

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(повне найменування вищого навчального закладу)
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЙ ТА ТРАНСПОРТУ
(назва факультету)
КАФЕДРА ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ І ФІЗИКИ
(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи
першого(бакалаврського) рівня вищої освіти
(рівень вищої освіти)

На тему: «Розробка системи безперебійного живлення телеретрансляторів з
використанням енергії сонячного випромінювання»

Виконав: студент 4 курсу групи 4ЕЛ

спеціальності

141. Електроенергетика,
електротехніка та
електромеханіка
(код і назва спеціальності)

освітньо-

професійної

програми

Електротехніка та
електротехнології
(назва ОПП)

Лісова В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник

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

Рецензент

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

Хмельницький 2026

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему «Розробка системи безперебійного живлення телеретрансляторів з використанням енергії сонячного випромінювання» складається з пояснювальної записки та графічної частини. Пояснювальна записка містить 79 сторінок формату А4, 5 рисунків, 17 таблиць, 20 використаних джерел, 1 додаток та 14 слайдів мультимедійної презентації.

Ключові слова: система безперебійного живлення, телеретранслятор, фотоелектричні модулі, сонячна інсоляція, акумуляторна батарея, автономне енергозабезпечення, інвертор.

У роботі проведено аналіз параметрів сучасних телеретрансляторів та особливостей побудови систем їх живлення. Розглянуто типи фотоелектричних установок, їх переваги та недоліки при експлуатації на об'єктах зв'язку.

Сформовано методичну базу для розрахунку добового енергоспоживання об'єкта, обсягів надходження сонячної радіації та необхідної ємності накопичувачів енергії.

Виконано практичні розрахунки для конкретної телеретрансляторної системи: визначено оптимальну просторову орієнтацію панелей та їхню необхідну встановлену потужність.

Здійснено вибір обладнання (фотоелектричних модулів, акумуляторів, інверторів) та розроблено схему інтеграції сонячної системи в існуючу мережу живлення телеретранслятора.

Проведено аналіз енергоефективності системи в розрізі типового року.

У розділі «Охорона праці» проаналізовано умови роботи на робочому місці, стан мікроклімату та потенційні небезпеки. Описано вимоги безпеки та нормативні правила під час монтажу та обслуговування електрообладнання згідно з діючим законодавством.

ABSTRACT

The bachelor's qualification work on the topic “Development of an uninterruptible power supply system for TV repeaters using solar radiation energy” consists of an explanatory note and a graphic part. The explanatory note contains 77 pages in A4 format, 5 figures, 17 tables, 20 literature sources, 1 supplement and 14 slides of a multimedia presentation.

Key words: uninterruptible system, television repeater, photovoltaic modules, solar insolation, rechargeable battery, autonomous energy supply, inverter.

The work analyzes the parameters of current television relays and the peculiarities of their power supply systems. The types of photovoltaic installations are reviewed, their advantages and disadvantages during operation at communication sites are considered.

A methodological basis has been formed for calculating the daily energy consumption of the facility, the amount of solar radiation received and the required capacity of energy storage devices.

Practical layouts for a specific TV relay system were determined: the optimal spacious orientation of the solar panels was determined and their necessary power was set.

The selection of equipment (photovoltaic modules, batteries, inverters) has been completed and the scheme for integrating the solar system into the main power line of the TV repeater has been developed.

An analysis of the energy efficiency of the system was carried out in terms of typical year.

The section “Protection of Work” analyzed the work environment, microclimate and potential problems. The safety and regulatory rules for the installation and maintenance of electrical equipment are described in accordance with the current legislation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1.ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА	6
1.1 Параметри телеретрансляторів та особливості побудови систем їх живлення.....	6
1.2 Типи фотоелектричних установок, їх переваги та недоліки	10
1.3 Особливості фотоелектричних установок для автономного електрозабезпечення об'єктів.....	13
1.4Висновки.....	17
2.МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА.....	19
2.1 Методика розрахунку добової потреби телеретранслятора в електричній енергії.....	19
2.2 Методика розрахунку надходження сонячної енергії до фотоелектричних модулів.....	22
2.3 Методика розрахунку необхідної ємності акумуляторної батареї	27
2.4 Методика розрахунку необхідної встановленої потужності фотоелектричних модулів.....	29
2.5 Підходи щодо вибору обладнання для компонування фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора	31
2.6 Висновки	33
3. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	35
3.1 Опис телеретрансляторної системи, що досліджується	35
3.2 Розрахунок добової потреби телеретрансляційної системи в електричній енергії та аналіз його результатів.....	36
3.3 Вибір можливого місця розташування та просторової орієнтації фотоелектричних модулів.....	40
3.4 Розрахунок середнього добового надходження сонячної радіації до поверхні модулів в розрізі типового року.....	41

3.5 Вибір типу фотоелектричних модулів, визначення необхідної кількості модулів та розрахунок добового вироблення енергії фотоелектричним масивом в розрізі року	41
3.6 Розрахунок ємності акумуляторної батареї, вибір типу та необхідної кількості акумуляторів в батареї	48
3.7 Вибір інвертора для фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора	53
3.8 Розробка схеми підключення компонентів фотоелектричної системи до існуючої схеми живлення телеретранслятора	56
3.9 Висновки	59
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	61
4.1 Характеристика робочого місця	61
4.2 Характеристика обладнання та потенційні небезпеки	63
4.3 Електробезпека та категорія приміщення	64
4.4 Вибір оптимальних метеоумов	64
4.4 Протипожежна профілактика	66
4.5 Техніко-економічні розрахунки заходів з охорони праці	67
4.6 Висновки	68
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72
ДОДАТОК А.....	74

ВСТУП

Актуальність теми. У наш час, коли інформація відіграє велику роль, важливо, щоб телебачення і радіо працювали стабільно, без перебоїв. Телеретранслятори часто знаходяться у віддалених місцях, куди важко дістатися, і де якість електричної енергії є низькою, або мають місце значні перебої через аварії. Звичайні системи, які працюють тільки на дизельних генераторах, мають чимало мінусів: вони дорогі в обслуговуванні, постійно потребують постачання палива і шкодять довкіллю. Якщо ж використовувати енергію природи, наприклад, сонце, разом із сучасними накопичувачами електроенергії на основі літій-завізо-фосфатних батарей та розумною системою управління, то можна створити надійну систему безперебійного живлення, яка не потребуватиме частого обслуговування і матиме привабливі економічні показники.

Мета роботи – розробка та обґрунтування конфігурації фотоелектричної системи, що забезпечує стабільне функціонування телеретранслятора в умовах автономного живлення.

Об'єкт дослідження – процеси перетворення та розподілу електричної енергії в гібридних системах живлення телекомунікаційних об'єктів.

Предмет дослідження – технічні рішення та параметри обладнання (фотоелектричних модулів, випрямних систем, акумуляторних батарей та засобів моніторингу), що забезпечують безперебійне живлення цифрових передавачів.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу для вибору структури системи, математичного моделювання для розрахунку потужності сонячної генерації та ємності накопичувачів, а також метод порівняння для оцінки ефективності проєкту.

Задачі дослідження:

1. Проаналізувати типові схеми електрозабезпечення об'єктів зв'язку і основні вимоги до них.

2. Розробити схему гібридної системи електрозабезпечення телеретранслятора, що поєднує в собі централізовану електромережу, дизель-генератор та сонячну фотоелектричну станцію.
3. Розрахувати вироблення енергії фотоелектричною системою та параметри акумуляторної батареї, що забезпечують можливість автономного живлення телеретранслятора у разі втрати ним зовнішнього живлення від централізованої мережі.
4. Обґрунтовано обрати інвертор, фотоелектричні модулі, акумуляторні батареї та допоміжне обладнання для комплектації розробленої системи безперебійного живлення ретранслятора.

Апробація роботи. Результати розрахунку вироблення енергії фотоелектричними станціями в кліматичних умовах Херсонської області опубліковано в Збірці матеріалів II-ї науково-практичної конференції за міжнародною участю «Сучасні стратегії сталого розвитку держави та суспільства: наукові горизонти та перспективи», том 2, Хмельницький, 2025 (Додаток А).

1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1 Параметри телеретрансляторів та особливості побудови систем їх живлення

Телеретранслятор (ТРТ) – комплексний об'єкт радіотехнічної інфраструктури, призначений для прийому, обробки та ретрансляції телевізійних сигналів. За нормативами енергонадійності об'єкт зв'язку відноситься до споживачів I категорії, для чого необхідна наявність не менше двох незалежних джерел живлення та пристрою автоматичного включення резерву (АРВ). Основними технічними параметрами телевізійних ретрансляторів як споживачів енергії є номінальна напруга живлення та споживана потужність.

Сучасні комунікаційні пристрої (передавачі, цифрові модулятори, сервери) в основному призначені для роботи від постійного струму (DC). Стандартні рівні напруги 48 В (найпоширеніший) або 24 В, оскільки він повинен бути підключений безпосередньо до батареї без будь-якого проміжного перетворення.

Споживана потужність (P_{sp}). Продуктивність ТРТ залежить від радіусу зони покриття та кількості мультиплексів: 200-500 Вт для повторювачів малої потужності і 1-3 кВт для станцій середньої потужності. Важливими особливостями є відсутність пускового струму і майже лінійна крива навантаження протягом доби. Щоб гарантувати безперебійну передачу електроенергії, коефіцієнт доступності мережі повинен бути не менше 0,999. Це дорівнює до 9 годин загального простою на рік [1].

Особливості структури енергосистеми. Традиційна архітектура живлення дистанційних передавачів базується на використанні системи випрямляча з паралельно з'єднаними батареями. До основних принципів такого будівництва відноситься буферний режим – випрямляч забезпечує живлення активних пристроїв і підтримує заряд акумулятора (АКБ). У разі

аварії в зовнішній мережі акумулятор негайно бере на себе навантаження без припинення живлення.

Резервування модулів. Випрямні системи зазвичай будуються за принципом N+1, де один модуль є запасним для підвищення відмовостійкості.

Термокомпенсація заряду. Оскільки ТРТ часто розташовані в неопалюваних контейнерах або на щоглах, напруга заряду АКБ повинна коригуватися залежно від температури навколишнього середовища для запобігання передчасному виходу батарей з ладу [2].

Система електроживлення (СЕЖ) сучасного телевізійного ретранслятора проєктується як система постійного струму з безперервним циклом роботи. Основний стандарт для таких об'єктів – використання шини живлення -48 В (або +48 В), що дозволяє ефективно поєднувати мережеві випрямлячі, акумулятори та відновлювані джерела енергії. Модульний випрямляч перетворює змінний струм з електромережі (220 або 380 В) на постійний струм 48 В. Акумулятори – це одна або кілька груп акумуляторних батарей, які підключені паралельно до загальної шини постійного струму. Вони працюють у так званому "буферному режимі", тобто завжди знаходяться під невеликою напругою для постійної підзарядки. Пристрій контролю й розподілу (часто скорочено ПкР) захищає кожного окремого споживача (як-от передавач, приймач чи модем) від перевантаження, а також контролює, як заряджаються та розряджаються батареї.

У випадку, коли встановлюють сонячні панелі, до системи додають DC/DC контролер (MPPT). Його підключають прямо до тієї ж 48-вольтової шини. Завдяки цьому сонячна енергія може частково або повністю замінювати живлення від випрямлячів, особливо вдень. Відповідно до правил роботи об'єктів зв'язку, ця система може працювати у трьох головних режимах: звичайний режим, в якому обладнання отримує живлення від випрямлячів, які одночасно підтримують акумулятори повністю зарядженими; автономний (або резервний) режим, в який система переходить, якщо зовнішня електромережа вимикається, і живлення миттєво переключається на

аккумулятори, а тривалість роботи системи в автономному режимі, залежить від місткості батарей (для найважливіших вузлів це зазвичай від 4 до 12 годин); економічний (або сонячний) режим реалізується, коли достатньо сонячного світла і сонячний контролер піднімає напругу на шині трохи вище, ніж у випрямлячів, що змушує випрямлячі перейти в режим очікування, і тоді з мережі 220 В електрика не споживається взагалі.

Впровадження сонячної енергії в таку архітектуру вимагає використання спеціалізованих контролерів, що працюють паралельно з існуючими джерелами живлення, пріоритетно використовуючи енергію фотоелектричних модулів для зменшення споживання з мережі або повної автономізації об'єкта [3].

Україна має високий потенціал сонячної енергії, який коливається від 1070 кВт·год/м² на півночі до понад 1400 кВт·год/м² на півдні. Потенціал сонячної енергії перевищує потреби країни, встановлена потужність СЕС перевищує 7 ГВт (до 75% «зеленої» енергії). Найвигіднішою територією був південний регіон, зокрема, Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька області та АР Крим, але в результаті війни було зруйновано та окуповано понад 30% промислових СЕС, а понад 60% промислових СЕС до 2022 року були зосереджені саме на півдні України.

Одна з можливих схем облаштування системи, що живить телерадіоб'єкт, використовуючи як мережеву електрику, так і зелену енергію, представлено на рис. 1.1. Вона містить такі частини, як централізовану електричну мережу, дизель-генератор, сонячні панелі, випрямляч, МРРТ контролер, шину постійного струму (DC BUS -48V), аккумуляторну батарею (LiFePO₄). Споживачем в цій схемі є головне обладнання: цифровий передавач DVB-T2, супутниковий приймач, різні мережеві комутатори та система для дистанційного нагляду.

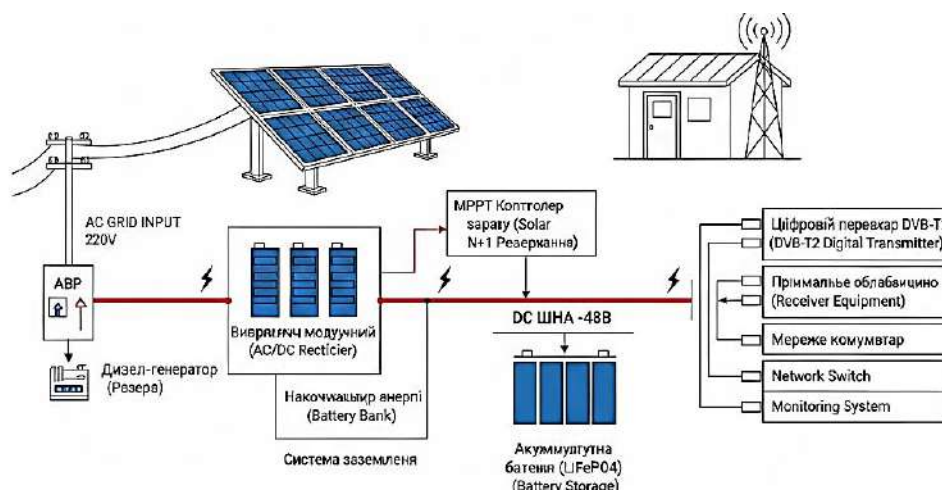


Рисунок 1.1 – Функціональна блок-схема гібридної фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора

Типова схема електричного живлення телеретранслятора наведена на рис. 1.2.

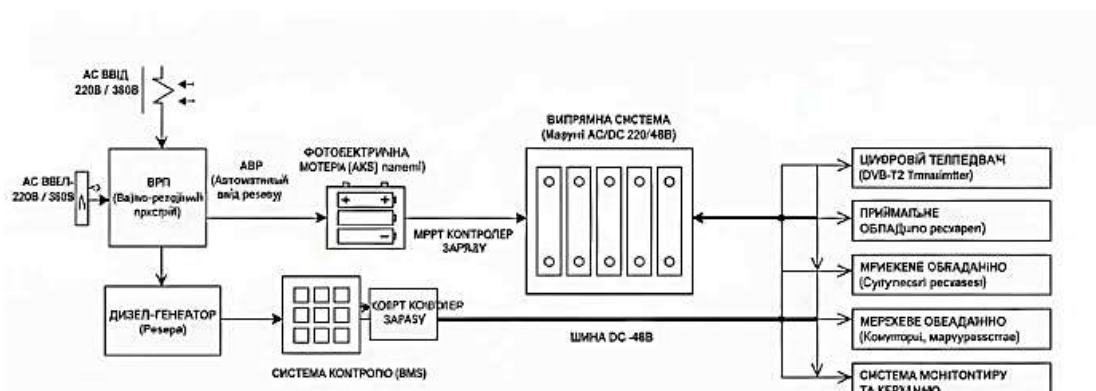


Рисунок 1.2 – Типова схема електричного живлення телевізійних ретрансляторів

Схема на рис. 1.2 об'єднує в єдину систему живлення централізовану електричну мережу, резервний дизель-генератор і сонячні батареї. До ввідно-розподільчого пристрою ВРП надходить електрика від зовнішньої мережі [1]. Тут стоять лічильник та захист від стрибків напруги. Пристрій автоматичного введення резерву АВР перемикає систему з основної мережі на дизель-генератор, якщо електрика повністю зникає [2]. Випрямна система перетворює змінний струм 220 В на постійний 48 В [3]. Випрямна система будується на

модульному принципі, в якій модулі підключені паралельно, щоб забезпечити надійність, якщо один із модулів вийде з ладу.

Фотоелектричні модулі (сонячні панелі) генерують постійний струм, який через спеціальний MPPT контролер заряду одразу подається на головну шину [4]. До головної шини надходять всі потоки енергії. Напруга цієї шини становить 48 В, що одночасно відповідає вимогам безпеки для телекомунікаційних систем і зменшує втрати електрики при її транспортуванні до передавачів. Головна шина пов'язана з системою контролю BMS [7], що керує роботою всього об'єкта.

Цифровий передавач (DVB-T2) [8] є головним споживачем електрики на об'єкті. Споживачами електрики також є обладнання для прийому сигналу (супутникові антени та тюнери) [9], мережеве обладнання (комутатори для передачі даних) [10], а також система моніторингу [11], за допомогою якої дистанційно контролюється робота і стан всього обладнання.

1.2 Типи фотоелектричних установок, їх переваги та недоліки

Для забезпечення безперебійного живлення телеретрансляторів та інших об'єктів критичної інфраструктури використовують різні конфігурації фотоелектричних систем (ФЕС). Вибір конкретного типу системи залежить від наявності централізованої електромережі, вимог до автономності та економічної доцільності. У сучасній практиці виділяють три основні типи установок.

Автономні фотоелектричні системи (Off-Grid). Такі системи працюють повністю незалежно від загальної електричної мережі. Вони є єдиним рішенням для телеретрансляторів, розташованих у важкодоступних гірських або лісових районах, де прокладання ліній електропередач є технічно неможливим або занадто дорогим.

До переваг Off-Grid- систем відносять повну енергетичну незалежність від енергопостачальних компаній; відсутність витрат на оплату електроенергії

та підключення до мереж; можливість встановлення в будь-якій географічній точці.

Недоліки Off-Grid- систем: висока початкова вартість через необхідність великої кількості акумуляторів; ризик припинення живлення при тривалій відсутності сонячної активності (понад 3-5 днів); необхідність регулярного технічного обслуговування акумуляторного парку.

Мережеві фотоелектричні системи (On-Grid). Системи цього типу працюють паралельно з централізованою енергомережею. Весь вироблений струм спрямовується на власні потреби або в загальну мережу.

Переваги On-Grid- систем: найнижча вартість обладнання (відсутні дорогі акумулятори); висока ефективність використання сонячної енергії.

Недоліки On-Grid- систем: непридатність для організації безперебійного живлення, оскільки згідно з вимогами безпеки, мережевий інвертор миттєво вимикається при зникненні напруги в зовнішній мережі. Це робить таку систему неможливою для використання як СБЖ для телеретрансляторів [4].

Гібридні фотоелектричні системи (Hybrid). Гібридні системи поєднують у собі переваги автономних та мережевих установок. Вони мають у своєму складі акумуляторні батареї та інтелектуальний інвертор, який може працювати як з мережею, так і автономно.

Переваги гібридних систем: максимальна надійність електропостачання, оскільки система автоматично перемикається на АКБ при зникненні мережі; пріоритетне використання сонячної енергії дозволяє значно економити витрати на електрику; можливість заряджати АКБ від мережі в періоди низької сонячної активності.

Недоліки гібридних систем: складність налаштування та монтажу; більш висока ціна порівняно з мережевими установками.

Порівняльна характеристика типів ФЕС для телеретрансляторів представлена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик різних типів ФЕС

Параметр	Автономна (Off-Grid)	Мережева (On-Grid)	Гібридна (Hybrid)
Незалежність від мережі	Повна	Відсутня	Часткова/Повна
Режим СБЖ	Так	Ні	Так
Потреба в АКБ	Обов'язкова	Ні	Обов'язкова
Складність системи	Висока	Низька	Дуже висока
Доцільність для ТРТ	Для віддалених об'єктів	Не рекомендується	Оптимальна



Рисунок 1.3 – Структурні схеми мережевої, автономної та гібридної фотоелектричних установок

На рис. 1.3 представлено три основні конфігурації побудови сонячних електростанцій, що розрізняються за принципом взаємодії з мережею та

наявністю системи накопичення енергії.

Мережева система (On-Grid) складається з сонячних панелей та мережевого інвертора. Енергія від панелей перетворюється інвертором і спрямовується безпосередньо в локальну або в загальну мережу. Ключова особливість – працює лише за наявності напруги в зовнішній мережі. Ідеально підходить для продажу енергії за «зеленим тарифом» або Net Billing.

Автономна система (Off-Grid) складається з сонячних панелей, контролера заряду, блоку АКБ, автономного інвертора. Панелі заряджають акумулятори через контролер (PWM або MPPT). Для живлення споживачів інвертор споживає енергію виключно з АКБ. Ключова особливість – система повністю незалежна від зовнішніх мереж. Проте, потрібно дуже точно розрахувати ємність акумуляторних батарей, щоб запасу електрики вистачало для стабільної роботи в похмурі дні та вночі.

Гібридна система (Hybrid) поєднує в собі переваги обох попередніх типів, даючи змогу як передавати надлишки енергії в мережу, так і забезпечувати резервне живлення. Інвертор здатен одночасно працювати з мережею, панелями та акумуляторами. Він розумно розподіляє енергію: заряджає АКБ, живить об'єкт, а зайву енергію віддає в мережу. Ключова особливість – система забезпечує безперебійне живлення, коли вимикають зовнішню мережу (як функція ДБЖ), і допомагає максимально ефективно використовувати генеровану сонячну енергію.

1.3 Особливості фотоелектричних установок для автономного електрозабезпечення об'єктів

Автономні фотоелектричні установки (ФЕУ) – це одне з найефективніших рішень, коли потрібно постійно жити електрикою віддалені об'єкти зв'язку. Особливо це стосується телевізійних ретрансляторів, які часто ставлять у важкодоступних місцях, на височинах або там, де немає звичайної електромережі. Використання сонячної енергії дозволяє бути

незалежними від центральних мереж і значно зменшити витрати на утримання таких систем [1, 2].

Автономна ФЕУ, призначена для живлення телеретранслятора, – це комплекс обладнання, що відповідає за перетворення сонячної енергії в електрику, її накопичення з наступною передачею споживачеві. До такої системи входять: фотоелектричні модулі (сонячні панелі); акумуляторні батареї; контролер заряду; інвертор (якщо потрібен змінний струм); система нагляду та захисту.

Ключова особливість таких автономних ФЕУ полягає в тому, що вони працюють ізольовано, без підключення до жодної зовнішньої електричної мережі. Це означає, що потрібно точно розрахувати, скільки енергії буде вироблятися та споживатися. Також обов’язково треба мати запас електрики, щоб об’єкт міг працювати вночі або коли сонячна активність низька [3].

Щоб телеретранслятор працював без жодних перебоїв, сонячна установка мусить відповідати таким вимогам: мати надійне електроживлення (працювати цілодобово); забезпечувати стабільну напругу на виході; мати достатній запас накопиченої енергії; бути стійкою до змін погодних умов; мати мінімальні втрати енергії в процесі її перетворюється та зберігання.

Найважливіше при проєктуванні автономних ФЕУ – це забезпечити енергетичний баланс. Тобто, скільки електроенергії виробляється, стільки ж її має і споживатися. Добове споживання електрики об’єктом розраховується за формулою:

$$W_{\text{доб}} = P_{\text{ср}} \cdot t, \quad (1.1)$$

де $W_{\text{доб}}$ – добове споживання електроенергії, Вт·год;

$P_{\text{ср}}$ – середня споживана потужність навантаження, Вт;

t – час роботи обладнання, год.

Для телеретрансляторів, що працюють у безперервному режимі (24 години на добу), час роботи становить $t = 24$ год, тому:

$$W_{\text{доб}} = P_{\text{ср}} \cdot 24. \quad (1.2)$$

Необхідна встановлена потужність фотоелектричної установки визначається з урахуванням коефіцієнтів втрат у системі:

$$P_{\text{ФЕУ}} = \frac{W_{\text{доб}}}{(H_{\text{ср}} \cdot \eta_{\text{сист}})}, \quad (1.3)$$

де $H_{\text{ср}}$ – середньодобова інсоляція, кВт·год/м²;

$\eta_{\text{сист}}$ – загальний коефіцієнт корисної дії системи (враховує втрати в контролері, інверторі, кабелях, акумуляторах).

Зазвичай $\eta_{\text{сист}}$ для автономних сонячних систем приймається в межах 0,65–0,8 [4].

На відміну від мережевих сонячних електростанцій, автономні ФЕУ для телеретрансляторів працюють у режимі безперервного електроживлення (24/7). Це означає, що система повинна забезпечувати: денне живлення навантаження від сонячних панелей; одночасне заряджання акумуляторних батарей; нічне живлення від акумуляторів; резервування у періоди низької генерації. У зв'язку з цим, баланс потужності в системі описується рівнянням:

$$P_{\text{ген}} = P_{\text{наван}} + P_{\text{зар}} + P_{\text{втрат}}, \quad (1.4)$$

де $P_{\text{ген}}$ – потужність, що генерується фотоелектричними модулями;

$P_{\text{наван}}$ – потужність споживача (телеретранслятора);

$P_{\text{зар}}$ – потужність заряду акумуляторів;

$P_{\text{втрат}}$ – сумарні втрати в елементах системи.

При недостатній генерації сонячної енергії дефіцит потужності компенсується за рахунок акумуляторних батарей. Ємність АКБ визначається за формулою:

$$C_{\text{ак}} = \frac{W_{\text{рез}}}{U_{\text{сист}} \cdot DOD \cdot \eta_{\text{ак}}}, \quad (1.5)$$

де $C_{\text{ак}}$ – необхідна ємність акумуляторів, А·год;

$W_{\text{рез}}$ – запас енергії на резервний період, Вт·год;

$U_{\text{сист}}$ – номінальна напруга системи, В;

DOD – допустима глибина розряду акумулятора;

$\eta_{\text{ак}}$ – коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї.

Для об'єктів зв'язку, зокрема телеретрансляторів, резерв автономної роботи зазвичай приймається 2–5 діб, що обумовлено необхідністю безперебійного мовлення навіть при тривалих несприятливих погодних умовах [5].

Найбільш поширеними типами акумуляторів, що можуть застосовуватись в автономних ФЕУ, є свинцево-кислотні (AGM, GEL) та літій-іонні (Li-ion, LiFePO₄).

Літій-залізо-фосфатні акумулятори мають більший ресурс циклів, вищу енергоефективність та менші втрати енергії, що робить їх перспективними для автономних систем живлення телекомунікаційного обладнання [6].

Ефективність роботи ФЕУ значною мірою залежить від кліматичних факторів: інтенсивності сонячного випромінювання; температури навколишнього середовища; запиленості повітря; кута нахилу панелей.

Потужність фотоелектричного модуля змінюється залежно від температури та освітленості і визначається виразом:

$$P = P_{STC} \cdot \frac{G}{G_{STC}} [1 + \alpha \cdot (T - T_{STC})], \quad (1.6)$$

де P_{STC} – номінальна потужність модуля при стандартних умовах;

G – поточна сонячна радіація, Вт/м²;

$G_{STC} = 1000$ Вт/м²;

α – температурний коефіцієнт потужності;

T – температура модуля, °C;

$T_{\text{STC}} = 25$ °C.

Для підвищення ефективності роботи системи в автономних установках застосовується оптимальний кут нахилу панелей, який приблизно дорівнює географічній широті місцевості [7].

Особливістю електрозабезпечення телеретрансляторів є підвищені вимоги до надійності, оскільки перерви в живленні призводять до втрати сигналу мовлення. Тому автономні ФЕУ повинні мати багаторівневу систему резервування, яка включає: запас ємності акумуляторів; можливість підключення резервного генератора; дублювання контролерів заряду; системи автоматичного моніторингу стану енергосистеми.

Імовірність безвідмовної роботи системи електроживлення можна оцінити за показником надійності:

$$R(t) = e^{(-\lambda t)}, \quad (1.7)$$

де $R(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи;

λ – інтенсивність відмов елементів системи;

t – час роботи системи.

1.4 Висновки

Застосування фотоелектричних установок у поєднанні з акумуляторними системами значно підвищує енергетичну автономність і надійність роботи телеретрансляторів порівняно з дизельними генераторами, оскільки зменшується кількість механічних елементів та потреба в технічному обслуговуванні [8].

Основними перевагами фотоелектричних установок для автономного електрозабезпечення телеретрансляторів є: повна енергетична незалежність; безперервність електроживлення; екологічна безпечність; низькі

експлуатаційні витрати; тривалий термін служби (20–25 років для сонячних модулів); можливість масштабування системи.

Таким чином, автономні фотоелектричні установки є технічно та економічно доцільним рішенням для систем безперебійного живлення телеретрансляторів, особливо в умовах відсутності централізованого електропостачання. Їх особливості полягають у необхідності накопичення енергії, забезпеченні енергетичного балансу, високій надійності та адаптації до змінних умов сонячної генерації.

2. МЕТОДИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Методика розрахунку добової потреби телеретранслятора в електричній енергії

Розрахунок добової потреби телеретранслятора в електричній енергії є ключовим етапом проектування системи безперебійного живлення з використанням фотоелектричних установок. Правильне визначення енергоспоживання дозволяє обґрунтовано вибрати потужність сонячної електростанції, ємність акумуляторних батарей та параметри перетворювального обладнання.

Телеретранслятори належать до категорії відповідальних споживачів електроенергії та працюють у безперервному режимі (24 години на добу). До складу їх енергоспоживання входять: передавальне обладнання; підсилювачі потужності; блоки обробки сигналу; системи охолодження (вентилятори, кондиціонери); системи моніторингу та автоматики; допоміжне обладнання (освітлення, системи безпеки).

Сумарна добова потреба в електричній енергії визначається як сума енергоспоживання всіх складових елементів системи живлення.

На першому етапі необхідно скласти перелік усіх електроспоживачів телеретранслятора із зазначенням таких параметрів, як: номінальної потужності P_i , Вт; режиму роботи; часу роботи протягом доби t_i , год; коефіцієнта використання потужності k_i .

Основними споживачами енергії телеретранслятора зазвичай є: передавач (основне навантаження); антенно-фідерний тракт (активні елементи); система охолодження; мережеве та комутаційне обладнання; система резервування.

Добове споживання електроенергії кожним електроприймачем визначається за формулою:

$$W_i = P_i \cdot t_i \cdot k_i, \quad (2.1)$$

де W_i – добове споживання електроенергії i -го споживача, Вт·год;

P_i – номінальна потужність споживача, Вт;

t_i – час роботи протягом доби, год;

k_i – коефіцієнт завантаження (0,6–1,0 залежно від режиму роботи).

Для обладнання безперервної дії (передавач, сервери, системи зв'язку) приймається: $t_i = 24$ год, $k_i \approx 0,9$ –1,0.

Загальна добова потреба телеретранслятора в електричній енергії визначається як сума добових витрат усіх споживачів:

$$W_{\text{доб}} = \Sigma (P_i \cdot t_i \cdot k_i), \quad (2.2)$$

або у розгорнутому вигляді:

$$W_{\text{доб}} = W_{\text{перед}} + W_{\text{охол}} + W_{\text{авт}} + W_{\text{доп}}, \quad (2.3)$$

де $W_{\text{доб}}$ – загальна добова потреба в електроенергії, Вт·год;

$W_{\text{перед}}$ – енергія передавального обладнання;

$W_{\text{охол}}$ – енергія системи охолодження;

$W_{\text{авт}}$ – енергія систем автоматики та зв'язку;

$W_{\text{доп}}$ – енергія допоміжних систем.

У системах безперебійного живлення на базі фотоелектричних установок необхідно враховувати втрати в елементах енергетичного тракту: в інверторі ($\eta_{\text{інв}} = 0,9$ –0,95); контролері заряду ($\eta_{\text{к}} = 0,95$ –0,98); акумуляторній батареї ($\eta_{\text{ак}} = 0,85$ –0,95); кабельні лінії ($\eta_{\text{кб}} = 0,97$ –0,99). З урахуванням втрат розрахункова добова потреба в електроенергії визначається за формулою:

$$W_{\text{доб}_{\text{розр}}} = \frac{W_{\text{доб}}}{\eta_{\text{сист}}}, \quad (2.4)$$

де $\eta_{\text{сист}} = \eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{ак}} \cdot \eta_{\text{кб}}$ – загальний коефіцієнт корисної дії системи.

Для автономних фотоелектричних систем зазвичай приймають $\eta_{\text{сист}} = 0,65\text{--}0,8$.

Оскільки телеретранслятори є об'єктами безперервного мовлення, при розрахунку необхідно передбачати резерв електроенергії на випадок: похмурих днів; зниження сонячної інсоляції; аварійних режимів.

Розрахункова добова потреба з урахуванням резерву визначається:

$$W_{\text{рез}} = W_{\text{доб}_{\text{розр}}} \cdot k_{\text{рез}}, \quad (2.5)$$

де $k_{\text{рез}}$ – коефіцієнт резервування (1,2–1,5 для об'єктів зв'язку).

Середня потужність $P_{\text{ср}}$, необхідна для живлення телеретранслятора, визначається як:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{доб}}}{24}. \quad (2.6)$$

Максимальна потужність навантаження визначається з урахуванням пускових струмів та пікових режимів:

$$P_{\text{макс}} = P_{\text{ср}} \cdot k_{\text{пик}}, \quad (2.7)$$

де $k_{\text{пик}}$ – коефіцієнт пікового навантаження (1,2–1,4).

Алгоритм розрахунку добової потреби в електроенергії полягає в наступному:

- скласти таблицю споживачів електроенергії телеретранслятора;
- визначити потужність кожного елемента P_i ;

- встановити режим та час роботи t_i ;
- розрахувати добове споживання кожного споживача W_i ;
- просумувати всі значення W_i для отримання $W_{\text{доб}}$;
- врахувати втрати в системі живлення;
- врахувати коефіцієнт резерву для безперебійної роботи;
- визначити середню та максимальну потужність системи.

Для фотоелектричних систем електроживлення телеретрансляторів важливо враховувати нерівномірність генерації протягом доби. Тому енергетичний баланс системи описується рівнянням:

$$W_{\text{ген}} \geq W_{\text{доб,розр}}, \quad (2.8)$$

де $W_{\text{ген}}$ – добова генерація фотоелектричної установки.

При цьому значна частина енергії, виробленої вдень, накопичується в акумуляторних батареях і використовується в нічний час, що є принциповою особливістю автономних систем безперебійного живлення телекомунікаційних об'єктів.

Таким чином, методика розрахунку добової потреби телеретранслятора в електричній енергії базується на детальному аналізі електричних навантажень, урахуванні режимів роботи обладнання, втрат у системі живлення та необхідного резерву енергії, що забезпечує надійну та безперебійну роботу телеретрансляційного обладнання в умовах автономного електропостачання [8].

2.2 Методика розрахунку надходження сонячної енергії до фотоелектричних модулів

Розрахунок надходження сонячної енергії до фотоелектричних модулів є одним із ключових етапів проєктування системи безперебійного живлення

телеретрансляторів на базі сонячної енергії. Від правильності визначення кількості сонячної радіації, що падає на поверхню фотоелектричних панелей, залежить вибір встановленої потужності фотоелектричної установки, ємності акумуляторних батарей та надійність роботи всієї системи електропостачання.

Сонячна енергія, що надходить до поверхні Землі, характеризується сонячною радіацією, яка вимірюється у Вт/м^2 або $\text{кВт}\cdot\text{год/м}^2$. Основними складовими сонячного випромінювання є: пряма (пряме сонячне випромінювання), розсіяна (дифузна) та відбита від поверхні Землі радіація.[20]

Сумарна сонячна радіація, що надходить на похилу поверхню фотоелектричних модулів, визначається як:

$$H_{\Sigma} = H_{\text{пр}} + H_{\text{роз}} + H_{\text{відб}}, \quad (2.9)$$

де H_{Σ} – сумарна сонячна радіація на поверхні модулів, $\text{кВт}\cdot\text{год/м}^2$;

$H_{\text{пр}}$ – пряма складова сонячної радіації;

$H_{\text{роз}}$ – розсіяна складова;

$H_{\text{відб}}$ – відбита складова радіації.

Для автономних фотоелектричних систем, що використовуються для живлення телеретрансляторів, визначення сумарної радіації є критичним, оскільки система повинна працювати в умовах змінної інсоляції протягом року.

На першому етапі розрахунку визначають середньомісячні або середньорічні значення сонячної інсоляції для конкретної географічної місцевості розміщення телеретранслятора. Ці дані отримують із метеорологічних довідників або баз даних сонячної радіації.

Середньодобова сонячна радіація на горизонтальну поверхню позначається:

$$H_{\text{гор}}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{м}^2 \cdot \text{добу}}. \quad (2.10)$$

Річна кількість сонячної енергії визначається:

$$H_{\text{річ}} = \Sigma H_{\text{міс}}, \quad (2.11)$$

де $H_{\text{міс}}$ – середньомісячна сонячна радіація, кВт·год/м².

Для проектування автономних енергосистем використовують найгірший (зимовий) місяць, коли інсоляція є мінімальною, що забезпечує гарантовану роботу системи протягом року.

Фотоелектричні модулі зазвичай встановлюються під певним кутом нахилу до горизонту, тому необхідно перерахувати інсоляцію з горизонтальної площини на похилу.

Сонячна радіація на похилу поверхню визначається:

$$H_{\beta} = H_{\text{гор}} \cdot R, \quad (2.12)$$

де H_{β} – сонячна радіація на поверхні модулів, кВт·год/м²;

R – коефіцієнт переходу від горизонтальної до похилої поверхні.

Коефіцієнт R залежить від кута нахилу модулів β , географічної широти φ , пори року; орієнтації панелей відносно півдня.

Для оптимальної річної генерації кут нахилу панелей приймається таким, що дорівнює географічній широті місцевості φ , тобто $\beta = \varphi$. Для забезпечення зимового максимуму енергогенерації (актуально для безперебійного живлення телеретрансляторів) варто обрати $\beta = \varphi + 10^{\circ} \dots 15^{\circ}$.

Миттєва щільність потоку сонячної радіації, що падає на поверхню модуля, визначається:

$$G = G_0 \cdot \cos(\theta), \quad (2.13)$$

де G – щільність потоку сонячної радіації на поверхні модуля, Вт/м²;

G_0 – сонячна радіація на перпендикулярну поверхню;

θ – кут падіння сонячних променів на площину модуля.

Кут падіння визначається залежно від: сонячної деклінації; годинного кута; географічної широти; кута нахилу панелей.

Ефективна кількість сонячної енергії, що використовується фотоелектричними модулями, розраховується за формулою:

$$E_{\text{сон}} = H_{\beta} \cdot S_{\text{мод}} \quad (2.14)$$

де $E_{\text{сон}}$ – добова сонячна енергія, що надходить до модулів, кВт·год;

$S_{\text{мод}}$ – сумарна площа фотоелектричних модулів, м².

З урахуванням коефіцієнта корисної дії фотоелектричних модулів фактична вироблена енергія становить:

$$E_{\text{ген}} = H_{\beta} \cdot S_{\text{мод}} \cdot \eta_{\text{мод}} \quad (2.15)$$

де $\eta_{\text{мод}}$ – ККД фотоелектричних модулів (0,15–0,22).

При розрахунку вироблення енергії ФЕУ необхідно враховувати реальні втрати, що виникають у системі, а саме: температурні втрати; втрати на забруднення поверхні модулів; втрати в кабелях; втрати в контролері та інверторі; втрати на невідповідність параметрів модулів.

Загальний коефіцієнт втрат визначається:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{мод}} \cdot \eta_{\text{контр}} \cdot \eta_{\text{інв}} \cdot \eta_{\text{кб}} \cdot \eta_{\text{тем}} , \quad (2.16)$$

де $\eta_{\text{контр}}$ – ККД контролера заряду;

$\eta_{\text{інв}}$ – ККД інвертора;

$\eta_{\text{кб}}$ – ККД кабельних ліній;

$\eta_{\text{темп}}$ – температурний коефіцієнт.

Реальна кількість енергії, що надходить до навантаження, визначається:

$$E_{\text{реал}} = H_{\beta} \cdot S_{\text{мод}} \cdot \eta_{\text{заг}}. \quad (2.17)$$

Температура фотоелектричних модулів значно впливає на їх продуктивність. Зменшення потужності при підвищенні температури визначається:

$$P_T = P_{STC} \cdot [1 - \gamma \cdot (T_{\text{мод}} - 25)], \quad (2.18)$$

де P_T – потужність модуля при робочій температурі;

P_{STC} – номінальна потужність при стандартних умовах;

γ – температурний коефіцієнт потужності (0,004–0,005 1/°C);

$T_{\text{мод}}$ – температура модуля, °C.

Для спрощених інженерних розрахунків використовують поняття еквівалентних сонячних годин:

$$t_{\text{екв}} = \frac{H_{\beta}}{G_{STC}}, \quad (2.19)$$

де $t_{\text{екв}}$ – еквівалентна тривалість сонячного сьйва, год;

$G_{STC} = 1 \text{ кВт/м}^2$ – стандартна сонячна радіація.

Тоді добова генерація енергії фотоелектричною установкою визначається:

$$E_{\text{ген}} = P_{\text{вст}} \cdot t_{\text{екв}} \cdot \eta_{\text{сист}}, \quad (2.20)$$

де $P_{\text{вст}}$ – встановлена потужність фотоелектричних модулів, кВт;

$\eta_{\text{сист}}$ – загальний ККД фотоелектричної системи.

При проектуванні систем безперебійного живлення телеретрансляторів необхідно враховувати роботу системи в найменш сприятливий зимовий період; необхідність цілодобового електроживлення (24/7); накопичення енергії в акумуляторах; запас потужності 20–40 %.

Таким чином, методика розрахунку надходження сонячної енергії до фотоелектричних модулів базується на визначенні сонячної інсоляції для конкретного регіону, перерахунку її на похилу поверхню панелей, урахуванні коефіцієнта корисної дії модулів, системних втрат та кліматичних факторів. Це дозволяє забезпечити надійне та безперебійне електроживлення телеретранслятора за рахунок енергії сонячного випромінювання в автономному режимі [7].

2.3 Методика розрахунку необхідної ємності акумуляторної батареї

При розробці фотоелектричної системи безперебійного живлення для телеретрансляторів одним з найголовніших кроків є розрахунок ємності акумулятора. Акумулятор потрібен, щоб накопичувати електричну енергію, яку виробляють сонячні панелі вдень, а потім використовувати її вночі або коли сонячна інсоляція є низькою. Якщо ємність акумулятора розрахована вірно, то обладнання для телеретрансляції працюватиме надійно, без перебоїв.

Для розрахунку ємності АКБ необхідно знати наступні параметри системи живлення телеретранслятора:

- добову потребу в електричній енергії, $W_{\text{доб}}$, Вт·год;
- номінальну напругу акумуляторної батареї, $U_{\text{сист}}$, В;
- кількість діб автономної роботи, $n_{\text{авт}}$;
- допустиму глибину розряду акумулятора DOD;
- коефіцієнт корисної дії акумуляторної батареї, $\eta_{\text{ак}}$;
- коефіцієнт запасу $k_{\text{зап}}$;
- температурний коефіцієнт експлуатації.

У випадку системи безперебійного живлення для телеком-об'єктів, таких

як телеретранслятори, зазвичай приймають наступні значення: $n_{\text{авт}} = 2 \dots 5$ діб;
 $DOD = 0,5 \dots 0,8$; $\eta_{\text{ак}} = 0,85 \dots 0,95$.

Визначають, скільки всього енергії має надати акумулятор, коли система працює без зовнішнього живлення:

$$W_{\text{ак}} = W_{\text{доб}} \cdot n_{\text{авт}}, \quad (2.21)$$

де $W_{\text{ак}}$ – необхідний запас енергії в акумуляторах, Вт·год;

$W_{\text{доб}}$ – добове енергоспоживання телеретранслятора, Вт·год;

$n_{\text{авт}}$ – кількість діб автономної роботи.

Якщо врахувати, що в системі живлення (інвертор, контролер, кабелі) є деякі втрати, то розрахункову енергію знаходимо так:

$$W_{\text{акрозр}} = \frac{W_{\text{ак}}}{\eta_{\text{сист}}}, \quad (2.22)$$

де $\eta_{\text{сист}}$ – загальний коефіцієнт корисної дії системи (0,7–0,85).

Номінальна ємність акумуляторної батареї визначається за формулою:

$$C_{\text{ном}} = W_{\text{акрозр}} / (U_{\text{сист}} \cdot DOD), \quad (2.23)$$

де $C_{\text{ном}}$ – необхідна номінальна ємність акумуляторної батареї, А·год.

Глибина розряду визначає частку ємності, яку можна використовувати без значного скорочення терміну служби акумулятора. Для різних типів акумуляторів характерні такі значення: для свинцево-кислотних АКБ $DOD = 0,5$; для АКБ типів GEL, AGM: $DOD = 0,6 - 0,7$; для LiFePO_4 : $DOD = 0,8 - 0,9$.

У реальних умовах експлуатації ємність АКБ зменшується з часом внаслідок старіння, температурних впливів та циклів заряд-розряд. Тому вводиться коефіцієнт запасу $k_{\text{зап}}$:

$$C_{\text{розр}} = C_{\text{ном}} \cdot k_{\text{зап}}, \quad (2.24)$$

де $C_{\text{розр}}$ – розрахункова ємність акумуляторної батареї, А·год.

Температура навколишнього середовища істотно впливає на ефективну ємність акумуляторних батарей. При зниженні температури ємність зменшується, що особливо актуально для автономних телеретрансляторів, розміщених на відкритій місцевості. Так, при температурах нижче 0 °С фактична ємність свинцево-кислотних акумуляторів може зменшуватись на 20–30 %.

Внаслідок цілодобового режиму роботи телеретрансляторів відбувається постійне глибоке циклування акумуляторної батареї, а час автономного енергоживлення $t_{\text{авт}}$ має відповідати умові:

$$t_{\text{авт}} \geq 24 \cdot n_{\text{авт}}. \quad (2.25)$$

Таким чином, методика розрахунку необхідної ємності акумуляторної батареї базується на визначенні добового енергоспоживання телеретранслятора, заданого часу автономної роботи, допустимої глибини розряду, втрат у системі, температурних умов експлуатації та коефіцієнта запасу. Комплексне врахування цих факторів забезпечує стабільне та безперебійне електроживлення телеретранслятора в автономній фотоелектричній системі.

2.4 Методика розрахунку необхідної встановленої потужності фотоелектричних модулів

Щоб забезпечити безперебійне живлення телеретрансляторів за рахунок сонячної енергії, важливо визначити кількість сонячних панелей, яку необхідно встановити. Потужність, яку вироблятимуть ці панелі, повинна покривати всі добові потреби об'єкта в енергії, компенсувати втрати в самій

системі, а також створювати запас для забезпечення живлення в періоди нестачі сонячної інсоляції.

Щоб розрахувати потужність сонячних панелей, потрібно врахувати:

- обсяг електроенергії, який телеретранслятор споживає за добу ($W_{\text{доб}}$, Вт·год);
- надходження сонячної енергії в середньому за добу на квадратний метр ($H_{\text{доб}}$, кВт·год/м²·добу);
- еквівалентну кількість годин сонячного сяйва за добу ($t_{\text{екв}}$, год);
- ефективність сонячних панелей ($\eta_{\text{мод}}$);
- ефективність системи в цілому ($\eta_{\text{сист}}$);
- необхідний запас потужності ($k_{\text{зап}}$);
- параметри розташування сонячних панелей (кут нахилу та азимутальний кут);
- особливості погодних умов для місцевості, де система працюватиме.

Якщо телеретранслятор працює повністю автономно, тобто без підключення до централізованої електромережі, то розрахунок варто виконувати, виходячи з найменшого надходження сонячної радіації, що спостерігається в році – зазвичай це зимовий місяць. Це забезпечить стабільність роботи системи цілий рік.

Спочатку необхідно визначити, скільки електроенергії телеретранслятор споживає за добу, враховуючи безперервність його роботи.

Сонячна установка має виробляти такий обсяг енергії, щоб покривати не лише на споживання, але й втрати у деяких частинах системи, як-то: у контролері заряду; в інверторі; акумуляторній батареї; кабельних лінії; а також враховувати температурні втрати [17].

Розрахунковий обсяг добової генерації визначається формулою:

$$W_{\text{ген}} = W_{\text{доб}} / \eta_{\text{сист}} \cdot \quad (2.26)$$

Для автономних сонячних систем зазвичай приймають

$$\eta_{\text{сист}} = 0,65 \dots 0,8.$$

Еквівалентна тривалість сонячного саява визначається через добову інсоляцію, враховуючи, що стандартна сонячна інтенсивність становить $G_{STC} = 1 \text{ кВт/м}^2$. У практичних інженерних розрахунках $t_{\text{екв}}$ називають “піковими сонячними годинами” (Peak Sun Hours).

Необхідна встановлена потужність фотоелектричної установки визначається за енергетичним балансом системи з використанням виразів (2.20) та (2.26). Тоді для забезпечення безперебійної роботи телеретранслятора необхідна кількість фотоелектричних модулів $N_{\text{мод}}$ становитиме:

$$N_{\text{мод}} = \frac{P_{\text{вст}}}{P_{\text{ном}}}, \quad (2.27)$$

де $P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність одного фотоелектричного модуля, Вт.

Остаточне значення, отримане за формулою (2.27), округлюється до більшого цілого числа для забезпечення енергетичного резерву.

Таким чином, методика розрахунку необхідної встановленої потужності фотоелектричних модулів базується на визначенні добового енергоспоживання телеретранслятора, урахуванні кліматичних умов, еквівалентної тривалості сонячного саява, втрат у системі, температурних факторів та коефіцієнта запасу. Комплексне врахування зазначених параметрів забезпечує надійну та безперебійну роботу системи електроживлення телеретранслятора в автономному режимі з використанням енергії сонячного випромінювання [5].

2.5 Підходи щодо вибору обладнання для компонування фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора

При проєктуванні сонячної системи для автономного живлення телеретранслятора особливу увагу потрібно приділити підбору обладнання,

оскільки від цього залежить надійність, безперебійність та економічність роботи системи зв'язку [1, 2].

Сонячна система безперебійного живлення ретранслятора – це, по суті, окремий енергетичний комплекс, до складу якого входять фотоелектричні модулі, акумуляторна батарея, контролер заряду, інвертор (у випадку наявності споживачів змінного струму), система захисту та комутації, система моніторингу та керування [4].

Обирати обладнання необхідно з урахуванням як його технічних параметрів, так і умов, в яких воно експлуатуватиметься [5].

Сонячні панелі – це головне генеруюче обладнання, при виборі якого необхідно проаналізувати основні його технічні характеристики та їх залежність від зовнішніх умов [1]. Зокрема, необхідно звернути увагу на номінальну потужність модуля, його коефіцієнт корисної дії, температурний коефіцієнт потужності, робочі напругу та струм, термін служби (зазвичай 20 – 25 років), деградаційні характеристики [6].

Для об'єктів зв'язку краще обирати монокристалічні кремнієві панелі, адже вони демонструють високий ККД (18–22 %), що дозволяє розмістити масив модулів більшої потужності на обмеженій площі. Це підтверджено дослідженнями в галузі автономних енергосистем для зв'язку [2, 7].

Враховуючи цілодобовий режим роботи телеретранслятора, важливо обрати надійні АКБ, щоб ретранслятор продовжував безперервно функціонувати в нічний період або в умовах низької сонячної інсоляції [3]. При виборі типу акумулятора важливо враховувати його номінальну ємність, номінальну напругу, допустима глибину розряду, кількість циклів заряд-розряд, ККД цього циклу, температурний діапазон експлуатації [8].

Для безперебійного живлення ретрансляторів найкраще підходять літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори, оскільки вони, на відміну від свинцево-кислотних, мають тривалий термін служби (витримують велику кількість циклів), мають високий ККД і допускають глибокий розряд [8].

Контролер заряду є важливим компонентом автономної

фотоелектричної системи, що регулює режими заряджання/розряджання АКБ, не даючи акумуляторам перезарядитися або повністю розрядитися [2].

Є два основні види контролерів: PWM (широтно-імпульсні) та MPPT (з відстеженням точки максимальної потужності). Для автономних систем ретрансляторів варто використовувати MPPT-контролери, адже вони дозволяють використовувати сонячну енергію на 15–30 % ефективніше, ніж PWM-контролери [6].

Використання розумні системи керування дозволяє підвищити надійність електропостачання та зменшити витрати на обслуговування системи. Такий підхід гарантує, що телеретранслятор працюватиме стабільно, економічно, без перебоїв, з пріоритетом живлення від енергії сонячного випромінювання.

2.6 Висновки

Телеретранслятори є споживачами електрики, що працюють в безперервному режимі і потребують надійного та безперервного живлення, у зв'язку з чим їх системи електропостачання повинні бути надійними, мати резервування та забезпечувати якісне електроживлення.

Головними споживачами електричної енергії у телеретрансляторах є передавачі, підсилювачі, системи для обробки сигналу, охолодження та системи автоматики. Ці споживачі створюють цілодобове рівномірне навантаження.

Сонячні фотоелектричні установки для забезпечення електроенергією об'єктів зв'язку мають комплектуватися акумуляторною батареєю, ємність якої повинна бути достатньою для живлення обладнання в мінливих умовах сонячної інсоляції, в нічний період та перервах у централізованому електропостачання внаслідок аварійних ситуацій в централізованій мережі.

Представлено методику розрахунку добової потреби телеретранслятора в електричній енергії, що базується на аналізі потужності пристроїв, їх

завантаженості та тривалості роботи цих пристроїв протягом доби.

Описано методику визначення надходження сонячної енергії до поверхні фотоелектричних модулів, враховуючи кліматичні умови місця розташування об'єкту, кут нахилу та азимут приймальної поверхні панелей. Доведено, що для автономних систем безперебійного живлення розрахунки доцільно виконувати, виходячи з кліматичних даних для місяця з найгіршою сонячною інсоляцією.

Виходячи з рівняння енергетичного балансу між добовою спожитою і виробленою енергіями, запропоновано методику визначення необхідної встановленої потужності фотоелектричного масиву та кількості сонячних панелей в ньому.

Особливу увагу приділено методиці розрахунку необхідної ємності акумуляторної батареї, виходячи з даних щодо добового енергоспоживання об'єкту, заданого часу автономної роботи, припустимої глибини розряду та температурних умови експлуатації. Показано, що використання сучасних літій-залізо-фосфатних акумуляторів сприяє значному підвищенню надійності системи безперебійного живлення та подовженню терміну її функціонування.

Описано підходи до вибору обладнання для формування фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора. Визначено, що оптимальна архітектура такої системи має включати високоефективні фотоелектричні модулі, MPPT-контролер заряду, акумуляторну батарею достатнього об'єму, інвертор з чистою синусоїдою, а також комплекс захисту та моніторингу.

Отримані результати формують методичну базу для подальшого проєктування та оптимізації автономних систем електроживлення, призначених для телеретрансляторів.

3. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Опис телеретрансляторної системи, що досліджується

У центрі уваги даного дослідження знаходиться типовий цифровий телевізійний ретранслятор середньої потужності, спеціально розроблений для функціонування в межах одночастотної мережі (SFN) стандарту DVB-T2.

Ця система сконструйована за модульним принципом і розміщена у стандартній 19-дюймовій стійці; її архітектура передбачає інтеграцію таких ключових підсистем, як тракт обробки та підсилення сигналу та система гарантованого електроживлення.

Тракт обробки та підсилення сигналу формується двома ідентичними підсилювальними модулями (РА1 та РА2), які працюють за принципом гарячого резервування, що є критично важливим для забезпечення безперебійності. Примітно, що кожен із цих модулів обладнаний автономною системою моніторингу та захисту, яка контролює такі параметри, як коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ) та температурний режим.

В системі гарантованого електроживлення вхідне живлення забезпечується від мережі змінного струму з параметрами 230 В / 50 Гц. Натомість, внутрішня шина живлення постійного струму працює з напругою 48 В, що не тільки забезпечує високий рівень надійності, а й гарантує оптимальну сумісність з акумуляторними батареями (АКБ).

В рамках дослідницької частини роботи детально розраховуються параметри фотоелектричної системи, призначеної для живлення телеретранслятора. Ці розрахунки виконуються згідно з методиками, представленими у розділі 2. Отримані результати дозволяють побудувати графіки річного вироблення електроенергії фотоелектричним масивом, аналіз яких слугує основою для формування обґрунтованих висновків.

Ключова етапом дослідження є виявленні оптимального типу фотоелектричних модулів, встановленні їх необхідної кількості та оцінці

добового обсягу електроенергії, що генерується фотоелектричним масивом, задля безперебійної та надійної роботи телеретрансляторної системи.

Дослідження передбачає реалізацію кількох етапів. Першим етапом є встановлення енергетичних потреб телеретрансляційної системи. На основі розуміння енергоспоживання здійснюється обґрунтований вибір відповідного типу фотоелектричних модулів. Цей вибір у поєднанні з оцінкою потреб дозволяє визначити необхідну встановлену потужність фотоелектричної станції для стабільного живлення. Враховуючи необхідну потужність, далі виконується детальний розрахунок кількості фотоелектричних модулів.

Для всебічної оцінки продуктивності системи, проводиться розрахунок добового вироблення електроенергії фотоелектричним масивом, враховуючи сезонні коливання протягом року, аналізується динаміки генерації електричної енергії, здійснюється побудова та аналіз відповідних графіків та діаграм.

Завершальним етапом є всебічний аналіз отриманих результатів щодо доцільність та ефективність використання сонячної енергії для забезпечення автономного функціонування телеретрансляторної системи.

3.2 Розрахунок добової потреби телеретрансляційної системи в електричній енергії та аналіз його результатів

Добова потреба в електроенергії визначається як сума енергії, яку споживає все обладнання системи за 24 години роботи з урахуванням різних режимів навантаження. Спочатку визначається сумарна встановлена потужність усіх елементів системи. Сумарна потужність дорівнює сумі потужностей передавача, підсилювачів, приймального обладнання, системи живлення, допоміжних пристроїв та втрат. Номінальні потужності споживачів телеретрансляційної системи та режим роботи відповідного обладнання зазначено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Перелік та технічні характеристики споживачів електричної енергії

Найменування обладнання	Номінальна потужність, кВт	Кількість	Режим роботи	Примітка
Передавальне обладнання	0,5 – 0,7	1	Постійний	Основне навантаження
Система охолодження	0,2 – 0,4	1	Циклічний	Залежить від температури
Автоматика та моніторинг	0,1	1	Постійний	Джерела живлення, контролери
Освітлення та сервіс	0,05	1	Епізодичний	Аварійне/технічне
РАЗОМ	1,2	—	—	

Технічні характеристики споживачів мають певні особливості. Так, передавальне обладнання має активно-індуктивний характер навантаження. Вимоги до якості енергії – високі. Чутливе до стрибків напруги та гармонійних спотворень. Потребує чистої синусоїди від інвертора. Режим роботи – цілодобовий (S1).

Система охолодження (кондиціонування/вентиляція) має індуктивний характер навантаження (пускові струми двигунів). Режим роботи – циклічний (S3). Важливо враховувати, що при старті компресора можливий короткочасний сплеск потужності, який інвертор повинен витримувати.

Автоматика та телеметрія живиться постійним струмом або низьковольтним змінним. Основна вимога – безперебійність є критичною для передачі даних про стан об'єкта.

Розрахунок добової потреби телеретранслятора в електричній енергії виконується на основі аналізу потужності P_i всіх електроприймачів, що входять до складу системи, та часу їх роботи протягом доби t_i :

$$W_{\text{доб}} = \Sigma (P_i \times t_i \times k_i), \quad (3.1)$$

де коефіцієнт використання потужності k_i приймається з діапазону (0,6–1,0).

З урахуванням втрат у системі електрозабезпечення розрахункова добова потреба в електричній енергії становить:

$$W_{\text{розрах}} = \frac{W_{\text{доб}}}{\eta_{\text{сист}}}, \quad (3.2)$$

де загальний коефіцієнт корисної дії системи живлення $\eta_{\text{сист}}$ для автономних систем становить 0,75–0,85.

Розрахунок потреби в електричній енергії з урахуванням коефіцієнта резервування $k_{\text{рез}}$, що для об'єктів зв'язку приймається 1,2–1,3, здійснюється у відповідності з виразом:

$$W_{\text{рез}} = W_{\text{розрах}} \times k_{\text{рез}}. \quad (3.3)$$

Всі розрахунки здійснювався із залученням програмного середовища Maple 2018. Розрахунок добової потреби об'єкта в електричній енергії в середовищі Maple 2018 наведено на рис. 3.1.

При номінальній потужності передавача 450 Вт, середньому коефіцієнті використання його потужності 0,95 та 24-годинному циклі роботи маємо наступну добову потребу в електричній енергії для живлення цього передавача:

$$W_{\text{перед}} = 450 \text{ Вт} \times 24 \text{ год} \times 0,95 = 10\,260 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 10,26 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Розрахувавши добову потребу для всіх компонент телеретранслятора, у відповідності до формули (3.1) отримуємо наступну сумарну добову потребу в електричній енергії:

$$W_{\text{доб}} = \Sigma W_i = 10,26 + 8,21 + 2,04 + 3,46 + \dots = 31,20 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

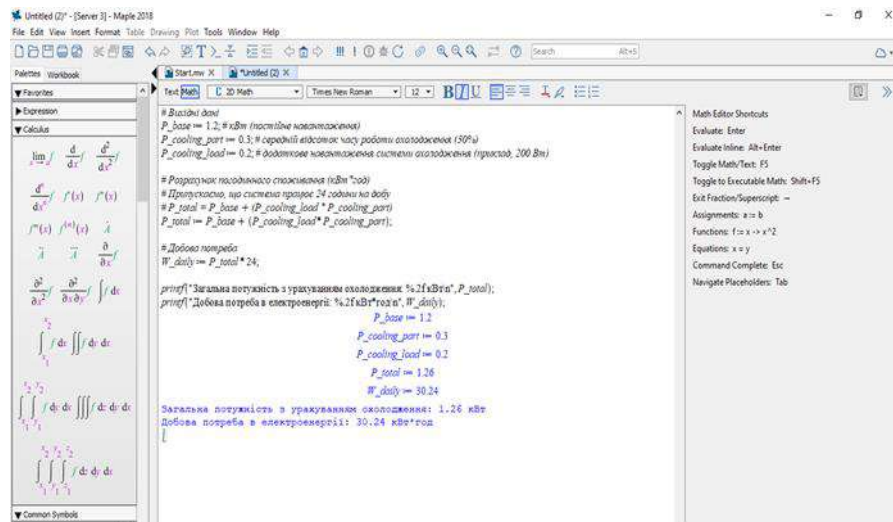


Рисунок 3.1 – Приклад розрахунку добової потреби об'єкта в електричній енергії з використанням середовища Maple 2018

Приймаючи $\eta_{\text{сист}} = 0,82$, за формулою (3.2) отримуємо:

$$W_{\text{розрах}} = \frac{32,45}{0,82} = 39,57 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Приймаючи коефіцієнт резервування $k_{\text{рез}} = 1,25$, що є типовим значенням для об'єктів телекомунікаційної інфраструктури, за формулою (3.3) знаходимо загальну добову потребу об'єкта в електричній енергії:

$$W_{\text{рез}} = 39,57 \times 1,25 = 49,46 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

В табл. 3.2 наведено результати розрахунку добової потреби в електричній енергії для живлення телеретранслятора протягом року у відповідні місяці з урахуванням циклічності роботи системи охолодження.

Таблиця 3.2 – Розподіл добової потреби в електроенергії за місяцями

Місяць	$W_{\text{доб}}$, кВт·год	$W_{\text{розрах}}$, кВт·год	$W_{\text{рез}}$, кВт·год	Примітка
Січень	31,20	38,05	47,56	Кондиціонер вимкнено
Лютий	31,20	38,05	47,56	Кондиціонер вимкнено
Березень	32,10	39,15	48,94	Кондиціонер 2 год/добу
Квітень	33,45	40,79	50,99	Кондиціонер 4 год/добу
Травень	35,80	43,66	54,58	Кондиціонер 6 год/добу
Червень	38,15	46,52	58,15	Кондиціонер 8 год/добу
Липень	38,15	46,52	58,15	Кондиціонер 8 год/добу
Серпень	38,15	46,52	58,15	Кондиціонер 8 год/добу
Вересень	35,80	43,66	54,58	Кондиціонер 6 год/добу
Жовтень	33,45	40,79	50,99	Кондиціонер 4 год/добу
Листопад	32,10	39,15	48,94	Кондиціонер 2 год/добу
Грудень	31,20	38,05	47,56	Кондиціонер вимкнено

3.3 Вибір можливого місця розташування та просторової орієнтації фотоелектричних модулів

Оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів β визначається з урахуванням географічної широти місцевості φ та сезонності експлуатації системи. Базова формула для розрахунку кута нахилу є наступною:

$$\beta_{\text{опт}} = \varphi + \Delta\beta \quad (3.4)$$

де $\Delta\beta$ – коригувальний кут, залежний від сезону.

В табл. 3.3 наведено значення кутів нахилу модулів в залежності від

сезонності експлуатації фотоелектричної системи.

Таблиця 3.3 – Значення кутів нахилу фотоелектричних модулів

Сезон експлуатації	Формула розрахунку	Приклад для $\varphi = 46^\circ$ (Херсонська область)
Річний оптимум	$\beta = \varphi$	46°
Зимовий максимум	$\beta = \varphi + 10^\circ \dots 15^\circ$	$56^\circ \dots 61^\circ$
Літній максимум	$\beta = \varphi - 10^\circ \dots 15^\circ$	$31^\circ \dots 36^\circ$

З урахуванням архітектурних особливостей будівлі, в якій розміщується обладнання телеретранслятора, та наявності двосхилого даху, прийнято наступне рішення: основний масив панелей (10 од.) розміщується на південному схилі даху будівлі ($\gamma = 0^\circ$); додатковий масив (9 од.) – на південно-західному схилі ($\gamma = +30^\circ$) для збільшення генерації у післяобідній час. Таке компонування дозволяє максимізувати сумарну річну генерацію, розподілити виробництво енергії більш рівномірно протягом світлового дня, а також зменшити пікові навантаження на контролер заряду та акумуляторну батарею.

3.4 Розрахунок середнього добового надходження сонячної радіації до поверхні модулів в розрізі типового року

Середнє добове надходження сонячної радіації до поверхні модулів, що мають кут нахилу β , розраховувалось за формулою (2.12):

$$H_\beta = H_{\text{гор}} \times R.$$

Для розрахунку за цією формулою необхідно за метеорологічними даними знати середнє денне надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню $H_{\text{гор}}$, а також визначити коефіцієнт перерахунку сонячної радіації з

горизонтальної поверхні на нахилу R , що залежить від просторової орієнтації приймача у відповідності з виразом:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z}, \quad (3.5)$$

де θ – кут падіння прямих променів на похилу площину;

θ_z – зенітний кут Сонця.

Результати розрахунку середньодобового надходження сонячної радіації до поверхні фотоелектричних модулів, нахилених під кутом 45° та орієнтованих на південь або з відхиленням від південного напрямку на кут, не більший 30° , представлено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Надходження сонячної радіації до поверхні модулів

Місяць	$H_{гор}$, кВт·год/м ² /добу	Коефіцієнт перерахунку R	H_{β} , кВт·год/м ² /добу
Січень	1,13	2,2	2,486
Лютий	1,99	1,8	3,582
Березень	3,28	1,4	4,592
Квітень	5	1,1	5,5
Травень	6,16	0,95	5,852
Червень	6,57	0,9	5,913
Липень	6,59	0,92	6,0628
Серпень	5,89	1,1	6,479
Вересень	4,33	1,4	6,062
Жовтень	2,64	1,8	4,752
Листопад	1,33	2,3	3,059
Грудень	0,92	2,5	2,3
Середньорічне:			4,719983333

3.5 Вибір типу фотоелектричних модулів, визначення необхідної кількості модулів та розрахунок добового вироблення енергії фотоелектричним масивом в розрізі року

Вибір фотоелектричних модулів (ФЕМ) для системи безперебійного живлення телеретранслятора здійснювався на основі комплексного аналізу техніко-економічних показників з урахуванням специфіки експлуатації об'єкта зв'язку. При здійсненні вибору типу модуля враховували такі параметри, як номінальна потужність модуля, його коефіцієнт корисної дії, температурний коефіцієнт потужності, робочий діапазон температур, гарантований термін служби та темп деградації потужності, стійкість до механічних навантажень та кліматичних факторів, а також вартість одиниці потужності.

Для об'єктів телекомунікаційної інфраструктури, що експлуатуються в умовах відкритої місцевості та потребують максимальної надійності, доцільно застосовувати монокристалічні модулі з технологією n-type TOPCon, які забезпечують високий ККД (21–23%), низький температурний коефіцієнт потужності ($-0,30 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$), мінімальну деградацію (менше 0,4% на рік), покращену роботу при низькій освітленості та розсіяному випромінюванні.

На основі проведеного аналізу ринку та технічних вимог обрано високоефективний фотоелектричний модуль на основі монокристалічного кремнію Risen Energy RSM108-9-420N, виготовлений за сучасною технологією n-type TOPCon, Half-Cell. Технологія Half-Cell забезпечує ефективну роботу такого модуля навіть в умовах часткового затінення його приймальної поверхні сторонніми об'єктами.

Основні технічні характеристики обраного фотоелектричного модуля Risen Energy RSM108-9-420N представлено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики фотоелектричного модуля Risen Energy RSM108-9-420N

Параметр	Значення	Одиниця виміру
Тип напівпровідникового матеріалу	Монокристалічний кремній	—
Технологія виробництва	n-type TOPCon, Half-Cell	—
Номінальна потужність ($P_{\text{ном}}$)	420	Вт
ККД модуля ($\eta_{\text{мод}}$)	21,5	%
Номінальна напруга ($U_{\text{мрр}}$)	38,87	В
Струм у точці максимальної потужності ($I_{\text{мрр}}$)	13,78	А
Напруга холостого ходу ($U_{\text{ос}}$)	47,20	В
Струм короткого замикання ($I_{\text{сс}}$)	14,65	А
Температурний коефіцієнт потужності	–0,30	%/°C
Робочий діапазон температур	–40...+85	°C
Кількість комірок	108 (6×9 + 9×6)	шт.
Габаритні розміри	1722×1134×30	мм
Маса модуля	22,0	кг
Клас захисту	IP68	—
Гарантія на потужність	30 років ($\geq 87,4\% P_{\text{ном}}$)	—

Необхідна встановлена потужність фотоелектричної системи знаходиться з балансу генерованої та спожитої енергії з використанням виразів (2.20) та (2.26):

$$P_{\text{вст}} = (W_{\text{рез}} \times 1000) / (H_{\beta} \times \eta_{\text{сист}}).$$

Підстановка вихідних даних для місяця грудня, як місяця з найгіршою сонячною інсоляцією, у випадку кута нахилу модуля 40° дає наступний результат:

$$P_{\text{вст}} = \frac{47,56 \times 1000}{1,595 \times 0,82} = \frac{47\,560}{1,308} = 36\,360 \text{ Вт}.$$

Необхідна кількість модулів визначалась за формулою (2.27) і для забезпечення $P_{\text{вст}} = 36\,360$ Вт становить:

$$N_{\text{мод}} = \frac{36360}{420} = 86,6.$$

Округлюючи отриманий результат до найближчого цілого числа отримуємо $N_{\text{мод}} = 36\,360 / 420 = 87$ од.

Однак, з урахуванням обмеженої площі даху будівлі телеретранслятора та наявного підключення до резервного джерела (мережа/дизель-генератор), прийнято компромісне рішення щодо встановлення лише 19 модулів, які можна розмістити на даху будівлі, із загальною встановленою потужністю:

$$P_{\text{заг}} = 19 \times 420 = 7\,980 \text{ Вт} \approx 8,0 \text{ кВт}.$$

Енергія $W_{1\text{мод}}$, вироблена протягом доби одним модулем номінальною потужністю $P_{\text{ном}}$, визначається за формулою:

$$W_{1\text{мод}} = \frac{H_{\beta} \times P_{\text{ном}} \times k_{\text{втрат}}}{1000},$$

де H_{β} – середньодобова інсоляція на похилу поверхню, кВт·год/м²;

$k_{\text{втрат}}$ – сумарний коефіцієнт втрат (0,6–0,7 з урахуванням температури, забруднення, невідповідності параметрів).

Попередньо проведене в середовищі Maple моделювання показало, що найбільшого річного обсягу виробленої одним модулем енергії в кліматичних умовах Херсонської області можна досягти при куті його нахилу 40°.

Результати розрахунку середньодобового обсягу виробленої енергії модулем Risen Energy RSM108-9-420N при такому куті нахилу і південній орієнтації представлено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Розподіл середньодобового вироблення енергії модулем Risen Energy RSM108-9-420N за місяцями при куті нахилу 40°

Місяць	H_β , кВт·год/м ²	$k_{\text{втрат}}$	$W_{\text{мод}}$, кВт·год
Січень	1,863	0,70	0,55
Лютий	2,810	0,70	0,83
Березень	3,991	0,60	1,01
Квітень	5,316	0,60	1,34
Травень	5,898	0,60	1,49
Червень	6,011	0,50	1,26
Липень	6,158	0,50	1,29
Серпень	6,048	0,50	1,27
Вересень	5,139	0,60	1,29
Жовтень	3,755	0,60	0,95
Листопад	2,150	0,60	0,54
Грудень	1,595	0,70	0,47

Аналіз табл. 3.6 показує, що максимальне вироблення енергії фотоелектричним модулем Risen Energy RSM108-9-420N за даних умов розміщення спостерігається в травні, в той час як мінімальне – в грудні.

Розподіл місячного вироблення енергії фотоелектричною системою з 19 модулів Risen Energy RSM108-9-420N на фоні потреби телеретранслятора в електричній енергії за аналогічний період представлено в табл. 3.7. Також наведено дані щодо коефіцієнту покриття потреби об'єкта в електричній енергії за рахунок фотоелектричної генерації, який дорівнює відношенню обсягу генерованої електричної енергії $W_{\text{ген}}$ до спожитої $W_{\text{рез}}$:

$$k_{\text{покр}} = \frac{W_{\text{ген}}}{W_{\text{рез}}}.$$

Таблиця 3.7 – Розподіл місячних обсягів вироблення електроенергії фотоелектричною системою (19 модулів, $\beta = 40^\circ$) в розрізі року на фоні споживання

Місяць	Днів у місяці	Генерація $W_{\text{ген}}$, кВт·год/міс.	Споживання $W_{\text{рез}}$, кВт·год/міс.	Коефіцієнт покриття $k_{\text{покр}}$, %
Січень	31	323,95	1 474,36	22,0
Лютий	28	441,56	1 331,68	33,2
Березень	31	594,89	1 517,14	39,2
Квітень	30	763,80	1 529,7	49,9
Травень	31	877,61	1 691,98	51,9
Червень	30	718,20	1 744,5	41,2
Липень	31	759,81	1 802,65	42,1
Серпень	31	748,03	1 802,65	41,5
Вересень	30	735,30	1 637,4	44,9
Жовтень	31	559,55	1 580,69	35,4
Листопад	30	307,80	1 468,2	21,0
Грудень	31	276,83	1 474,36	18,8
За рік:	365	7 107,33	19 055,31	37,3

Як видно з табл. 3.7, рішення з організації фотоелектричної системи, що складається з 19 фотоелектричних модулів, розташованих на південному скаті покрівлі будівлі телеретранслятора, здатне забезпечити близько 37% від річної потреби об'єкта в електричній енергії лише за рахунок сонячної фотоелектричної генерації, що дозволяє економити на електричній енергії, що постачається з мережі, а також на паливі для генератора у випадку аварійних ситуацій з припиненням живлення від централізованої мережі.

Сезонна динаміка генерації демонструє максимальне вироблення електроенергії у травні (877,61 кВт·год/місяць), мінімальне – у грудні (276,83

кВт·год/місяць). Різниця між максимальним та мінімальним обсягами виробленої електричної енергії становить 3,17 рази, що відповідає кліматичним особливостям Херсонської області.

Протягом року фотоелектрична система покриває потребу телеретранслятора в електроенергії на 20 - 50%. У травні коефіцієнт покриття навантаження найбільший і становить 51,9%. Найменший коефіцієнт покриття спостерігається в місяць з найменшою сонячною інсоляцією – у грудні. Отже, у всі місяці року необхідне покриття нестачі електричної енергії за рахунок живлення об'єкту від зовнішньої мережі або резервного джерела живлення, в якості якого використовується штатний генератор на рідкому паливі та акумуляторна батарея.

Загальне річне вироблення системи становить 7 107,33 кВт·год при річному споживанні об'єкта 19 055,31 кВт·год. Це забезпечує середньорічний коефіцієнт покриття навантаження 37,3%, що вказує на відповідну економію паливних та фінансових ресурсів при обраній конфігурації системи. Так, при середньому тарифі на електроенергію 4,5 грн/кВт·год річна економія фінансових ресурсів лише на зменшенні обсягу закупівлі електричної енергії з централізованої мережі становить $E_{\text{екон}} = 7\,107,33 \times 4,5 \approx 31\,983$ грн/рік, що потенційно дозволяє досягти прийняттого терміну окупності фотоелектричної системи близько 5–7 років.

Окрім того, заміщення електроенергії з мережі сонячною генерацією дозволяє уникнути викидів CO₂ у обсязі $M_{\text{CO}_2} = 7\,107,33 \times 0,4 \approx 2843$ кг.

3.6 Розрахунок ємності акумуляторної батареї, вибір типу та необхідної кількості акумуляторів в батареї

Акумуляторна батарея є ключовим елементом системи безперебійного живлення, що забезпечує накопичення енергії, виробленої фотоелектричними модулями, та її подачу до навантаження в нічний час та в періоди недостатньої сонячної інсоляції.

Основними параметрами, на які потрібно орієнтуватись при виборі АКБ, є: номінальна ємність та напруга; допустима глибина розряду (DOD); кількість циклів заряд-розряд; температурний діапазон експлуатації; ефективність циклу заряд/розряд; термін служби та вартість експлуатації.

В табл. 3.8 наведено порівняння типових параметрів АКБ найбільш розповсюджених електрохімічних систем.

Таблиця 3.8 – Параметри АКБ різних електрохімічних систем

Параметр	Свинцево-кислотні (AGM)	Гелеві (GEL)	Літій-залізо-фосфатні (LiFePO ₄)
Номінальна напруга, В	12	12	12,8 / 25,6
Глибина розряду (DOD)	0,5	0,6–0,7	0,8–0,9
Кількість циклів (при 80% DOD)	300–500	500–800	3000–6000
ККД, %	75–80	80–85	95–98
Робоча температура, °C	–20...+50	–20...+60	–20...+60
Термін служби, років	3–5	5–7	10–15
Питома вартість, грн/Вт·год	1,2–1,8	1,8–2,5	3,5–5,0

Порівняльний аналіз, виконаний з використанням даних табл. 3.8, показав, що для системи безперебійного живлення телеретранслятора, який експлуатується в автономному режимі з цілодобовим навантаженням, варто обрано літій-залізо-фосфатні акумулятори (LiFePO₄) через великий ресурс циклів заряд-розряд, стабільну роботу при глибоких розрядах, мінімальні втрати енергії, вбудовану систему керування батареєю (BMS), компактність та меншу масу.

Розрахунок необхідної ємності АКБ виконується для найгіршого місяця інсоляції (грудень), коли генерація сонячної енергії мінімальна, а потреба в запасі енергії з акумуляторів – максимальна. У зв'язку з цим, вихідні параметри для розрахунку ємності АКБ прийняті наступними: розрахункова добова потреба з резервом (грудень) $W_{\text{рез}} = 47,56 \text{ кВт} \cdot \text{год}$; номінальна напруга системи $U_{\text{сист}} = 48 \text{ В}$ (стандарт для телекомунікацій); кількість діб автономної роботи: $n_{\text{авт}} = 3$ доби; допустима глибина розряду для LiFePO_4 $\text{DOD} = 0,85$; ККД акумуляторної батареї $\eta_{\text{ак}} = 0,96$; загальний ККД системи (інвертор, контролер, кабелі) $\eta_{\text{сист}} = 0,82$; коефіцієнт запасу ємності $k_{\text{зап}} = 1,15$.

Кількість енергії, що її має забезпечити АКБ для автономного живлення обладнання телеретранслятора протягом 3 діб, згідно формули (2.21) становить:

$$W_{\text{ак}} = 47,56 \times 3 = 142,68 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Енергія з урахуванням втрат в системі та ефективності циклу заряд/розряд визначається за формулою (2.22):

$$W_{\text{розр}} = \frac{142,68}{0,82 \times 0,96} = \frac{142,68}{0,7872} = 181,25 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Тоді ємність АКБ, необхідна для накопичення цього обсягу енергії, у відповідності до формули (2.23) становитиме:

$$C_{\text{ном}} = \frac{181,25 \times 1000}{48 \times 0,85} = \frac{181\,250}{40,8} = 4\,442 \text{ А} \cdot \text{год},$$

де множник 1000 у чисельнику – коефіцієнт переведення $\text{кВт} \cdot \text{год}$ у $\text{Вт} \cdot \text{год}$.

З урахуванням коефіцієнту запасу необхідна розрахункова ємність АКБ становитиме:

$$C_{\text{розр}} = 4\,442 \times 1,15 = 5\,108 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Для реалізації розрахованої ємності АКБ обрано модульний акумулятор LiFePO₄ Zumax 24V (25,6V) 100Ah 2560W, який має вбудовану BMS-систему та підходить для телекомунікаційних застосувань. Параметри обраного акумулятора представлено в табл. 3.9.

Таблиця 3.8 – Технічні характеристики акумулятора Zumax 24V (25,6V) 100Ah 2560W

Параметр	Значення
Тип електрохімічної системи	Літій-залізо-фосфат (LiFePO ₄)
Номінальна напруга	25,6 В
Номінальна ємність	100 А·год
Енергоємність	2,56 кВт·год
Максимальний струм заряду	60 А
Максимальний струм розряду	100 А
Кількість циклів (при 80% DOD)	> 6000
Робоча температура	–20...+60 °С
Габарити	522×238×218 мм
Маса	19,5 кг
ККД	≥ 96%

Кількість послідовно включених акумуляторних модулів Zumax 24V (25,6V) 100Ah 2560W для забезпечення номінальної напруги системи 48 В становить:

$$N_{\text{посл}} = \frac{U_{\text{сист}}}{U_{\text{ак}}} = \frac{48}{25,6} = 1,875 \approx 2.$$

При послідовному з'єднанні 2 акумуляторів Zumax 24V (25,6V) 100Ah 2560W отримуємо напругу АКБ 51,2 В, що є припустимим відхиленням від

номінальної напруги системи 48 В. Ємність послідовної групи акумуляторів не змінюється і становить 100 А·год.

Розрахунок кількості паралельних груп для досягнення необхідної ємності:

$$N_{\text{пар}} = \frac{C_{\text{розр}}}{C_{\text{ак}}} = \frac{5\,108}{100} = 51,08.$$

Значення кількості паралельних груп округлюємо до найближчого більшого цілого числа, отримуємо $N_{\text{пар}} = 52$.

Загальна кількість акумуляторів в батареї:

$$N_{\text{заг}} = N_{\text{посл}} \times N_{\text{пар}} = 2 \times 52 = 104 \text{ од.}$$

Перевірка фактичної ємності АКБ:

$$C_{\text{факт}} = N_{\text{пар}} \times C_{\text{ак}} = 52 \times 100 = 5\,200 \text{ А} \cdot \text{год.}$$

Отримане значення $C_{\text{факт}}$ перевищує $C_{\text{розр}}$, що свідчить про достатність ємності АКБ для автономного живлення телеретранслятора протягом 3 днів.

АКБ забезпечує наступний обсяг акумульованої енергії:

$$W_{\text{факт}} = \frac{C_{\text{факт}} \times U_{\text{сист}}}{1000} = \frac{(5\,200 \times 48)}{1000} = 249,6 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Коефіцієнт забезпечення автономності становить:

$$k_{\text{заб}} = \frac{W_{\text{факт}}}{W_{\text{ак}}} = \frac{249,6}{142,68} = 1,75.$$

Значення $k_{\text{заб}} > 1$ підтверджує достатність розрахованої конфігурації АКБ.

3.7 Вибір інвертора для фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора

Номінальна вихідна потужність інвертора $P_{\text{інв}}$ повинна бути не меншою за сумарну потужність навантаження з урахуванням пускових струмів:

$$P_{\text{інв}} \geq P_{\text{наван}} \times k_{\text{зап}},$$

де $k_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу потужності, що становить від 1,2 до 1,4.

Напруга постійного струму U_{DC} є критично важливою, адже вона повинна точно відповідати номінальній напрузі акумуляторної батареї, що для телекомунікаційних систем, як правило, становить 48 В.

Що стосується форми вихідної змінної напруги, то для коректної та стабільної роботи чутливого телекомунікаційного обладнання необхідно використовувати інвертори, що генерують чисту синусоїду.

Коефіцієнт корисної дії інвертора $\eta_{\text{інв}}$ прямо вказує на енергетичну ефективність процесу перетворення, і для досягнення оптимальних результатів бажано обирати пристрої з показником не менше 90%.

Запровадження технології MPPT є ключовим, оскільки вона дозволяє ефективно відстежувати точку максимальної потужності сонячних панелей, що, своєю чергою, збільшує загальну ефективність генерації електроенергії на значні 15–30%.

Важливим аспектом є також кількість незалежних трекерів MPPT, яка надає можливість підключати групи сонячних панелей, що мають різну орієнтацію, без суттєвих втрат у загальній ефективності системи.

Що стосується функціональних можливостей, то інвертор має підтримувати різні режими роботи (автономний, гібридний, мережевий),

повинна бути передбачена можливість паралельної роботи для масштабування потужності. Важливою є наявність вбудованої системи моніторингу та дистанційного керування, а також інтегрованих захисів від перевантаження, короткого замикання та перегріву.

Діапазон робочих температур інвертора повинен бути ретельно підібраний, щоб повністю відповідати кліматичним умовам, в яких передбачається його експлуатація, гарантуючи надійну роботу.

Виходячи з розрахунків, представлених у пункті 3.2, максимальна добова потреба телеретранслятора в електроенергії $W_{\text{резмакс}}$ спостерігається в липні і становить 58,15 кВт · год/доб. Тоді середньодобова потужність навантаження становитиме:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{резмакс}}}{24} = \frac{58,15}{24} = 2,42 \text{ кВт.}$$

Максимальна потужність розраховується при коефіцієнті пікового навантаження, що становить для телекомунікаційного обладнання $k_{\text{пik}} = 1,3 - 1,5$:

$$P_{\text{макс}} = P_{\text{ср}} \times k_{\text{пik}} = 2,42 \times 1,4 = 3,39 \text{ кВт.}$$

Необхідна номінальна потужність інвертора з урахуванням коефіцієнту запасу становитиме:

$$P_{\text{інвном}} = P_{\text{макс}} \times k_{\text{зап}} = 3,39 \times 1,5 = 5,09 \text{ кВт.}$$

Отже, номінальна потужність інвертора для фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора має бути не менше 5 кВт. Втім, для забезпечення надійності системи електропостачання та можливості розширення системи у майбутньому прийнято до встановлення гібридний

інвертор IVEM8048-LV номінальною потужністю 8 кВт, основні параметри якого наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Основні параметри гібридного інвертора IVEM8048-LV

Параметр	Значення	Одиниця виміру
Номінальна вихідна потужність	8000	Вт
Пікова потужність (5 с)	16000	Вт
Номінальна вхідна напруга постійного струму	48	В
Діапазон вхідної напруги MPPT	90–450	В
Максимальна вхідна потужність сонячних панелей	8000	Вт
Кількість незалежних трекерів MPPT	2	шт.
Максимальний струм сонячної зарядки	150	А
Номінальна вихідна напруга змінного струму	230 ±5%	В
Номінальна вихідна частота	50/60 (авто)	Гц
Форма вихідної напруги	Чиста синусоїда	—
ККД інвертора (піковий)	93	%
ККД MPPT-контролера	≥ 99	%
Час перемикання на резерв	< 10	мс
Робочий діапазон температур	0...+55	°С
Діапазон температур зберігання	–15...+60	°С
Рівень шуму (на відстані 1 м)	< 45	дБ
Габаритні розміри	607×406×141	мм
Маса	23,7	кг
Клас захисту	IP20	—
Інтерфейси комунікації	Wi-Fi, RS485, USB	—

Інвертор IVEM8048-LV оснащено вбудованим захистом, основні функції якого представлені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Функції вбудованого захисту інвертора IVEM8048-LV

Тип захисту	Опис дії
Захист від перевантаження	Автоматичне обмеження потужності при перевищенні номіналу
Захист від короткого замикання	Миттєве відключення виходу при КЗ у навантаженні
Захист від перегріву	Зниження потужності або відключення при $T > +70^{\circ}\text{C}$
Захист від глибокого розряду АКБ	Відключення навантаження при $U_{\text{АКБ}} < 42 \text{ В}$
Захист від перенапруги на вході	Обмеження вхідної напруги сонячних панелей
Захист від зворотної полярності	Блокування підключення при неправильній полярності

Перевагою обраного інвертора є вбудований Wi-Fi модуль, що забезпечує передачу даних на хмарний сервер. Встановлення мобільного додатку дозволяє контролювати такі параметри, як поточну потужність генерації та споживання, рівень заряду акумуляторної батареї, напругу та струм у кожному ланцюзі, історію подій та помилок системи. Передбачена можливість налаштування параметрів роботи та отримання сповіщень про аварійні стани.

3.8 Розробка схеми підключення компонентів фотоелектричної системи до існуючої схеми живлення телеретранслятора

Для телеретранслятора обрано гібридну схему підключення компонентів фотоелектричної системи (Hybrid System). Вона дозволяє поєднувати енергію від сонячних панелей, акумуляторних батарей (АКБ) та зовнішньої мережі змінного струму. Структурна схема розробленої системи безперебійного живлення телеретранслятора представлена на рис. 3.2.

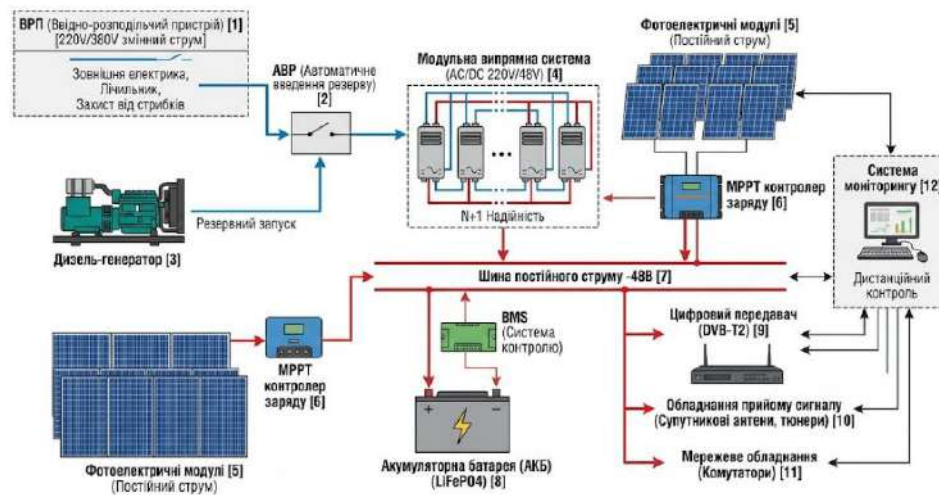


Рисунок 3.3 – Структурна схема системи безперебійного живлення телеретранслятора з інтегрованою фотоелектричною станцією

Поле фотоелектричних модулів формуються сонячними панелями, що з'єднуються у стринги для досягнення робочої напруги інвертора. Тут обов'язково встановлюється ПЗІП (DC) для захисту від перенапруг при грозових розрядах, що особливо актуально для об'єктів телекомунікаційної інфраструктури.

Накопичувач енергії (АКБ) формується з модулів LiFePO₄ і підключається через силовий запобіжник (Fuse), який захищає систему від короткого замикання. Використання шини 48В мінімізує струмові втрати.

Гібридний інвертор автоматично розподіляє потоки енергії: спочатку живить ретранслятор, потім заряджає АКБ, і лише при нестачі енергії бере її з мережі (або від резервного генератора на твердому паливі у випадку аварійного відключення від централізованої мережі).

Система АВР (ATS - Automatic Transfer Switch) забезпечує перемикання ретранслятора на резервну лінію живлення (мережу) без розриву зв'язку, якщо інвертор виходить за межі робочих параметрів.

Схема підключення компонентів цієї системи до гібридного інвертора представлена на рис. 3.3, а параметри кабельних ліній для здійснення такого підключення та необхідні пристрої захисту – в табл. 3.11.

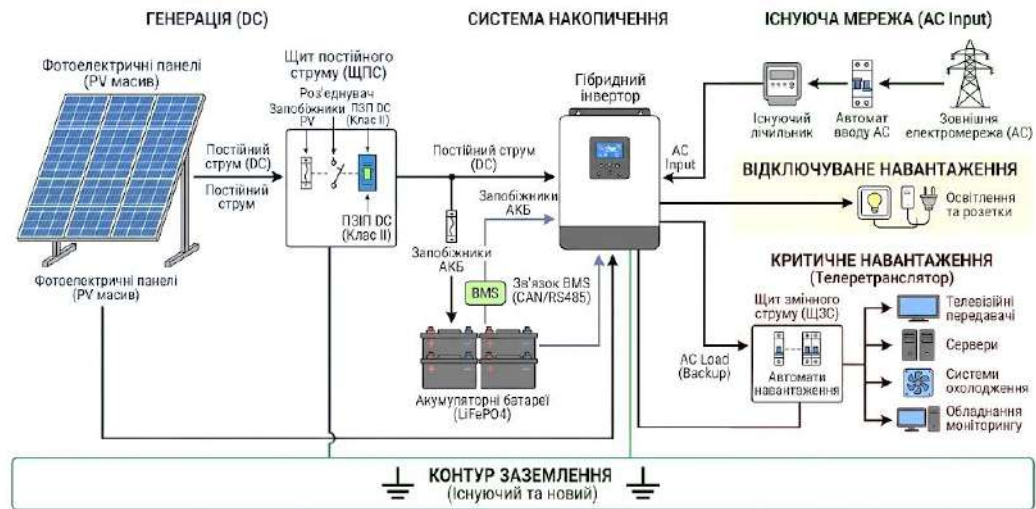


Рисунок 3.4 – Схема підключення обладнання до гібридного інвертора

Таблиця 3.11 – Параметри кабельних ліній та пристрої захисту

Лінія підключення	Рекомендований кабель	Пристрої захисту
PV – Інвертор	Сонячний 6 мм ²	ПЗІП DC, Автомат DC
АКБ – Інвертор	Силовий 35–50 мм ²	Запобіжник (125А-200А)
Інвертор – Ретранслятор	ВВГнг 3х6 мм ²	Автомат AC, ПЗІП AC
Мережа – Інвертор	ВВГнг 3х6 мм ²	Автомат AC 32А/40А

Необхідним є використання ізольованих інтерфейсів зв'язку для запобігання пошкодженню обладнання через перешкоди від передавальних антен.

Запропонована схема підключення забезпечує трирівневу надійність щодо джерел електропостачання: сонячна енергія, акумулятори та мережа. Використання гібридного інвертора дозволяє автоматизувати процес енергопостачання, мінімізуючи втручання персоналу та забезпечуючи стабільну роботу телеретранслятора в умовах нестабільного централізованого живлення.

3.9 Висновки

Аналіз об'єкта виявив критичну необхідність забезпечення безперервної роботи телеретранслятора, що характеризується середньою споживаною потужністю 2,42 кВт з максимальною добовою потребою в електричній енергії 58,15 кВт·год.

Математичне моделювання за допомогою програми Maple показало, що оптимальний кут нахилу фотоелектричних модулів становить 40°. Такий кут нахилу забезпечує максимальну річну продуктивність фотоелектричної системи в кліматичних умовах Херсонської області.

Для реалізації фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора обрано вискоефективні сонячні панелі Risen Energy RSM108-9-420N в кількості 19 одиниць, акумуляторну батарею LiFePO₄ на основі акумуляторних модулів Zumax 24V (25,6V) 100Ah 2560W загальною ємністю 5 200 А·год, які забезпечують надійне автономне живлення телеретранслятора протягом 3 діб, а також гібридний інвертор IVEM8048-LV номінальною потужністю 8 кВт.

Розрахунок виробленої в розрізі типового року електроенергії показав, що запропонована фотоелектрична система здатна забезпечити покриття потреби телеретранслятора в електричній енергії на рівні від 20% до 50% залежно від місяця, із середньорічним показником 37,3%, що дозволяє зменшити споживання енергії з централізованої мережі на 7 107,33 кВт·год за рік з економією фінансових ресурсів близько 31 983 грн/рік та зменшенням викидів CO₂ в атмосферу на понад 2,8 т/рік.

Інтеграція фотоелектричного генератора та акумуляторної батареї в штатну систему живлення телеретранслятора здійснюється через гібридний інвертор та систему автоматичного перемикавання на резерв. Така конфігурація дозволяє пріоритетно використовувати енергію з відновлюваних джерел, забезпечити високу надійність системи електропостачання і безперервність функціонування обладнання.

Запропонована система являє собою ефективне та комплексне рішення для забезпечення безперебійної роботи телеретранслятора. Використання відновлюваних джерел енергії не тільки відповідає сучасним вимогам енергетичної безпеки, але й слугує важливим кроком на шляху сталого розвитку.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Характеристика робочого місця

Оператор або технік, який працює з системою безперебійного живлення телеретранслятора, знаходиться в небезпечній зоні. Все тому, що доводиться мати справу з електрикою під напругою та працювати на висоті, коли треба обслуговувати сонячні панелі.

Гібридний інвертор [1]: Його ставлять у спеціальну електричну шафу. Вона захищає від пилу та вологи. Для вулиці це має бути захист не менше IP65, а для приміщення – IP20.

Батареї (LiFePO₄) [2]: Вони стоять в окремому ящику. Там є система, яка підтримує потрібну температуру, щоб батареї не перегрівалися.

Комутаційне обладнання [3]: Сюди входять розподільчі щитки з автоматами, пристрої, що захищають від раптових стрибків напруги (ПЗІП DC/AC), а також блоки ATS, які самі перемикають джерела живлення.

Робоча зона [4]: Це і приміщення, де стоять щити телеретранслятора, і дах (чи щогла), де розміщені сонячні панелі.

Освітлення [5]: На робочому місці є як природне, так і штучне світло, згідно з нормами ДБН В.2.5-28:2018. Це потрібно, щоб добре бачити все під час роботи з приладами.

Система мікроклімату [6]: У кімнаті завдяки кондиціонерам підтримується температура від +15°C до +25°C. Це дуже важливо, бо так електроніка та акумулятори працюють стабільно.

Електричний струм [7]: Це головний ризик – можна отримати удар, якщо торкнутися струмоведучих частин.

Робота на висоті [8]: Є небезпека, коли треба обслуговувати сонячні панелі на вежі.

Електромагнітні поля [9]: На людину впливає сильне випромінювання

від телепередавача.

Діелектричний комплект [10]: Це рукавички та килимки, які захищають від удару струмом.

Ізольований інструмент [11]: Усі інструменти для ремонту (наприклад, ключі, викрутки) мають бути з ізольованими ручками, щоб працювати було безпечно.

Захисна каска [12]: Її обов'язково треба носити, коли працюєш на висоті або там, де щось може впасти.

Запобіжний пояс [13]: Він потрібен, щоб працівник міг безпечно знаходитися та пересуватися на високих конструкціях.

Таблиця 4.1 – Устаткування приміщення

№ з/п	Найменування обладнання	Призначення	Технічні особливості / характеристики
1	Гібридний інвертор	Перетворення DC/AC, керування енергопотоками	Потужність 2-3 кВт, чиста синусоїда, вбудований контролер MPPT
2	Акумуляторна батарея (LiFePO4)	Накопичення енергії, резервування живлення	48В, 100А·год, інтегрована BMS-плата
3	Розподільчий щит (АС)	Комутація та розподіл живлення, захист	Автоматичні вимикачі (С16, С25), ПЗІП класу II
4	Шафа енергетична (Термошафа)	Розміщення обладнання та захист	Захист IP65, система примусової вентиляції, термостат
5	Система АВР (ATS)	Автоматичне перемикання на мережу	Час спрацювання < 10 мс
6	Засоби заземлення	Захист від ураження струмом	Шина заземлення, мідний провідник перерізом 16-25 мм ²

4.2 Характеристика обладнання та потенційні небезпеки

У приміщенні телеретранслятора та на майданчику зовні стоїть таке основне обладнання: гібридний інвертор (це модель Felicity IVEM8048-LV, потужність 8 кВт). Він бере постійний струм (48 вольт) і перетворює його на змінний (230 вольт). Крім того, він керує потоками енергії та має вбудовані MPPT-контролери. Акумуляторна батарея (тип LiFePO₄, 25,6 вольт на 100 ампер-годин). Ця система накопичує енергію, і в ній вже є своя вбудована система керування BMS. Сонячні панелі (це 19 модулів Risen Energy по 420 Вт кожний). Вони виробляють постійний струм, а напруга в одній такій лінії з панелей може сягати від 300 до 450 В. Ще є розподільчі щити (ЩПС, ЩЗС), автоматичний ввід резерву, система заземлення. Можна отримати удар електричним струмом – це якщо доторкнутися до відкритих струмопровідних частин інвертора, клем акумулятора або проводів від сонячних батарей. Є ще термічні та хімічні фактори – наприклад, деталі інвертора можуть сильно нагріватися, або при якомусь механічному пошкодженні акумулятора можливий витік електроліту (хоча LiFePO₄ батареї безпечніші, ніж свинцево-кислотні).

Робота на висоті – коли потрібно обслуговувати чи чистити сонячні панелі, які стоять на даху або на конструкції вежі. Може з'явитися електрична дуга – це трапляється, якщо роз'єднувати електричні кола, коли вони під напругою, або якщо станеться коротке замикання в сонячних батареях. Обов'язково використовуйте інструмент, який має ізольовані ручки (напруга до 1000 вольт), стеліть діелектричні килимки та надягайте рукавички. Мають бути встановлені автоматичні вимикачі, пристрої захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП типу II+III), а заземлення слід робити так, щоб опір був не більше 4 Ом. Важливо ніколи не від'єднувати лінії сонячних батарей, коли вони під навантаженням. Завжди використовуйте спеціальні роз'єднувачі, які призначені для постійного струму. При роботі на висоті обов'язково одягайте страхувальні пояси та захисні каски [4].

4.3 Електробезпека та категорія приміщення

Кімната, де стоїть телеретранслятор і все електричне обладнання (інвертори, щитки розподілу, акумулятори), вважається місцем з підвищеною небезпекою ураження електричним струмом. Це прописано в Правилах улаштування електроустановок (ПУЕ) та нормах ДНАОП 0.00-1.21-98. Причина цьому — те, що там є багато металевих конструкцій, які торкаються землі. Також можна випадково одночасно доторкнутися до заземлених частин і до елементів, по яких іде струм. До того ж, обладнання працює під напругою як змінного струму (230 В), так і постійного (від 48 до 450 В).

Потрібно використовувати такі засоби захисту, як захисне заземлення (система TN-S).

Для ліній, де є змінний струм, встановлюються спеціальні пристрої, які називаються ПЗВ (або УЗО). Вони спрацьовують, якщо струм витoku перевищує 30 мА [4].

Необхідно перевіряти, наскільки добре ізольовані кабелі та все обладнання.

Вивішуємо попереджувальні таблички, обгороджуємо ті частини, де є струм, і замикаємо дверцята електричних шаф [3].

4.4 Вибір оптимальних метеоумов

Робота оператора/інженера з обслуговування СБЖ відноситься до легкої роботи категорії 1Б (витрати енергії до 250 ккал/год, виконується переважно сидячи або стоячи з незначним переміщенням). Приміщення апаратної має незначний надлишок явного тепла (від інвертора та АКБ < 20 ккал/м³·год).

Згідно з ДСП 173-96, оптимальні параметри мікроклімату для даної категорії робіт наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Оптимальні метеоумови в виробничих приміщеннях

№ п/п	Най- мену- вання цеху	Надлишок явного тепла, кДж/м³·год	Катего- рія роботи	Пе- ріод року	Темпе- ратура, °С	Відносна воло- гість, %	Швидкість руху повітря, м/с
1	Апа- ратна телере- транс- лятора	< 83,6 (незначний)	1Б (легка)	Хол одний	21–23	40–60	≤ 0,1
2	Апа- ратна телере- транс- лятора	< 83,6 (незначний)	1Б (легка)	Тепл ий	22–24	40–60	≤ 0,2

В приміщенні апаратної застосовується штучне загальне рівномірне освітлення з елементами локалізованого підсвічування щитів та інверторів. Згідно з ДБН В.2.5-28:2018, роботи з обслуговування електрообладнання відносяться до IV розряду зорової роботи (середньої точності, підрозряд «б»). Нормована освітленість на робочій поверхні: $E = 300$ лк [4].

При розрахунку освітленості методом коефіцієнта використання необхідний світловий потік однієї лампи визначається за формулою:

$$\Phi = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot z}{N \cdot \eta},$$

де $E = 300$ лк;

$K = 1,2$ (коефіцієнт запасу для LED/люмінесцентних);

$S = 24$ м² (площа приміщення);

$z = 1,1$;

$N = 6$ (кількість світильників);

$\eta = 0,55$ (коефіцієнт використання, прийнятий за таблицями [8] для

приміщення з індексом $i = 0,8$).

$$\Phi = (300 \cdot 1,2 \cdot 24 \cdot 1,1) / (6 \cdot 0,55) \approx 2880 \text{ лм.}$$

За розрахунком обрано LED-світильники типу ДПО 4041-4000-50 потужністю 40 Вт (світловий потік 4000 лм), що забезпечує запас освітленості ~10%. Аварійне освітлення проєктується з мінімальною освітленістю 2 лк ($\geq 5\%$ від робочого).

Таблиця 4.3 – Заходи, що забезпечують нормативні значення запиленості та загазованості

Найменування цеху та джерела виділення	Найменування шкідливого компонента	ГДК, мг/м ³	Заходи, що забезпечують ГДК
Апаратна телеретранслятора (вентиляція, відкриті двері)	Пил неорганічний (до 20% SiO ₂)	2,0	Примусова припливно-витяжна вентиляція з фільтрами тонкого очищення, вологе прибирання, герметизація шаф (IP65)
Приміщення з АКБ (LiFePO ₄)	Вуглекислий газ (CO ₂)	9000	Нормальна вентиляція, контроль концентрації CO ₂ датчиками, аварійне провітрювання

4.4 Протипожежна профілактика

Кімнати, де стоїть електричне обладнання й батареї, вважають небезпечними щодо пожеж. За одними правилами (НАПБ Б.07.005-86) це категорія Г, бо там може виділятися тепло, іскри або навіть вогонь. А за іншими (ПУЕ), така зона має клас П-Па.

Короткі замикання в дротах чи електрошитах.

Можуть перегрітися контакти на сонячних панелях (тобто PV-стрічках)

або на клеммах інвертора.

Якщо неправильно користуватися акумуляторами, вони можуть дуже сильно нагрітися й вийти з-під контролю – це ще називають "тепловим розгоном".

Важливо не допустити пожеж, а також вживати оперативних заходів з ліквідації загоряння, якщо вони все ж стаються.

Необхідно прокладати кабелі, які не горять, типу ВВГнг(А)-LS, у спеціальних металевих лотках. Встановлювати окремі датчики диму й тепла. Вони одразу повідомляють про пожежу й підключені до системи, яка дозволяє все контролювати здалеку.

На об'єкті встановлена автоматична система, яка гасить пожежу газом або аерозолем. Вона не проводить електрику й не зіпсує обладнання при спрацюванні [4].

Локальні вогнища можуть бути ліквідовані вогнегасниками: порошковими (ОП-5) або вуглекислотними (ОУ-5). Встановлено щонайменше два таких вогнегасники на кожні 50 квадратних метрів кімнати.

Працівники регулярно проходять навчання з пожежної безпеки. Вони володіють інформацією, як правильно евакуюватися, і де знаходяться усі засоби, щоб загасити вогонь.

4.5 Техніко-економічні розрахунки заходів з охорони праці

Економічна оцінка заходів з охорони праці виконується з метою обґрунтування доцільності інвестицій у безпеку, зниження травматизму та підвищення продуктивності. Розрахунок повних приведених витрат виконується за формулою:

$$З = E + E_{\text{н}} \cdot K$$

де E – річні експлуатаційні витрати;

K – капітальні витрати;

$E_n = 0,12$ – нормативний коефіцієнт ефективності.

Таблиця 4.4 – Витрати на заходи з охорони праці

№ п/п	Найменування заходу	Капітальні витрати K , грн	Експлуатаційні витрати E , грн/рік	Повні приведені витрати Z , грн
1	Виробниче освітлення (LED світильники + аварійне)	12 400	2 800	4 288
2	Вентиляція та кондиціювання	18 500	5 400	7 620
3	Засоби індивідуального захисту (діелектрики, каски, пояси)	4 200	1 100	1 604
4	Протипожежний захист (сповіщувачі, вогнегасники, монтаж)	9 800	1 500	2 676
Разом		44 900	10 800	16 188

4.6 Висновки

Впровадження розроблених заходів сприяє зниженню ризику виробничого травматизму на ~85% та зменшенню простою обладнання через аварійні відключення.

Покращення освітленості та мікроклімату підвищує продуктивність праці обслуговуючого персоналу на 4–6%, а також знижує рівень професійних захворювань та втоми.

Економічний ефект від скорочення витрат на лікування, компенсації та відновлення обладнання перевищує повні приведені витрати протягом першого року експлуатації, що підтверджує економічну доцільність запропонованих рішень [4].

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі проведено розробку системи безперебійного живлення телеретрансляторів, що використовує енергію сонячного випромінювання.

З аналізу літературних джерел встановлено, що застосування фотоелектричних установок у поєднанні з акумуляторними системами значно підвищує енергетичну автономність і надійність роботи телеретрансляторів порівняно з генераторами на рідкому паливі, оскільки зменшується кількість механічних елементів та потреба в технічному обслуговуванні та постачанні палива.

Головними споживачами електричної енергії у телеретрансляторах є передавачі, підсилювачі, системи для обробки сигналу, охолодження та системи автоматики. Ці споживачі створюють цілодобове рівномірне навантаження.

Описано методики розрахунку добової потреби телеретранслятора в електричній енергії, надходження сонячної енергії до поверхні фотоелектричних модулів, необхідної встановленої потужності фотоелектричного масиву та кількості сонячних панелей в ньому, необхідної ємності акумуляторної батареї. Розроблено підходи до вибору обладнання для формування фотоелектричної системи безперебійного живлення телеретранслятора. Визначено, що оптимальна архітектура такої системи має включати вискоєфективні фотоелектричні модулі, MPPT-контролер заряду, акумуляторну батарею достатнього об'єму, інвертор з чистою синусоїдою, а також комплекс захисту та моніторингу.

Проведено розрахунок параметрів основних компонентів фотоелектричної системи, на основі якого обрано обладнання для її комплектації, а саме: сонячні панелі Risen Energy RSM108-9-420N в кількості 19 одиниць, акумуляторні модулі Zumax 24V (25,6V) 100Ah 2560W загальною ємністю 5 200 А·год, що забезпечують автономне живлення

телеретранслятора протягом 3 діб, а також гібридний інвертор IVEM8048-LV номінальною потужністю 8 кВт.

Встановлено, що запропонована фотоелектрична система здатна забезпечити покриття потреби телеретранслятора в електричній енергії на рівні від 20% до 50% залежно від місяця, із середньорічним показником 37,3%, що дозволяє зменшити споживання енергії з централізованої мережі на 7 107,33 кВт·год за рік з економією фінансових ресурсів близько 31 983 грн/рік та зменшенням викидів CO₂ в атмосферу на понад 2,8 т/рік.

Запропоновано схему підключення обраних компонентів фотоелектричної системи до існуючої схеми живлення телеретранслятора з інтеграцією фотоелектричного генератора та акумуляторної батареї в штатну систему через гібридний інвертор та систему автоматичного перемикачання на резерв. Така конфігурація дозволяє пріоритетно використовувати енергію з відновлюваних джерел, забезпечити високу надійність системи електропостачання і безперервність функціонування обладнання.

Запропонована система являє собою ефективне та комплексне рішення для забезпечення безперебійної роботи телеретранслятора. Використання відновлюваних джерел енергії не тільки відповідає сучасним вимогам енергетичної безпеки, але й слугує важливим кроком на шляху сталого розвитку.

В розділі «Охорона праці» проаналізовано умови роботи в приміщенні апаратної телеретранслятора, стан мікроклімату та потенційні небезпеки. Описано вимоги безпеки та нормативні правила під час монтажу та обслуговування електрообладнання згідно з діючим законодавством. Показано, що впровадження заходів з охорони праці сприяє зниженню ризику виробничого травматизму на ~85% та зменшенню простою обладнання через аварійні відключення, а покращення освітленості та мікроклімату приміщення підвищує продуктивність праці персоналу на 4–6%, а також знижує рівень професійних захворювань та втоми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про альтернативні джерела енергії : Закон України від 20.02.2003 № 555-IV // Відомості Верховної Ради України. – 2003. – № 24. – Ст. 155.
2. ДСТУ EN 62109-1:2015. Безпека силових перетворювачів для застосування у фотоелектричних енергетичних системах. Частина 1. Загальні вимоги. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 92 с.
3. Правила улаштування електроустановок : Видання 4-те, перероблене та доповнене. – Київ : Форт, 2017. – 760 с.
4. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ДНАОП 0.00-1.21-98) : затв. наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4. – Київ, 1998. – 142 с.
5. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 86 с.
6. Баб'як М.М. Автономні системи електропостачання на основі відновлюваних джерел енергії / М.М. Баб'як, О.В. Швед // Енергетика і автоматика. – 2021. – № 3. – С. 45–56.
7. Безденежних Л.В. Розрахунок та проектування систем сонячного тепло- та електропостачання : навч. посібник / Л.В. Безденежних. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 124 с.
8. Витязь О.Ю. Сонячна енергетика: теорія і практика : монографія / О.Ю. Витязь, Т.Г. Глаголева. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2020. – 210 с.
9. Сокол Є.І. Напівпровідникові перетворювачі в системах сонячної енергетики / Є.І. Сокол. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 244 с.
10. Джежерун О.С. Використання літій-залізо-фосфатних акумуляторів у буферних системах живлення / О.С. Джежерун // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. – 2022. – Вип. 1. – С. 34–41.
11. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: розпорядження КМУ від 18.08.2017 № 605-р.

12. Забарний Г.М. Нетрадиційні енергоресурси та екологія / Г.М. Забарний, П.В. Каніло. – Харків : Основа, 2018. – 238 с.
13. Каплун В.В. Гібридні системи енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел / В.В. Каплун // Технічна електродинаміка. – 2020. – № 4. – С. 67–74.
14. Кириленко О.В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / О.В. Кириленко. – Київ : Інститут електродинаміки НАНУ, 2019. – 400 с.
15. Козярьський П.П. Сонячні енергетичні установки : навч. посібник / П.П. Козярьський. – Київ: НУБіП України, 2021. – 180 с.
16. Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії : підручник / С.О. Кудря. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 392 с.
17. Мартинюк О.В. Системи моніторингу та діагностики фотоелектричних станцій / О.В. Мартинюк // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2022. – № 2. – С. 15–22.
18. Мельник В.С. Основи проектування систем безперебійного живлення для об'єктів критичної інфраструктури / В.С. Мельник // Зв'язок. – 2023. – № 1. – С. 28–33.
19. Системи накопичення енергії : технічний довідник / під ред. О. С. Янковської. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 156 с.
20. Терещенко О.І. Сучасні методи керування МРРТ-контролерами в автономних СЕС / О.І. Терещенко // Автоматика та інформатизація. – 2022. – № 4. – С. 89–95.

ДОДАТОК А

Результати апробації роботи



СУЧАСНІ СТРАТЕГІЇ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ДЕРЖАВИ ТА СУСПІЛЬСТВА: НАУКОВІ ГОРИЗОНТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

*Збірник матеріалів II-ї науково-практичної
конференції за міжнародною участю*

25 лютого 2025 року

Том 2

Хмельницький, 2025 рік

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Моделивання та оптимізація систем / В. М. Дубовой, Р. Н. Кветний, О.І. Михальов, А. В. Усов. Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2017. С. 26-30. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0057751.pdf>.
2. Підходи та методи оптимізації управлінських рішень / Н.О. Шпак, А.М. Ульянова. Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2006 С. 39-45, DOI: <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/7cc947fc-0e30-45ed-abcf-51495093a6b5/content>
3. Моделивання управлінських процесів з використанням типових моделей менеджменту / Тетяна Кужда, Михайло Галушак. Галицький економічний вісник. Тернопіль: ТНТУ, 2014. Том 44. № 1. С. 11-21. DOI: <https://galicianvisnyk.tntu.edu.ua/pdf/44/222.pdf>

Владислав Курак, Валерія Лісова, Дмитро Тендітний **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ФАСАДНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ** **СТАНЦІЙ У КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ**

За оцінками фахівців з Інституту відновлюваної енергії НАН України, освоєння сонячного енергетичного потенціалу Херсонщини дозволить щороку виробляти до 4696 млн. кВт•год електричної енергії [1, с. 12]. Станом на кінець 2020 року на території Херсонщини діяло близько 50 сонячних електростанцій загальною встановленою потужністю трохи більше 400 МВт [2], що становить лише 10% від теоретичного значення, яке загалом оцінюється в 3913 МВт.

Утім річний обсяг виробленої енергії може бути збільшений не лише за рахунок установлення нових фотоелектричних станцій, в яких реалізується традиційний підхід із даховим або наземним розташуванням модулів, але й через залучення до генерації вертикальних фасадів будівель, що є особливо перспективним в умовах міської багатоповерхової забудови, коли площа фасаду будівлі, де можуть бути розміщені модулі, значно перевищує площу даху, у зв'язку з чим фасадна фотоелектрична станція потенційно здатна забезпечити більшу генерацію електричної енергії, ніж дахова. Однак на сьогодні в Україні реалізовано лише поодинокі приклади фасадних фотоелектричних станцій і перевага все ще надається класичним системам з

даховим похилим розташуванням модулів, що мають більш сприятливі умови щодо сонячної інсоляції.

У цій роботі розраховано питоме вироблення енергії фасадними фотоелектричними станціями й на основі аналізу отриманих результатів оцінено перспективи впровадження таких систем на об'єктах, розташованих у кліматичних умовах Херсонської області.

Розрахунок надходження сонячної радіації до вертикальної поверхні фасаду залежно від його азимутального кута виконувався за методикою [3, с. 43], що враховує потоки прямого, розсіяного та відбитого від підстилювальної поверхні сонячного випромінювання. Як вхідні, використовувались кліматичні дані щодо надходження сонячної радіації на горизонтальну поверхню для м. Херсона [4]. Розрахунок проводився для характерного дня кожного місяця в діапазоні азимутальних кутів від 0° (південна орієнтація) до 180° (поверхня, орієнтована на північ) із кроком 10° , і для кожного фіксованого азимуту приймальної поверхні визначалось річне надходження сонячної енергії.

Аналіз результатів цього розрахунку засвідчив, що при азимутальних кутах у діапазоні від 0° до 30° річне надходження сонячної радіації до вертикальної поверхні залишається майже сталим і при азимуті 30° зменшується лише на 1% відносно поверхні з південною орієнтацією. При відхиленні поверхні від південного напрямку на кути понад 40° надходження сонячної енергії демонструє стрімке падіння, і для поверхонь, орієнтованих на північ, річне надходження енергії сонячного випромінювання є в 2,3 рази меншим, ніж для південних. Тобто відхилення поверхні фасаду від південного напрямку на кути $\leq 30^\circ$ не призводить до суттєвого зменшення в надходженні сонячної радіації і є цілком припустимим.

Здійснено оцінювання питомого вироблення електричної енергії фасадною фотоелектричною станцією залежно від орієнтації фасаду будівлі відносно сторін світу. Установлено, що станція з модулями, розташованими на південному фасаді будівлі, у кліматичних умовах Херсонщини здатна забезпечити річне вироблення електричної енергії загальним обсягом близько $108 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$, у той час як у випадку розміщення модулів на східному або західному фасадах – близько $84 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$, що лише на 22% менше порівняно

з південним. Це свідчить про доцільність розміщення фотоелектричних модулів не лише на південних, але й на східних і західних фасадах будівель.

Оцінювання питомого вироблення енергії для аналогічної за складом дахової фотоелектричної станції, що має модулі, нахилені під кутом 35° до горизонту і відповідно кращі умови сонячної інсоляції протягом року, показало, що така станція здатна генерувати близько $155 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ за рік. Цей показник приблизно в 1,4 рази вищий порівняно з питомим виробленням фасадної станції з модулями, орієнтованими на південь, та в 1,8 разів перевищує вироблення енергії для модулів, розміщених на східному або західному фасаді. Утім враховуючи, що в багатоповерхових будинках площа фасаду є суттєво більшою за площу даху, внесок фасадних модулів у загальну генерацію фотоелектричної системи може бути значно більшим за той, що забезпечується модулями, розташованими на даху будівлі.

Аналіз отриманих даних показує, що фасадні фотоелектричні станції здатні забезпечити суттєвий внесок у генерацію екологічно чистої електричної енергії в разі їх інтеграції в конструкції будівель, розташованих у кліматичних умовах Херсонської області.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 82 с.
2. Відновлювана енергетика на Херсонщині розвивається шаленими темпами. Херсонська обласна державна адміністрація. URL: <https://khoda.gov.ua/v%D1%96dnovljuvana-energetika-na-hersonshhin%D1%96-rozviva%D1%94tsja-shalenimi-tempami/> (дата звернення: 24.10.24). Назва з екрану.
3. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118671603>.
4. POWER. Data Access Viewer. URL: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access: 24.10.2024).