акумуляторні

батареї Santec 12-200 та світильники типу LED 2.80.4200 потужністю 80 Вт. У дослідженні [10] виконано аналіз комбінованої системи енергопостачання для освітлювальних установок, яка поєднує автономне живлення з живленням від електромережі.

Робота [11] демонструє технічні можливості реалізації автономної системи вуличного освітлення, яка базується на використанні сонячних батарей YL300C-30b потужністю 300 Вт, літій-іонних акумуляторів LT-LYP200 ємністю 200 А·год, інверторів MeanWell TS-3000(1500) 48 В і зарядних контролерів ECO Енергія MPPT Pro 200/100.

Зовнішній вигляд однієї з таких автономних систем освітлення наведено на рисунку 1.6, що ілюструє сучасний підхід до впровадження енергоефективних рішень для громадського простору.

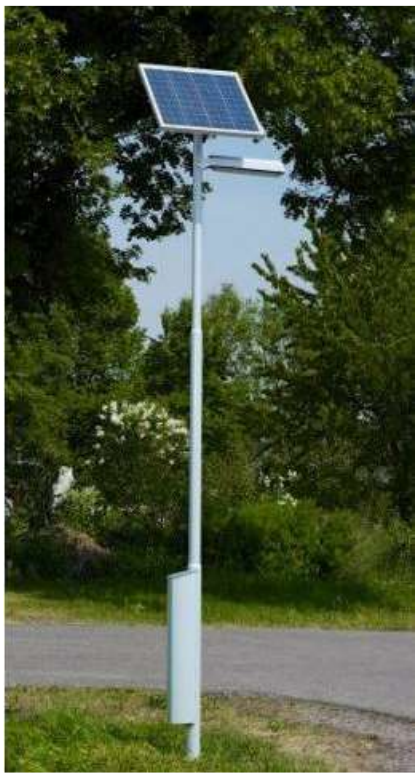


Рис. 1.6. Вигляд світлотехнічної установки з фотоелектричною станцією

У дослідженні [12] розглянуто застосування автономних енергозберігаючих систем освітлення у паркових зонах із використанням світлодіодних ламп LED-22 на 24 В потужністю 30–40 Вт. Ці пристрої характеризуються спрямованим світловим потоком і оптимізованою оптичною системою, що забезпечує ефективне освітлення.

Світлодіодні освітлювальні установки (ОУ) забезпечують суттєве підвищення ефективності завдяки значній економії енергоспоживання, яка може досягати 80% порівняно з традиційними джерелами світла, такими як лампи розжарювання, ДРЛ або ДНАТ. Основною перевагою світлодіодних систем є їхня енергоефективність, а також відсутність інерції під час вмикання і вимикання, що особливо важливо для зовнішніх освітлювальних систем [13,16]. Блок-схему автономного ОУ наведено на рис. 1.7.

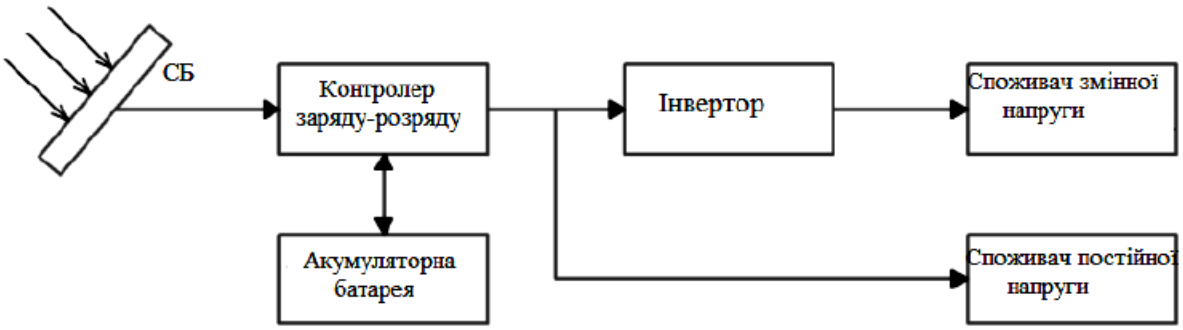


Рис. 1.7. Блок-схема фотоелектричної установки

Залежно від конфігурації, автономні ОУ можуть мати різні техніко-економічні характеристики, що впливають на їхню ефективність. Такі системи зазвичай використовуються для споживачів із низькими енергетичними потребами. Їхні переваги також проявляються в польових умовах, зокрема під час експлуатації ремонтного або будівельного обладнання.

У роботі [16] запропоновано застосування спеціальних драйверів для економного використання енергії. Ці драйвери автоматично переводять світильник у черговий режим при настанні сутінків, а за виявлення людини в радіусі 10–12 метрів або автомобіля на відстані 100 метрів перемикають його у робочий режим із повним рівнем освітлення. Після виходу об’єкта із зони виявлення світильник повертається до чергового режиму, що значно знижує навантаження на акумуляторну батарею.

На рисунку 1.8 наведено порівняння умовних площ фотоелектричних модулів різних типів, необхідних для генерації 1000 Вт електроенергії. Це дозволяє оцінити ефективність використання сучасних матеріалів і технологій у сфері сонячної енергетики [1,17-21].

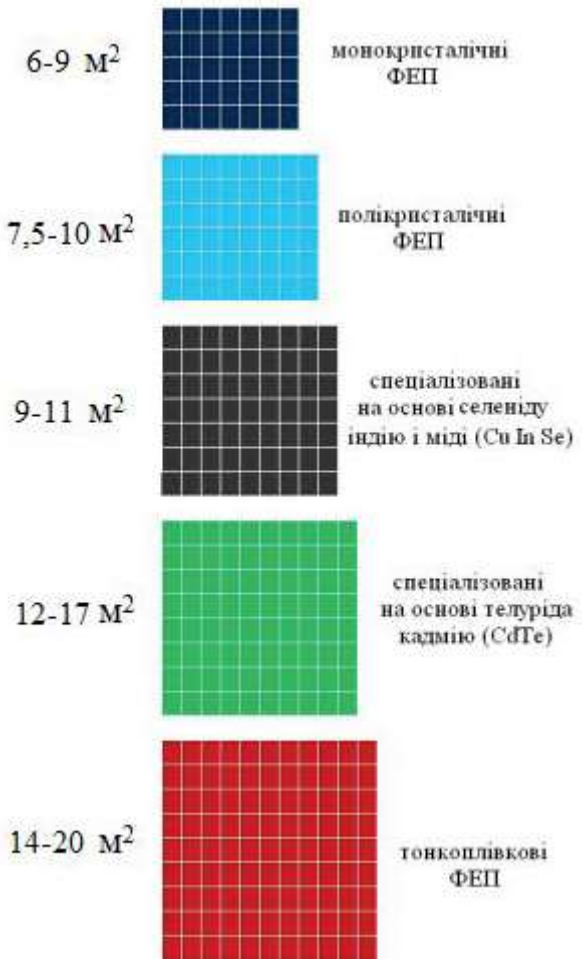


Рис. 1.8. Площі різних типів ФЕП для отримання 1 кВт електричної енергії

У дослідженні [20] доведено, що більшість кристалічних та тонкоплівкових фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) потребують значної площі поверхні для забезпечення однакового рівня генерації енергії, що обумовлено їх відносно низьким коефіцієнтом корисної дії (ККД). Ця особливість накладає обмеження на їх застосування в задачах, де важливі компактні геометричні розміри, наприклад, у вузлах інформаційних мереж.

Для промислових і локальних потреб найчастіше використовуються сонячні батареї, виготовлені з полікристалічного або монокристалічного кремнію, завдяки їхнім кращим технічним характеристикам. У той же час тонкоплівкові батареї мають переваги у вигляді більш ефективного поглинання розсіяного сонячного світла, меншого зниження потужності при частковому затемненні окремих секцій, а також кращої продуктивності за підвищених температур. Однак їхній ККД залишається нижчим порівняно з кристалічними ФЕП, що обмежує їх широке використання в енергетичних системах.

1.4. Накопичувальні батареї для фотоелектричних станцій в системах освітлення

Сонячні батареї генерують електроенергію протягом світлового дня, заряджаючи акумуляторні батареї, які накопичують і зберігають енергію для подальшого використання. Типи акумуляторів значно відрізняються за такими характеристиками, як кількість циклів перезарядки, термін зберігання, ємність, розміри, робочий температурний діапазон, час заряду та вартість.

У дослідженнях [25] було проаналізовано різні види акумуляторних батарей (АКБ), які використовуються для накопичення енергії від

фотоелектричних систем. Відповідно до проведених досліджень, АКБ для ФЕП повинні відповідати таким вимогам:

- низький рівень саморозряду;

- здатність працювати в умовах глибокого розряду;

- ефективна робота за низьких струмів заряду;

- стійкість до від'ємних температур для систем цілорічного використання;

- мінімальні вимоги до обслуговування.

Акумулятори, здатні витримувати велику кількість циклів заряд-розряд, є найкращим вибором для роботи з ФЕП. Водночас стартерні акумулятори, які зазвичай застосовуються в автомобілях, не підходять для таких систем. Серед різноманіття АКБ найбільш поширеними є свинцево-кислотні батареї (СКА), які вирізняються невисокою вартістю експлуатації. Вартість зберігання 1 кВт·год енергії у таких акумуляторах нижча порівняно з іншими типами, виготовленими за альтернативними технологіями. Крім того, свинцево-кислотні батареї перевершують аналоги за кліматичними характеристиками, що робить їх популярним вибором для роботи у складних умовах [25].

СКА, які використовують сірчану кислоту як електроліт, а двоокис свинцю для виготовлення електродів (рис. 1.9), мають ряд недоліків, які перевищують їх переваги.



Рис. 1.9. Фрагмент СКА на номінальну напругу 230 В

Вони громіздкі, характеризуються низькою енергоємністю (до 40 Вт·год/кг) і обмеженою кількістю циклів розряду, що обмежує їх використання в більш сучасних системах.

У роботі [25] досліджується використання вдосконалених свинцево-кислотних акумуляторів, в яких електроліт замінено на скловолокно, що забезпечує здатність повного поглинання не тільки самого електроліту, але й газів, що виділяються під час хімічних процесів.

Такі акумулятори мають шарувату конструкцію, подібну до листкового пирога: чергуються електродні пластини та шари електроліту, який утримується скловолокном. Бульбашки кисню та водню, що утворюються під час роботи акумулятора, активно беруть участь у хімічних реакціях відновлення й окислення, підвищуючи їхню інтенсивність. Цей процес, відомий як рекомбінація, у сучасних AGM-акумуляторах досягає ефективності 99 %. Така технологія виключає контакт електроліту із зовнішнім середовищем, що дозволяє зберігати його хімічний склад і властивості незмінними, а також дає змогу герметизувати корпус, роблячи пристрій більш безпечним.

Основною перевагою AGM-акумуляторів є їхня здатність переносити численні глибокі розряди без значної втрати продуктивності. Це робить їх оптимальними для використання в автономних електричних системах.

У роботі [29] запропоновано використання літій-іонних (Li-ion) акумуляторів, які базуються на високій реактивності літію та його здатності проникати в кристалічну решітку іншого матеріалу.

Завдяки наноструктурній топології, Li-ion акумулятори демонструють значні переваги над іншими типами за багатьма технічними характеристиками. Li-ion АКБ здатні швидко накопичувати енергію, працюючи в режимі онлайн, а струм розряду може перевищувати заряд у три рази, забезпечуючи миттєву віддачу великої кількості енергії.

Усього 2 % початкового заряду на місяць. Акумулятор не потребує повного розрядження перед наступним циклом зарядки.

Ці характеристики роблять літій-іонні акумулятори надзвичайно ефективними для сучасних енергетичних систем.

Таблиця 1.2 Основні характеристики акумуляторних батарей [21]

Тип	Густина енергії	Потужність	Ефективність	Кількість циклів	Робоча температура
	Вт·год/кг	*Вт/кг*	%		*°С*
Кислотно-свинцевий	30-40	180	70-92	500-800	-20…+60
Li-ion	160	1800	99,9	1200	- 20…60
$LiFePO_4$	80-120	1400	99,9	<2000	- 45…80
Суперконденсатори	<10	>10000	0,9-0,98	>1000000	-40…+70

Як видно з таблиці 1.2, літій-іонні (Li-ion) акумулятори мають значні переваги над свинцево-кислотними АКБ. Основна відмінність полягає у принципах їхньої роботи. У свинцево-кислотних акумуляторах енергія накопичується за рахунок хімічної реакції між електродами та електролітом — сірчаною кислотою. Однак з часом на електродах утворюється шар сульфату свинцю, що призводить до деградації батареї. Передчасний вихід з ладу таких АКБ також відбувається через великі розрядні струми або паралельне підключення, яке зазвичай використовується для збільшення ємності.

У Li-ion акумуляторах хімічні реакції практично відсутні — накопичення та віддача заряду відбуваються за рахунок міграції іонів літію

між електродами, що забезпечує значно вищі технічні характеристики порівняно зі свинцевими АКБ.

Розвиток енергоємних технологій вимагає створення пристроїв, які здатні не лише ефективно накопичувати енергію, а й оперативно її віддавати в навантаження [31], зберігаючи стабільність характеристик протягом великої кількості циклів заряд-розряд [41]. У цьому контексті значний інтерес викликають суперконденсатори (СК), які також відомі як іоністори, ультраконденсатори або двошарові електрохімічні конденсатори [44].

Сучасні СК поєднують властивості акумуляторів та лінійних конденсаторів, витримуючи понад мільйон циклів заряд-розряд без втрати функціональності, що в 500 разів перевищує ресурс Li-ion АКБ [46]. Завдяки низькому внутрішньому опору, який у 10-30 разів менший, ніж у акумуляторах, СК забезпечують більшу потужність та струми, мінімізуючи енергетичні втрати [33].

Ємність сучасних суперконденсаторів досягає 10 000 Ф при номінальній напрузі 2,7–4 В [41]. Для роботи на високій напрузі їх з’єднують послідовно, формуючи батареї, здатні працювати на сотнях вольт.

Висновки до розділу

Фотоелектричні станції є сучасним та ефективним рішенням для використання відновлюваних джерел енергії. Їхнє впровадження на підприємствах дозволяє зменшити витрати на енергоресурси, сприяти збереженню довкілля та забезпечувати сталий розвиток енергетичної інфраструктури.

Ретельний вибір і правильна інтеграція компонентів фотоелектричної станції забезпечують її ефективність і довговічність. Використання сучасних технологій, таких як високоефективні модулі та MPPT-контролери, дозволяє значно підвищити продуктивність системи навіть у складних умовах експлуатації.

Сучасні суперконденсатори (СК) показують надзвичайно високу довговічність (понад мільйон циклів заряд-розряд), низькі втрати енергії через опір і здатність забезпечувати високі потужності. Вони займають проміжну нішу між акумуляторами та лінійними конденсаторами, відкриваючи нові можливості для енергоємних систем.

Використання інноваційних технологій, таких як AGM та LiFePO4 акумулятори, а також розвиток суперконденсаторів, дозволяє створювати автономні системи електроживлення, що відповідають сучасним вимогам енергоефективності, надійності та екологічності.

Автономні системи живлення з використанням сонячних батарей, енергоефективних акумуляторів і суперконденсаторів можуть бути ефективно впроваджені для освітлення населених пунктів, паркових зон, будівельних і ремонтних робіт, а також інших задач, які вимагають мобільності та незалежності від централізованих електромереж.

2. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1. Дослідження потоку сонячного випромінювання

Кількість сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню Землі, визначається географічними координатами місцевості та її кліматичними особливостями. Для аналізу енергетичного потенціалу сонячного випромінювання обраної території було створено й встановлено спеціальну вимірювальну систему, блок-схема якої представлена на (рис. 2.1). Ця система забезпечує вимірювання та збереження даних про щільність потоку сонячного випромінювання в режимі реального часу з інтервалом у 1 хвилину.

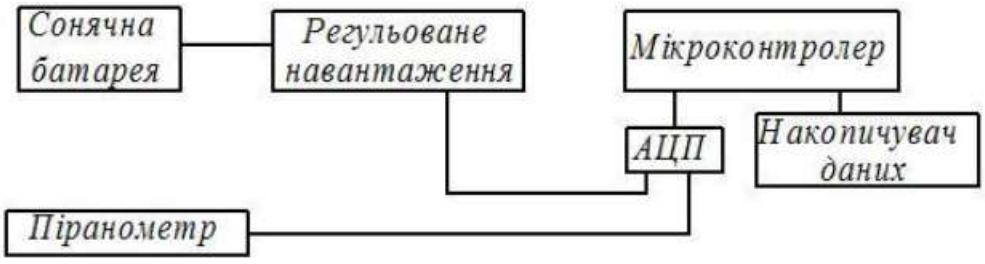


Рис. 2.1. Блок-схема установки для вимірювання сонячного випромінювання

Склад системи включає:

Мікроконтролер Atmega 32 з 32 КБ Flash-пам’яті, 2 КБ SRAM та 32 робочими регістрами, який виконує обробку і збереження отриманих даних за допомогою 10-бітного аналогово-цифрового перетворювача (АЦП);

MicroSD накопичувач для збереження даних;

Регульоване навантаження;

Сонячна батарея ALM-50M;

Піранометр для фіксації щільності сонячного випромінювання.

Дана установка забезпечує вимірювання густини енергетичного потоку сонячного випромінювання, а також кількості електроенергії, що генерується сонячною батареєю. У якості джерела енергії використовується сонячна батарея типу ALM-50M з резистивним регульованим навантаженням. Електрична схема енергетичного блоку системи наведена на рис. 2.2.

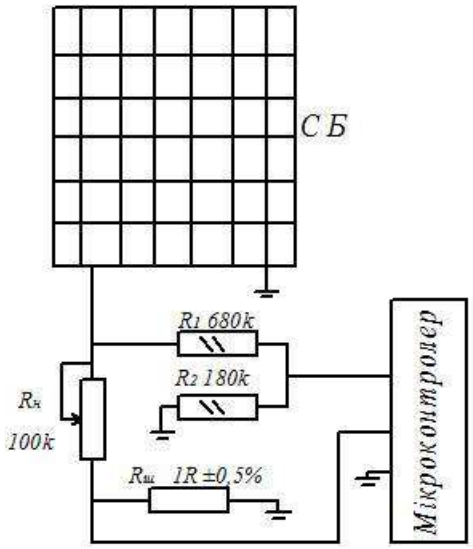


Рис. 2.2. Електрична схема блоку вимірювання

Напруга, що генерується сонячною батареєю, подавалася на навантаження Rn, подільник напруги R1, R2, а також шунт Rш.

Струм навантаження визначався шляхом вимірювання падіння напруги на шунті Rш, з похибкою ±0,5%. Для вимірювання напруги на виході сонячної батареї застосовувався подільник R1, R2, виготовлений із високоомних резисторів, що мінімізувало їхній вплив на результати вимірювань. Похибка подільника становила ±2%. Генерована потужність електричного струму обчислювалася за формулою P=U·I. Опір навантаження

підбирався так, щоб відповідати режиму максимальної потужності сонячної батареї.

Пристрій також складався з фотоприймача F на основі монокристалічного кремнію, блоку перетворення струму в напругу A та блоку підсилення сигналу B. Робота фотоприймача здійснювалася в режимі короткого замикання, при якому різниця напруг на входах диференціального підсилювача залишалася близькою до нуля. Це забезпечувало мінімальний вхідний струм підсилювача, а струм зворотного зв’язку дорівнював за величиною фотоструму фотодіода, але мав протилежний напрямок.

Вихідна напруга каскаду обчислювалася за формулою:

$$U=R\cdot I, \tag{2.1}$$

де R — опір резистора в зворотному ланцюзі, а I — фотострум, що генерується фотодіодом. Завдяки регульованому підсиленню другого каскаду B у межах від 0 до 5 В та можливості перемикання чотирьох резисторів у зворотному ланцюзі першого каскаду A, можна було проводити вимірювання густини світлового потоку в діапазонах 2, 20, 200 і 2000 Вт/м².

Вимірювання виконувалися при куті нахилу поверхні фотоприймача до горизонту a = 49o, що є оптимальним для широти Кропивницького. Всі дослідження проводилися відповідно до ДСТУ EN 60904-1:2009.

2.2. Аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання на широті м. Кропивницький

У процесі дослідження енергетичного потенціалу сонячного випромінювання важливо враховувати не лише географічне розташування місцевості, але й її кліматичні особливості. Сучасні метеорологічні служби

України надають дані про температуру, хмарність, швидкість вітру, висоту хмар і атмосферний тиск для обласних і районних центрів. Однак серед цих параметрів відсутня інформація про потік сонячного випромінювання.

Для встановлення залежності між рівнем хмарності та інтенсивністю сонячного випромінювання було проведено експериментальні дослідження густини потоку сонячного випромінювання на широті міста Кропивницький. Розташування фотодатчика обиралося так, щоб уникнути штучного затінення і забезпечити максимально точні та об’єктивні результати вимірювань.

Вимірювання здійснювалися з нахилом фотоприймача під оптимальним для широти Кропивницького кутом $\alpha=49^{o}$. Дослідницька робота розпочалася в травні 2019 року. На рисунках 2.3–2.4 представлені дані щодо густини потоку сонячного випромінювання, а також динаміка змін потужності, що генерується сонячною батареєю, протягом травня 2019 року.

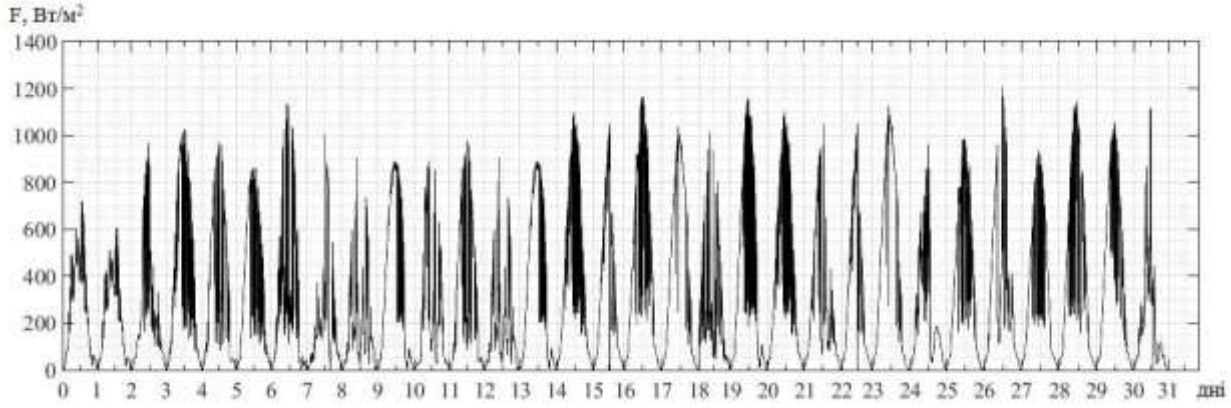


Рис. 2.3. Графік зміни густини потоку сонячного випромінювання (2019 р)

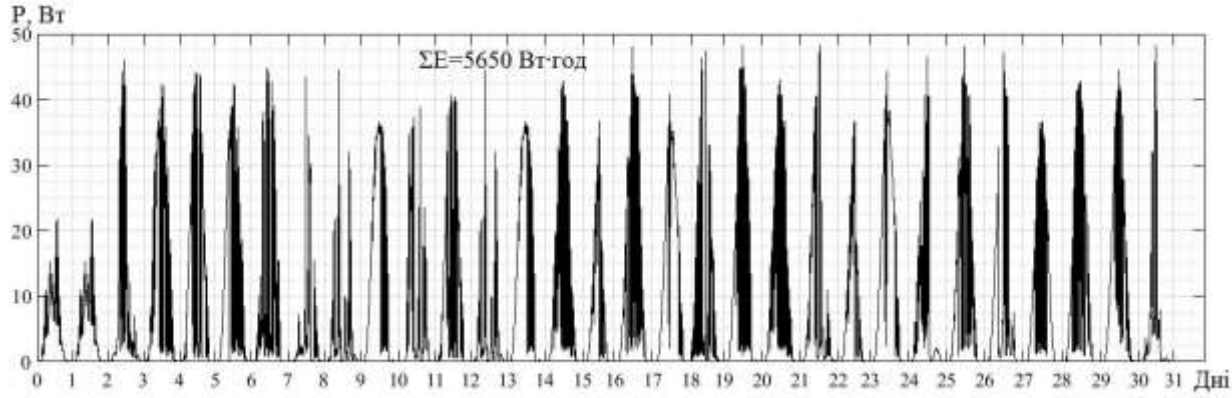


Рис. 2.4. Графік зміни потужності сонячної батареї у травні 2019

З використанням графіків потужності сонячної батареї було виконано розрахунок енергії у Вт·год, яку генерувала батарея протягом кожного місяця 2019-2020 років: травень — 5650, червень — 6406, липень — 6750, серпень — 6625, вересень — 4700, жовтень — 2320, листопад — 1820, грудень — 1680, січень — 2040, лютий — 2880, березень — 3570, квітень — 4850. Вимірювання здійснювалися за умови постійного навантаження R = 6 Ом, яке відповідало максимуму потужності та було рівне внутрішньому опору сонячної батареї.

Для реєстрації даних використовувався часовий інтервал у 1 хвилину, що забезпечувало стабільність вимірювань при зміні енергетичного потоку в межах ±10 %. Визначення енергії сонячного випромінювання протягом доби проводилося за допомогою статистичної обробки виміряних даних, яка полягала у побудові часових розподілів густини потоку випромінювання. Під час цього використовувалися дискретні значення потоку з кроком 10 Вт/м². Обробку результатів виконували в середовищі Matlab із застосуванням методу найменших квадратів. Також проведено аналіз добового розподілу густини сонячного випромінювання, що дозволило класифікувати дні місяця за рівнем прозорості атмосфери.

На рисунку 2.5 наведено графіки розподілу густини потоку випромінювання для трьох типів днів травня 2019 року: сонячного (безхмарного), похмурого (з помірною хмарністю) і хмарного. Відповідно до 10-бальної шкали ступеня хмарності, яку використовують метеослужби, безхмарний стан атмосфери відповідає 0-3 балам, помірна хмарність — 4-6 балів, а хмарний стан — 7-10 балів.

З аналізу отриманих графіків було визначено енергію сонячного випромінювання для різних типів днів: для сонячного E = 6,03 кВт·год/м^2 для похмурого E = 2,8 кВт·год/м^2 , а для хмарного E = 1,54 кВт·год/м^2. Ці показники відображають енергію, що потрапляє на площу 1 м², нахилену під кутом 49° до горизонту.

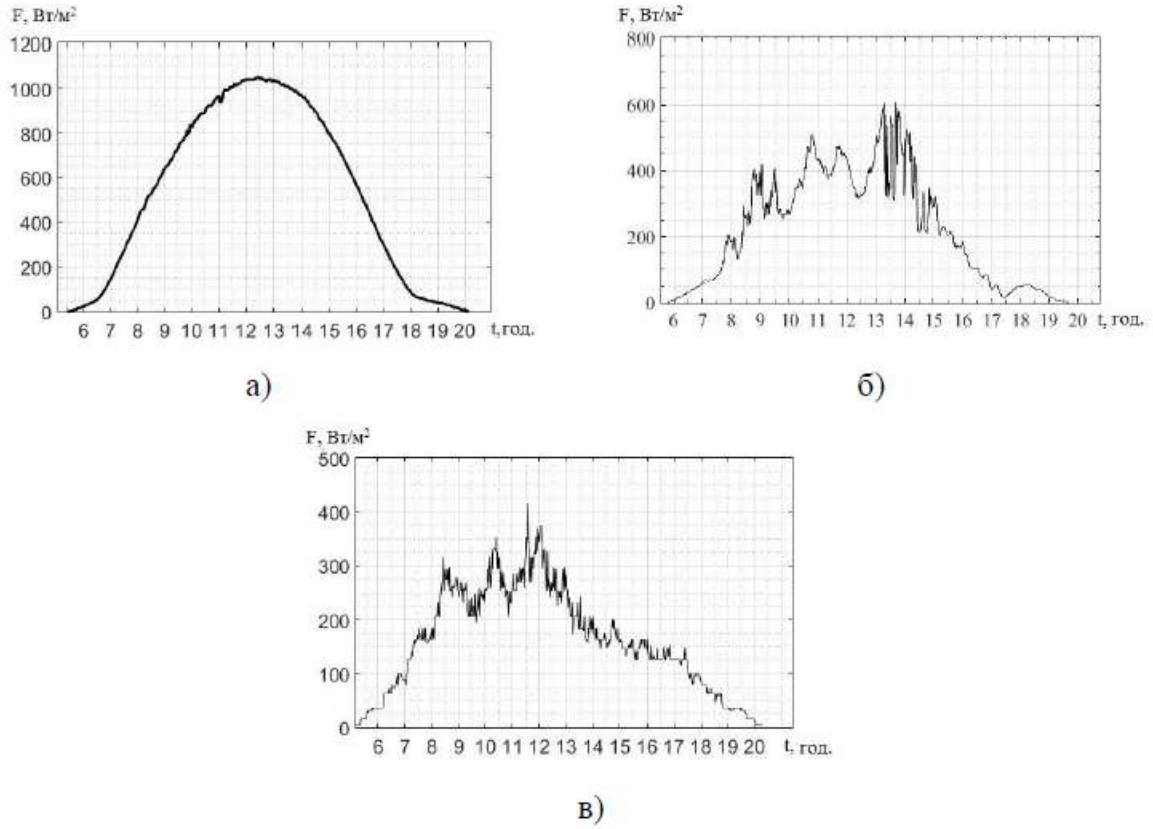


Рис. 2.5. Графік зміни густини потоку сонячного випромінювання:
а) сонячного дня; б) похмурого дня; в) хмарного дня

На основі зібраних даних було проведено аналіз розподілу годин за типами погодних умов (сонячні, похмурі та хмарні) для кожного місяця. Додатково обчислено показники щоденної густини потоку сонячної радіації для різних погодних станів: Fc (сонячно), Fп (похмуро), Fx (хмарно), а також їх усереднене значення Fсер. Результати цих обчислень представлено в таблиці 3.2. Аналогічну методику розрахунків було застосовано до всіх досліджуваних місяців.

Таблиця 2.1. Помісячний розподіл хмарності та густини потоку сонячного випромінювання за період 2019-2021 років

Місяць	Кількість хмарних годин	F_x, $Вт/м^2$	Кількість похмурих годин	F_n, $Вт/м^2$	Кількість сонячних годин	F_c, $Вт/м^2$
Травень	151,4	174	115,1	265	174,7	465
Червень	144,2	189	105,4	275	196,3	489
Липень	131,9	230	95	320	240	523
Серпень	130	155	90	270	245	490
Вересень	135	105	83	205	190	370
Жовтень	205	75	50	115	28	161
Листопад	192	64	54	142	16	153
Грудень	171	80	23	145	37	240
Січень	197	81	27	157	46	330
Лютий	185	126	46	197	59	370
Березень	169	145	75	217	131	402
Квітень	157	153	102	240	166	453

Графічне зображення 2.6 демонструє динаміку розподілу енергетичного потоку сонячної радіації за період травень-жовтень 2016 року. Аналіз графічних даних за травень і червень (рис. 2.6. а, б) показує, що випромінювання з густиною потоку до 200 Вт/м2 спостерігається впродовж 300-1400 хвилин, тоді як потоки, що перевищують 200 Вт/м2, фіксуються протягом 50-300 хвилин. Математичний опис часового розподілу енергетичних потоків в діапазоні 0-200 Вт/м2 підпорядковується експоненціальним залежностям: $F=334e^{-0.0022\tau}$ для травня та $F=324e^{-0.0024\tau}$ для червня.

Дослідження показників за липень, серпень і вересень (рис. 2.6 в, г, д)

виявляє схожу тенденцію розподілу енергетичного потоку з травнем і червнем. Однак відмінною рисою є подовжена тривалість дії потоків у межах 800-900 Вт/м^2, що візуально відображається у вигляді пікових значень на графіках. Часовий розподіл енергетичних потоків у діапазоні 0-200 Вт/м^2 для цих місяців також характеризується експоненціальною залежністю.

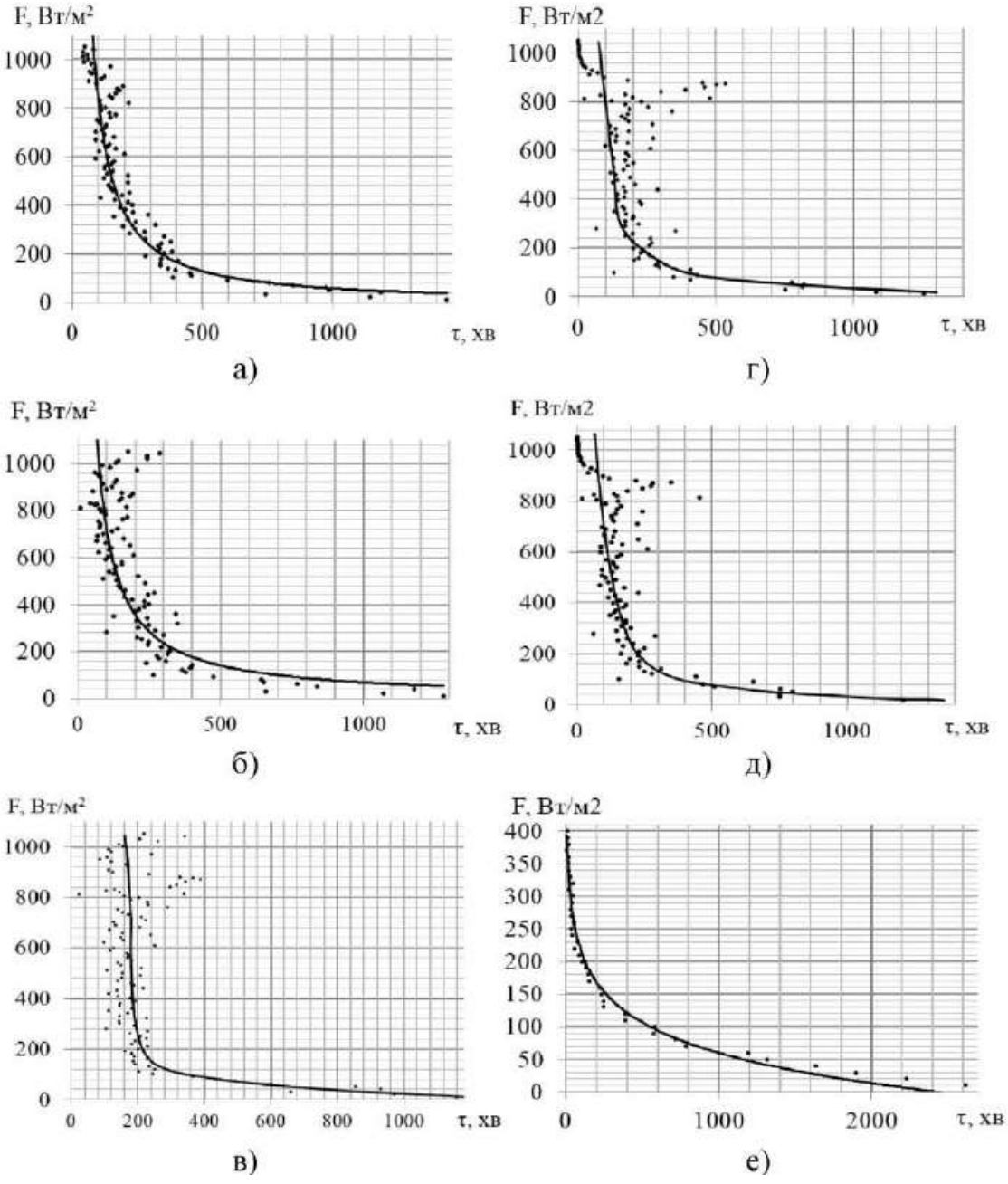


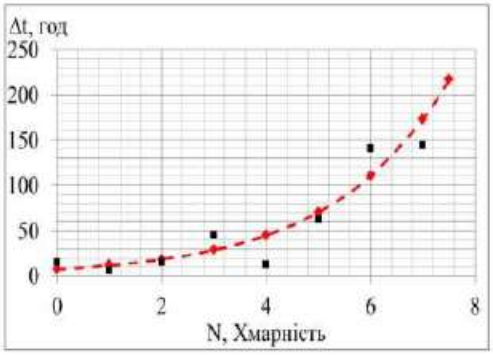
Рис. 2.5. Місячний розподіл густини потоку сонячного випромінювання: а) травня; б)червня; в) липня; г) серпня; д) вересня; е) жовтня

У Кропивницькому протягом осінньо-зимового сезону спостерігається характерне скорочення тривалості сонячної активності з потужністю понад 200 Вт/м². Часову динаміку розподілу енергетичного потоку сонячної радіації за жовтень 2019 року відображено на рис. 2.5 е. Для енергетичних потоків діапазону 0-200 Вт/м² встановлено математичну залежність $F=190e^{-0,001}$. Подібні закономірності були зафіксовані у листопаді, грудні та січні, де розподіл описується рівнянням $F=170e^{-0,001}$.

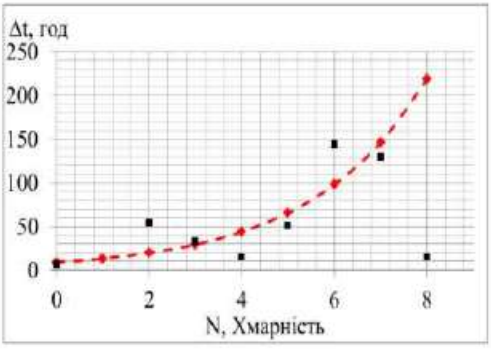
З настанням весняного періоду в регіоні Кропивницького відзначається подовження періоду дії потоків, що перевищують 200 Вт/м². У лютому часовий розподіл енергетичних потоків нижче 200 Вт/м² характеризується функцією $F=205e^{-0,0041}$. Березень та квітень демонструють аналогічні тенденції, які математично виражаються формулою $F=275e^{-0,001}$.

2.3. Вплив ступеню хмарності на густину енергії сонячного випромінювання

З метою дослідження розподілу періодів з різним ступенем хмарності N було виконано статистичний аналіз метеорологічних даних, отриманих з офіційного порталу метеослужби. За результатами обробки інформації створено графічні залежності, що відображають тривалість Δt кожного рівня хмарності помісячно протягом 2019-2021 років. На створених графіках середні показники тривалості для відповідних ступенів хмарності позначено пунктирними лініями.



а)



б)

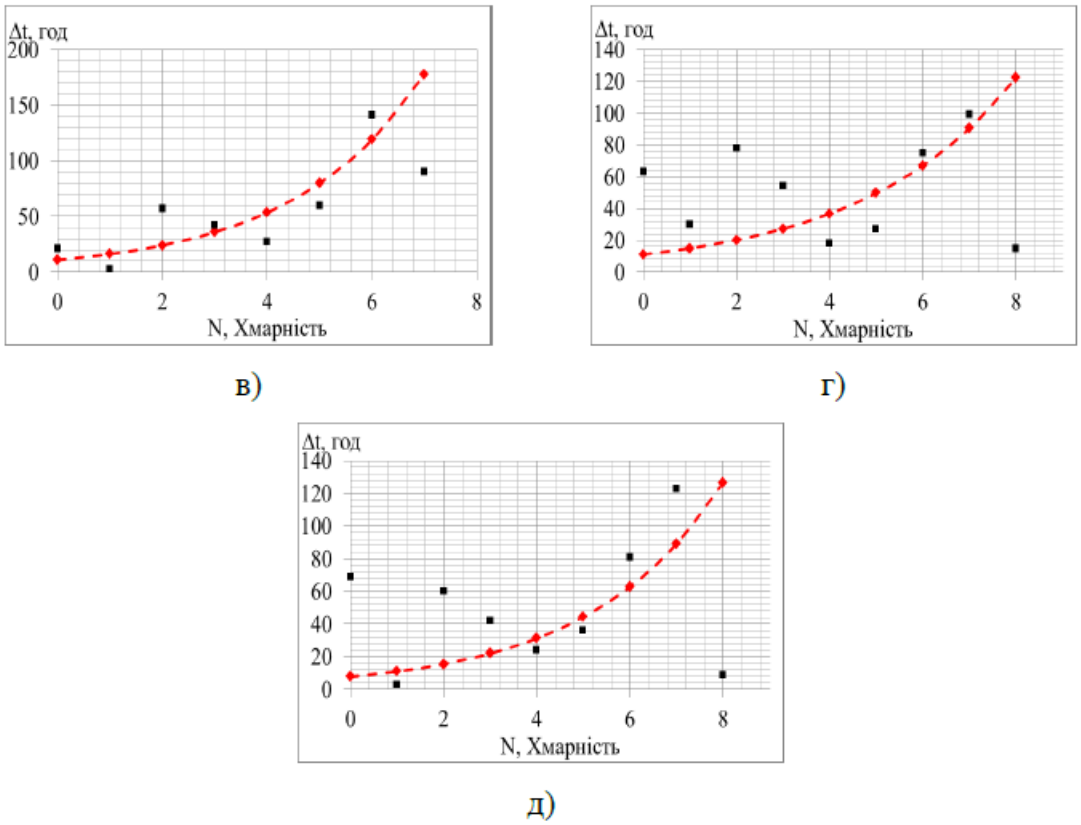


Рис. 2.6. Рівень хмарності протягом:
а) травня; б) червня; в) липня; г) серпня; д) вересня 2016 року

Протягом весняно-літнього сезону (рис. 2.6. а, б, в, г, д) спостерігається тенденція до збільшення періодів з ясним небом. Починаючи з травня, тривалість періодів з низькою хмарністю (0-3 бали) зростає в межах від 20 до 80 годин, а для помірної хмарності (4-6 балів) цей показник збільшується від 20 до 150 годин. Водночас відбувається скорочення періодів значної хмарності (7-8 балів) зі 150 до 100 годин.

В осінньо-зимовий період (рис. 2.7 а, б, в), починаючи з жовтня, фіксується зворотна динаміка: тривалість періодів з мінімальною хмарністю (0-3 бали) скорочується до 10-30 годин, а періоди з помірною хмарністю (4-6 балів) зменшуються до 5-35 годин. Натомість суттєво подовжуються інтервали зі значною хмарністю (7-8 балів), охоплюючи період від 80 до 180 годин.

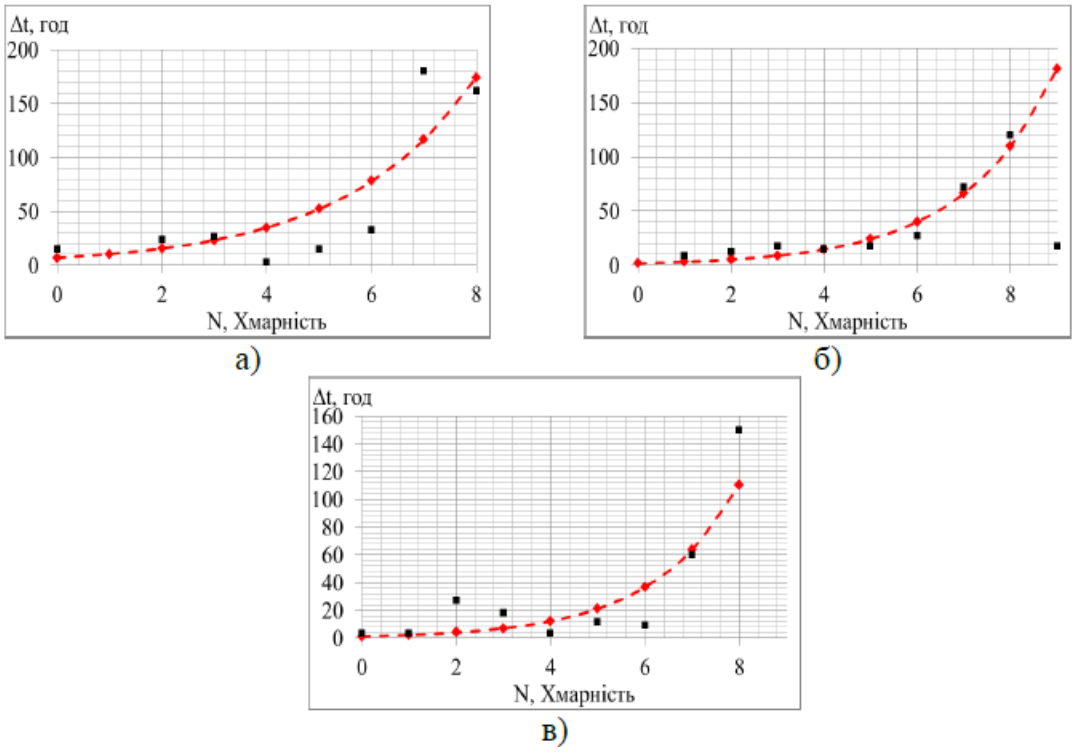


Рис. 2.7. Місячний розподіл рівня хмарності протягом 2019 р.:
а) жовтня б) листопада; в) грудня

Графічні дані за січень, лютий, березень і квітень 2020 року представлені на рис. 2.8. Аналіз діаграм демонструє, що періоди з низькою хмарністю (0-3 бали) тривають від 10 до 20 годин, помірна хмарність (3-6 балів) спостерігається впродовж 20-50 годин, а інтервали зі значною хмарністю (7-8 балів) охоплюють період від 90 до 140 годин.

На підставі усереднених показників тривалості кожного ступеня хмарності за місяць було встановлено функціональні залежності $\Delta t = f(N)$, які систематизовано в таблиці 2.2. Всі обчислення та аналіз даних здійснювалися за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel.

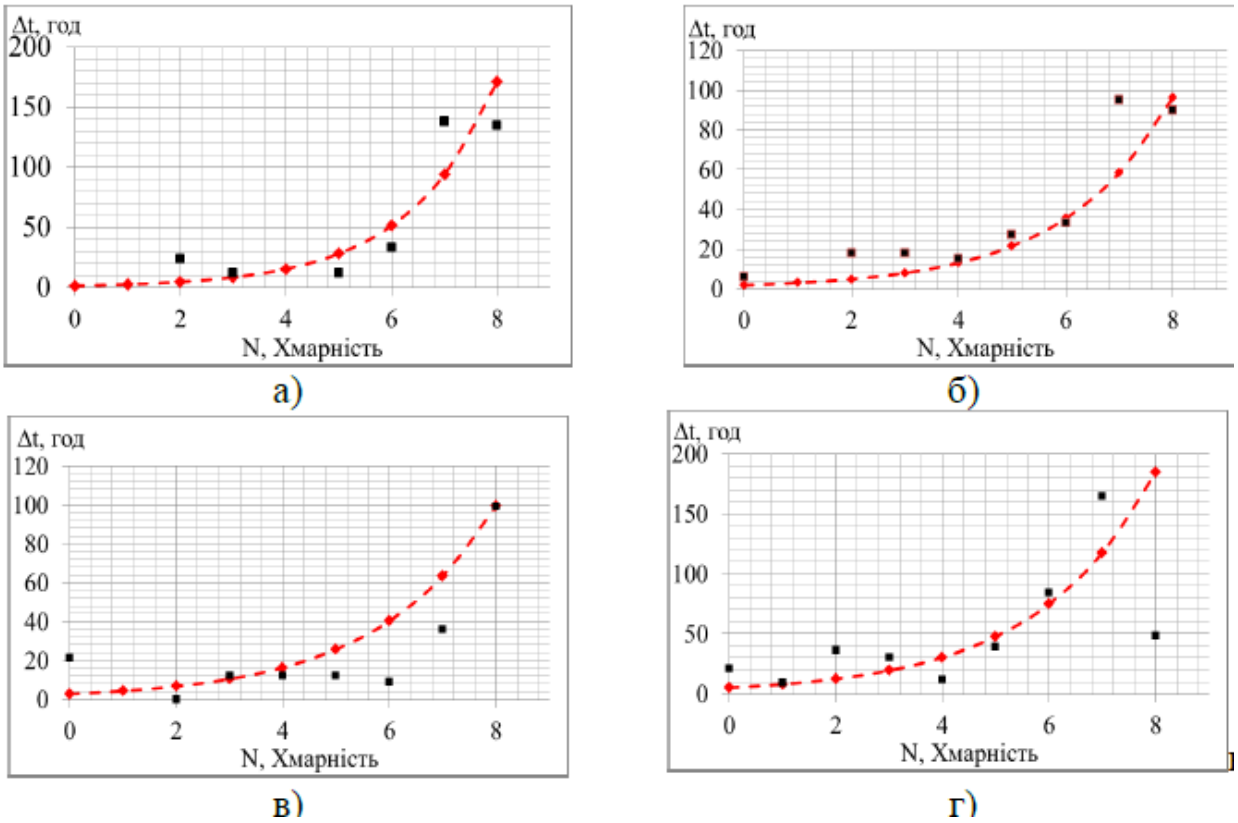


Рис. 2.8. Розподіл тривалості рівня хмарності протягом 2020 р.:
а) січня; б) лютого; в) березня; г) квітня

Отримані залежност тривалості стану атмосфери із даним рівнем хмарності за 2019-2021 роки.

Травень	Δt=7,413e0.45N
Червень	Δt=8,89e0.4N
Липень	Δt=10,81e0.4N
Серпень	Δt=11,09e0.3N
Вересень	Δt=7,7e0.35N
Жовтень	Δt=7,1e0.4N
Листопад	Δt=2,01e0.5N
Грудень	Δt=1,36e0.55N
Січень	Δt=1,14e0.6N
Лютий	Δt=1,767e0.5N
Березень	Δt=2,718e0.45N

Квітень $\Delta t=5,04e0.45N$

Графічні зображення 2.9 та 2.10 відображають кореляцію між добовою енергією сонячної радіації та усередненим показником хмарності для кожного місяця протягом 2019-2021 років. Візуалізацію даних було здійснено на основі усереднених експериментальних вимірювань сонячної енергії та середньодобових показників хмарності. Аналітична обробка результатів проводилася з використанням Microsoft Excel, а оптимізація даних виконувалася за допомогою методу найменших квадратів.

Процес обробки даних включав наступні етапи: формування інформаційних масивів показників хмарності та виміряних значень сонячної енергії; статистичне усереднення отриманих даних; візуалізація залежності енергії сонячного випромінювання від хмарності E=f(N); обчислення середньодобових та сумарних показників сонячної енергії в межах місячних та річних періодів.

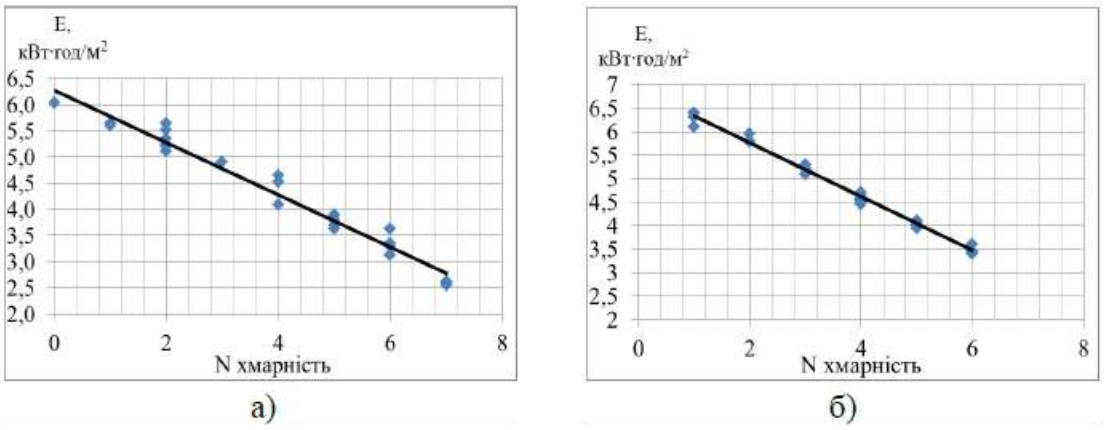


Рис. 2.9. Залежність енергії сонячного випромінювання за одну добу від ступеня хмарності протягом: а) травня; б) червня;

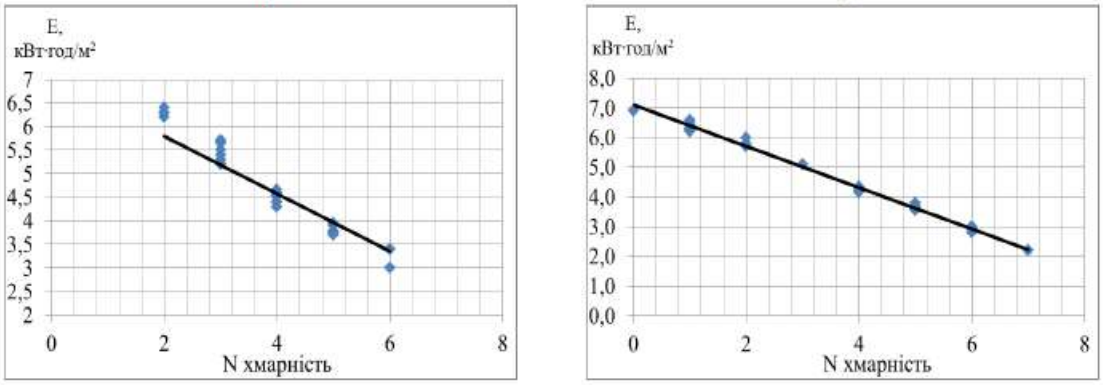


Рис. 2.9. Залежність енергії сонячного випромінювання за одну добу від ступеня хмарності протягом:
в) липня; г) серпня

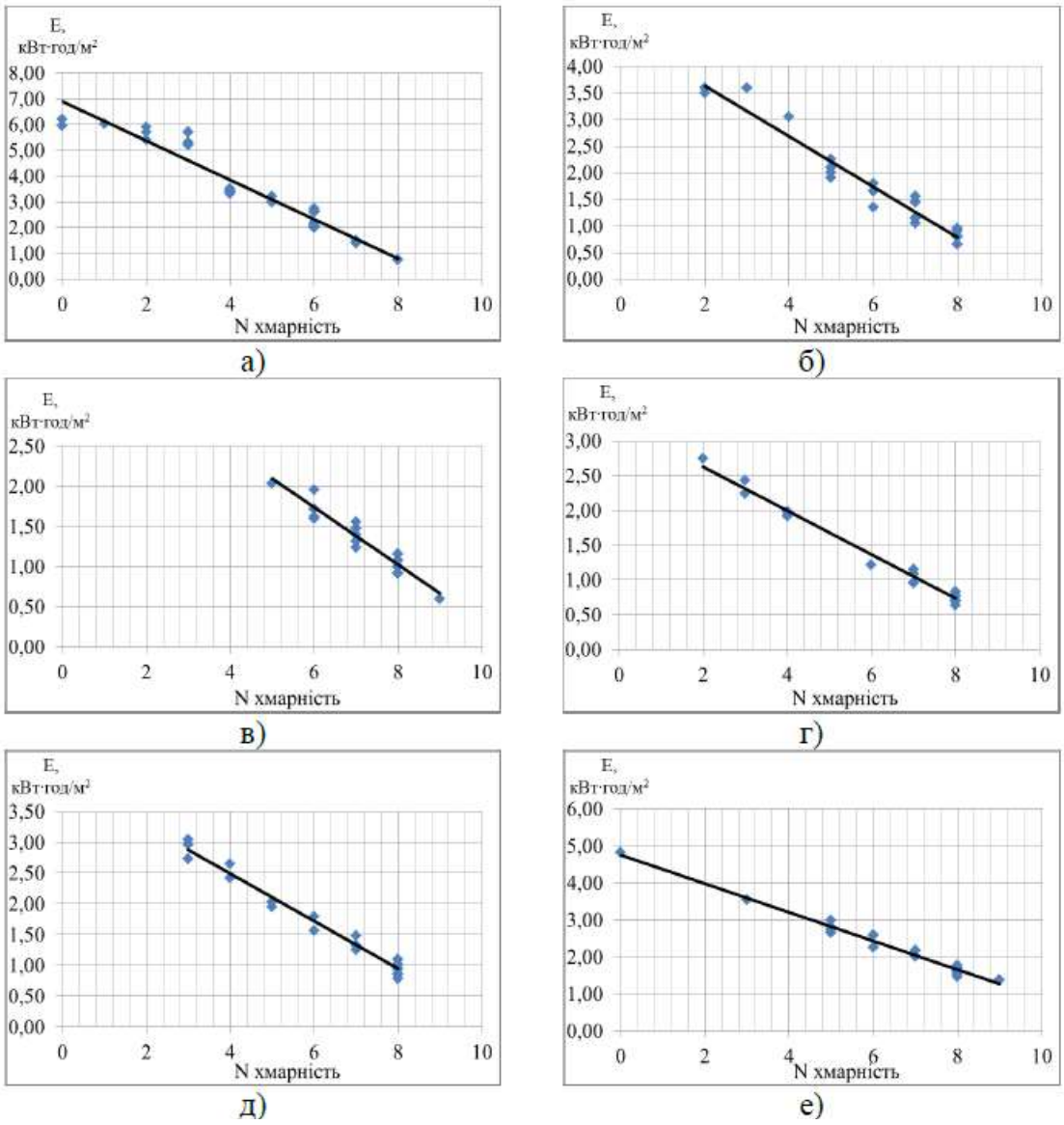


Рис. 2.10. Залежність енергії сонячного випромінювання за одну добу

від ступеня хмарності протягом:

а) вересня; б) жовтня; в) листопада; г) грудня; д) січня; е) лютого

Беручи до уваги сезонну варіативність тривалості світлового дня та кута падіння сонячних променів, було проведено комплексний аналіз взаємозв'язку між надходженням сонячної енергії та метеорологічними умовами регіону, зокрема хмарністю, для кожного місяця 2016-2017 років. У таблиці 2.2 представлено результати досліджень у вигляді функціональних залежностей Есер=f(N), де Есер позначає щодобову густину сонячної енергії (кВт·год/м²), що надходить на поверхню, встановлену під кутом 49° до горизонтальної площини, а N відображає усереднений показник хмарності протягом доби.

Таблиця 2.2 Залежності середньодобової сонячної енергії від середньодобової хмарності

Місяць	$E_{сер}=f(N)$
Травень	$E_{сер} = -0,5467 \cdot N + 6,2689$
Червень	$E_{сер} = -0,5575 \cdot N + 7,0102$
Липень	$E_{сер} = -0,7624 \cdot N + 7,8964$
Серпень	$E_{сер} = -0,677 \cdot N + 7,1902$
Вересень	$E_{сер} = -0,6072 \cdot N + 5,9676$
Жовтень	$E_{сер} = -0,4736 \cdot N + 4,567$
Листопад	$E_{сер} = -0,4 \cdot N + 4,195$
Грудень	$E_{сер} = -0,32 \cdot N + 3,263$
Січень	$E_{сер} = -0,386 \cdot N + 4,0385$
Лютий	$E_{сер} = -0,3871 \cdot N + 4,7581$
Березень	$E_{сер} = -0,5095 \cdot N + 5,814$
Квітень	$E_{сер} = -0,5334 \cdot N + 6,455$

Використовуючи метеорологічні дані та встановлені закономірності, було здійснено аналіз енергетичного потенціалу сонячної радіації за період з 2016 по 2020 рік. Результати обчислень щодо помісячного розподілу енергії сонячного випромінювання представлено у таблиці 2.3.

У ході дослідження було визначено як інтегральні річні показники, так і усереднені добові значення щільності сонячної енергії. За досліджуваний часовий проміжок річний енергетичний потенціал варіювався у діапазоні від 994,4 до 1130 кВт·год/м², тоді як середньодобові показники знаходились в інтервалі 2,7-3,1 кВт·год/м².

Таблиця 2.3. Середньомісячна густина енергії сонячного випромінювання

Місяць	2020 *E, кВт·год /м²*	2019 *E, кВт·год /м²*	2018 *E, кВт·год /м²*	2017 *E, кВт·год /м²*	2016 *E, кВт·год /м²*	Середнє значення *E, кВт·год /м²*
Січень	54,5	45,5	44,4	39,7	45,5	47,6
Лютий	72,7	65,7	72,0	69,6	59,2	69,5
Березень	105,0	83,2	99,9	99,5	82,1	95,5
Квітень	109,1	106,3	114,0	101,9	120,7	110,2
Травень	132,3	136,0	115,0	102,5	108,9	117,7
Червень	131,3	138,1	134,9	120,1	124,5	129,0
Липень	136,4	145,4	134,6	122,9	131,0	134,9
Серпень	139,4	142,7	138,1	124,3	131,2	133,7
Вересень	99,0	101,7	76,1	103,6	67,6	90,6
Жовтень	73,7	49,2	56,8	73,0	52,3	59,5
Листопад	48,5	38,7	47,8	46,0	42,5	43,7
Грудень	39,4	35,8	48,5	33,2	38,9	38,8
Річна енергія	1141	1088	1082	1037	1004	1071

На основі усереднених помісячних даних протягом п’яти років (2016-

2020 р.), було побудовано графік зміни середньомісячного значення густини потоку сонячної енергії протягом року, який представлений на рис. 2.11.

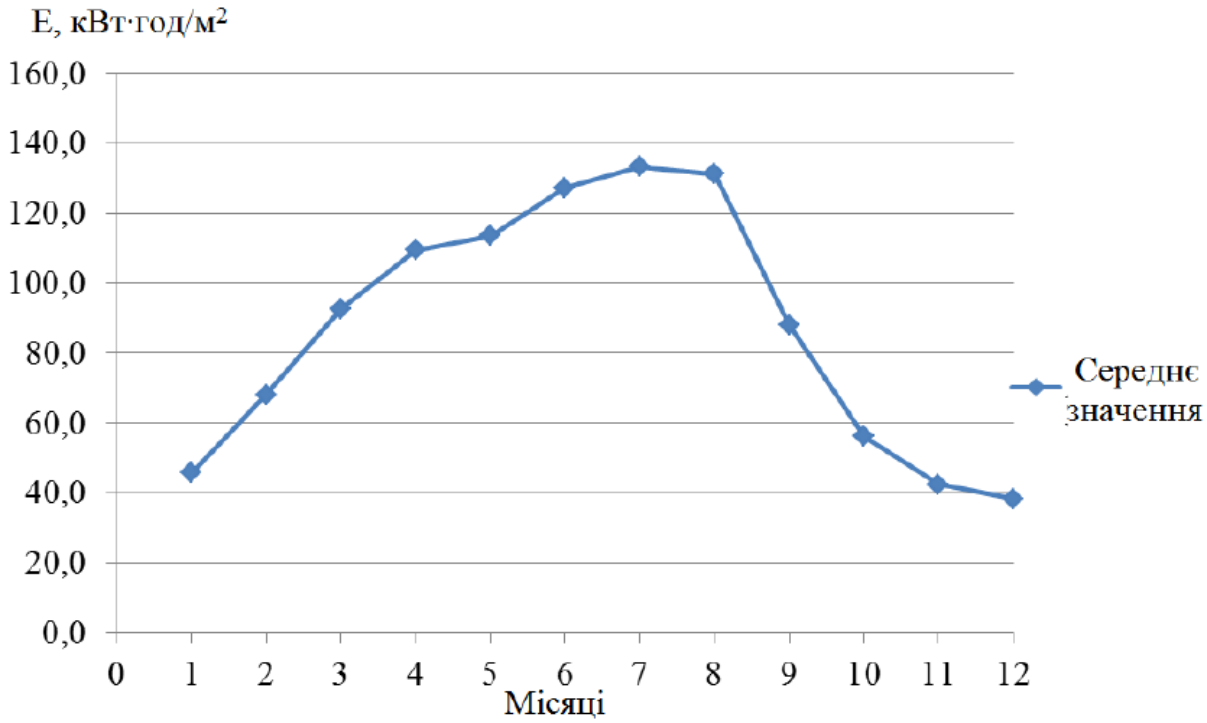


Рис. 2.11. Річний графік зміни середньомісячного значення густини енергії сонячного випромінювання

Графік місячних змін сонячної енергії протягом 2020 року приведено на рис. 2.12. На ньому ж приведений графік помісячного споживання електроенергії Woc на зовнішнє освітлення м. Кропивницького



Рис. 2.12. Графік зміни сонячної енергії та спожитої енергії зовнішнім освітленням для м. Кропивницького протягом року.

2.4. Моніторингу енергетичного потенціалу сонячного випромінювання населених пунктів Центральноукраїнського регіону України

З метою поширення отриманих залежностей густини енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності були проведені розрахунки енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для м. Кропивницького, м. Олександрія, м. Бобринця та м. Гайворон. Для цього були використані дані метеослужб для цих міст протягом 2020 року. Використовуючи значення середньодобового ступеня хмарності та аналітичні залежності приведені в табл. 2.3, було розраховано середньодобову поверхневу густину енергії сонячного випромінювання Ероз, кВт*год/м^2.

Розрахунок проводився для поверхні розташованої під кутом 49° до горизонту. На основі розрахованої середньодобової густини енергії сонячного випромінювання та даних метеослужб було розраховано помісячну енергію сонячного випромінювання Ероз, кВт*тод/м^2 за 2020 рік для м. Кропивницького, м. Бобринця, м. Олександрія та м. Гайворон. Дані приведені в табл. 2.4. Також в даній таблиці приведено помісячну енергію сонячного випромінювання NASA, для поверхні розташованої під кутом 49° до горизонту, які були взяті із сайту NASA [19]. На основі розрахованих даних було проведено розрахунок сумарної річної поверхневої густини енергії сонячного випромінювання.

Сумарна річна поверхнева густина енергії за даний період для м. Кропивницького становить 1094 кВтгод/м , м. Олександрія - 1116 кВтгод/м , м. Бобринецького - 995 кВтгод/м та м. Гайворон - 1117 кВтгод/м , а відхилення від даних, приведених на сайті NASA не перевищує 7-14 %.

Таким чином отримані залежності густини енергії сонячного випромінювання від ступеня хмарності можна використовувати для визначення енергетичного потенціалу сонячного випромінювання населених пунктів Центральноукраїнського регіону на основі даних метеослужб.

Таблиця 2.4 Розрахована густина енергії сонячного випромінювання

Місяць	Кропивницький		Олександрія		Бобринець		Гайворон	
	$E_{розр}$ кВт*год/ м^2							
Січень	51	59	49	58	52	62	52	60
Лютий	67	76	68	74	65	76	67	78
Березень	91	109	92	109	79	106	89	116
Квітень	106	118	109	117	104	112	114	124
Травень	126	140	131	146	99	126	111	153
Червень	133	134	136	139	125	127	135	145
Липень	140	139	142	141	130	133	147	153

Продовження таблиці 2.4

Місяць	Кропивницький		Олександрія		Бобринець		Гайворон	
	$E_{розр}$ *кВт*год/* $м^2$							
Серпень	146	137	143	139	143	133	156	148
Вересень	95	107	97	109	82	105	99	115
Жовтень	62	82	69	85	57	85	73	91
Листопад	48	55	48	54	37	60	45	56
Грудень	39	48	41	48	32	52	40	53
Сумарна річна енергія	1105	1205	1127	1220	1005	1177	1128	1291

Із розрахованих даних за 2020 рік для м. Кропивницького, м. Олександрії, м. Бобринця та м. Гайворон, було побудовано графік зміни помісячного значення густини потоку сонячної енергії протягом 2020 року, який представлений на рис. 2.13. Як видно рис. 2.11 ефективна робота сонячних батарей можлива в період з березня по вересень. В інші місяці, в результаті зменшення сонячного дня, а також збільшення хмарних днів, ефективність сонячних систем зменшується.

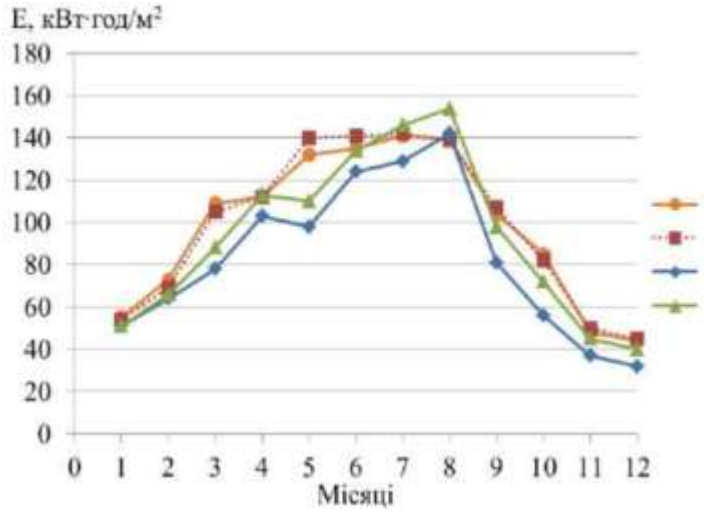


Рис. 2.13. Графік зміни густини енергії сонячного випромінювання

Висновки до розділу

У даній роботі було реалізовано комплексний підхід до дослідження сонячної радіації у регіоні. Розроблено та впроваджено експериментальний комплекс для фіксації та моніторингу інтенсивності сонячного випромінювання. Це дозволило провести детальний аналіз часової динаміки поверхневої густини сонячної радіації для Кропивницького, охоплюючи період 2019-2030 років з помісячною деталізацією.

Досліджено кореляцію між хмарністю та інтенсивністю сонячного випромінювання протягом 2019-2020 років. На основі зібраних даних встановлено математичну залежність Ecep=f(N), що пов'язує середньодобову поверхневу густину сонячної енергії зі ступенем хмарності. Застосування цієї моделі дозволило розрахувати енергетичні показники для періоду 2016-2020 років у Кропивницькому. Виявлено, що річна густина енергії варіюється в діапазоні 995-1130 кВт·год/м², з середнім значенням 1060 кВт·год/м². Примітно, що варіативність показників за шестирічний період не перевищує 7% від середнього значення.

Розширюючи географію дослідження, проведено порівняльний аналіз сонячного потенціалу чотирьох міст регіону за 2017 рік. Зафіксовано такі показники річної густини енергії: Кропивницький - 1094 кВт·год/м², Олександрія - 1116 кВт·год/м², Бобринець - 995 кВт·год/м², Гайворон - 1117 кВт·год/м². При зіставленні з даними NASA розбіжність становить 7-14%, що свідчить про достатню точність проведених вимірювань.

3. МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ В СИСТЕМІ ОСВІТЛЕННЯ

3.1. Розрахунок фотоелектричної енергетичної установки для зовнішнього освітлення

Інноваційна енергетична установка базується на інтеграції сонячного модуля з накопичувальними елементами (Li-іонними акумуляторами або суперконденсаторами), комплексною системою керування та світловим приладом.

Інтелектуальна система керування забезпечує автоматичне регулювання роботи світлового приладу залежно від рівня природного освітлення, який визначається за напругою на сонячній батареї. Для запобігання небажаного спрацьовування під час значної хмарності, система оснащена програмованим таймером з діапазоном налаштування 0-9 годин. Додатково реалізовано функцію контролю процесів заряду-розряду акумуляторних батарей.

З метою оптимізації енергоспоживання впроваджено комбіновану систему, що поєднує датчик руху з широтно-імпульсним модулятором для регулювання світлового потоку. При настанні сутінків освітлення активується в економному режимі (20-50% потужності). При детекції руху в радіусі 10-12 метрів система переходить на повну потужність, а після залишення зони детекції повертається до чергового режиму. Такий алгоритм дозволяє досягти 50% економії енергії акумуляторів.

Система керування також включає інвертор для перетворення постійного струму в змінний та модуль балансування напруги на елементах акумуляторної батареї.



Рис. 3.1. Схема енергетичної установки для зовнішнього освітлення населених пунктів

Для визначення необхідної потужності сонячної електростанції ключовим параметром є аналіз енергоспоживання системи зовнішнього освітлення населеного пункту з помісячною деталізацією.

Для розрахунку денної генерації електроенергії одним фотоелектричним модулем використовується наступна математична модель:

$$E_{СБ} = \mu \cdot E_{сер} \cdot S_0, \tag{3.1}$$

де μ відображає ефективність перетворення сонячної енергії в електричну (ККД модуля); Есер - представляє усереднену денну інсоляцію; S_0 - є активною площею одного фотоелектричного модуля в квадратних метрах.

Загальну кількість необхідних фотоелектричних модулів та сумарну площу фотоелектричної системи визначають шляхом співвідношення енергетичних потреб освітлювальної мережі (Wосв) до генераційної здатності одного модуля (ЕСБ).

$$N = W_{осв} / E_{СБ}. \tag{3.2}$$

$$S = N \cdot 1{,}66,\ м^2. \tag{3.3}$$

При проектуванні накопичувальної системи враховувалась тривалість роботи освітлювальної мережі, яка становить від 8 до 13 годин. Оптимальним вибором для реалізації системи накопичення є літій-іонні акумулятори або суперконденсатори, що характеризуються розширеним температурним діапазоном функціонування та мінімальними втратами на саморозряд порівняно з альтернативними технологіями. Для конкретизації розрахунків було обрано акумуляторний блок LP48100ES з характеристиками: номінальна ємність 100 А·год при напрузі 48 В.

Розрахунок необхідної ємності акумуляторної системи здійснюється за формулою:

$$C_б = W_{осв}/(U_б \cdot k), \tag{3.4}$$

де Wосв відображає енергетичні потреби системи освітлення; Uб - є номінальною напругою акумуляторного блоку; k - представляє коефіцієнт глибини розряду (0,8 для літій-іонних акумуляторів та 1,0 для суперконденсаторів)

Визначення кількості акумуляторних блоків проводиться через співвідношення розрахованої необхідної ємності до номінальної ємності одного блоку.

$$n = C_б/(C \cdot \mu_б), \tag{3.5}$$

Для літій-іонних акумуляторів та суперконденсаторів характерний високий коефіцієнт корисної дії $\mu_б$, що сягає 0,99.

Гнучкість конфігурації системи досягається через послідовно-паралельне з'єднання фотоелектричних модулів, що дозволяє оптимізувати вихідні електричні параметри відповідно до потреб установки.

У запропонованій конфігурації реалізовано два паралельних масиви по 24 послідовно з'єднаних модулів, що забезпечує наступні електричні характеристики: номінальна напруга - 732 В, напруга холостого ходу - 893 В, струм короткого замикання - 16,4 А. Для такої конфігурації оптимальним є використання гібридного інвертора Growatt 10000HY. Цей пристрій забезпечує перетворення постійної напруги акумуляторів у змінну 220 В та містить два вбудованих MPPT контролери для оптимізації процесів заряду-розряду 48-вольтних акумуляторних блоків.

На основі даних про сонячну інсоляцію проведено розрахунок енергетичних параметрів установок для різних населених пунктів України. Розрахунки базуються на характеристиках сонячного модуля KVazar KV 250M та враховують реальне енергоспоживання систем зовнішнього освітлення. Для забезпечення автономності системи розраховано необхідну ємність накопичувачів енергії, що реалізується на базі літій-іонних акумуляторів LP48100ES (48 В, 100 А·год).

3.2. Техніко-економічнеобгрунтування вибору фотоелектричної енергетичної установки

На основі демографічних критеріїв для проведення техніко-економічного аналізу фотоелектричних систем зовнішнього освітлення було обрано місто з населенням 200-250 тисяч мешканців. Особливу увагу в дослідженні приділено сільським населеним пунктам, де наразі здебільшого відсутня інфраструктура зовнішнього освітлення.

Як модель для розрахунків обрано місто Кропивницький з населенням близько 228 тисяч жителів. Було розроблено та проаналізовано дві концептуальні моделі енергозабезпечення:

Гібридна система з мережевою синхронізацією для осінньо-зимового періоду:

Забезпечує енергопостачання освітлення в період низької інсоляції

Надлишок генерації у весняно-літній період спрямовується в електромережу

Автономна система з мережевою підтримкою:

Повністю автономна робота у весняно-літній період

Компенсація енергодефіциту в зимовий період за рахунок електромережі.

За результатами розрахунків для реалізації автономної системи (тип II) потрібно:

165,105 фотоелектричних модулів

1,720 інверторних установок

45,848 акумуляторних блоків

1,376 комплектів монтажного обладнання

Загальна кошторисна вартість проекту становить 2,177 млрд грн.

Детальні економічні розрахунки для Кропивницького показали суттєву різницю у вартості реалізації двох типів енергетичних систем:

Система першого типу (гібридна з мережевою синхронізацією):

Орієнтовна вартість: 390 мільйонів гривень

Система другого типу (автономна з мережевою підтримкою):

Орієнтовна вартість: 164 мільйони гривень

Важливо зазначити, що наведені кошторисні розрахунки є базовими та не включають додаткові витрати на:

Монтажні роботи

Системи релейного захисту

Трансформаторні підстанції

Подальше технічне обслуговування

Експлуатаційні витрати

Врахування цих додаткових компонентів значно вплине на загальний бюджет проекту.

Таблиця 3.1. Технічні показники розрахунку сонячної електростанції для зовнішнього освітлення

Назва обладнання	Тип сонячної електростанції	Ціна за шт. *тис. грн.*	Кількість шт.	Ціна *тис.грн.*
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	7,9	33823	267201,7
	II - тип		12454	98386,6
Інвертор Growatt 10000 HY	I - тип	110	353	38830,0
	II - тип		130	14300,0
Li-ion акумулятори LP48100ES	I - тип	9,5	3459	32860,5
	II - тип		3459	32860,5
Монтажні комплектуючі для установки сонячних батарей на землю	I - тип	180	282	50760,0
	II - тип		104	18720,00
Всього:	I - тип			389652
	II - тип			164267

Легко видно, що сонячні енергетичні установки, розраховані на основі енергетичних потреб, як окремих областей, так і великих міст, вимагають значних витрат і можуть бути впровадженні в далекому майбутньому.

За даними кількості світлоточок та спожитої електроенергії було проведено розрахунок середнього значення споживання однією світлоточкою в Кропивницькому.

Для визначення зв’язку між спожитою електричною енергією в системі зовнішнього освітлення та кількістю світлоточок була побудована графічна залежність, яка приведена на рис. 4.2.

Обробка та розрахунок результатів дослідження виконували за допомого програмного середовища Microsoft Exel, за допомогою методу найменших квадратів була отримана аналітична залежність між обсягом спожитої енергії та кількістю світлоточок в системі освітлення для м. Кропивницького:

$$W = 53842e^{0,146\,N},$$

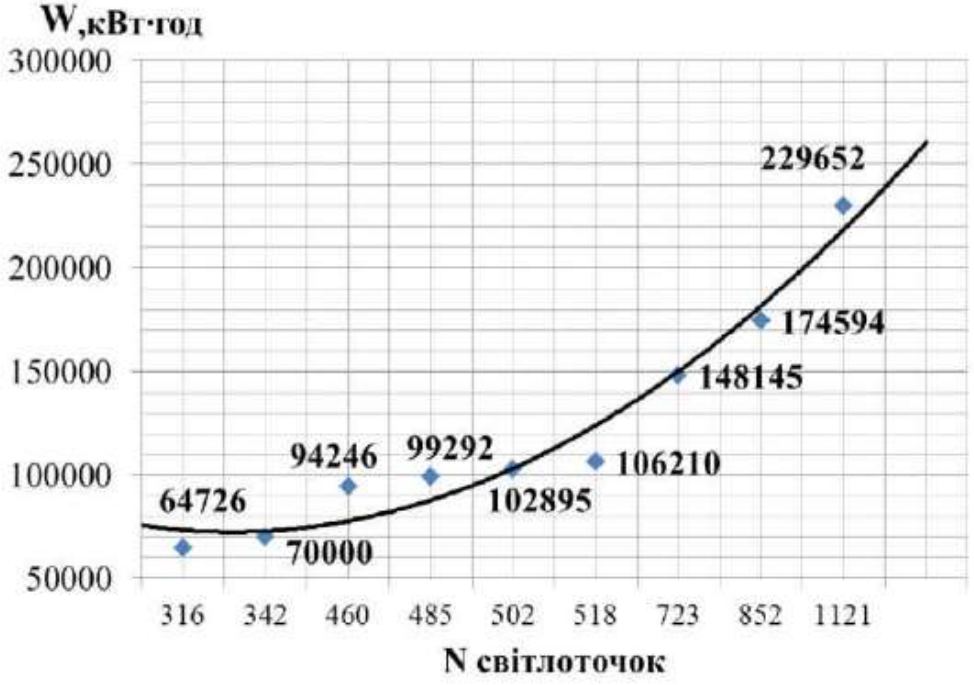


Рис. 4.2. Залежність енергії, спожитої зовнішнім освітленням від кількості світлоточок N

Висновки до розділу

Наведено методику розрахунку сонячних енергетичних установок для зовнішнього освітлення населених пунктів. Запропоновано два типи сонячних енергетичних установок. Перший тип повністю забезпечує електроенергією зовнішнє освітлення в осінньо-зимовий період. Другий тип буде забезпечувати автономне живлення зовнішнього освітлення протягом весняно-літніх місяців.

Представлено аналіз енергетичного потенціалу сонячного випромінювання по областях України та проведено аналіз енергії, спожитої зовнішнім освітленням. Отримано залежності енергії, спожитої зовнішнім освітленням, від кількості світлоточок

Проведене техніко-економічне обґрунтування вибору сонячної енергетичної установки для зовнішнього освітлення м. Кропивницький з населенням близько 250 тисяч.

4. РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОНОМНОГО ЗОВНІШНЬОГО ОСВІТЛЕННЯ

4.1. Аналіз ефективності роботи автономної фотоелектричної установки для зовнішнього освітлення

Перед тим як перейти до вибору конфігурації світловий прилад - сонячна батарея було проведено аудит потоку сонячної енергії для різних типів світлових приладів з блоками автономного. Аудит потоку сонячної енергії проводився протягом 29 вересня 2020 року. Було виявлено, що СП № 4,5 були освітленні до 13^{00}, №1 до 15^{00}, №2 до 17^{00}, а №3 був освітлений на протязі всього світлового дня. Даний аудит дав змогу оцінити ефективність та місце розташування СБ. Поряд з аудитом проводилося вимірювання густини потоку сонячного випромінювання. Дослідження проводили для освітлювальної установки №4. Результат представлено на рис. 4.1.

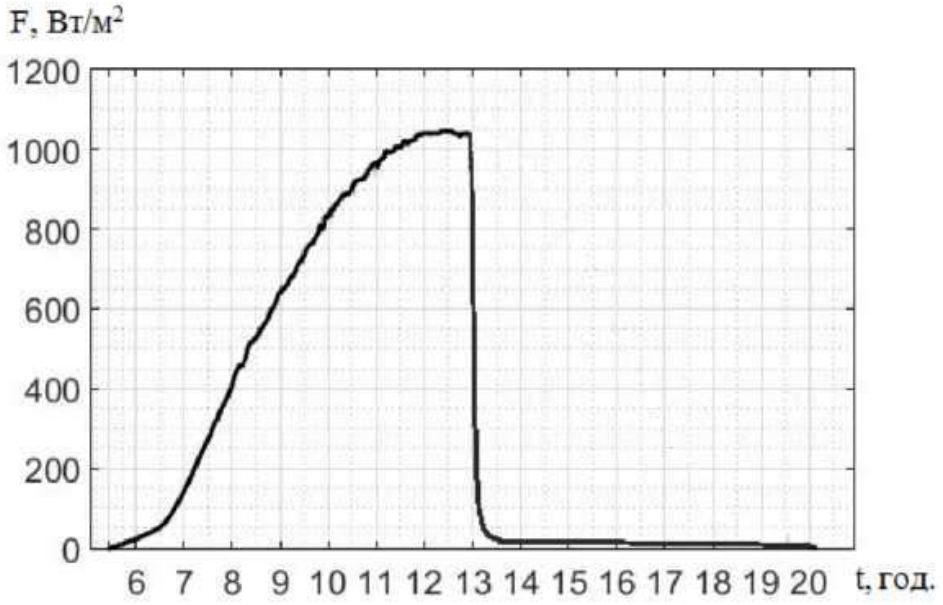


Рис. 4.1. Графік зміни густини потоку сонячного випромінювання впродовж доби для СП №4 і 5

Аналіз денної динаміки сонячної інсоляції показав характерну криву з поступовим зростанням до максимального значення 1050 Вт/м² о 13:00. Після цього спостерігається різке падіння інтенсивності до 35 Вт/м² через затінення фотодатчика, що призводить до реєстрації лише розсіяного випромінювання. Для світлових приладів №1 та №2 період освітлення тривав до 15:00, тоді як СП №3 отримував сонячне випромінювання протягом усього світлового дня.

За результатами енергетичного аудиту розроблено дві концепції автономного енергозабезпечення освітлювальної системи:

1. Децентралізована - з розміщенням фотоелектричних модулів на кожній опорі

2. Централізована - з концентрацією сонячних панелей на опорі №3 та кабельною системою розподілу енергії

Для централізованої системи запропоновано розміщення керуючої апаратури та акумуляторних блоків у спеціалізованому боксі або приміщенні навчального корпусу. Однак цей варіант має обмеження через проблеми затінення.

Розрахунки для централізованої системи базувались на наступних параметрах:

- Сумарне навантаження: 125 Вт (5 світильників)

- Максимальна тривалість роботи: 15 годин (грудень)

- Добове енергоспоживання: 1875 Вт·год

Для накопичення енергії обрано:

- 5 паралельних Li-ion акумуляторів (24V10A) із сумарною ємністю 50 А·год при 24 В

- Альтернативний варіант: 5 паралельних суперконденсаторів SM-24V-200FUS (24 В, 1000 Ф)

Впровадження інтелектуальної системи керування (датчики руху + ШІМ-регулювання) дозволяє скоротити енергоспоживання на 50%.

Розрахунок фотоелектричної частини проводився для найгірших умов освітлення (грудень 2020).

Необхідну потужність сонячної батареї $P_{СБ}$ розраховували за формулою:

$$P_{СБ} = (E_{АКБ} \cdot E_{ном})/(E_{сер} \cdot \mu_b), \quad (4.1)$$

де $E_{АКБ}$ - енергія, необхідна для повного заряду АКБ;

$E_{ном}$ - номінальне значення енергії сонячного випромінювання (1000 *Вт/м²);*

$E_{сер}$ - середньодобове значення енергії сонячного випромінювання.

За результатами розрахунків для автономної системи освітлення визначено оптимальну потужність фотоелектричної частини - 1250 Вт. Система реалізована на базі п'яти паралельно з'єднаних сонячних модулів KVazar KV 250M із загальною площею світлосприймаючої поверхні 8,3 м².

Паралельне з'єднання модулів забезпечує наступні електричні характеристики системи:

- Номінальна потужність: 1250 Вт
- Напруга в точці максимальної потужності: 30,5 В
- Напруга холостого ходу: 37,1 В
- Робочий струм при максимальній потужності: 40,5 А

Керування системою здійснюється за допомогою спеціалізованого контролера TA_CM5024Z.

Додатково проведено економічний аналіз децентралізованого варіанту системи, де фотоелектричні модулі розміщуються індивідуально на кожній опорі з урахуванням локальних особливостей інсоляції.

Порівняльний техніко-економічний аналіз обох варіантів виконання

автономної системи освітлення проведено для конкретного об'єкта - території головного корпусу, включаючи пішохідну алею та паркувальну зону.

Таблиця 4.1 Техніко-економічний розрахунок автономного освітлення головного корпусу пансіонату

Назва обладнання	Тип автономної установки	Ціна за шт. тис. грн.	Кількість шт.	Ціна тис.грн.
Сонячна батарея KVazar KV 250M	I - тип	8,3	9	74,7
	II - тип		5	41,5
Контролер TA CM2024Z	I - тип	0,8	5	4
Контролер TA CM5024Z	II - тип	2	1	2
Li-ion акумулятори 24 В, 10 Атод	I - тип	4,6	5	23
	II - тип		5	23
Суперконденсатори SM-24V-200FUS 15 *Вт ■ год*	I - тип	11,2	5	56
	II - тип		5	56
Монтажні комплектуючі	I - тип	1,5	5	7,5
	II - тип		1	1,5
Датчик руху	I - тип	0,3	5	1,5
	II - тип		5	1,5
Всього:	I - тип з Li-ion акумуляторами			**330,7**
	II - тип з Li-ion акумуляторами			**129,5**
	I - тип з суперконденсаторами			**143,7**
	II - тип з суперконденсаторами			**102,5**

Враховуючи енергоефективні умови розташування сонячних батарей, було використано другий варіант системи автономного живлення. Він дозволив використати одну систему кріплення СБ, систему керування та блок акумуляторів, які були розташовані в спеціально виконаному антивандальному боксі. З табл. 4.1 видно, що для реалізації автономної

системи освітлення І-го типу потрібно 330,7 *тис. грн*. Для ІІ-го загальна вартість становить 129,5 *тис. грн*.

4.2. Економічна ефективність впровадження автономної системи зовнішнього освітлення

Для визначення економічної доцільності впровадження автономної системи зовнішнього освітлення в КП Міськсвітло використано підхід оцінки ефективності проектних рішень, який базується на наступних принципах:

- аналіз і порівняння грошового потоку, отриманого від реалізації проекту, із витратами, необхідними для його здійснення;

- приведення інвестицій та отриманого грошового потоку до єдиного розрахункового періоду (зазвичай року, що передує початку проекту);

- дисконтування грошових потоків із використанням ставок дисконту, що враховують альтернативну вартість капіталу;

- визнання інвестицій економічно доцільними лише в тому випадку, якщо додатковий грошовий потік забезпечує повернення вкладених коштів та досягнення необхідного рівня прибутковості на вкладений капітал.

Одним із найпоширеніших інструментів оцінки інвестиційної ефективності є показник чистої приведеної вартості (ЧПВ), відомий у міжнародній практиці як Net Present Value (NPV). Цей показник також називають "чистою приведеною цінністю", "чистою дисконтованою вартістю" або "дисконтованими вигодами":

$$ЧТВ = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t - З_t}{(1+i/100)^t} - К \qquad (4.2)$$

У випадках, коли проект передбачає значні первісні вкладення коштів *К, ЧТВ* можна розрахувати за формулою:

$$ЧТВ = \sum_{t=1}^{n} \frac{B_t - З_t}{(1+i/100)^t} - К, \quad (4.3)$$

де B_t і $З_t$ – відповідно повні вигоди та витрати за рік *t.* ;

t – відповідний рік проекту (1, 2, 3, ... *n*);

n – строк служби проекту, років. Для геліосистем може бути прийнятий 10 років.

i – ставка дисконту (18%).

В загальному випадку капітальні витрати включають в себе:

$$К = К_{буд} + К_{об} + К_{дод} \quad (4.4)$$

де $К_{буд}$ – капіталовкладення в будівлі і споруди. Визначаються на основі їх кошторисної вартості;

$К_{об}$ – капіталовкладення в силові, робочі машини та обладнання, які включають: витрати на придбання, доставку, монтаж, пусконалагоджувальні роботи;

$$К_{об} = Ц_{об} \cdot \left(1 + \frac{к_д}{100} + \frac{к_м}{100}\right) \quad (4.5)$$

де $Ц_{об}$ – ціна обладнання;

$к_д$ – відсоток витрат, пов’язаних з доставкою обладнання. В розрахунках може бути прийнятий 2% від ціни обладнання.

$к_м$ – коефіцієнт, який враховує витрати на монтаж обладнання та пусконалагоджувальні роботи. В розрахунках може бути прийнятий 15% від ціни обладнання.

$К_{дод}$ – додаткові капіталовкладення до складу яких входять: витрати на підготовку проектно-кошторисної документації, та отримання дозвільної документації.

Розрахунок вартості обладнання, що підлягає встановленню приведено в таблиці 4.1.

Капітальні витрати при встановленні автономної системи зовнішнього освітлення тип з Li-ion акумуляторами:

$$К_{об} = 129500 \cdot \left(1 + \frac{2}{100} + \frac{10}{100}\right) = 147840 \text{ грн.}$$

Річна економія електроенергії за рахунок заміни світильників з лампами ДРЛ-250 на світильники з автономним живленням складає:

$$В_{ел} = P_{ДРЛ} \cdot n_{світ} \cdot T_{річ} \cdot C_0 = 275 \cdot 5 \cdot 2890 \cdot 8{,}86 = 44364 \text{ грн}$$

де $P_{ДРЛ}$ – потужність світильника з лампою ДРЛ-250;

$n_{світ}$ =5 – кількість світильників

$T_{річ}$ =2890 –річна тривалість роботи системи освітлення

C_0 – діючий тариф на електричну енергію, грн./кВт год.

Простий термін окупності заміни світильників становить:

$$T_{ок} = \frac{К}{В_{ел}} = \frac{330700}{44364} = 7{,}45 \text{ року}$$

Планове і своєчасне обслуговування обладнання дозволить знизити витрати на його утримання і ремонт, а також збільшити термін експлуатації.

Таблиця 4.2.Розрахунок чистої теперішньої вартості проекту

Рік проекту	Капіталовкладення, грн	Грошові надходження, грн	Ставка дисконту,%	Фактор теперішньої вартості	Приведені грошові надходження, грн	ЧДД, грн
0	330700					
1		11364	18	0,85	9630,5	-59869,5
2		11364	18	0,72	8161,4	-51708,0
3		11364	18	0,61	6916,5	-44791,6
4		11364	18	0,52	5861,4	-38930,1
5		11364	18	0,44	4967,3	-33962,8
6		11364	18	0,37	4209,6	-29753,2
7		11364	18	0,31	3567,4	-26185,8
8		11364	18	0,27	3023,3	-23162,5
9		11364	18	0,23	2562,1	-20600,5
10		11364	18	0,19	2171,3	-18429,2

Як свідчать проведені розрахунки за показником чистої теперішньої вартості, проект модернізації системи зовнішнього освітлення є економічно невигідним навіть після десятирічного періоду експлуатації. Навіть на одинадцятий рік функціонування системи підприємство не досягає позитивного фінансового результату, що вказує на низьку інвестиційну привабливість такого проекту.

Висновки до розділу

Результати техніко-економічного порівняння існуючої та запропонованої систем освітлення показали, що термін окупності проекту становить 7,45 роки, однак дисконтований термін окупності перевищує експлуатаційний ресурс батареї, який становить 11 років. Варто зауважити, що через зниження вартості обладнання та постійне зростання тарифів на електроенергію впровадження сучасних освітлювальних систем без використання пільгових кредитів або державної підтримки часто є економічно невигідним для більшості споживачів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання дослідження було проаналізовано сучасний стан та перспективи розвитку сонячної енергетики, а також вивчено можливості використання фотоелектричних станцій (ФЕС) для зовнішнього освітлення. Робота охоплює теоретичні, технічні та економічні аспекти, що дозволяють оцінити ефективність та доцільність впровадження автономних енергетичних систем на базі сонячних панелей.

Встановлено, що фотоелектричні станції є ефективним інструментом для перетворення сонячної енергії в електричну. З огляду на сучасні технологічні досягнення, їх використання сприяє зменшенню викидів парникових газів та економії традиційних енергоресурсів. Аналіз перспектив розвитку сонячної енергетики в Україні свідчить про зростаючий інтерес до впровадження альтернативних джерел енергії, зокрема у системах зовнішнього освітлення.

Проведено дослідження енергетичного потенціалу сонячного випромінювання на широті м. Кропивницький. Встановлено залежність густини сонячного випромінювання від кліматичних умов, зокрема ступеня хмарності. Оцінка результатів дозволила визначити оптимальні параметри встановлення фотоелектричних модулів та підвищити їх ефективність.

Розроблено модель автономної системи зовнішнього освітлення на основі фотоелектричних панелей. Виконано розрахунки, що дозволили оцінити технічні характеристики системи та її продуктивність. Особливу увагу приділено вибору компонентів, таких як сонячні батареї, накопичувачі енергії та контролери.

Проведено аналіз витрат та доходів від впровадження автономної системи зовнішнього освітлення. Розраховано термін окупності проекту, враховуючи сучасні тенденції зміни вартості обладнання та тарифів на

електроенергію. Встановлено, що для досягнення економічної ефективності важливим фактором є доступ до пільгових умов фінансування або державної підтримки.

Запропоновано практичні рекомендації щодо впровадження фотоелектричних станцій для автономного освітлення у різних кліматичних умовах. Зроблено акцент на оптимізації конструкції систем, підборі обладнання та врахуванні регіональних особливостей.

Таким чином, дослідження підтвердило перспективність використання фотоелектричних станцій у системах зовнішнього освітлення як технологічно прогресивного, екологічно безпечного та потенційно економічно ефективного рішення. Однак для досягнення максимальної ефективності необхідно враховувати як технічні аспекти, так і фінансово-економічні обмеження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стан сфери зовнішнього освітлення в Україні за 2017 рік [Електронний ресурс]. - Режим доступу: http://minregion.gov.ua.

2. Інтегрований вуличний світильник Shenzhen [Електронний ресурс]. - Режим доступа: http://www.shinehui.com/en/products_list.php?prid1=21.

3. Уличные світильники SunShmes [Електронний ресурс]. - Режим доступа: http://sun-shines.ru/product/street-light.

4. Фотоэлектрические установки EPS-Soltec [Електронний ресурс]. - Режим доступа: http://www.eps-soltec.com/en/produkte/strasen-wege-

5. undplatzbeleuchtung.

6. Чумакевич В.О. Обґрунтування можливості освітлення парків в місцях постійної дислокації за допомогою сонячних батарей у львівській області /

7. О. Чумакевич, В. В. Атаманюк, І. В. Пулеко, А. М. Дубовський // Військово- технічний збірник. - 2015. - № 13. - С. 102-105.

8. Пастушенко М.С. Перспективи впровадження відновлювальних джерел електричної енергії на залізничному транспорті України // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. - 2013. - № 12. - С. 45 - 51.

9. Сурков М.А., Сумарокова Л.П. Оценка возможности применения фотоэлектрических установок для электроснабжения уличного освещения в климатических условиях Сибири / М.А. Сурков, Л.П. Сумарокова // Интернет- журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». - Том 8. - №6.

10. Кожем'яко В.П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В.П. Кожем'яко, В.Г. Домбровський, В.Ф. Жердецький, В.І. Маліновський, Г.В. Притуляк // Оптико- електронні інформаційно-енергетичні технології. - Т. 22. - №. 2. - С. 141-157.

11. Воронин, С.М. Возобновляемые источники энергии и энергосбережение / С.М. Воронин, С.В. Оськин, А.Н. Головко. - Краснодар, 2006. - С. 267.

12. Андреев В.М. Нанотехнологии для солнечной фотоенергетики / В.М.Андреев // Альтернативная энергетика и экология. - 2007. - №2 (46). - С.93- 98.

13. Четошникова Л.М., Применение автономных систем освещения на базе солнечных модулей для парковых зон / Четошникова Л.М., Гуськова А.И. // ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК - 2013. - № 4-2. - С.205-209.

14. А.С. Литвиненко, О.М. Діденко, Ю.О. Васильєва, Л.Д. Гуракова, К.І. Іоффе // Светотехника и электроэнергетика. - 2016. - №1. - С. 12-18.

15. Григораш, О.В. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю.И. Стрелков // Промышленная энергетика, №4. - 2001. - С. 37-40.

16. Евстафьев В.А., Майкова О.В Автономный светодиодный уличный фонарь // XIX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии». - 2013. - С.41-42.

17. Назаренко Л.А. Солнечные энергетические установки с голограммными концентраторами энергии / Л.А. Назаренко, А.С. Литвиненко // Светотехника и электроэнергетика. - 2010. - № 3-4. - pp. 21 25.

18. Андреев С.В. Солнечные электростанции / С.В. Андреев // - М.: Наука 2002.

19. Michael Forst. Germany’s module industry poised for growth // SUN & Wind Energy. -Vol.5. -2011. - pp.256-263.

20. Голицын М.В., Голицын А.М., Пронина Н.М. Альтернативные Энергоносители. // - М.: Наука, 2004.

21. Данилов И.А. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие. // - М.:ВШ, 2005.

22. Ермолова Н.С., Моураов А.Г. Возобновляемые источники энергии: новые технологии использования солнечной энергии // Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по матер. XVI-XVII междунар. науч.-практ. конф. - 2014. - № 9- 10(16).

23. Владимир Гуревич Свинцово-кислотные аккумуляторы: устройство, принцип действия, применение // Силовая электроника. - 2012. - № 5.

24. Шембель О.М., Білогуров В.А. Основні характеристики сучасних хімічних джерел струму різних електрохімічних систем / О.М. Шембель, В.А. Білогуров // Сучасна спеціальна техніка. Науково-практичний журнал. - 2009. - № 2(17). - С. 66-86.

25. Гаврилко П.П. Розвиток та впровадження сонячної енергетики в домогосподарствах україни / П.П. Гаврилко, Р.С. Чорний, Я.В. Шевчук // Міжнародний науковий журнал. - 2016. - Том 2. - №10. - С. 66-71.

26. Рыкованов А.С. Li-ion аккумуляторные батареи с внешней системой баланса / А.С. Рыкованов // Силовая электроника. - 2012. - № 6.

27. Рыкованов А.С. Системы обеспечения функционирования Li-ion аккумуляторных батарей. Структуры и принципы построения / А.С. Рыкованов // Силовая электроника. - 2012. - № 5.

28. Nema S. K., Nema R. K., Agnihorti G. A.: Int. J. Energy and Environment. - 2010. - No. 1. - P. 487.

29. Білецький О.О., Супруновська Н.І., Щерба А.А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їхніх початкових і кінцевих напруг / О.О. Білецький, Н.І. Супруновська, А.А. Щерба // Техн. Електродинаміка. - 2016. - № 1. - С. 3-10.

30. Изотов В.Ю., Громадский Д.Г., Малетин Ю.А. Моделирование и расчет рабочих параметров суперконденсатори / В.Ю. Изотов, Д.Г. Громадский, Ю.А. Малетин // Наук. вісті НТУУ "КПГ. - 2008. - № 6. - С. 114-118.

31. Супруновская Н.И., Щерба А.А. Процессы перераспределения электрической энергии между параллельно соединенными конденсаторами / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба // Техн.електродинаміка. - 2015. - № 4. - С. 3-11.

32. Супруновская Н.И., Щерба А.А., Иващенко Д.С., Белецкий О.А.

33. Процессы обмена энергией между нелинейными и линейными звеньями электрической схемы замещения суперконденсаторів / Н.И. Супруновская, А.А. Щерба, Д.С. Иващенко, О.А. Белецкий // Техн.електродинаміка. - 2015. - № 5. - С. 3-11.

34. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемы еисточники энергии. / Дж. Твайделл, А. Уэйр // - М.: Энергоатомиздат. - 2000. - С. 390.

35. Щерба А.А., Супруновська Н.І. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений. / А.А. Щерба, Н.І. Супруновська // Техн. електродинаміка. - 2012 - № 5. - С. 3-9.

36. Burke A. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles / A. Burke // Proc. of the IEEE. - 2007.- V. 95. - No. 4. - P. 806-820.

37. Burke A., Miller M. The power capability of ultracapacitors and lithium batteries for electric and hybrid vehicle applications / A. Burke, M. Miller //Journ.of the Power Sources Issue. 1, January 2011. - Vol. 196. - P. 514-522.

38. Burke A., Miller M., Zhao H. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density / A. Burke, M. Miller, H. Zhao // Research Report. - UCD-ITS-RR-12-06. - Institute of Transportation Studies. University of California. - May 2012.

39. Burke A., Zhao H. Application of sepercapacitors in electric and hybrid vehicles / A. Burke, H. Zhao // Research Report. - UCD-ITS-RR-15-09. - Institute of Transportation Studies. University of Califotnia. - 2015.

40. Green-Cap (ELECTRIC DOUBLE LAYER CAPACITORS). - Available online at: http://www.masters.com.pl/files/ds/samwha/ samwha-green-cap.pdf.

41. Ivanova O.M., Danylenko M.I., Monastyrskyy G.E., Kolomytsev V.I., Koval Y.M., Shcherba A.A., Zaharchenko S.M., Portier R. Investigation of the formation mechanisms for Ti-Ni-Zr-Cu nanopowders fabricated by electrospark Erosion method in cryogenic liquids / O.M. Ivanova, M.I. Danylenko, G.E. Monastyrskyy, V.I. Kolomytsev, Y.M. Koval, A.A. Shcherba, S.M. Zaharchenko, R. Portier. // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. - 2009. - T.31. - No 5. - Pp. 603-614.

42. Kurzweil P., Frenzel B. Capacitance characterization metods and ageing be haviour of supercapacitors / P. Kurzweil, B. Frenzel. // Proc. the 15th International seminar on double layer capacitors. - Deerfield Beach, Fl., U.S.A., December 5-7 2005.

43. Maletin Y. New Approach to Ultracapacitor Technology: What it Can Offer to Electrified Vehicles / N. Stryzhakova, S. Zelinskyi, S. Chernukhin, D. Tretyakov, H. Mosqueda, N. Davydenko, and D. Drobnyi. // Journ. of Energy and Power Engineering. - 2015. - No. 9. - P. 585-591.

44. MihailescuB., Svasta P.,Varzaru G. Hybrid Supercapacitor - Battery electric system with low electromagnetic emissions for automotive applications / B. Mihailescu, P. Svasta, G. Varzaru. // U.P.B. Scientific Bulletin, Series C.- 2013. - Vol. 75. - Iss. 2. - P. 277-290.

45. Rafik F. Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling / F. Rafik, H. Gualous, R. Gallay, A. Crausaz, and A. Berthon. // Journal of Power Sources. - 2007. - Vol. 165. - No. 2. - P. 928-934.

46. Roedem B. Thin - film PV module review: Changing contribution of PV module technologies for meeting volume and product needs / B. Roedem // Refocus.- 2006. -Vol. 7. -No 4.-Pp. 34-39.

47. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications / L. Zubieta, R. Bonert // IEEE Trans. On Industry Applications. - January-February 2000. - Vol. 36. - No. 1. - P. 199-205.

48. Філюк Я.О. Світлотехнічні установки з автономним живленням // V Міжнародна науково-технічна конференція „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи “, 23-27 лютого 2015 року. - Т. : ТНТУ, 2015. - С. 115-116.

ДОДАТКИ

Додаток А

ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Заходи по охороні праці та техніки безпеки

Всі правові питання охорони праці у нашій країні вирішуються на основі Конституції. Законодавство по правовій охороні праці регламентує режим робочого часу і відпочинку робочих та службовців. Нормальна тривалість робочого часу для всіх працюючих не повинна перевищувати 41 год за неділю як при п'ятиденному та і шестиденному робочому тижню. Робочим і працівникам у віці від 16 до 18 років встановлюється 36-годинний робочий тиждень. Така ж тривалість робочого тижня для робітників, зайнятих на роботах з шкідливими умовами праці. При роботі у нічний час з 22 по 6 год тривалість зміни зменшується на 1 год, за виключенням робочих та працівників для яких вже передбачено скорочений робочий час. Застосування надурочних робіт допускається тільки у виключних випадках і з дозволу місцевого профсоюзного комітету. Для кожного працюючого загальна кількість надурочних робіт не повинна перевищувати 120 год на протязі року. На роботах у тяжких та шкідливих умовах і на об'єктах робіт, які відносяться до категорії підвищенної небезпеки забороняється використовувати осіб молоших 18 років.

Серед заходів, направленних на створення раціональних умов трудового процесу важливу роль відіграє режим праці і відпочинку.

Організаційні заходи по небезпечній експлуатації електроустановок включають: оперативне обслуговування діючих електроустановок, що в свою чергу передбачає періодичні і позачергові огляди системи електропостачання і електроприймачів; контроль та облік електроенергії; оперативні перемикання у електричних мережах,

забезпечуючі безперебійне живлення електроенергією. Оперативне обслуговування електроустановок проводиться інженерно-технічним, черговим і оперативно-ремонтним електротехнічним персоналом

Обов'язки закріплені за даною електроустановкою чергового персоналу визначаються місцевими інструкціями, у яких повинні бути викладені також основні конкретні міри по електронебезпеці і пожежній небезпеці стосовно до експлуатуючого електрообладнання.

Оперативне обслуговування електроустановок може здійснюватися як однією особою так і декількома. Чисельність персоналу для кожного цеху, ділянки, підстанції визначається головним енергетиком підприємства.

При обслуговуванні електроустановок напругою вище 1000 В старший у зміні (бригадир) або черговий повинні мати кваліфікаційну групу не нижче, IV, а у електроустановках до 1000 В - не нижче групи III.

У електроустановках підприємства застосовуються слідуючі технічні захисні міри:

1. Малі напруги. Якщо номінальна напруга електроустановки не перевищує тривалодопустимої напруги дотику, то даже одночасний дотик людини з стумоведучими частинами різних фаз чи полюсів буде безпечним Однофазний дотик до струмоведучих частин, а також, дотик до опинившогося під напругою корпусу, наваіть не заземленному буде безпечним, так як струм через людину при дотику до фази визначається опором ізоляції та малою напругою. Однак у сирих приміщеннях де опір людини може бути значно знижений, струм протікаючий через людину, при дотику до двох виводів чи фаз буде невідпускаючим. Тому приймаються інші міри захисту.

2. Електричний розділ мереж. Розгалуджена мережа великої довжини має значну ємність і малий активний опір ізоляції відносно

землі, а отже струм замикання у такій мережі може бути значним. Тому однофазний дотик у мережі навіть з ізольованою нейтраллю являється, безумовно, небезпечним. Якщо єдину сильно розгалуджену мережу з великою ємністю і малим опором ізоляції розділити на ряд невеликих мереж такої ж напруги, які будуть мати незначну ємність і високим опором ізоляції, небезпека різко знизиться. Так, струм через людину, що доторкнулася до однієї фази буде визначатися високим опором фаз відносно землі , якщо у мережах напругою 380 В $|Z| > 63$ кОм, а опір кола людини Rch = 1.0 кОм, струм через людину не перевище 10 мА.

Звичайно електричне розділення мереж виконується шляхом під'єднання окремих електроприймачів через роздільний трансформатор, живлячийся від основної мережі.

Велику небезпеку представляє можливість продовження роботи електроустановки при глухому замиканні на землю, так як людина, що доторкнулася до справної фази, попадає під лінійну напругу. Щоб уникнути небезпеки необхідно постійно проводити контроль ізоляції.

3. Контроль і профілактика ушкоджень ізоляції. Приймально-здаточні випробування проводяться при вводі у єксплуатацію нових та вийшовших із ремонту електроустановок.

. Захисне заземлення. Застосування захисного заземлення у мережі з заземленою нейтраллю напругою до 1000 В неефективно, так як навіть при глухому замиканні на землю струм не залеже від опору заземлення і змешенням останього зростає. Тому захисне заземлення застосовується у внутрішньоцеховій мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю. Захисне заземлення на проектуємому підприємстві виконується у вигляді замкненого контуру навколо ГЗП.

6. Занулення. Застосовується у чотирипроводних мережах до 1000 В з заземленною нейтраллю. Для зменшення тривалості режиму замикання на корпус прокладається нульовий провід, що з'єднується з

заземленною нейтраллю джерела та повторними заземлювачами. При зануленні корпуси електрообладнання з'єднуються не з заземлювачами а з нульовим проводом. Занулення перетворює замикання на корпус електроприймача у однофазне коротке замикання, у результаті чого спрацьовує МТЗ і селективно відмикає ушкоджену ділянку мережі.

А.2. Розрахунок заземлення

У відповідності з ПУЕ, всі металеві частини електроустановок, які в процесі роботи не мають з'єднання з струмопровідними частинами, але можуть попасти під напругу, повинні бути заземлені

Трансформаторні підстанції напругою 10/0,4 кВ на стороні 0,4 кВ мають глухозаземлену нейтраль. З'єднання обмоток цехових трансформаторів - Δ/Y з нулем. Струм замикання на землю 27 А. Для цехового обладнання використовується заземлення. Цехові підстанції отримуються живлення від 2 кабелів, що прокладені в одній траншеї.

Грунт – чорнозем, другий кліматичний район.

Розрахунок зводиться до визначення вертикальних заземлювачів і довжини з'єднувальної полоси з розміщенням на плані.

Визначаєм норму на опір заземлення $R_з^н$.

Якщо заземлюючий пристрій використовується одночасно для електроустановок напругою до 1000 В та вище:

$$R_з \le \frac{125}{I_з} = \frac{125}{27} = 4{,}63 \text{ Ом};$$

Згідно ПУЕ , так як сумарна потужність токоприймачів більш 100 кВА то $R_з$ повинен бути не більше 4 Ом. Приймаємо $R_з$ = 4 Ом.

Визначаємо розрахунковий питомий опір грунту:

$$\rho_p = \rho_{табл} \cdot \psi = 220 \cdot 1{,}3 = 286 \text{ Ом·м}$$

де $\rho_{табл}$ - табличне значення, для чорнозему $\rho_{табл}$ =220 Ом·м табл. 7.14 [21]; ψ - підвищуючий коефіцієнт, для України, для стержньових заземлювачів ψ =1,2...1,4.

Опір одинарного вертикального заземлювача:

$$R_o = 0{,}366 \frac{\rho_{розр}}{l}\left(lg\frac{2l}{d} + \frac{1}{2}lg\frac{4t+l}{4t-l}\right) =$$
$$= 0.366\frac{286}{5}\left(lg\frac{2\cdot 5}{2.5} + \frac{1}{2}lg\frac{4\cdot 3+5}{4\cdot 3-5}\right) = 15{,}4 \text{ Ом;}$$

де l – довжина заземлювача, приймаємо 5 м; d – діаметр заземлювача (приймаємо стержні діаметром 2,5 см).

$$t = h + \frac{l}{2} = 0.5 + \frac{5}{2} = 3 \text{ м;}$$

де h – глибина прокладки полос (згідно ПУЕ – 0,В...0,8 м).

Приймаємо електроди прокладені по замкнутому контуру згідно плану і знаходимо орієнтовну кількість заземлювачів:

$$n_o = \frac{R_e}{R_з^и \cdot \eta_o} = \frac{15{,}4}{4.054} = 6.9 \approx 7 \text{ шт.}$$

Де η_o – коефіцієнт використання ряду заземлювачів, для a/l=4/5=0.8, η_o =0,54 по рис. 7.5[21].

Де а= 4 м – відстань між електродами згідно ПУЕ.

Довжина горизонтальної з’єднувальної полоси:

$$l_n = 1.05a \cdot n = 1.05 \cdot 4 \cdot 7 = 29.4 \text{ м.}$$

Опір полоси з урахуванням екранування:

$$R_n = 0.366 \frac{\rho_{розр}}{l_n \cdot \eta_n} lg \frac{2l_n}{b \cdot n} = 0.366 \frac{286}{29.4 \cdot 0.51} lg \frac{2 \cdot 29.5^2}{0.01 \cdot 7} = 28{,}38 \text{ Ом;}$$

де η_n – коефіцієнт використання з'єднувальної полоси шириною b = 10 мм та товщиною 5 мм.

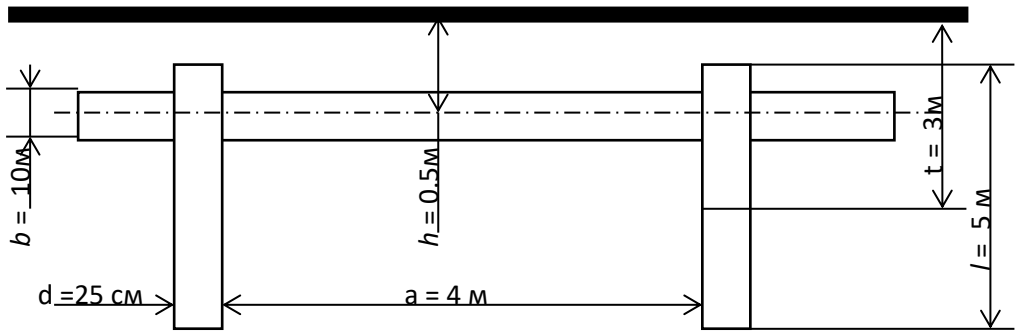


Рис. А.1. Схема прокладки заземлення

Необхідний опір вертикальних заземлювачів з урахуванням опору з'єднувальної полоси:

$$R_{тр} = \frac{R_n \cdot R_з^н}{R_n \cdot R_з^н} = \frac{28{,}38 \cdot 4}{28{,}38 - 4} = 7{,}94 \text{ Ом.}$$

Остаточна кількість заземлювачів:

$$n = \frac{R_o}{R_{тр} \cdot \eta_o} = \frac{15{,}4}{7{,}94 \cdot 0{,}59} = 3{,}6 \approx 4 \text{ штук.}$$

Проводимо перевірку опору зземлювача і порівнюємо отримане значення з нормуємим:

$$R_з = \frac{1}{\frac{1}{R_{тр}} + \frac{1}{R_п}} = \frac{1}{\frac{1}{7,94} + \frac{1}{28,38}} = 3,98 \text{ Ом.}$$

$$3,98 < 4 \text{ Ом}$$

Розрахункове значення заземлювача $R_з$ не перевищує його нормативне значення 4 Ом. Спроектований контур заземлення відповідає вимогам ПУЕ.