

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

“ Дopusчено до захисту ”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
канд. техн. наук., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“ ____ ” _____2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої
освіти
на тему
“ Оптимальна система регулювання потужності
сонячних батарей фотоелектричної станції ”

Виконав здобувач вищої освіти
2 курсу магістратури, групи ЕНМ-22М
ОПП «Енергетичний менеджмент»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Артем ВИДИШ
« ____ » _____2023 р.

Керівник роботи
канд. техн. наук, доцент
_____Валентин СОЛДАТЕНКО
« ____ » _____2023 р.

Рецензент _____

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Енергетичний менеджмент»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри ЕТС та ЕМ

канд. техн. наук, професор

Петро ПЛЄШКОВ.

«___» _____ 2023 р.

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

Видишу Артему Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи (проекту) Оптимальна система регулювання потужності сонячних батарей фотоелектричної станції

Optimal power control system for solar panels of a photovoltaic power plant

2. Керівник роботи (проекту) Солдатенко Валентин Петрович, канд. техн. наук., доц.
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання студентом роботи до захисту _____

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи є підвищення ефективності використання енергії сонячного випромінювання в системі з фотоелектричними перетворювачами за рахунок удосконалення екстремального регулювання їх потужності. Завдання роботи: виконати аналіз питання побудови та особливості експлуатації фотоелектричних систем автономного типу; дослідити методи проектування енергоефективних фотоелектричних станцій автономного типу; виконати порівняння способів екстремального регулювання потужності фотоелектричних батарей; розробити комп'ютерну імітаційну модель фотоелектричної системи автономного типу з системою екстремального регулювання потужності; дослідити режими роботи фотоелектричної системи з екстремальним регулюванням потужності на комп'ютерній імітаційній моделі; розробити заходи із охорони праці.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>10.10.2023 р.</i>	
2	<i>Принципи побудови та особливості експлуатації фотоелектричних систем автономного типу</i>	<i>13.10.2023 р.</i>	
3	<i>Проектування енергоефективних фотоелектричних станцій автономного типу</i>	<i>25.10.2023 р.</i>	
4	<i>дослідження роботи системи регулювання потужності фотоелектричної батареї</i>	<i>15.11.2023 р.</i>	
5	<i>Охорона праці</i>	<i>30.11.2023 р.</i>	
6	<i>Загальні висновки</i>	<i>07.12.2023 р.</i>	
7	<i>Оформлення пояснювальної записки КР</i>	<i>11.12.2023 р.</i>	
8	<i>Оформлення презентаційної частини КР</i>	<i>15.12.2023 р.</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника _____

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача _____

АНОТАЦІЯ

Видиш А.М. Оптимальна система регулювання потужності сонячних батарей фотоелектричної станції.

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ОПП «Енергетичний менеджмент». – Центральноукраїнський національний технічний університет. – м. Кропивницький, 2023р.

Метою роботи є підвищення ефективності використання енергії сонячного випромінювання в системі з фотоелектричними перетворювачами за рахунок удосконалення екстремального регулювання їх потужності.

Виконано огляд структурних схем фотоелектричних установок автономного типу з реалізацією методів підвищення їх енергоефективності.

Визначено, що впровадження екстремального регулювання величини потужності фотоелектричних батарей є найбільш дієвим способом збільшення енергетичної ефективності таких систем.

Покращено методику розробки фотоелектроустановок автономного типу шляхом виконання розрахунку енергобалансу та застосування статистичних даних щодо інсоляції конкретної місцевості.

Виконано порівняльний аналіз методів і алгоритмів регулювання максимальної потужності фотобатарей.

Обрана систему регулювання потужності фотоелектричних панелей забезпечує стійке відслідковування максимуму потужності та коефіцієнт використання сонячної батареї не менше 98%.

Виконане моделювання роботи системи регулювання потужності фотоелектричних панелей за допомогою комп'ютерної імітаційної моделі.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, сонячна фотоенергетика, автономне енергозабезпечення, екстремальне регулювання, енергозаощадження

THE SUMMARY

Vydysh A. Optimal power control system for solar panels of a photovoltaic power plant.

Specialty 141 – "Electric power, electrical engineering and electromechanics". – "Energy management". – Central Ukrainian National Technical University. – Kropyvnytskyi, 2023

The purpose of the work is increasing the efficiency of solar radiation energy use in the system with photoelectric converters due to the improvement of extreme regulation of their power.

An overview of the structural schemes of autonomous type photovoltaic installations with the implementation of methods of increasing their energy efficiency was carried out.

It was determined that the implementation of extreme power regulation of photovoltaic batteries is the most effective way to increase the energy efficiency of such systems.

The methodology for the development of autonomous-type photovoltaic installations has been improved by performing an energy balance calculation and using statistical data on the insolation of a specific area.

A comparative analysis of methods and algorithms for regulating the maximum power of photo batteries was performed.

The chosen power regulation system of photovoltaic panels ensures stable monitoring of the maximum power and the utilization rate of the solar battery is not less than 98%.

Modeling of the power regulation system of photovoltaic panels using a computer simulation model.

Key words: renewable energy sources, solar photoenergy, autonomous energy supply, extreme regulation, energy saving

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ЗМІСТ	6
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ТИПУ	11
1.1 Роль та місце галузі сонячної фотоелектричної генерації в сучасній енергетиці	11
1.2 Фотоелектрична установка автономного типу та її характерна структурна схема.....	13
1.3 Особливості експлуатації фотоелектричних модулів в автономних системах	17
1.4 Шляхи збільшення ефективності роботи сонячних фотоелектричних панелей.....	20
1.5 Висновки до першого розділу.....	23
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ АВТОНОМНОГО ТИПУ	24
2.1 Методики розрахунку параметрів фотоелектричних систем автономного типу та їх характеристик.....	24
2.2 Визначення параметрів сонячних енергетичних установок автономного типу за статистичними даними графіка інсоляції.....	32
2.3 Порівняльний аналіз ефективності різних конфігурацій фотоелектричних установок автономного типу	44
2.4 Висновки до другого розділу	49

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ БАТАРЕЇ	51
3.1 Порівняльний аналіз DC-DC перетворювачів для фотоелектричних систем живлення автономного типу.....	51
3.2 Алгоритми відстеження оптимального режиму роботи фотоелектричних перетворювачів	62
3.3 Моделювання роботи системи регулювання потужності фотоелектричної батареї з функцією екстремального регулювання покроковим методом	68
3.4 Висновки до третього розділу.....	81
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	83
4.1 Забезпечення дотримання заходів безпеки під час монтажу електроустановок.....	83
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	85
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

СЕС – сонячна електрична станція

ФЕМ – фотоелектричний модуль

ФЕП – фотоелектричний перетворювач

ФЕС – феотелектрична станція

ФЕУАТ – фотоелектрична установка автономного типу

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Актуальність теми. Перетворення енергії сонячної інсоляції у сучасних фотоелектричних установках та системах на їх основі складає близько 5-10%. За ясної літньої погоди на квадратний метр поверхні, нормальної до сонячних променів, надходить до 1000 Вт енергії світлового випромінювання. Проте на виході фотоелектричних установок до споживача передається значно менше енергії. Причиною тому є занадто низьке значення коефіцієнта корисної дії кремнієвих фотоелементів, та недовикористанням генерувального потенціалу сонячних батарей. Низька ефективність використання енергії сонячного випромінювання до 30% викликане тим, що у більшості фотоелектричних установок автономного типу відсутні систем регуляторів максимальної потужності, хоча їх застосування є доцільним при проектуванні як систем з рухомими сонячними панелями (з автоматичним слідкуванням за Сонцем), так і з нерухомими. Впровадження екстремальних регуляторів дозволяє повніше використовувати генераційний потенціал сонячних батарей та підвищити загальну ефективність автономних фотоелектричних установок.

Існує низка методів екстремального регулювання потужності фотоелектричних батарей, проте на даний момент не досліджено питання їх переваг стосовно систем на основі фотоелектричних перетворювачів і не встановлене оптимальне співвідношення параметрів самої системи екстремального регулювання потужності сонячних батарей. Тому подальші дослідження задля вибору найефективніших алгоритмів управління та налаштувань екстремальних регуляторів у складі автономних фотоелектричних установок є актуальними.

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є підвищення ефективності використання енергії сонячного випромінювання в системі з фотоелектричними перетворювачами за рахунок удосконалення екстремального регулювання їх потужності.

Для досягнення мети в потрібно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз питання побудови та особливості експлуатації фотоелектричних систем автономного типу;
- дослідити методи проектування енергоефективних фотоелектричних станцій автономного типу;
- виконати порівняння способів екстремального регулювання потужності фотоелектричних батарей;
- розробити комп'ютерну імітаційну модель фотоелектричної системи автономного типу з системою екстремального регулювання потужності;
- дослідити режими роботи фотоелектричної системи з екстремальним регулюванням потужності на комп'ютерній імітаційній моделі.

Об'єкт дослідження – процес відбору потужності від фотоелектричної батареї за умов реалізації екстремального регулювання.

Предмет дослідження – фотоелектрична установка автономного типу з регулюванням вихідної потужності.

Методи дослідження. Під час виконання досліджень були застосовані методи теорії електричних кіл, методи математичного моделювання, метод комп'ютерного імітаційного моделювання.

Наукова цінність роботи полягає в подальшому розвитку теорії екстремального регулювання потужності енергетичних установок побудованих з використанням фотоелектричних перетворювачів.

Практична цінність запропоновано систему керування вихідної потужності фотоелектричної установки на основі екстремального покрокового регулювання потужності з високими експлуатаційними характеристиками.

Структура роботи: кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань. Повний обсяг роботи складає 87 сторінок. Основна частина викладена на 85 сторінках друкованого тексту, містить 29 рисунків та 2 таблиці. Список використаних джерел містить 18 джерела та викладений на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ АВТОНОМНОГО ТИПУ

1.1 Роль та місце галузі сонячної фотоелектричної генерації в сучасній енергетиці

Сонячна енергетика демонструє стрімке зростання у всьому світі протягом останнього десятиліття. За даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), з 2010 по 2020 рік сукупні потужності сонячної фотоелектричної генерації зросли майже у 18 разів – з 40 ГВт до 728 ГВт. Це найвищі темпи розвитку та приросту встановленої потужності серед усіх відновлюваних джерел енергії.

Основними факторами, що зумовили «сонячний бум», є здешевлення комплектуючих (передусім фотовольтаїчних модулів) та покращення їх технічних характеристик, а також запровадження сприятливих регуляторних умов та податкових пільг в багатьох країнах. Наприклад, вартість сонячних панелей з 2010 р. знизилася майже в 4 рази. Це зробило фотоенергетику значно більш конкурентною та привабливою для інвесторів.

Найактивніше сонячна генерація будується у країнах Азії, передусім Китаї та Індії. Проте Європа та США також демонструють стійке зростання потужностей сонячних електричних станцій (СЕС). В Україні за останні 5 років відбувся справжній «сонячний прорив» – встановлена потужність фотоелектричних станцій (ФЕС) збільшилась майже у 40 разів до понад 8 ГВт у 2022 році.

Отже, сонячна енергетика набуває все більшого значення у світовій енергосистемі. Очікується, що до 2026 р. її частка може сягнути 16 % у структурі глобального виробництва електроенергії. Це зумовлюватиметься як економічними перевагами, так і екологічною доцільністю подальшого

розвитку саме сонячних джерел енергії. Світові експерти прогнозують подальше динамічне зростання сонячної генерації. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, до 2040 року частка сонячної та вітрової енергії складатиме до 40 % світового виробництва електроенергії. Це відповідатиме як економічним інтересам, так і екологічним цілям декарбонізації.

Втім розвиток сонячної енергетики також стикається з певними проблемами та викликами, зокрема щодо акумулювання та транспортування великих обсягів виробленої енергії, нестабільності генерації тощо. Тому вкрай важливими є наукові дослідження стосовно раціональної інтеграції СЕС в енергосистеми та розподільні мережі, розробка смарт-мереж, управління попитом, підвищення ефективності використання сонячних фотоелектричних батарей, удосконалення технологій акумулювання електричної енергії тощо.

Виробництво електроенергії із сонячного випромінювання ґрунтується на явищі фотоелектричного перетворення, тобто безпосередньої трансформації сонячного світла в електричний струм у спеціальних напівпровідникових матеріалах і пристроях – фотоелектричних модулях (ФЕМ). Модулі виготовляють на основі кремнію, міді-індію-галію-селену (CIGS), кадмій-телуриду (CdTe) та інших речовин. Конструктивно це сукупність сполучених фотоелектричних перетворювачів. ФЕМ з'єднуються в батареї і разом з інверторами (для перетворення постійного струму на змінний) утворюють фотоелектричну станцію або фотоелектричну систему. В залежності від призначення розрізняють централізовані та автономні (острівні) ФЕУ. Перші приєднані до загальної мережі, другі працюють автономно.

Останнім часом поряд із великими СЕС, зростає увага до локальних автономних систем. Їх актуальність зумовлена можливістю застосування там, де підведення мережі неможливе або економічно недоцільне. Зокрема для електропостачання об'єктів транспортної інфраструктури, сільського господарства, віддалених споживачів.

Отже, автономні ФЕУ з використанням сонячної енергії є ефективним джерелом електроживлення у віддалених районах, де немає доступу до загальних електромереж. Подальший розвиток технологій та зниження вартості дозволить розширити їх застосування.

1.2 Фотоелектрична установка автономного типу та її характерна структурна схема

Фотоелектричні енергетичні установки автономного типу (ФЕУАТ), як правило, складаються з кількох основних компонентів:

- фотоелектричні перетворювачі, об'єднані в єдиний масив (фотоелектричні модулі чи сонячні панелі);
- батареї акумуляторів для накопичення та зберігання електроенергії;
- інверторний пристрій для перетворення постійного струму від фотоелектричної установки у змінний струм, що необхідний для живлення більшості споживачів;
- контролер режимів заряджання та розряджання батареї акумуляторів.

Комунікація перелічених компонентів автономної системи здійснюється за певною структурною схемою з урахуванням особливостей конкретного об'єкта живлення та необхідних режимів роботи. Додатково можуть застосовуватися різноманітні давачі, стабілізатори, пристрої захисту тощо. Важливе значення має правильне проектування системи та підбір оптимальних параметрів її елементів з огляду на пріоритетне навантаження та кліматичні умови роботи об'єкта.

Залежно від особливостей розміщення автономної фотоелектричної системи та умов її експлуатації, до її складу можуть бути введені додаткові джерела енергії. Наприклад, вітрогенератор для використання енергії вітру чи дизель-генератор (або бензо-генератор) як резервне або аварійне джерело живлення. Така гібридна система має складнішу структуру, що включає згадані компоненти із відповідними зв'язками через контролер.

Підключення додаткових елементів в гібридній ФЕУАТ забезпечує підвищену надійність та безперебійність енергопостачання автономного об'єкта за будь-яких погодних чи експлуатаційних умов. Втім це ускладнює саму систему та потребує ретельного проектування з узгодженням режимів роботи всіх складових.

На рис. 1.1 зображена структурна схема фотоелектричної установки з реалізацією двох типів регулювання потужності батарей фотоелектричних перетворювачів: екстремальне керування та слідкування сонячних батарей за напрямком Сонця.

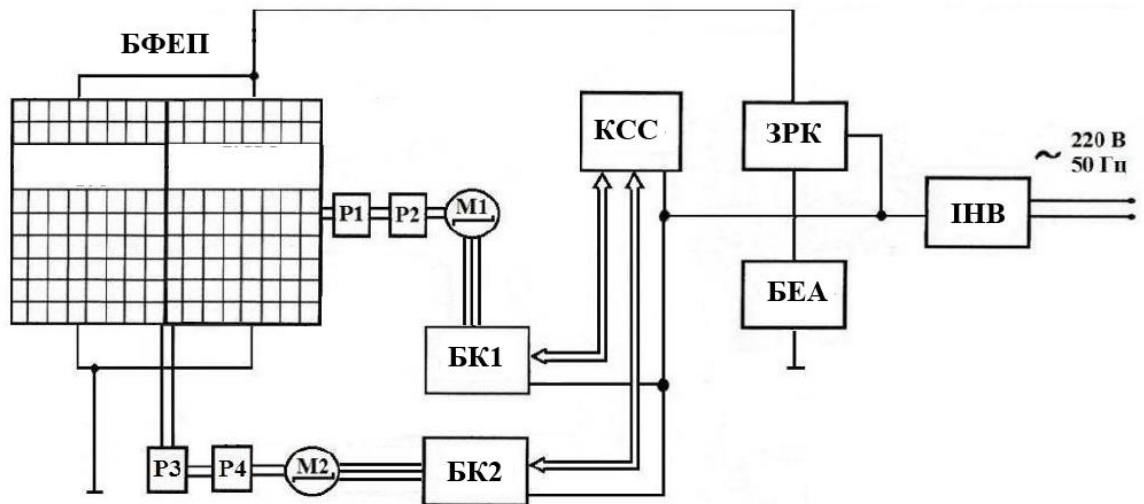


Рисунок 1.1 – Структурна схема фотоелектричної енергетичної установки автономного типу

На схемі рис. 1.1 введені наступні умовні позначки:

БЕА – батарея електричних акумуляторів;

БФЕП – батарея фотоелектричних перетворювачів;

КСС – контролер слідкування за Сонце;

БК1 та БК2 – блоки керування двигунами М1 та М2;

М1 та М2 – крокові двигуни приводів системи слідкування за Сонцем по двом осям;

P1, P2, P3, P4 – механічні редуктори передачі зусилля від крокових двигунів на систему орієнтації;

ЗРК – зарядно-розрядний контролер для батарей електричних акумуляторів;

ІНВ – інверторний пристрій.

В фотоелектричних установках важливу роль відіграє контролер заряду-розряду батарей акумуляторів. Цей пристрій виконує декілька функцій:

- забезпечення максимально ефективного режиму роботи сонячної батареї шляхом відстеження точки максимальної потужності за допомогою алгоритмів MPPT.

- точне регулювання величини зарядного і розрядного струму акумуляторів, недопущення їх глибоких розрядів та перезарядів.

- продовження терміну служби акумуляторів за рахунок оптимізації режимів їх експлуатації.

Отже, контролер заряду-розряду є важливим елементом в складі фотоелектричної системи живлення автономного типу.

Наразі існують контролери заряду-розряду двох основних типів: із широтно-імпульсною модуляцією (ШИМ) та з функцією MPPT для відстеження точки максимальної потужності сонячних батарей.

Основним недоліком звичайних ШИМ-контролерів є необхідність узгодження напруги фотоперетворювачів з напругою акумуляторів під час зарядки. Інакше частина виробленої сонячними панелями енергії втрачається. Наприклад, для заряду 12 В батарей потрібні 36 послідовно з'єднаних сонячних елементів. Для збільшення потужності таку систему можна масштабувати за рахунок паралельного підключення аналогічних ланцюгів.

Контролери з функцією MPPT є технічно складнішими у порівнянні зі звичайними ШИМ-контролерами, проте на 30 % ефективнішими з точки зору використання енергії сонячних батарей.

Асортимент контролерів заряду-розряду на ринку досить широкий. Відмінність їх полягає у вхідних та вихідних характеристиках, сумісності з різними типами акумуляторів.

Основна перевага контролерів з MPPT – це можливість відстеження точки максимальної потужності сонячної батареї та підтримка її оптимального режиму роботи незалежно від напруги акумулятора. Це дозволяє підвищити загальну енергоефективність фотоелектричної системи.

Серед відомих моделей контролерів заряду-розряду з функцією MPPT, які реалізовані провідними світовими компаніями, лідерами є:

- Outback FlexMax (США)
- Morningstar (Німеччина)
- EPSolar Tracer (Китай)
- Xantrex XW-MPPT60-150 (Канада)

Ці пристрої мають високу ефективність та якість, широкий діапазон потужностей. Вони підтримують можливість підключення до хмарних сервісів моніторингу, сумісні з різними типами акумуляторів та фотоперетворювачів. В цілому контролери з MPPT є важливою частиною сучасних фотоелектричних систем автономного енергоефективного живлення.

Склад і структура фотоелектричної установки значною мірою визначається умовами та режимами її експлуатації, а також потребами кінцевого споживача електроенергії. Наразі існує декілька підходів до вибору компонентів ФЕУАТ та розрахунку їх оптимальних параметрів.

Зокрема, деякі фірми-виробники та постачальники енергообладнання пропонують власні онлайн методики чи програми підбору складових ФЕУ. Однак такі рекомендації можуть бути необ'єктивними і не оптимальними, оскільки часто штучно завищують складність і вартість системи, виходячи з комерційних інтересів постачальника.

Тому актуальним є розробка об'єктивних та максимально оптимізованих методів проектування автономних фотоелектричних установок для конкретних умов застосування. Це дозволить підвищити ефективність та знизити собівартість подібних проєктів.

1.3 Особливості експлуатації фотоелектричних модулів в автономних системах

Основним елементом будь-якої фотоелектричної системи є сонячні батареї, або фотоелектричні перетворювачі (ФЕП), які безпосередньо генерують електроенергію з сонячного випромінювання. На даний момент на ринку представлено ФЕП кількох різних типів, придатних для використання у наземних ФЕУАТ.

За матеріалом виготовлення їх можна розділити на дві великі групи – кремнієві та плівкові. Перші, в свою чергу, поділяються на полікристалічні, монокристалічні та аморфні. Серед плівкових ФЕП найпоширенішими є модулі на основі телуриду кадмію (CdTe), селеніду міді-індію (CIS) та органічних (полімерних) матеріалів.

Кремнієві фотоелементи бувають двох видів: *монокристалічні; полікристалічні*. Різниця між цими матеріалами полягає у специфіці одержання початкових кремнієвих заготовок при їхньому вирощуванні з розплавів. Монокристалічна заготовка більш однорідна, але й більш дорога. Полікристалічна – менш однорідна, але має меншу вартість, що може бути вирішальним фактором, коли мова йде про виготовлення фотоелементів. Теоретична ефективність кремнієвих елементів становить приблизно 28 %, а практична – від 14 до 16 %.

Найбільш широке застосування в автономних наземних фотоелектричних системах знайшли саме фотоперетворювачі на основі кремнію. Це пояснюється кількома факторами. По-перше, кремній достатньо поширений у земній корі, що робить його відносно дешевшим. По-друге, кремнієві ФЕП демонструють досить високу ефективність перетворення сонячного випромінювання на електроенергію порівняно з іншими технологіями. І, по-третє, кремнієва фотовольтаїка є найбільш вивченою та освоєною, а отже відносно недорогою у виробництві, що також важливо для масового впровадження.

На відміну від централізованих електростанцій, автономні фотоелектричні системи часто експлуатуються за мінливих погодних та зовнішніх умов. Фотоперетворювачі в таких ФЕУ безпосередньо піддаються впливу навколишнього середовища. Це можуть бути перепади температури, вологості, запиленість повітря, атмосферні опади, вітрове навантаження тощо.

Тому для автономних систем особливе значення має забезпечення міцності, надійності та стабільності роботи сонячних панелей в різних експлуатаційних режимах. При проектуванні ФЕУАТ обов'язково варто враховувати умови та фактори зовнішнього впливу в кожному конкретному випадку.

Вольт-ватні характеристики фотоелектричних перетворювачів відображають залежність потужності, що ними генерується, від напруги. Ці характеристики мають чітко виражений максимум, за якого ФЕП видає найбільшу потужність. Положення даного максимуму суттєво залежить від зовнішніх факторів, таких як термін служби модуля, температура та рівень освітленості.

Основними факторами, що впливають на вольт-амперні характеристики фотоелектричних перетворювачів, є рівень освітленості сонячним промінням та температура навколишнього середовища. Зниження освітленості відбувається при зміні орієнтації сонячних панелей щодо напрямку на Сонце, тобто збільшенні кута між вектором сонячного випромінювання та нормаллю до площини ФЕП. При досягненні кута близько 180° чи потраплянні в тінь освітленість і, відповідно, генерований струм падають практично до нуля.

Тому для забезпечення оптимальної роботи ФЕУАТ необхідно максимально ефективно відстежувати положення сонячних панелей за допомогою систем відслідковування траєкторії Сонця.

Навіть часткове затінення сонячних панелей призводить до падіння їх загальної потужності. Крім того, на затінених фотоперетворювачах та паралельно з ними з'єднаних модулях виникає висока зворотна напруга. Це може викликати перегрів, деградацію та пошкодження сонячних батарей.

За прогнозами, навіть за повного уникнення негативного впливу часткових затінь, очікуване зниження потужності фотоперетворювачів може сягати 15-20 % наприкінці 5 років роботи та 30 % після 10 років експлуатації.

Тому дуже важливо попереджати часткове затінення сонячних панелей в ФЕУАТ, наприклад розміщуючи їх на відстані від можливих перешкод або використовуючи системи відслідковування Сонця.

Проведений аналіз показав, що найсуттєвіші зміни вольт-амперної характеристики фотоелектричного перетворювача відбуваються в періоди раптового виходу сонячних батарей з тривалого затінення на освітлену ділянку. Це типова ситуація для частково хмарної погоди, коли панелі періодично потрапляють у тінь від хмар та знову освітлюються Сонцем.

За літніх умов при середньодобовій температурі повітря в межах $+20...25^{\circ}\text{C}$, за відсутності вітру, температура робочої поверхні сонячних батарей може сягати $+50...70^{\circ}\text{C}$. В результаті цього напруга холостого ходу та оптимальна робоча напруга фотоперетворювача знижуються в середньому на 25 % порівняно з номінальним значенням. Час повного прогріву панелей після виходу з тіні складає до 20 хвилин, що залежить від особливостей їх конструкції та розташування.

Дослідження показали, що за умов інтенсивності сонячного випромінювання фото-ЕРС кремнієвих перетворювачів демонструє лінійну залежність від температури робочої поверхні з коефіцієнтом 1,5-2,5 мВ/К. Тобто з підвищенням температури фото-ЕРС пропорційно знижується.

Відповідно, при зміні температурних умов експлуатації в діапазоні від $+70^{\circ}\text{C}$ до -30°C , напруга оптимального режиму роботи типової кремнієвої сонячної батареї зростає орієнтовно в 1,5 рази. Абсолютні значення напруги кремнієвих фотоелементів при цьому змінюються в межах 0,5-0,75 вольт.

Отже температурні ефекти чинять значний вплив на характеристики фотоперетворювачів та потребують урахування при проектуванні сонячних електростанцій.

Зміна температури робочої поверхні сонячних батарей призводить до паралельного зсуву їх вольт-амперної характеристики вздовж осі напруги без спотворення кривої.

При цьому змінюється і величина струму короткого замикання фотоперетворювача, який демонструє залежність від температури.

Окрім температурного впливу, на метрологічні характеристики та працездатність сонячних батарей також можуть впливати радіаційні чинники, механічні пошкодження поверхні та електростатичні явища. Всі ці фактори потребують контролю та врахування при експлуатації фотоелектричних перетворювачів.

1.4 Шляхи збільшення ефективності роботи сонячних фотоелектричних панелей

Існує декілька основних шляхів підвищення загального коефіцієнту корисної дії автономних фотоелектричних систем:

- застосування контролерів з функцією MPPT для підтримки оптимального режиму роботи сонячних батарей у точці максимальної потужності;
- використання систем стеження за сонцем, що забезпечують максимальне влучення променів на панелі впродовж дня;
- оптимізація конструкції та розташування сонячних батарей для мінімізації їх нагріву, а також застосування сонячних концентраторів.

Втім, навіть за оптимальних умов сумарний ККД більшості фотоелектричних систем не перевищує 10 %. Недовикористання генеруючого потенціалу сонячних панелей залишається основною проблемою галузі.

Застосування режиму максимальної точки потужності (MPPT) є доцільним для підвищення ефективності фотоелектричних систем як з системами сонячного стеження, так і зі стаціонарними сонячними панелями.

Алгоритми МРРТ ефективно працюють для сонячних батарей будь-якої потужності і з фотоперетворювачами різних виробників.

Ефект від впровадження екстремального регулювання буде залежати від діапазону коливань температури панелей, оскільки саме температура значно впливає на оптимальний режим роботи. За умови безперервного підстроювання робочої напруги сонячних батарей до точки максимальної потужності, використання їхнього потенціалу може підвищуватися до 30 %.

Використання систем безперервного слідування сонячних батарей за положенням сонця також істотно підвищує ефективність використання сонячної енергії, щонайменше на 25-30 % порівняно з нерухомими панелями.

Однак реалізація механізмів сонячного стеження є досить складним технічним завданням. Такі системи вимагають застосування пристроїв вертикального і горизонтального повороту з редукторами та електроприводами, блоків автоматичного керування та фотоелектричних датчиків положення Сонця. Їх функціонування потребує значних фінансових затрат, що необхідно враховувати при проектуванні фотоелектричних установок.

На прикладі установок компанії Celtek (рис. 1.2) можна побачити одну з реалізацій систем сонячного стеження. Дана конструкція дозволяє розмістити до 6 м² сонячних панелей з точністю наведення на сонце до 1°. Використовуються електроприводи, контролери і датчики положення.

Проте поширення таких систем обмежене внаслідок складності та вартості. Часто сонячні батареї розміщують на дахах, де системи стеження неможливо реалізувати. А для відкритих майданчиків питання доцільності залишається не вирішеним, адже не визначено оптимальну область застосування залежно від потужності чи площі сонячних панелей. Отже реалізація систем безперервного стеження на практиці є складною та часто економічно недоцільною.

У деяких сонячних енергетичних системах з автоматичним слідуванням за Сонцем використовують фотоелектричні панелі в поєднанні з

лінзами Френеля. Ці лінзи являють собою складову оптичну систему, зібрану з окремозятих концентричних кілець малої товщини, які прилягають одне до одного та мають поперечний переріз у формі призм спеціального профілю.



Рисунок 1.2 – Установка фотоелектричної панелі зі слідкуванням за Сонцем

Лінзи Френеля поділяють на кільцеві та поясні. Кільцеві лінзи направляють світловий потік в одну сторону, фокусуючи його на фотоелектричну панель. Промені від точкового джерела світла, розташованого в фокальній площині лінзи, заломлюючись в кільцях виходять майже паралельним пучком. Поясні лінзи розсіюють світло від джерела в усіх напрямках в певній площині. Діаметр лінз Френеля може складати від 0,1-0,2 м до кількох метрів.

Застосування цих лінз дає змогу збільшити світловий потік, що падає на одиницю площі фотоелектричних перетворювачів, підвищуючи загальну ефективність сонячної системи. Проте використання лінз призводить до підвищення температури панелей та прискорення їх деградації.

Окрім цього, технологія монтажу такої фотоелектричної системи з лінзами вимагає великих трудовитрат та уваги до деталей.

Ще одним ефективним методом збільшення віддачі є оптимізація конструкції самих сонячних батарей з метою мінімізації їх нагрівання. Адже з підвищенням температури кремнієвих фотоелементів їх коефіцієнт корисної

дії знижується. Проте інформації щодо досліджень конкретних рішень та механізмів примусового охолодження панелей обмаль. Можливо використання тепловідводів, радіаторів, рідинного охолодження тощо. Цей напрямок потребує подальшого вивчення.

В цілому, поєднання фотоелектричних перетворювачів з оптичними системами типу лінз Френеля є перспективним шляхом збільшення ефективності сонячних електростанцій. Але потрібні додаткові зусилля по вивченню та оптимізації таких комплексів.

1.5 Висновки до першого розділу

1. Фотоелектричні енергетичні системи можуть працювати автономно або в поєднанні з іншими джерелами енергії, такими як вітрогенератори чи дизель-генератори. Це залежить від умов та місця використання. Структура фотоелектричних систем автономного типу включає сонячні батареї, акумулятори, контролери заряду і перетворювачі струму.

2. Характеристики фотоелектричних панелей сильно залежать від умов навколишнього середовища. Для підвищення ефективності використовують системи максимального відбору потужності, що дозволяють оптимізувати роботу сонячних батарей.

3. Системи безперервного стеження сонячних панелей за Сонцем складно реалізувати технічно і економічно. Тому їх застосовують лише в спеціалізованих мобільних системах, де головним завданням є максимальна ефективність при обмежених розмірах сонячних батарей.

4. На жаль, існуючі методи розрахунку параметрів автономних фотоелектричних систем часто базуються на неточних даних від виробників. Ці дані можуть бути необ'єктивними і призводити до завищення характеристик сонячних батарей та акумуляторів. Для коректного проектування потрібні незалежні виміри параметрів обладнання в реальних умовах експлуатації.

РОЗДІЛ 2

ПРОЕКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ АВТОНОМНОГО ТИПУ

2.1 Методики розрахунку параметрів фотоелектричних систем автономного типу та їх характеристик

Існує розмаїття підходів та методик для визначення параметрів та характеристик фотоелектричних систем, котрі дозволяють з певним ступенем точності розрахувати необхідні показники окремих компонентів задля забезпечення оптимального функціонування за конкретних умов експлуатації.

Ці методики відрізняються використанням математичним інструментарієм, вхідними даними щодо властивостей та характеристик складових частин системи, а також періодом спостереження за кліматичними факторами, що враховується під час розрахунків.

Наприклад, для визначення оптимального кута нахилу та орієнтації сонячних панелей використовують дані про середньодобову та середньорічну інсоляцію, хмарність, температурний режим конкретної місцевості. Застосовуючи математичне моделювання траєкторії сонячного випромінювання, можна з високою точністю підібрати оптимальні параметри встановлення фотоелектричних панелей для максимізації генерації електроенергії.

Ще одним важливим аспектом є дослідження впливу зовнішніх факторів, таких як температура, вологість, запиленість повітря на ефективність роботи фотоелектричних систем. Аналіз цих параметрів дозволяє змодельовати можливі втрати потужності та розробити заходи для їх мінімізації в конкретних умовах експлуатації.

Отже, комплексне застосування математичного моделювання, аналізу статистичних даних та дослідження впливу зовнішніх чинників є важливою

складовою для визначення оптимальних параметрів та режимів роботи фотоелектричного обладнання.

Інтервали часу, які використовуються для побудови кліматичних характеристик, варіюються від періоду одного місяця до кількох годин. При чому застосовуються або усереднені багаторічні дані для типового дня кожного місяця, або часові ряди вихідних даних, що містять інформацію про температуру повітря, сонячну радіацію та швидкість вітру для кожного проміжку часу протягом усього періоду розрахунку.

Застосування точних щогодинних даних дає змогу врахувати локальні кліматичні особливості, які спричиняють стійку асиметрію в добовому ході метеорологічних показників. Проте такі детальні характеристики реєструються обмеженою кількістю метеостанцій. Внаслідок цього безпосереднє застосування подібних розрахункових методик може бути ускладненим, оскільки вони часто не мають можливості моделювати необхідні вихідні дані на основі інтегральних місячних характеристик.

Тому, оптимальним є комбінований підхід, який поєднує переваги усереднених багаторічних даних для врахування загальних кліматичних тенденцій та деталізованої погодинної інформації задля моделювання локальних особливостей. Це дає змогу підвищити точність розрахунків параметрів фотоелектричних систем для конкретних умов їх експлуатації.

Комп'ютерні програми для розрахунку фотосистем можна поділити на дві основні категорії: проектні (розрахункові) та моделюючі. Вони відрізняються як за вхідними даними, так і за вихідними результатами.

Програми для проектування дають змогу за один цикл розрахунку відшукати параметри фотоелектричної системи ФЕУАТ при заданому навантаженні.

Програми для моделювання використовують під час розрахунку параметри системи, що визначені заздалегідь.

Базовий алгоритм програм для моделювання полягає у поступовому калькулюванні енергетичного балансу на кожному модельованому кроці та

фіксації основних характеристик роботи системи (енергія, вироблена фотоелектричними панелями і спожита навантаженням, надлишок чи дефіцит енергії тощо).

Отже, проєктні та моделюючі програми доповнюють одна одну. Результати розрахунків проєктних програм можуть бути використані як вхідні дані для моделюючих з метою детального аналізу роботи фотоелектричної системи за різних режимів експлуатації та умов навколишнього середовища. І навпаки, дані моделювання дозволяють коригувати проєктні рішення для оптимізації системи.

Проєктні програми для розрахунку фотоелектричних систем повинні не лише визначати як розподіляються енергетичні потоки у системі, а й визначати структурний склад енергоустановки на основі заданого переліку компонентів.

Характерною особливістю таких програм є те, що параметри фотоелектричної системи розраховуються без урахування енергетичного балансу на повному річному чи сезонному циклі роботи. Часто рівняння балансу енергії, що включає сонячні батареї і акумулятори, взагалі не розглядається.

Зазвичай сонячна батарея підбирається з розрахунку забезпечення роботи навантаження за місячний часовий проміжок з найгіршим співвідношенням сонячної інсоляції та енергоспоживання. В результаті, такі алгоритми дають мінімум інформації щодо можливих параметрів фотоелектричної системи ФЕУАТ.

Для удосконалення проєктних розрахунків доцільно додатково моделювати різні варіанти систем з проміжними значеннями потужності та ємності, аналізуючи енергетичний баланс на річному циклі. Це дозволить точніше підібрати оптимальне співвідношення компонентів фотоелектричної станції для конкретних умов експлуатації.

Для розрахунку оптимальної конфігурації фотоелектричної системи необхідно розглянути та промоделювати безліч її можливих варіантів. З цією

метою використовується метод перебору та аналізу різних комбінацій параметрів.

Працездатність чергового варіанту системи перевіряється за допомогою спеціальних моделюючих програм. На основі результатів моделювання здійснюється коригування параметрів системи, після чого розрахунковий цикл повторюється з новим набором вихідних даних.

Такі ітерації продовжуються доти, доки не буде отримано задовільний варіант конфігурації фотоелектричної станції, який оптимально задовольнятиме задані вимоги за найменшої вартості системи. Комбіноване використання моделюючих та оптимізаційних розрахунків дозволяє комплексно підійти до проектування, враховуючи техніко-економічні аспекти.

Існує методика визначення величини потужності автономних сонячних електричних станцій, яка полягає у наступних етапах:

- а) розрахунок необхідної вихідної потужності автономної електростанції відповідно до запланованого навантаження;
- б) визначення оптимальної ємності акумуляторних батарей з урахуванням часу автономної роботи системи;
- в) підбір потужності зарядного пристрою та інвертора відповідно до потужності сонячної батареї для забезпечення ефективності зарядки і перетворення струму;
- г) розрахунок потужності сонячних панелей згідно планованого графіку споживання та наявної інсоляції.
- д) перевірка узгодженості всіх підсистем та оптимізація системи в цілому для досягнення необхідних техніко-економічних показників автономних сонячних електричних станцій.

Така поетапна методика дозволяє комплексно спроектувати ефективну сонячну електростанцію автономного типу.

Детальніше перший етап розрахунку потужності сонячної електростанції автономного типу, що дозволяє точно визначити необхідну потужність, включає наступні кроки:

- а) складання переліку всіх споживачів електроенергії (побутові прилади, освітлення, техніка тощо) з зазначенням їх потужності та напруги живлення;
- б) оцінка часу використання кожного електроприладу протягом доби та розрахунок добової потреби в електроенергії для кожного споживача;
- в) складання зведеної таблиці загального енергоспоживання за добу на основі даних попередніх пунктів;
- г) побудова графіка електроспоживання з розподілом за часом доби;
- д) розрахунок сумарної потужності електроспоживання навантаженням;
- е) визначення необхідної вихідної потужності автономної сонячної електростанції за формулою з урахуванням коефіцієнта корисної дії.

$$P_{\text{шини},j} = \eta_j^{-1} \cdot P_{\text{спож},j},$$

де $P_{\text{шини},j}$ – перерахована на основну шину фотоелектричної станції активна потужність споживача j ;

η_j – коефіцієнт ефективності j -того автономного інвертора напруги;

$P_{\text{спож},j}$ – активна потужність j -того споживача.

На другому етапі здійснюється розрахунок необхідної ємності акумуляторних батарей. Він базується на визначеній раніше загальній добовій потребі в електроенергії та кількості годин автономної роботи системи в нічний час, коли немає надходження сонячної енергії.

Ємність акумуляторів підбирається з таким розрахунком, щоб накопиченої електроенергії вистачило для забезпечення безперебійного живлення всіх споживачів протягом заданого часу. Також враховуються коефіцієнти старіння батарей та глибини їх розряду.

Отже, виходячи з потреби в електроенергії в нічний час та параметрів системи, розраховується необхідна ємність акумуляторів для автономної сонячної електростанції за таким виразом:

$$C_{\text{БА}} = T_{\text{ніч}} \frac{100}{\text{disc}} \cdot \frac{P_{\text{НОМ}}}{U_{\text{НОМ}}}.$$

де $T_{\text{ніч}}$ – розрахункова тривалість нічного часу доби, що приймається рівною 10 годинам для літнього періоду та 16 годинам для зимового періоду;

disc – ступінь допустимого розряду акумулятора;

$P_{\text{НОМ}}$ – номінальна активна потужність навантаження;

$U_{\text{НОМ}}$ – номінальна напруга в мережі приладів навантаження.

Третій етап полягає у розрахунку необхідної потужності зарядного пристрою сонячної електростанції автономного типу.

Спочатку обирається метод зарядки акумуляторних батарей: при сталому струмі (20 %-30 % від ємності батарей акумуляторів) або сталій напрузі. Перший потребує постійного контролю та регулювання струму, другий може викликати високі струми на початку заряду (до 0,040-0,05 кА).

Далі розраховується необхідна потужність зарядного пристрою з урахуванням параметрів обраної системи зарядки, кількості та ємності акумуляторів. Також передбачаються захисні схеми обмеження максимального струму/напруги заряду для запобігання пошкоджень.

В результаті підбирається зарядний пристрій оптимальної потужності для конкретної конфігурації сонячної електростанції автономного типу.

Так, для прискорення процесу зарядки акумуляторних батарей доцільно використовувати двоетапний метод – спочатку за постійним струмом, а потім за постійною напругою.

На першому етапі батареї заряджаються регламентованим струмом (як правило, 0,2 С-0,3 С, де С – ємність батареї акумуляторів), що дозволяє швидко відновити більшу частину ємності.

На другому етапі подається постійна зарядна напруга для дозарядження батарей «щадним» струмом. Це необхідно, адже в кінці заряду струм потрібно знижувати з метою уникнення перезаряду.

Застосування такого двоетапного процесу заряду суттєво скорочує загальний час зарядки, що є важливим фактором для автономних сонячних електростанцій.

Важливим етапом є розрахунок необхідної потужності та кількості сонячних панелей для забезпечення зарядки акумуляторів та електроживлення сонячної електростанції автономного типу.

При цьому приділяється значна увага аналізу кліматичних умов та сонячної активності в конкретному регіоні, де планується експлуатувати станцію. Враховуються статистичні дані про середньомісячну кількість сонячної радіації, особливо за найменш сприятливих погодних умов.

На основі цих даних та попередніх розрахунків енергоспоживання і параметрів акумуляторів розраховується необхідна загальна потужність та кількість сонячних панелей з запасом для забезпечення надійної роботи сонячної електростанції автономного типу.

Зрештою за визначеними при розрахунку потужностями навантаженнями в системі проводиться підбір типу та технічних характеристик інвертора напруги.

Також існує реверсивно-балансовий метод знаходження параметрів фотоелектричних установок автономного типу. Його основна перевага полягає у наступному:

- спочатку здійснюється розрахунок альтернативних варіантів конфігурації фотоелектричної станції;
- потім за допомогою оптимізаційних процедур з усього різноманіття обираються кілька найбільш ефективних варіантів.

Такий підхід дозволяє дослідити взаємозв'язки між параметрами системи та кліматичними даними регіону і їх вплив на експлуатаційні характеристики.

Отже, даний метод є ефективним інструментом для визначення оптимальної конфігурації автономної фотоелектричної станції з урахуванням конкретних умов її роботи.

У літературних джерелах представлена комп'ютерна імітаційна модель фотоелектричної системи автономного типу на базі сонячних батарей, акумуляторів і навантаження зі зворотним зв'язком. Управління режимами роботи сонячної та акумуляторної батарей здійснюється за допомогою контролера, що забезпечує логіку функціонування, аналогічну реальній фотоелектричній системі автономного типу в режимі реального часу.

На рис. 2.1 представлена ця модель ФЕУАТ та вказані параметри системи, – потужність сонячної батареї, ємність акумулятора, потужність навантаження, коефіцієнти корисної дії перетворення та інші, які можуть задаватися користувачем.

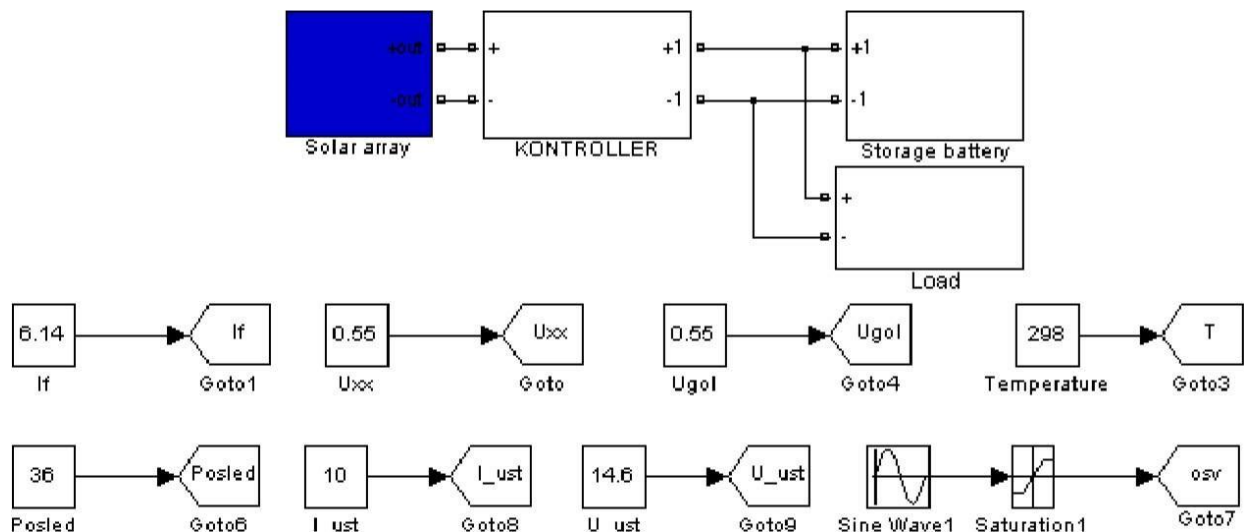


Рисунок 2.1 – Загальний вигляд комп'ютерної імітаційної моделі фотоелектричної установки автономного типу

Така модель дозволяє дослідити роботу ФЕУАТ в різних режимах залежно від зміни параметрів чи кліматичних факторів.

У цілому можна погодитися, що представлена імітаційна модель достатньо адекватно відображає роботу всіх елементів фотоелектричної системи автономного типу. Тому її можна використовувати в якості

інструменту при проектуванні автономних енергетичних установок автономного типу.

Водночас слід зазначити, що в більшості існуючих методик розрахунок параметрів ФЕУАТ ґрунтується на узгодженні усереднених графіків генерації та споживання енергії (середньорічних або середньомісячних). Це позбавляє можливості врахування ситуацій, коли протягом тривалого періоду (декілька днів) сонячної енергії буде недостатньо або, навпаки, її буде надлишок порівняно з розрахунками.

Отже, для підвищення надійності проектування ФЕУАТ доцільно використовувати погодинне моделювання балансу попиту та пропозиції енергії з урахуванням можливої послідовності днів без сонця в конкретному регіоні. Це дозволить точніше розрахувати параметри системи.

2.2 Визначення параметрів сонячних енергетичних установок автономного типу за статистичними даними графіка інсоляції

Основним завданням проектування фотоелектричних систем автономного типу є визначення їх необхідної потужності та підбір оптимальних параметрів визначальних компонентів:

- сонячних панелей – їх типу, кількості, загальної потужності;
- акумуляторних батарей – ємності, напруги, ресурсу циклів заряд-розряд;
- перетворювального обладнання – потужності контролерів, інверторів.

Головною умовою при цьому є забезпечення балансу енергії, тобто відновлення розряду акумулятора за рахунок заряду від сонячних панелей протягом розрахункового циклу (доба, місяць, рік).

Врахування цієї умови є запорукою надійного проектування ФЕУАТ з безперервним живленням навантаження.

Основними стартовими даними для розрахунку потужності фотоелектричної системи автономного типу є параметри графіка електроспоживання.

Для його побудови необхідно здійснити: визначення всіх споживачів електроенергії та їх одиничної потужності; встановлення типу кожного споживача (є він пристроєм зі змінною напругою живлення, чи з постійною); оцінку часу роботи та загальної тривалості використання кожного споживача протягом доби.

На підставі цих даних будується у часі графік потужності навантаження, який і використовується в подальших розрахунках параметрів ФЕУАТ.

Так, на рис. 2.2 показано приклад типового графіка електроспоживання приміщення для проживання або розміщення виробничих потужностей для літнього періоду року. По осі X відкладено час доби, по осі Y - потужність електроспоживання. На графіку можна виділити два проміжки часу:

проміжок $t_1 - t_2$ являє собою тривалість денної частини доби, коли є природне освітлення і не вмикається штучне, причому в цей час спостерігається базовий рівень споживання електроенергії;

проміжок від нуля до t_1 після t_2 до 24 годин являє собою темний час доби, коли увімкнене штучне освітлення і відбувається пікове енергоспоживання різними приладами. Даний графік буде використаний в якості вихідної інформації для розрахунку параметрів автономної фотоелектричної системи автономного типу.

На етапі проектування ФЕУАТ варто максимально оптимізувати енергоспоживання за рахунок реалізації наступних заходів:

- раціонального розподілу підключення споживачів за часом доби;
- пріоритезації вмикання потужних приладів в періоди з високою інсоляцією;
- вимкнення несуттєвих споживачів в період дефіциту енергії.

Це дозволить зменшити необхідну встановлену потужність ФЕУАТ та загальну вартість системи.

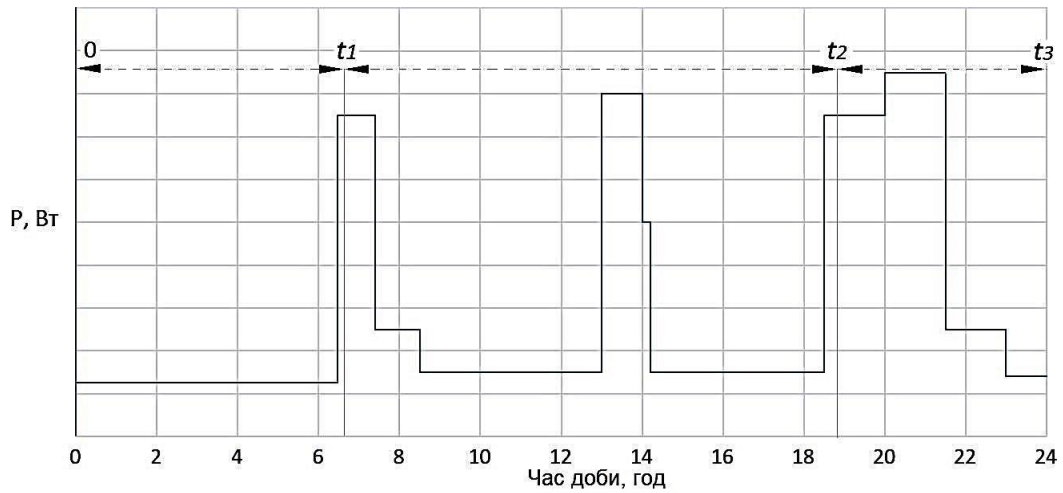


Рисунок 2.2 – Приклад типового графіку споживання електроенергії

Енергія споживання навантаженням за добу визначається:

$$W_{\text{доби}} = \int_0^{24} P_{\text{нав}} dt, \quad (2.1)$$

де $P_{\text{нав}}$ – миттєва активна потужність навантаження споживача.

Також до батарей акумуляторів систем ФЕУАТ висуваються такі основні критерії їх вибору: стійкість до циклів заряд/розряд, глибокого розряду, низький саморозряд, надійність та простота обслуговування. Дотримання цих умов забезпечить ефективну та надійну роботу ФЕУАТ.

Кількість акумуляторних батарей, їх ємність та номінальна напруга визначають на підставі розрахункового графіка енергоспоживання системи. У переважній більшості випадків рекомендується застосовувати герметичні необслуговувані свинцево-кислотні акумулятори з гелієвим електролітом загального призначення. Вони мають найбільш оптимальне співвідношення експлуатаційних характеристик та вартості.

Такі акумулятори відрізняються надійністю, довговічністю, стійкістю до перепадів температури та вібрацій. Вони не вимагають обслуговування

протягом тривалого часу. Гелевий електроліт забезпечує мінімальне випаровування і запобігає розшаруванню, що збільшує термін служби батарей.

Для систем зі складним профілем навантаження або високими вимогами до надійності можуть розглядатися літій-іонні чи літій-полімерні акумулятори. Вони забезпечують велику питому ємність, кількість циклів заряд-розряд та широкий температурний діапазон роботи. Однак такі акумулятори мають вищу вартість.

Вибір акумуляторів є важливим етапом проєктування фотоелектричної системи автономного типу. Він впливає на надійність роботи, строк служби та вартість установки в цілому. Тому це питання потребує ретельного аналізу в кожному конкретному випадку.

Глибокий розряд свинцево-кислотних акумуляторів, тобто зниження залишкової ємності нижче 30-40 %, призводить до незворотних процесів сульфатації пластин і зменшення терміну служби. Це вимагає більш частої заміни батарей, що збільшує витрати на обслуговування системи.

Для запобігання глибоким розрядам в сонячних установках вдаються до двох основних заходів. По-перше, це регулювання навантаження шляхом його часткового або повного відключення у випадку зниження залишкової ємності акумулятора до критичного рівня. По-друге, використання акумуляторів більшої ємності з запасом, що дає змогу накопичити більше енергії в періоди її надлишку та витратити у періоди нестачі без глибоких розрядів.

Оптимальним компромісом між вартістю і надійністю батарей є обмеження глибини розряду на рівні близько 30 %. Це дозволяє мінімізувати процеси деструкції пластин та забезпечити тривалий термін експлуатації акумуляторів з мінімальними втратами їх ємності.

Номінальна напруга акумуляторних батарей у сонячних енергосистемах типово становить 12, 24 або 48 вольт. Цей параметр впливає на вибір інвертора та контролера заряду.

Для невеликих фотоелектричних станцій автономного типу з добовим виробництвом електроенергії менше 1-1,5 кВт·год найбільш доцільно

використовувати 12-вольтові свинцево-кислотні акумулятори. Для середніх систем потужністю 1-3 кВт·год на добу оптимальним є застосування 24-вольтових батарей. А для великих установок з виробництвом понад 3 кВт·год щодоби рекомендуються 48-вольтові або акумулятори з ще вищою напругою, адже це дозволяє зменшити струми і втрати потужності в провідниках.

Вибір оптимальної напруги є важливим кроком проектування сонячної системи, оскільки це впливає на коефіцієнт корисної дії, надійність та вартість як акумуляторів, так і іншого обладнання.

Ємність акумуляторних батарей у сонячних електростанціях підбирається з розрахунку забезпечення безперебійного електроживлення споживачів протягом певної кількості послідовних діб без сонячного випромінювання. Цей показник автономності визначають на основі аналізу багаторічних даних про рівень сонячної інсоляції в конкретній місцевості.

Наприклад, згідно з даними за липень 2023 року для м. Кропивницький, наведеними на графіку рис. 2.3 сонячної активності, кількість днів поспіль з нульовою інсоляцією не перевищує трьох. Отже, для забезпечення безперервної роботи системи автономного типу в цьому регіоні достатньо підібрати ємність акумуляторів з розрахунку триденної автономії в роботі.

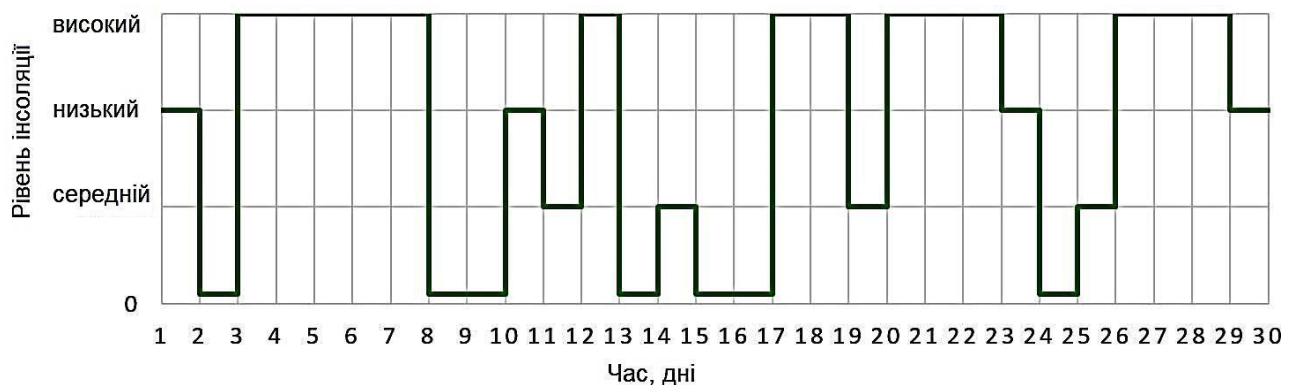


Рисунок 2.3 – Місячна липнева діаграма рівня інсоляції
для м. Кропивницький у 2023 р

Подібні дані про рівень сонячної радіації в різних населених пунктах можна отримати з відкритих інтернет-джерел. Це дозволить коректно розрахувати параметри акумуляторного господарства для конкретного проекту сонячної електростанції з урахуванням кліматичних особливостей її розташування.

В результаті величину ємності батареї акумуляторів визначають:

$$C_{\text{БА}} = \frac{100}{dic_{\text{max}}} \cdot D \cdot \frac{W_{\text{добн}}}{U_{\text{БА ном}}}, \quad (2.2)$$

де dic_{max} – максимально допустима глибина розряду батарей акумуляторів;

D – число днів без зарядки батарей акумуляторів підряд;

$U_{\text{БА ном}}$ – номінальне значення напруги батареї акумуляторів;

$W_{\text{добн}}$ – енергія споживання навантаженням за добу.

Аналіз даних про рівень сонячної радіації в різних регіонах України демонструє певні закономірності. Зокрема, в південних областях країни, таких як Одеська, Миколаївська, Херсонська, кількість послідовних похмурих днів зазвичай не перевищує двох. Крім того, загальна кількість сонячних годин на рік та величина інсоляції в цих регіонах наближаються до максимально можливих показників для території України.

Наприклад, на графіку рівня сонячної радіації за рік для міста Херсон рис. 2.4 можна побачити, що спостерігається висока інсоляція з невеликою кількістю похмурих днів. Це сприятливі умови для використання сонячних панелей та дозволяє зменшити ємність акумуляторних батарей в фотоелектричних системах автономного типу порівняно з північними регіонами.

Під час світлового часу доби сонячні фотоелектричні батареї виконують заряджання батарей акумуляторів і виробляють електрику для споживачів. Величина енергії фотоелектричних батарей, яка необхідна для забезпечення

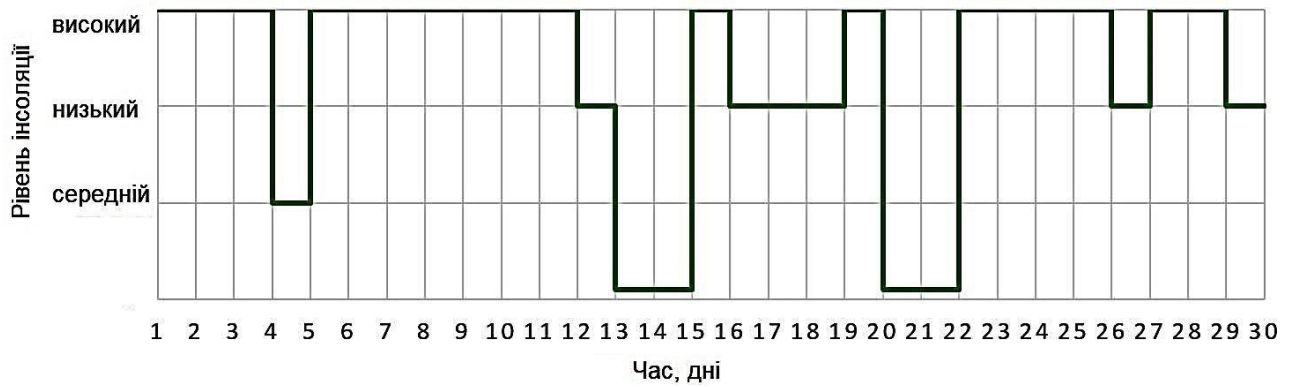


Рисунок 2.4 – Місячна липнева діаграма рівня інсоляції
для м. Херсон у 2023 р

живлення навантаження в період протягом $(a + b)$ днів визначається:

$$W_{\Phi EB (a+b)} = a \cdot \left[k_{BA} \int_0^{t_1} p_{нав(т)} dt + \int_{t_1}^{t_2} p_{нав(с)} dt + a \cdot k_{BA} \int_{t_2}^{t_3} p_{нав(т)} dt \right] + b \cdot k_{BA} \int_0^{24} p_{нав} dt,$$

де a – число днів із достатньою інтенсивністю сонячного випромінювання;

b – число днів із малою інтенсивністю сонячного випромінювання;

k_{BA} – поправковий коефіцієнт для врахування ККД батареї акумуляторів.

Число днів із задовільною та недостатньою інсоляцією, a та b відповідно, визначають за графіками інсоляції для визначеної місцевості.

Таким чином визначити добову енергію, яку мають забезпечувати фотоелектричні батареї можна за виразом:

$$W_{\Phi EB \text{ доби}} = a^{-1} \cdot W_{\Phi EB (a+b)}. \quad (2.4)$$

Щоб точно розрахувати необхідну площу фотоелектричних панелей, потрібно володіти кількома ключовими вихідними даними. По-перше, це паспортна потужність вибраних для встановлення фотоелектричних модулів. Від цієї величини залежить майбутня продуктивність всієї системи. По-друге,

важливий запланований строк служби ФЕУАТ – адже чим довше система пропрацює без заміни, тим швидше окупляться початкові витрати на неї.

Крім того, при розрахунках необхідно враховувати конкретний графік інсоляції місцевості, де планується монтаж фотоелектричних панелей. Адже різні регіони України суттєво відрізняються за кількістю сонячних днів та годин на рік, що безпосередньо впливає на вихід електроенергії.

Додатково важливий фактор – це орієнтація фотомодулів відносно сонячного випромінювання. Можлива як фіксована установка під певним кутом, так і застосування автоматичних систем повороту ФЕП слідом за Сонцем, що дозволяє підвищити ефективність фотоелектричних парелей.

Не менш важливо знати, чи планується регулювати потужність ФЕУАТ у відповідь на зміни навантаження. Системи максимального відбору енергії дозволяють завантажувати інвертор на повну потужність в будь-який момент, тим самим збільшуючи загальний обсяг вироблення.

Сучасні фотоелектричні модулі, що застосовуються в ФЕУАТ, мають питому потужність в межах 120-180 Вт на квадратний метр. Це означає, що з кожного квадратного метру сонячної батареї можна отримати таку кількість електроенергії за сприятливих умов та розрахункової інтенсивності інсоляції на рівні 1000 Вт на квадратний метр. Проте реальний обсяг вироблення електроенергії суттєво залежить від пори року та конкретних погодних умов впродовж періоду експлуатації системи. Адже взимку тривалість світлового дня менша, а хмарність значно більша, ніж влітку.

Для врахування сезонних та регіональних відмінностей використовують дані про сонячну інсоляцію – середньорічну кількість сонячного випромінювання на горизонтальну поверхню для конкретної місцевості. Ці величини наведено на спеціалізованих мапах інсоляції, а також у вигляді табличних даних на профільних інтернет-ресурсах.

Існує декілька ефективних методів, що дозволяють підвищити енергетичну продуктивність сонячних батарей.

Перший метод передбачає впровадження систем автоматичного слідування за положенням Сонця на небосхилі. Застосування таких комплексів дає змогу постійно тримати фотомодулі строго перпендикулярно до сонячних променів, що забезпечує максимальне поглинання енергії.

Інший ефективний підхід – реалізація алгоритмів екстремального регулювання потужності в сонячних станціях. Суть полягає в автоматичному підлаштуванні режиму роботи ФЕП таким чином, щоб вихідна напруга і струм завжди відповідали точці максимальної потужності.

Крім зазначених вище способів, можна також застосовувати сучасні трекерні системи з адаптивним керуванням. Вони дозволяють в реальному часі розраховувати оптимальний кут нахилу сонячних панелей з врахуванням погодних умов, пори року та інших факторів. Застосування таких інноваційних комплексів забезпечує найвищий рівень вироблення енергії.

Використання двохосових трекерних систем з автоматичним слідуванням за сонцем дійсно дозволяє підвищити енергоефективність фотоелектричних установок на 50 % і більше. Проте такі механічні комплекси мають досить складну конструкцію та високу вартість, що не завжди окупається за рахунок додатково виробленої електроенергії.

Тому на практиці частіше за все застосовують одновісні системи з рухомим каркасом тільки по горизонталі або по вертикалі. Вони простіші за будовою і при цьому забезпечують приріст ефективності на 25-35 %. Це оптимальне співвідношення між вартістю додаткового обладнання та отриманим економічним ефектом.

Отже, вибір конкретного типу трекерної системи має ґрунтуватися на розрахунках окупності з урахуванням регіональних особливостей інсоляції та вимог до строку окупності проекту. Це дозволить прийняти найбільш раціональне рішення для кожного окремого випадку.

Ефективність застосування систем екстремального регулювання потужності в сонячних електростанціях безпосередньо залежить від діапазону

коливань температури навколишнього середовища. Адже саме температура визначає робочі характеристики фотоелектричних модулів.

За результатами аналізу, впровадження алгоритмів автоматичної оптимізації режимів роботи дає приріст ефективності на 30 % і більше порівняно зі звичайним під'єднанням сонячних батарей безпосередньо до акумуляторів. Пояснюється це тим, що в режимі екстремального регулювання контролер постійно підлаштовує робочу напругу таким чином, щоб виходити на максимум потужності за конкретних умов. Тоді як при паралельному з'єднанні ФЕП та АБ напруга фіксована і не оптимальна протягом більшої частини доби. Отже, саме адаптивне регулювання дозволяє повною мірою розкрити потенціал сонячних батарей.

Беручи до уваги необхідні вихідні дані потрібна поверхня сонячної батареї визначатиметься виразом:

$$F_{\text{ФЕБ}} = \frac{W_{\text{ФЕБ доби}}}{W_{\text{ФЕБ (доби) пит}}}, \quad (2.5)$$

де $W_{\text{ФЕБ (доби) пит}}$ – величина енергії, яка за добу продукується фотоелектричною батареєю площе 1 м^2 і може бути визначена за виразом;

$$W_{\text{ФЕБ (доби) пит}} = \frac{k_1}{k_2} P_{\text{ФЕБ пит}} \cdot (t_1 - t_2), \quad (2.6)$$

де $k_1 \approx 1,2-1,3$ – коефіцієнт, який враховує зростання енергоефективності ФЕП під час екстремального регулювання порівняно із паралельно-послідовним сполученням фотоелектричної панелі та акумуляторної батареї;

k_2 – коефіцієнт, який враховує орієнтацію ФЕП в просторі;

$P_{\text{ФЕБ пит}}$ – електрична потужність фотоелектричної батареї площею 1 м^2 за нормальних умов експлуатації;

t_1 – момент часу початку світлового дня;

t_2 – момент часу кінця світлового дня.

Для врахування впливу просторової орієнтації сонячних батарей на їх енергетичну ефективність застосовується спеціальний поправочний коефіцієнт. Його значення залежить від конкретного типу фотомодулів:

- при використанні двохосьових систем слідкування за сонцем коефіцієнт дорівнює 1, що означає оптимальне розміщення перпендикулярно до сонячних променів;
- для фіксованого кута нахилу, що дорівнює широті даної місцевості та орієнтації строго на південь, коефіцієнт становить 1,25;
- у випадку горизонтального або близького до горизонтального розташування сонячних панелей без слідкуючих систем коефіцієнт приймає найбільше значення – 1,5.

Отже, даний параметр дозволяє врахувати недоотримання енергії через відхилення фотоелектричних модулів від оптимального кута падіння сонячних променів.

Точніше зазначений коефіцієнт можна визначити шляхом імітаційного моделювання ФЕУАТ.

Контролер заряду акумуляторних батарей і регулювання потужності фотоелектричних модулів є вкрай важливим компонентом фотоенергетичних установок автономного типу. Адже саме цей пристрій забезпечує ефективне функціонування всієї системи в цілому. Основні функції контролера полягають в оптимізації режимів роботи сонячної батареї, контролі та регулюванні струмів заряду і розряду батареї акумуляторів. Завдяки цьому упереджується як надмірний розряд, так і перезаряд батарей, що суттєво подовжує термін їх служби.

При підборі моделі контролера необхідно враховувати максимальні робочі значення напруги та струму як для фотоелектричного масиву, так і для акумуляторів. Для систем з широтно-імпульсною модуляцією контролер має вибиратися з запасом за струмом короткого замикання сонячних панелей на рівні 20-25 %. Для екстремальних регуляторів вибір потужності контролера

залежить безпосередньо від загальної потужності установки з обов'язковим урахуванням мінімальної напруги розряджених акумуляторів.

Для перетворення постійного струму від джерел живлення в змінний використовуються спеціальні пристрої – інвертори. Головний параметр, що характеризує їх ефективність, це коефіцієнт корисної дії, який має перевищувати 90%. Стандартна напруга виходу інверторів складає 220 В з частотою 50 або 60 Гц. Для пристроїв потужністю понад 10 кВт переважна напруга 380 В. Вхідна напруга живлення вибирається з ряду: 12, 24, 48 В.

До інверторів систем електроживлення автономного типу висувається низка специфічних вимог, зокрема такі:

- витримувати короточасні та тривалі перевантаження;
- забезпечувати мінімальні втрати енергії в режимах малих навантажень;
- підтримувати стабільний рівень вихідної напруги за будь-яких умов;
- мати низький рівень гармонік вихідного сигналу для якісного живлення споживачів;
- мати високий загальний коефіцієнт корисної дії.

Дотримання цих вимог дозволяє забезпечити надійне та ефективне функціонування всієї фотоенергетичної системи.

При підборі інвертора для автономної фотоелектричної станції важливо враховувати не лише сумарну потужність усіх під'єднаних споживачів, але і передбачати певний запас. Рекомендоване збільшення паспортної потужності всіх пристроїв має становити щонайменше 40 %. Це дозволяє забезпечити нормальне функціонування електроприладів з високими пусковими струмами: компресори холодильників, насоси тощо. Адже саме під час запуску цих пристроїв споживання енергії може в рази перевищувати номінальні значення.

Отже, запропонована методика проектування систем енергопостачання автономного типу включає наступні етапи:

- розрахунок необхідної потужності майбутньої установки на основі енергоспоживання та балансу енергії;
- підбір ємності і типу акумуляторних батарей;

- визначення площі та параметрів сонячних панелей;
- вибір контролера для управління акумуляторами та оптимізації режимів роботи фотомодулів;
- розрахунок та вибір інвертора з необхідним запасом потужності.

Така поетапна процедура з урахуванням усіх вихідних даних дозволяє спроектувати найбільш оптимальну ФЕУАТ.

2.3 Порівняльний аналіз ефективності різних конфігурацій фотоелектричних установок автономного типу

Досконаліша методика проектування фотоенергетичних систем автономного типу надає можливість визначати оптимальні технічні параметри з урахуванням конкретних умов експлуатації та вимог замовника.

Зокрема, вона дозволяє спроектувати ФЕУАТ в таких основних конфігураціях:

1) фіксоване встановлення сонячних панелей під кутом, що дорівнює широті даної місцевості (ШМ) в напрямку на південь, із стабілізацією напруги за на заданому рівні, будемо використовувати аббревіатуру ФЕУАТ-ШМ;

2) фіксоване встановлення сонячних панелей під кутом, що дорівнює широті даної місцевості (ШМ) в напрямку на південь з використанням контролера для екстремального крокового регулювання потужності (ЕРП), будемо використовувати аббревіатуру ФЕУАТ-ШМ-ЕРП;

3) двохосьова система слідування сонячних панелей за Сонцем з фіксацією напруги на заданому рівні, будемо використовувати аббревіатуру ФЕУАТ-ДО;

4) двохосьова система слідування сонячних панелей за Сонцем і екстремальним кроковим регулюванням потужності, будемо використовувати аббревіатуру ФЕУАТ-ДО-ЕРП.

Такий гнучкий підхід дає змогу проектувати оптимальні за складом та ефективністю фотоелектричні установки автономного типу.

Для демонстрації можливостей удосконаленої методики розрахунку та порівняння ефективності різних конфігурацій систем було проведено проектування ФЕУАТ для електропостачання житлового будинку в літній період у місті Херсон. Вихідними даними для розрахунків послужили: графік електроспоживання об'єкта в розрізі годин доби, приведений на рис. 2.5 та діаграма надходження сонячної енергії для даної місцевості з урахуванням середньомісячної кількості годин сонячного сяйва та хмарності (рис. 2.4.).

На підставі вихідних даних розрахуємо кілька варіантів фотоелектричних станцій автономного типу та проведено порівняльний аналіз за показниками ефективності з метою виявити оптимальну конфігурацію системи для забезпечення електроживлення даного об'єкта.

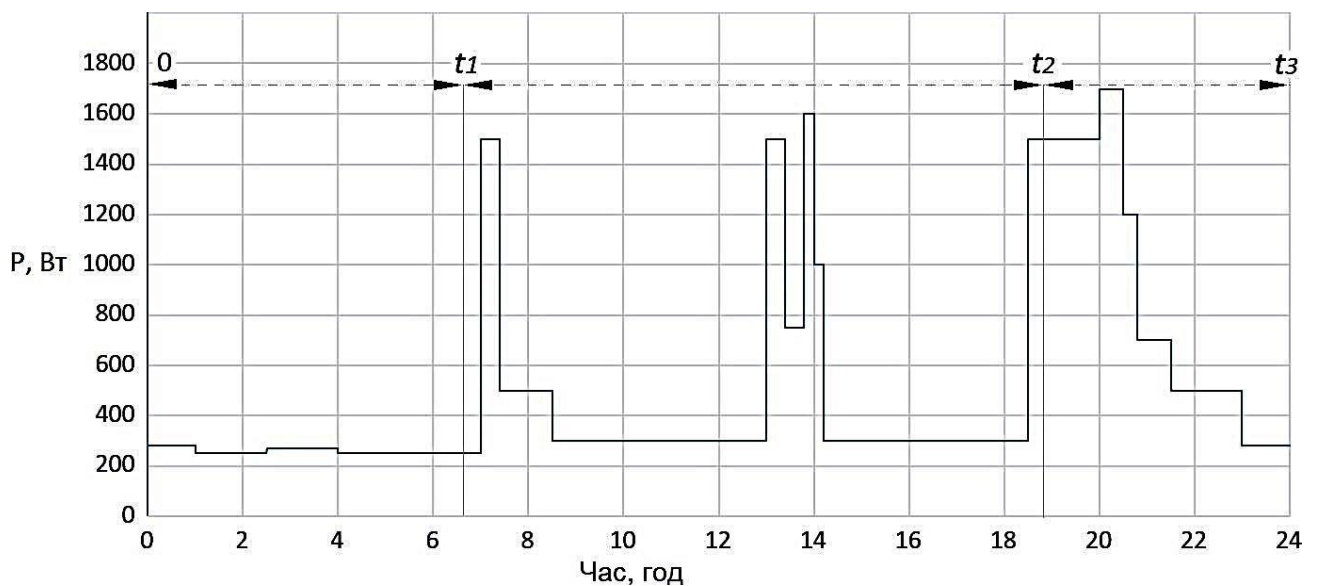


Рисунок 2.5 – Добовий графік електроспоживання житлового приміщення

У відповідності до удосконаленої методики визначення енергії споживання навантаженням за добу виконується за виразом (2.1):

$$W_{\text{добн}} = \int_0^{24} p_{\text{нав}} dt \approx 5,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Ємність батареї акумуляторів за виразом (2.2):

$$C_{\text{БА}} = \frac{100}{70} \cdot 2 \cdot \frac{5,6}{48} \approx 0,335 \text{ кА} \cdot \text{год}.$$

Зважаючи на розраховану ємність батарей акумуляторів оптимальним варіантом буде використання свинцево-кислотних акумуляторів. Передбачається послідовне під'єднання 4-х окремих батарей на 12 В та ємністю 90 А·год кожна. Така конфігурація дозволяє отримати сумарну напругу 48 В та ємність 360 А·год, що цілком задовольняє розрахункові потреби даної системи автономного енергопостачання.

Необхідна енергія фотоелектричних батарей для забезпечення живлення навантаження в період протягом $(5 + 2) = 7$ днів визначається по (2.3):

$$W_{\text{ФЕБ (5+2)}} = 5 \cdot [1,2 \cdot 0,8 + 2,4 + 1,2 \cdot 2,4] + 2 \cdot 1,2 \cdot 5,6 = 44,6 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Добова енергія фотоелектричних батарей за виразом (2.4):

$$W_{\text{ФЕБ добн}} = a^{-1} \cdot W_{\text{ФЕБ (5+2)}} = 5^{-1} \cdot 44,6 = 8,92 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Загальна кількість електроенергії, що виробляється фотоелектричним генератором протягом доби, залежить від конструкція та параметрів самої сонячної батареї, а також умов її експлуатації. Тому відповідно до удосконаленої методики було проведено розрахунки та порівняння добової генерації для чотирьох можливих варіантів структур системи, що були розглянуті на початку підрозділу.

1) Конфігурація ФЕУАТ-ШМ:

$$W_{\text{ФЕБ (добн) пнт}} = \frac{1}{1,25} 0,18 \cdot 10 = 1,44 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$F_{\text{ФЕБ}} = \frac{8,92}{1,44} \approx 6,21 \text{ м}^2.$$

2) Конфігурація ФЕУАТ-ШМ-ЕРП:

$$W_{\text{ФЕБ (добн) пнт}} = \frac{1,3}{1,25} 0,18 \cdot 10 = 1,872 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$F_{\text{ФЕБ}} = \frac{8,92}{1,872} \approx 4,81 \text{ м}^2.$$

3) Конфігурація ФЕУАТ-ДО:

$$W_{\text{ФЕБ (добн) пнт}} = \frac{1}{1} 0,18 \cdot 10 = 1,8 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$F_{\text{ФЕБ}} = \frac{8,92}{1,44} \approx 4,96 \text{ м}^2.$$

4) Конфігурація ФЕУАТ-ДО-ЕРП:

$$W_{\text{ФЕБ (добн) пнт}} = \frac{1,3}{1} 0,18 \cdot 10 = 2,340 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

$$F_{\text{ФЕБ}} = \frac{8,92}{2,340} \approx 3,81 \text{ м}^2.$$

Для підрахунку числа сонячних фотобатарей візьмемо до уваги перетворювачі «АХ-180М» зі значенням номінальної потужності 0,18 кВт і

величиною площі 1,3 м². Орієнтовна вартість системи була визначена виходячи із ринкової вартості на комплектуючі складники системи.

Результати виконаних розрахунків підсумовані в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Зведені дані результатів розрахунку конфігурацій ФЕУАТ

Конфігурація системи	Площа ФЕП, м ²	Число ФЕП, шт	Вартість обладнання, тис. грн
ФЕУАТ-ШМ	6,21	5	54,776
ФЕУАТ-ШМ-ЕРМ	4,81	4	51,734
ФЕУАТ-ДО	4,96	4	85,632
ФЕУАТ-ДО-ЕРП	3,81	3	81,116

Аналіз даних табл. 2.1 засвідчує, що обрана структура фотоелектричної установки автономного типу суттєво впливає на необхідну кількість фотоелектричних панелей за однакового рівня енергоспоживання.

Зокрема, для ФЕУ невеликої потужності при використанні двохосьових систем слідкування з екстремальним регулюванням або фіксованого розташування зі стабілізатором напруги кількість фотоелектричних перетворювачів варіюється в межах 3-5 штук.

Ефект від застосування алгоритмів оптимізації відбору потужності за ефективністю можна порівняти із системами автоматичного позиціонування фотоелектричних панелей. Проте вартість та складність реалізації екстремальних регуляторів значно менші.

Отже, запропонований підхід дозволяє обрати оптимальну структуру ФЕУАТ з урахуванням вимог енергоефективності та вартості реалізації для конкретних умов.

2.4 Висновки до другого розділу

1. Існує декілька підходів до визначення параметрів фотоелектричних систем. Вони дозволяють з певною точністю розрахувати необхідні параметри окремих вузлів ФЕУ. Проте ці методи мають певні недоліки: часто призводять до завищення розрахункової потужності системи, що збільшує вартість проекту; базуються на усереднених даних сонячної інсоляції в регіоні, які не дають цілісної картини для конкретної місцевості протягом всього року. Тому актуальним є питання удосконалення методики проектування ФЕУ з метою підвищення точності визначення параметрів для реальних умов експлуатації, оптимізації складу та характеристик системи для досягнення максимальної ефективності при мінімальних витратах.

2. Удосконалена методика проектування фотоелектричних систем автономного типу, що ґрунтується на розрахунку енергетичного балансу та деталізованих даних сонячної інсоляції для конкретного регіону, дозволяє на етапі проектування порівнювати та обирати оптимальний варіант структури і технічних параметрів фотоенергетичної установки з урахуванням заданих умов експлуатації та графіка електроспоживання об'єкта. Це дає змогу забезпечити максимальну енергоефективність автономної системи при мінімальних капіталовкладеннях на стадії проектування за рахунок раціонального підбору складу устаткування.

3. Проведене порівняння енергоефективності та параметрів різних конфігурацій фотоелектричних станцій автономного типу показало, що ефект від впровадження систем екстремального регулювання потужності фотоелектричних батарей є порівнянним з ефектом від застосування комплексів автоматичного слідкування фотомодулів за Сонцем. Але реалізація алгоритмів оптимізації відбору енергії є набагато простішою і дешевшою в порівнянні зі складними електромеханічними системами двохосової орієнтації панелей. Тому з точки зору практичної реалізації, саме

метод екстремального регулювання є більш раціональним та перспективним підходом для підвищення ефективності фотоенергетичних систем.

4. Найбільш оптимальним варіантом конфігурації фотоелектричної системи автономного типу за результатами порівняльного аналізу є варіант із фіксованим розташуванням сонячних панелей у південному напрямку під кутом, рівним географічній широті місцевості та екстремальним регулюванням. Це забезпечує максимальне вловлювання сонячного випромінювання впродовж дня і року. Саме така структура ФЕУАТ є найбільш економічно ефективним рішенням для автономного енергопостачання.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ БАТАРЕЇ

3.1 Порівняльний аналіз DC-DC перетворювачів для фотоелектричних систем живлення автономного типу

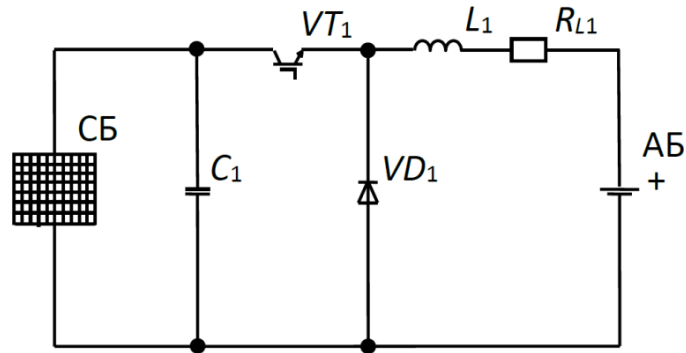
Одним із ключових завдань при розробці та створенні перетворювачів енергії (зарядних пристроїв) для фотоелектричних систем автономного типу є погодження напруги джерел. Оскільки напруга у точці максимальної потужності вольт-амперної характеристики є нестабільною, перетворювач повинен мати функцію регулювання. Потреба у широкому діапазоні регулювання напруги накопичувача енергії під час пошуку точки віддачі максимальної потужності значно впливає на структуру та складність побудови контролера заряджання акумуляторів, ускладнює знаходження його енергетичних параметрів та розрахунок елементів силового кола.

Контролери заряду часто будуються на основі безтрансформаторних DC-DC перетворювачів, що забезпечує високу енергетичну ефективність завдяки мінімізації кількості елементів. Проте такі схеми мають обмежений спектр регулювання напруги. Ця обставина поважає узгодження рівнів напруги фотоелектричної батареї та батареї акумуляторів.

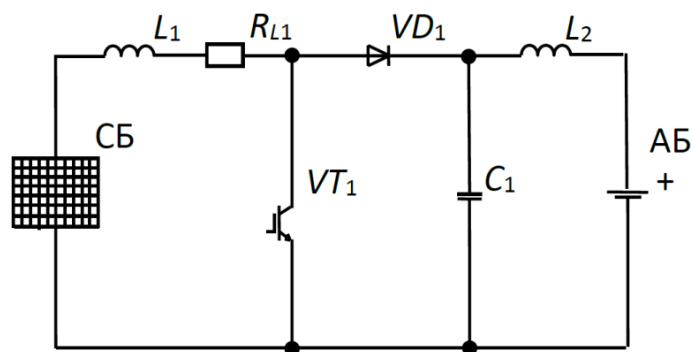
Для вирішення цієї проблеми можна застосувати паралельне або послідовне з'єднання окремих елементів, що складають акумуляторну чи сонячну батарею, щоб налаштувати їх сумарну напругу таким чином, аби діапазон регулювання перетворювача включав точку максимальної потужності вольт-ватної характеристики з урахуванням її можливого зміщення. Однак не завжди вдається досягти оптимальних енергетичних показників системи таким шляхом.

Поширений варіант контролера заряду акумуляторних батарей на основі

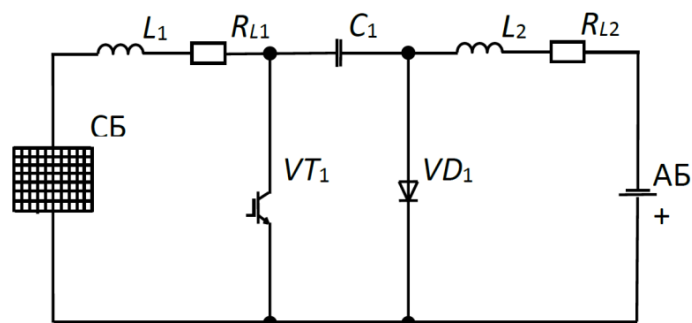
DC-DC перетворювача у понижувальній конфігурації зображений на рис. 3.1. Перевагою даної схеми є стабільний струм заряджання акумулятора, який можна забезпечити за рахунок великої вихідної індуктивності. Але імпульсне споживання струму на вході потребує застосування громіздкого вхідного С-фільтра.



а)



б)



в)

понижуючий (а) та підвищуючий (б) DC-DC перетворювач; перетворювач Кука (в)

Рисунок 3.1 – Схеми регульованих DC-DC перетворювачів енергії фотобатареї

Якщо припустити, що струм дроселя є безперервним, то регульовальна характеристика даного перетворювача буде описуватися виразом:

$$\frac{U_{ВНХ}}{U_{ВХ}} = \frac{\gamma}{1 + R_{L1} / R_H}, \quad (3.1)$$

де γ – відносна тривалість перебування транзистора у відкритому стані;

R_{L1} – активний опір дросельної котушки L_1 ;

R_H – опір споживачів навантаження.

Наведена раніше регульовальна характеристика (3.1) застосовна при роботі перетворювача від ідеального джерела електрорушійної сили. Проте в реальних умовах ситуація дещо відмінна. При підключенні перетворювача до фотоелектричної батареї, яка має нелінійну вольт-амперну характеристику, а також при роботі на акумуляторну батарею, що є навантаженням зі змінним опором, характеристики системи суттєво змінюються і відхиляються від теоретичної формули (3.1). Оскільки в даному випадку регульованим параметром є напруга сонячної батареї, з урахуванням виразу (3.1) можна отримати модифіковану формулу, яка точніше описує реальну роботу системи:

$$U_{СБ^*} = \frac{U_{СБ}}{U_{АБ}} = \frac{1 + R_{L1} / R_H}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot I_{ВНХ}}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot \frac{I_{ВХ}}{\gamma}}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}}{U_{АБ}} \cdot \frac{I_{СБ}}{\gamma^2}.$$

У зв'язку зі складністю опису реальної вольт-амперної характеристики сонячної батареї за допомогою аналітичних виразів, доцільно скористатися спрощеною математичною моделлю. У цій моделі ВАХ сонячної батареї апроксимується всього за трьома характерними точками:

- напруга холостого ходу U_{xx} ;

- струм короткого замикання I_{K3} ;
- оптимальними значеннями струму I_0 і напруги U_0 , що відповідають точці максимальної потужності.

$$I_{CE} = I_{K3} \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{K3}} \right)^{\frac{U_{XX} - U_{CE}}{U_{XX} - U_0}} \right) \quad (3.2)$$

Покладемо вираз (3.2) у вираз для напруги сонячної батареї, отримаємо:

$$U_{CE}^* = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}^*}{\gamma^2} \left(1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{K3}} \right)^{\frac{U_{XX} - U_{CE}}{U_{XX} - U_0}} \right), \quad (3.3)$$

У виразі (3.3) опір дроселя для зручності був виражений відносною величиною $R_{L1}^* = R_{L1} \cdot I_{K3} / U_{AB}$.

Параметр енергетичної ефективності системи керування зарядом акумуляторних батарей K_p має назву коефіцієнта використання. Цей коефіцієнт визначається як відношення фактично споживаної перетворювачем потужності від сонячної батареї до оптимальної потужності, що визначається точкою максимуму на її вольт-амперній характеристиці:

$$K_p = \frac{P_{CE}}{P_{CE_max}} = \frac{U_{CE}}{U_0^*} \cdot \frac{I_{CE}}{I_0}.$$

Окрім коефіцієнта використання сонячної батареї, важливим показником ефективності системи є коефіцієнт корисної дії самого перетворювача η . Цей показник характеризує відношення корисної

потужності, що передається від перетворювача до акумулятора, до загальної споживаної перетворювачем потужності від сонячної батареї. Якщо знехтувати втратами потужності в транзисторі VT_1 і врахувати лише втрати в дроселі L_1 , тоді ККД перетворювача можна розрахувати за формулою:

$$\eta = \frac{1}{U_{CE}^*} \cdot \frac{I_{ВИХ}}{I_{ВХ}} = \frac{1}{U_{CE}^*} \cdot \frac{1}{\gamma}.$$

Отже, за допомогою спрощеної математичної моделі (3.2), що апроксимує вольт-амперну характеристику сонячної батареї трьома точками, ми можемо визначити залежності основних енергетичних параметрів розглянутого перетворювача у функції впливу керування γ .

Буде доцільно проаналізувати енергетичні характеристики системи керування зарядом акумуляторної батареї в крайніх точках діапазону регулювання. Для цього необхідно розглянути режими роботи при мінімальній та максимальній напрузі оптимальної точки вольт-амперної характеристики сонячної панелі.

Шляхом аналізу для панелі типу АХ-180М було встановлено наступне:

- максимальне значення напруги точки оптимального відбору потужності відповідає умовам холодної, сонячної погоди за мінімальної температури -30°C , при цьому параметри вольт-амперної характеристики (позначимо її ВАХ1) наступні:

$$U_{xx1} = 52 \text{ В}, I_{kz1} = 4,81 \text{ А}, U_{01} = 43,11 \text{ В}, I_{01} = 4,301 \text{ А}.$$

- мінімальне значення напруги точки оптимального відбору потужності спостерігається за слабкої освітленості та максимальної температури $(+60...+70^{\circ}\text{C})$, при цьому параметри вольт-амперної характеристики (позначимо її ВАХ2):

$$U_{xx2} = 25,2 \text{ В}, I_{kz2} = 2,11 \text{ А}, U_{02} = 21,81 \text{ В}, I_{02} = 1,801 \text{ А}.$$

Вольт-амперні характеристики ВАХ1 та ВАХ2 представлені на рис. 3.2.

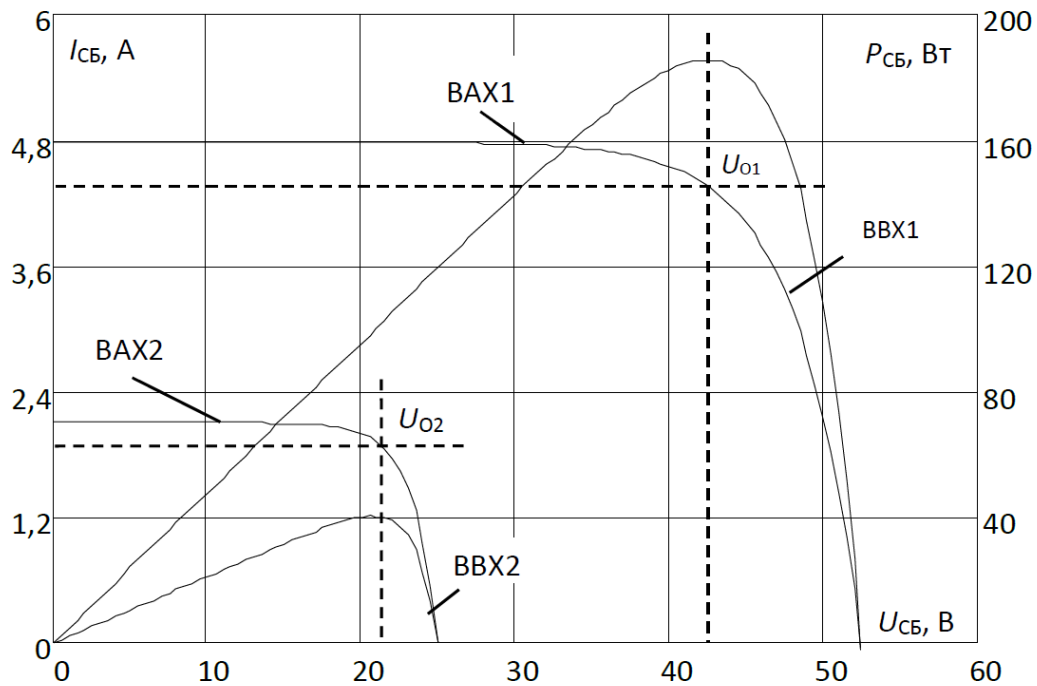
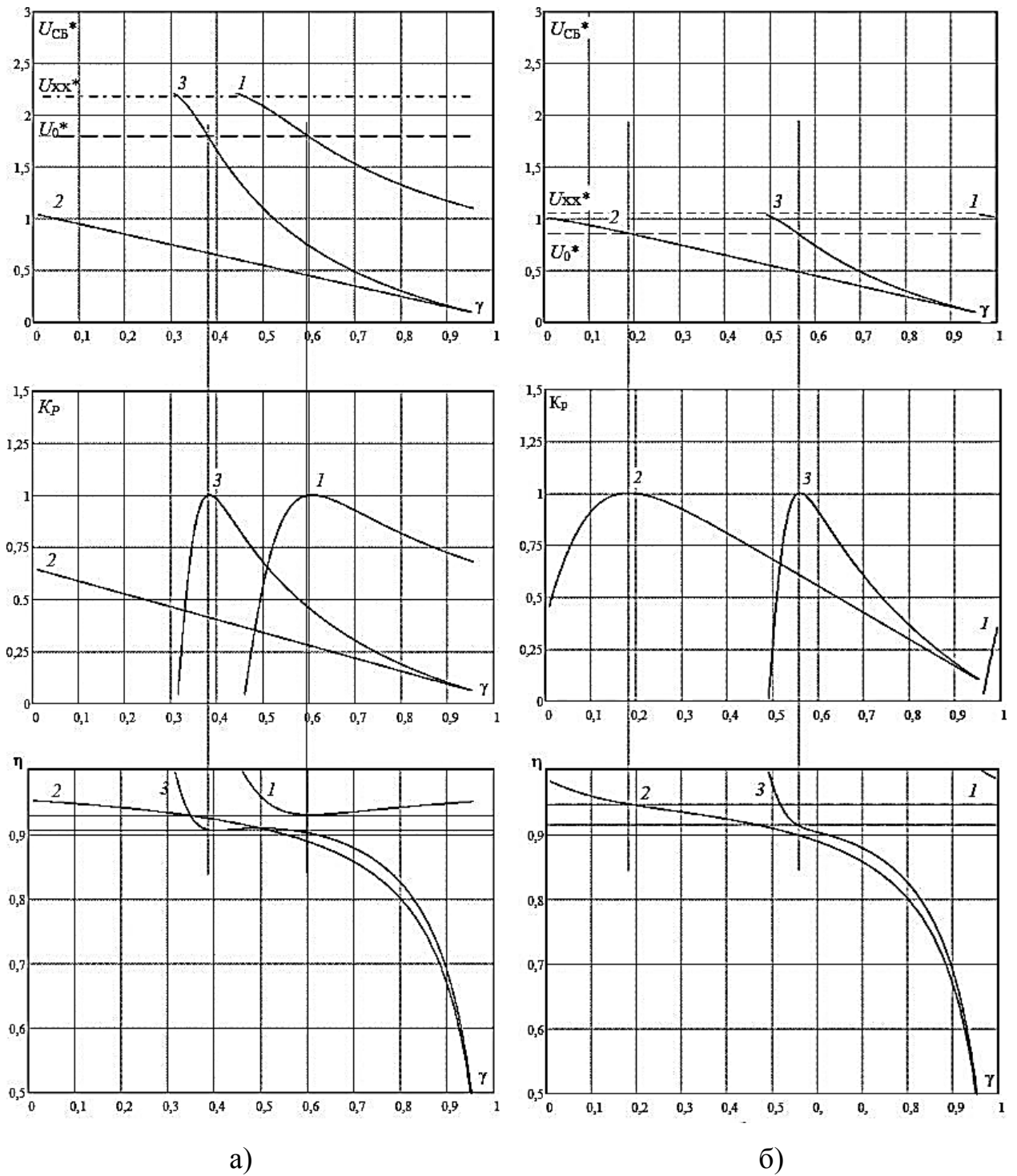


Рисунок 3.2 – Множина вольт-амперних і вольт-ватних характеристик для моделі фотоелектричних перетворювачів АХ- 180М

Характеристики розглянутого вище понижувального перетворювача при його роботі на двох граничних вольт-амперних характеристиках сонячної панелі (рис. 3.2.) показані на рис. 3.3. При цьому напруга акумулятора становить $U_{AB} = 24 \text{ В}$, а відносні втрати в дроселі дорівнюють $R_{L1}^* = 0,05$.

За температури -30°C максимум вхідної потужності перетворювача спостерігається при значенні відносної тривалості знаходження транзистора у відкритому стані $\gamma = 0,59$. При цьому коефіцієнт використання сонячної батареї прямує до максимального значення $K_p \rightarrow 1$, а ККД перетворювача мінімальний і становить $\eta = 0,93$. Варто звернути увагу, що на усьому діапазоні регулювання напруга фотоелектричної батареї перевищує напругу батареї акумуляторів ($U_{CB}^* > 1$). Збільшення напруги сонячної батареї обмежене рівнем напруги холостого ходу, що досягається при значенні відносної тривалості $\gamma = 0,46$. Подальше зменшення коефіцієнта γ призводить до переходу перетворювача в режим роботи з переривчастим струмом і не може бути описане за допомогою виразу (3.3).



а) для випадку $U_{AB} < U_0$ (BAX1); б) – для випадку $U_{AB} > U_0$ (BAX2)

1 – понижуючий перетворювач, 2 – підвищуючий перетворювач, 3 – перетворювач Кука
Рисунок 3.3 – Залежності параметрів перетворювачів енергії фотоелектричної батареї від відносної тривалості перебування транзистора у відкритому стані γ

У випадку зменшення напруги оптимальної точки вольт-амперної характеристики сонячної панелі до значення $U_0 = 21,8 \text{ В}$ при напрузі акумулятора $U_{AB} = 24 \text{ В}$ використання понижувального перетворювача є неефективним. Це підтверджуються характеристиками на рис. 3.3, б, згідно яких діапазон регулювання дуже вузький (24-25 В) та не охоплює точку максимальної потужності на вольт-ваттній характеристиці. Коефіцієнт використання сонячної батареї в цьому режимі становить всього $K_p = 0,33$ при повністю відкритому транзисторі ($\gamma = 1$). Тому для таких умов доцільно застосування підвищувального перетворювача, який дозволяє отримати напругу сонячної батареї меншу за напругу акумулятора ($U_{CB} < U_{AB}$). Це сприятиме підвищенню ефективності системи.

Вхідною ланкою підвищувального перетворювача, зображеного на рис. 3.1, б, є дросель L_1 , який забезпечує безперервність вхідного струму та стабільність робочої точки по струму на вольт-амперній характеристиці сонячної батареї. Оскільки конденсатор C_1 працює в імпульсному режимі заряду, на виході необхідний дросель L_2 для вирівнювання струму заряджання акумуляторної батареї. За умови живлення від ідеального джерела напруги та безперервності струму в дроселі L_1 регульовальна характеристика підвищувального перетворювача описується виразом:

$$\frac{U_{ВНХ}}{U_{ВХ}} = \frac{1 - \gamma}{1 - \gamma^2 + R_{L1} / R_H}. \quad (3.4)$$

Характеристика ідеального підвищувального перетворювача передбачає зростання напруги в усьому діапазоні регулювання. Однак на практиці через втрати в дроселі L_1 відбувається спотворення характеристики при великих значеннях коефіцієнта γ . Це спричинене значним зростанням відношення вхідного струму до вихідного. Для визначення реальної регульовальної характеристики з урахуванням режиму роботи від сонячної батареї на

аккумуляторне навантаження були проведені перетворення, аналогічні розглянутим раніше для понижувального перетворювача, в результаті отримано наступний вираз:

$$U_{CE}^* = R_{L1}^* \left[1 - \left(1 - \frac{I_0}{I_{K3}} \right)^{\frac{U_{XX} - U_{CE}}{U_{XX} - U_0}} \right] + 1 - \gamma . \quad (3.5)$$

Характеристики розглянутого вище підвищувального перетворювача, побудовані за виразом (3.5) при тих самих вихідних даних. Графічно вони представлені на рис. 3.3. Отримані результати свідчать, що підвищувальний перетворювач має лінійну регульовальну характеристику. На відміну від виразу (3.4), тут відсутня нелінійність, обумовлена втратами в дроселі L_1 . Це пояснюється розташуванням робочої точки сонячної батареї на ділянці стабілізації струму її вольт-амперної характеристики. Тому неможливим є налаштування даної схеми на точку максимальної потужності за умови $U_0 > U_{AB}$. Відповідно, коефіцієнт використання сонячної батареї складає $K_p = 0,65$ при $\gamma = 0$. Отже, ефективність застосування підвищувального перетворювача обмежена за певних співвідношень напруг.

Як було зазначено вище, як понижувальний, так і підвищувальний перетворювачі мають обмеження щодо регулювання точки максимальної потужності за певних співвідношень напруг U_{AB} та U_0 . Для подолання цих обмежень можна застосувати складений широкодіапазонний перетворювач, наприклад перетворювач Кука (рис. 3.1, в). Використання складених схем дозволяє розширити діапазон регулювання і підвищити ефективність відслідковування точки максимальної потужності за будь-яких умов. Він має вхідний підвищувальний каскад та вихідний понижувальний. Регульовальна характеристика такого перетворювача описується формулою:

$$\frac{U_{ВЛХ}}{U_{ВХ}} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \cdot \frac{1}{R_{L1} / R_H \cdot \left(\frac{\gamma}{1-\gamma} \right)^2 + R_{L2} / R_H + 1},$$

Для струмів виконується наступне співвідношення:

$$\frac{I_{ВЛХ}}{I_{ВХ}} = \frac{1-\gamma}{\gamma}.$$

Характеристики перетворювача Кука під час роботи фотоелектричної батареї на батарею акумуляторів як на навантаження можна із розв'язку рівняння відносно коефіцієнта γ . Поклавши в рівнянні $\psi = (1 - \gamma) / \gamma$ та після проведення еквівалентних перетворень зведемо його до квадратного рівняння:

$$U_{CE}^* = \psi^2 \frac{R_{L2}}{U_{AE}} I_{CE} + \psi + \frac{R_{L1}}{U_{AE}} I_{CE}$$

Останнє рівняння має один корінь, що виражається формулою:

$$\psi = \frac{\sqrt{U_{AE}^2 + 4R_{L2}I_{CE}} U_{CE} - R_{L1}I_{CE} - U_{AE}}{2R_{L2}I_{CE}}$$

Сумісно вираз (3.2) та останній вираз для кореня рівняння становлять шуканий аналітичний зв'язок.

На рис. 3.3 представлені результати розв'язку рівняння регулювальної характеристики перетворювача Кука.

Видно, що ця складена схема дозволяє здійснювати регулювання напруги сонячної батареї в точках, близьких до максимальної потужності, як за умови $U_0 > U_{AB}$, так і за $U_0 < U_{AB}$. Зокрема, при $U_0 > U_{AB}$ та $\gamma = 0,38$

коефіцієнт використання наближається до одиниці $K_p \rightarrow 1$, а коефіцієнт корисної дії становить 0,91. А при $U_0 < U_{AB}$ та $\gamma = 0,58$ маємо аналогічно високі показники: $K_p \rightarrow 1$ та $\eta = 0,92$. Тому перетворювач Кука забезпечує ефективне регулювання за будь-якого співвідношення напруг сонячної та акумуляторної батарей.

Перетворювач Кука за інших рівних умов є єдиним з розглянутих безтрансформаторних перетворювачів, здатним забезпечити максимально можливий (близький до одиниці) коефіцієнт використання сонячної батареї за будь-якого співвідношення напруг U_0 та U_{AB} . Водночас, ця схема має певні недоліки, адже здійснює подвійне перетворення енергії, тому має завищену потужність елементів і одразу дві дросельні елементи (L_1 та L_2). Це слід враховувати під час вибору транзисторного ключа, що має бути розрахований на суму струмів від фотоелектричної батареї та акумулятора. Введення додаткового дроселя спричинює деяке зниження коефіцієнта корисної дії, порівняно з простішими схемами, що видно з табл. 3.1 та рис. 3.3. Для полегшення порівняльного оцінювання перетворювачів в табл. 3.1 зведено результати розрахунків.

Таблиця 3.1 – Значення показників ефективності перетворювачів

Перетворювач	Випадок $U_0 > U_{AB}$		Випадок $U_0 < U_{AB}$	
	η	K_p	η	K_p
схема Кука	91	1	92	1
підвищуючий	95	0,65	95	1
понижуючий	93	1	98	0,33

Провівши зіставлення розглянутих перетворювачів постійної напруги за ключовими критеріями ефективності, а саме коефіцієнтом використання потужності сонячної батареї K_p та коефіцієнтом корисної дії η , можна зробити

висновок, перетворювач Кука завдяки широкому діапазону регулювання має найкращі показники щодо використання потужності сонячної батареї. Його K_p наближається до одиниці практично за будь-яких умов ($K_p \rightarrow 1$). Водночас, через подвійне перетворення енергії та додаткові втрати, перетворювач Кука показує гірші значення ККД порівняно з простішими схемами підвищувального чи понижувального перетворювача.

Стосовно ж підвищувального перетворювача в системах керування зарядом акумуляторних батарей, то вони мають деякі обмеження у застосуванні. Такі перетворювачі працюють в режимах низької напруги сонячної батареї, які спостерігаються за умов затінення чи виходу сонця з-за хмар. Однак ці режими, як правило, є короткочасними та перехідними. Тому використання саме підвищувального перетворювача в якості основного в складі контролера заряду акумуляторів є недоцільним, адже його функціонал буде задіяний не повною мірою.

Схема понижувального перетворювача у складі систем керування зарядом на основі фотоелектричних установок найпростіше узгоджується із застосуванням алгоритмів екстремального регулювання величини потужності сонячних батарей, оскільки дозволяє регулювати напругу шляхом зміни шпаруватості роботи ключів. Більш того, за стандартних вольт-амперних характеристик сонячної батареї, саме понижувальний перетворювач є найоптимальнішим рішенням для фотоелектричних систем як з точки зору простоти, так і ефективності перетворення енергії. Тому понижувальний DC-DC перетворювач розглядається як базова схема для побудови контролерів заряду акумуляторних батарей у складі автономних фотоелектричних систем.

3.2 Алгоритми відстеження оптимального режиму роботи фотоелектричних перетворювачів

Отримання максимальної енергії від сонячних батарей вимагає пошуку оптимальної робочої точки на вольт-амперній характеристиці

фотоелектричних модулів. Цілеспрямований пошук і підтримка режиму максимальної потужності дозволяє генерувати додаткову електроенергію, підвищуючи загальну ефективність фотоелектричної системи. Таким чином, точне налаштування режимів роботи сонячної станції є запорукою отримання максимально можливої кількості електроенергії при заданій потужності встановлених фотоелектричних модулів.

Існує низка систем точного регулювання потужності фотоелектричних батарей, що використовують різноманітні підходи для визначення оптимального режиму роботи: поступове сканування параметрів, обчислення похідної вольт-амперної характеристики, виміри напруги холостого ходу, струмова розгортка, гібридні методи та нечітка логіка. Багато виробників контролерів заряду застосовують власні фірмові технології пошуку точки максимальної потужності, проте в основі цих методів лежать ітераційні алгоритми наближення до оптимального режиму роботи.

У методі поступового сканування система пошуку оптимального режиму невеликими кроками змінює вхідний опір навантаження, внаслідок чого змінюється напруга на виході фотоперетворювачів. Після кожного кроку вимірюється потужність, якщо вона зросла - контролер продовжує змінювати напругу в тому ж напрямку, доки потужність не почне зменшуватися. Алгоритм поступового сканування показано на рис. 3.4. Популярність цього підходу зумовлена простотою реалізації, незважаючи на те, що він може призводити до коливань потужності навколо оптимальної точки.

Метод обчислення похідної ґрунтується на тому, що похідна потужності по напрузі дорівнює нулю в точці максимуму на вольт-амперній характеристиці сонячної батареї. Контролер розраховує знак зміни потужності при зміні напруги, щоб спрогнозувати ефект від регулювання напруги. Відповідно до алгоритму цього методу (рис. 3.5), контролер обраховує значення похідної, визначаючи точку максимальної потужності та виконуючи порівняння результатів від ділення $\Delta I / \Delta U$ з I / U . Такий підхід дозволяє більш

точно налаштувати оптимальний режим роботи сонячної батареї порівняно з поступовим скануванням.

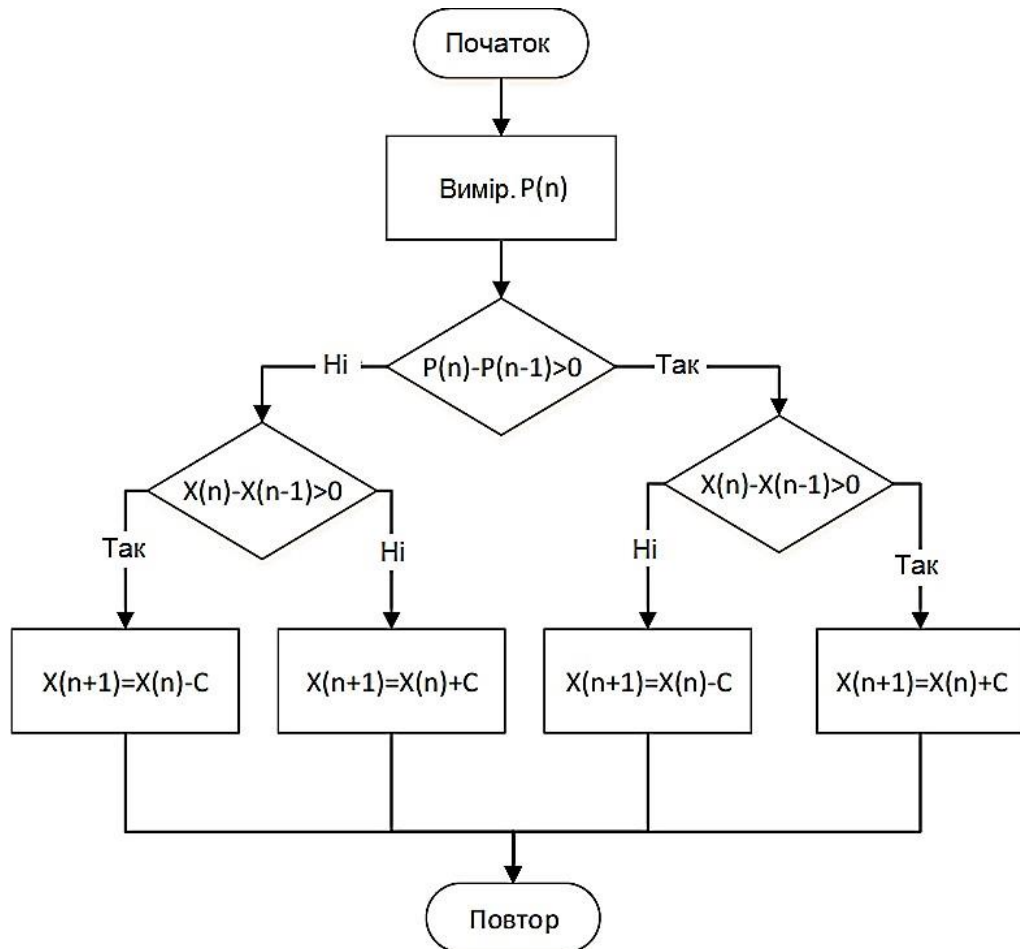


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритму пошуку точки максимальної потужності методом поступового сканування

У випадку коли величини I/U та $\Delta I / \Delta U$ рівні, то поточне значення напруги відповідає максимуму потужності. Регулятор підтримує це значення напруги до зміни умов освітленості. Якщо освітленість змінюється, то цикл алгоритму повторюється. Хоча цей підхід потребує більше обчислень, він здатний точніше відстежувати оптимальну робочу точку за швидкої зміни інсоляції, ніж метод поступового сканування.

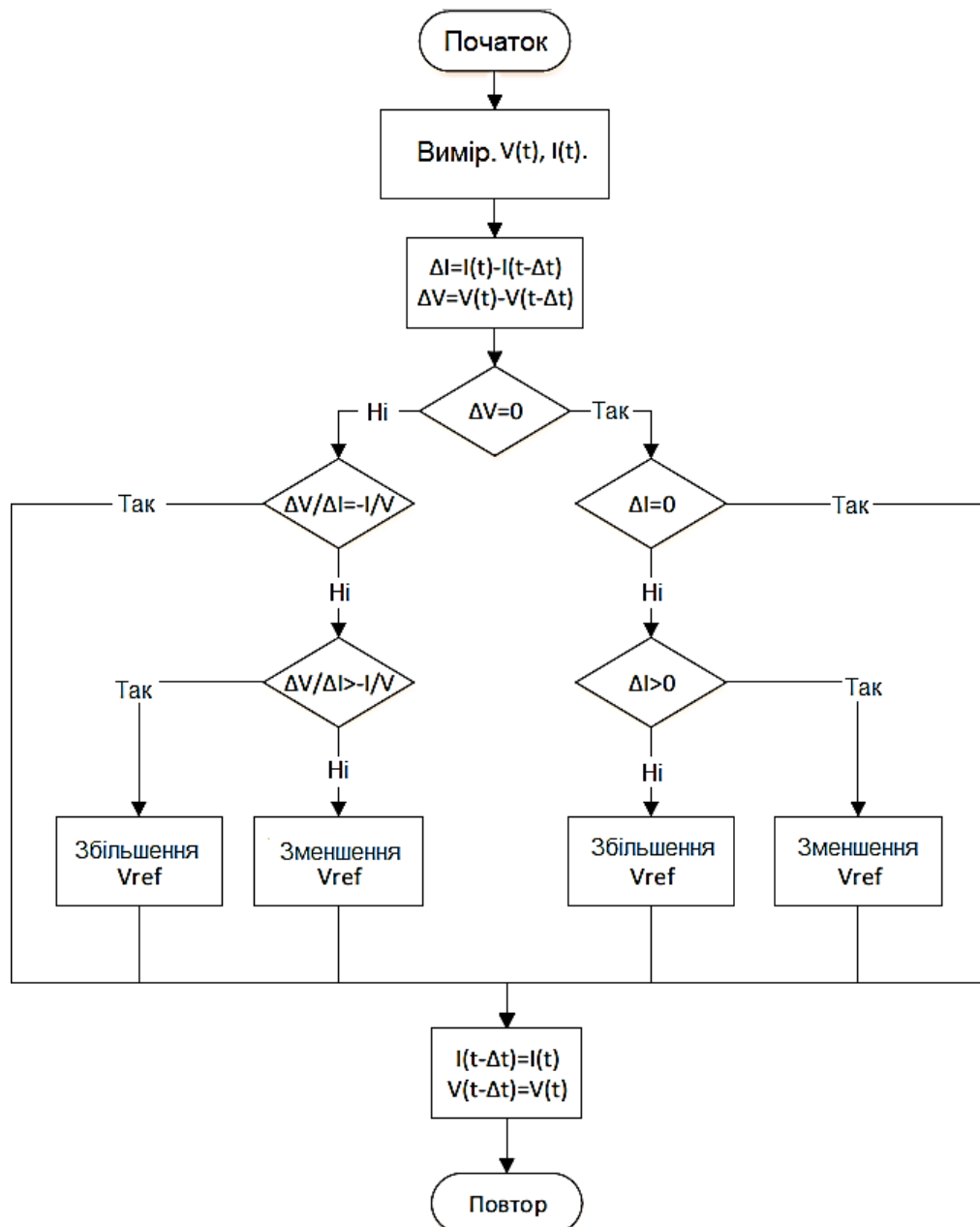


Рисунок 3.5 – Блок-схема алгоритму пошуку точки максимальної потужності методом обчислення похідної

Метод регулювання за напругою холостого ходу (постійної напруги) також знайшов застосування. Термін «метод постійної напруги» використовується для позначення різних підходів. Найчастіше це означає, що вихідна напруга підтримується на фіксованому рівні незалежно від умов, або регулюється пропорційно до поточного значення напруги холостого ходу. В цьому випадку робоча точка не є точкою максимальної потужності, проте за

швидко змінної інсоляції, на відміну від інших методів, система продовжує функціонувати. Найчастіше даний підхід використовується в комбінації з іншими способами пошуку оптимального режиму за потужністю.

Система екстремального регулювання за цим методом спочатку від'єднує сонячну батарею від навантаження і вимірює напругу холостого ходу. Після цього встановлюється робоче значення напруги, пропорційне вимірній напрузі холостого ходу з використанням фіксованого коефіцієнта. В результаті робоча точка фотоелектричного модуля встановлюється або безпосередньо в точці оптимуму на його вольт-амперній характеристиці або в околі точки оптимуму.

Гібридний метод пошуку точки максимальної потужності поєднує декілька підходів оптимізації. Однією з найпоширеніших комбінацій є метод поступового сканування та регулювання за напругою холостого ходу. Алгоритм цього методу показано на рис. 3.6. На першому етапі точка максимуму потужності грубо оцінюється на основі методу напруги холостого ходу. Після цього, на другому етапі за допомогою поступового сканування параметрів проводиться точне визначення оптимальної робочої точки на вольт-амперній характеристиці сонячної батареї.

Поступове сканування та метод обчислення похідної дають можливість визначити локальний максимум генерації потужності та забезпечити роботу в реальній точці екстремуму на вольт-амперній характеристиці сонячної батареї. Основним недоліком поступового сканування є те, що система, навіть вийшовши на роботи в точці оптимуму, продовжує постійний пошук ще кращої точки, створюючи тим самим коливання вихідної потужності фотоелектричних перетворювачів навіть за постійного рівня освітленості. Це призводить до невеликих втрат потужності.

Метод обчислення похідної, на відміну від поступового сканування, може визначити точку максимуму без коливань вихідної потужності. Проте за швидких змін інсоляції його робота може стати нестабільною. Цей підхід вимагає більше обчислювальних ресурсів контролера, що може знизити

частоту вимірювань та спричинити додаткові втрати енергії сонячної батареї. Отже, вибір оптимального методу залежить від конкретних умов застосування та вимог до системи.

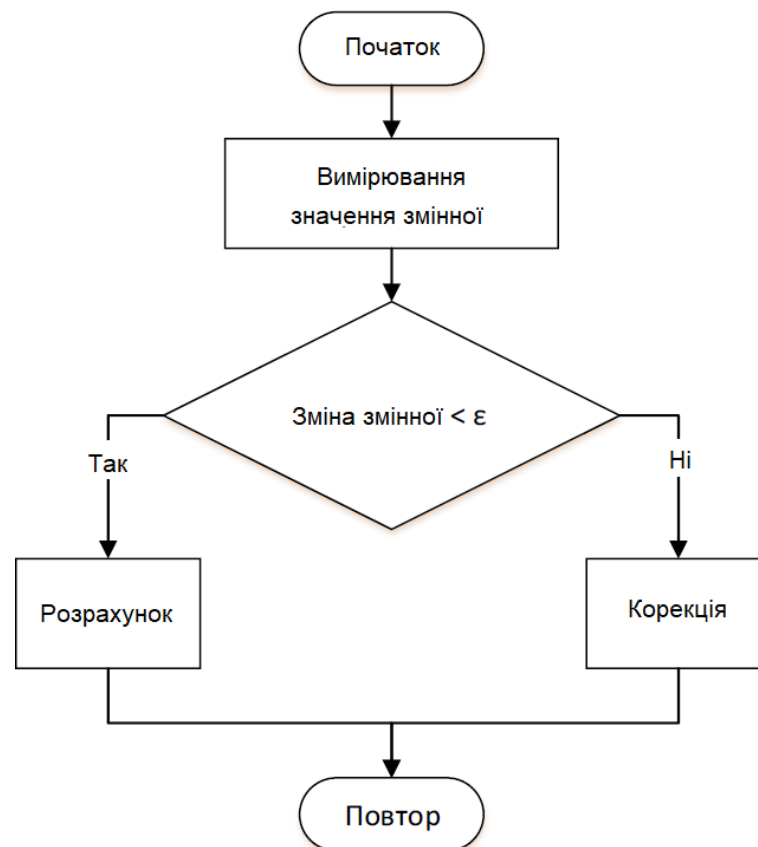


Рисунок 3.6 – Блок-схема циклу алгоритму гібридного методу пошуку точки максимальної потужності

У методі регулювання за напругою холостого ходу під час вимірювань відбуваються втрати виробленої сонячною батареєю енергії. Також використовуване типове співвідношення точки максимальної потужності до напруги при холостому ході (зазвичай 76%) не завжди точно відповідає конкретним умовам.

3.3 Моделювання роботи системи регулювання потужності фотоелектричної батареї з функцією екстремального регулювання покрововим методом

Вимоги, що висуваються до систем екстремального регулювання, особливо характеристик сонячних батарей, зумовлюють необхідність проведення досліджень точності регулювання екстремуму залежно від кроку зміни напруги стабілізації сонячної батареї (ΔU_{cm}) та визначити швидкодію екстремального регулятора. Це забезпечить стійкість системи за умов дрейфу вольт-амперної характеристики сонячної батареї.

При проектуванні фотоелектричних систем автономного типу з екстремальними кроковими регуляторами (ЕКР), для прогнозування їх енергоефективності, необхідно мати відомості про зв'язок точності регулювання екстремуму від кроку зміни напруги стабілізації сонячної батареї. Для дослідження цього зв'язку побудована комп'ютерна імітаційна модель автономної фотоелектричної енергетичної установки в середовищі моделювання MATLAB Simulink, загальний вигляд якої приведено на рис. 3.7.

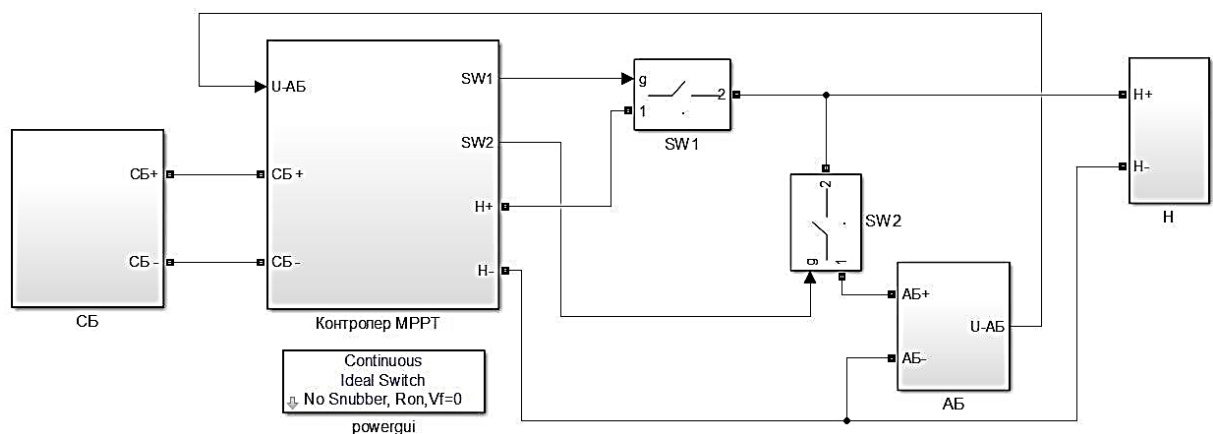


Рисунок 3.7 – Комп'ютерна імітаційна модель фотоелектричної установки автономного типу

Модель включає сонячну фотоелектричну батарею, акумуляторну батарею, блок електричного навантаження, контролер заряду з функцією пошуку точки максимальної потужності сонячної батареї, калючі SW1 та SW2 для переключення живлення електричного навантаження між сонячною батареєю та блоком акумуляторів. Нижче приводяться моделі кожного блоку.

Всі виміри струму та напруги здійснюються за допомогою блоків вольтметрів, амперметрів та осцилографів. Параметри блоків моделі фотоелектричної установки автономного типу було задано з урахуванням технічних характеристик обладнання та отриманих експериментальних даних.

Запропонована комп'ютерна імітаційна модель адекватно відображає енергетичні та електромагнітні процеси, що протікають в реальній енергетичній установці. Це дає можливість застосовувати її під час проектування подібних систем.

Виміряні вольт-амперні і вольт-ватні залежності для фотоелектричних панелей типу AX-180M за різних температур та освітленості в різні пори року наведено на рис. 3.8. Аналіз цих даних показує, що генеровані параметри суттєво залежать від розташування сонячної батареї та умов її експлуатації. Реальні значення напруги U_{opt} в точці максимальної потужності для практичних умов знаходяться в межах 22-44 В.

Діапазон зміни напруги U_{opt} в точці максимальної потужності для панелей AX-180M, зазначений у технічних характеристиках виробника (22-35 В), відмінний від експериментально отриманих значень. Це спричинено тим, що параметри по сонячним батареям наведені за температури модулів 25°C. Реальні умови експлуатації відрізняються ширшим діапазоном температур, що й призводить до відхилень U_{opt} .

Температура сонячних батарей значною мірою залежить від їх конструкції, інтенсивності охолодження вітром та рівня освітленості. Навіть взимку на відкритих майданчиках за умов слабкого вітру температура панелей може перевищувати температуру повітря на 10-20°C. Влітку ж у безвітряну погоду перегрів сонячних батарей може сягати 30-40°C. Отже, аналіз вольт-

амперних та вольт-ватних характеристик фотоелектричних модулів вказує, що під час проектування енергетичних установок фотоелектричними панелями потрібно враховувати робочий температурний діапазон панелей від -20 до $+70^{\circ}\text{C}$. Це призводить до зміни оптимальної напруги та напруги холостого ходу стандартних фотоелектричних модулів, наприклад АХ-180М, на 25 В.

Таким чином робочий діапазон напруги екстремального регулятора для пошуку точки максимальної потужності має бути не менш як 30 В (20-50 В).

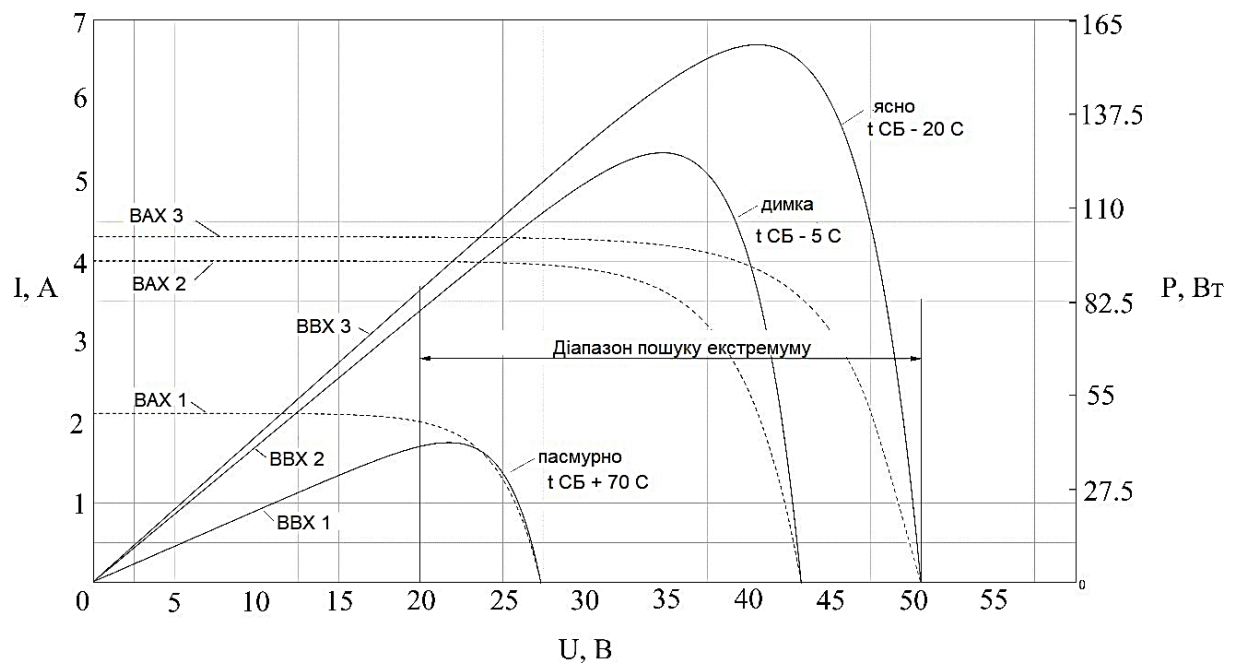


Рисунок 3.8 – Множина вольт-амперних і вольт-ватних характеристик для моделі фотоелектричних перетворювачів АХ- 180М при зміні температури та рівня освітленості

На рис. 3.9 – 3.17 показано часові діаграми струму, напруги, потужності контролера заряду акумуляторної батареї для випадку екстремального крокового регулювання потужності сонячної батареї за умов постійного рівня освітленості та різних параметрах налаштування екстремального регулятора. Діаграми були отримані з допомогою розробленої комп'ютерної імітаційної моделі фотоелектричної установки автономного типу.

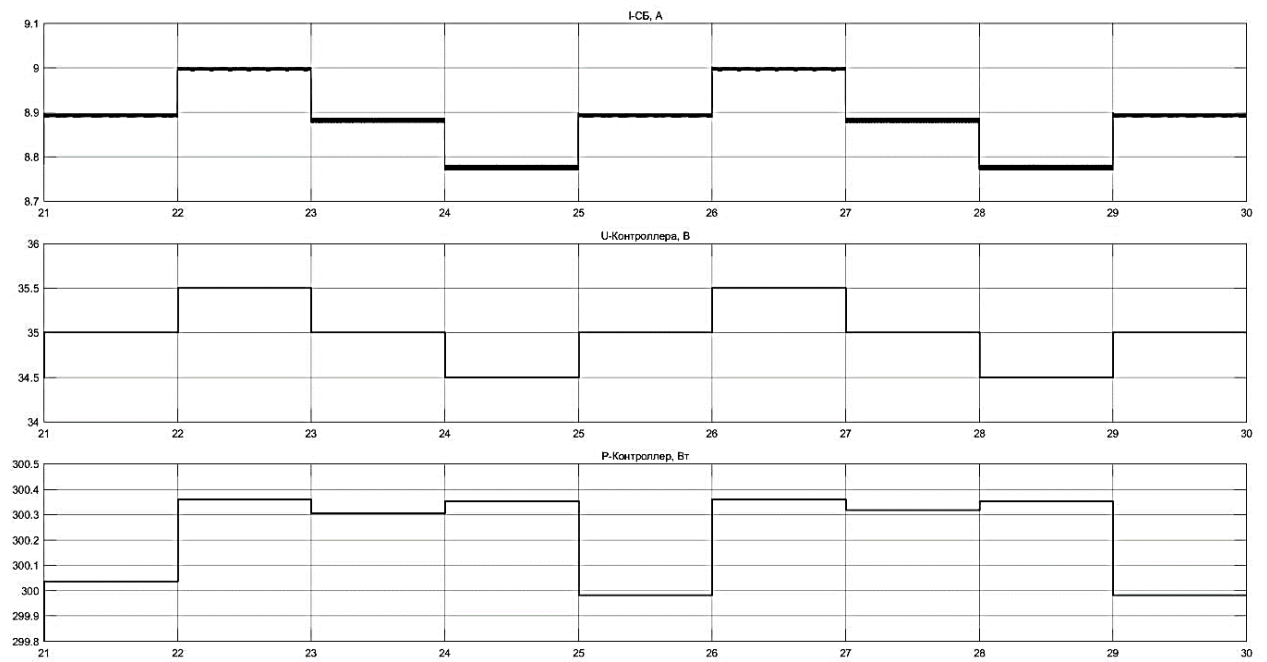


Рисунок 3.9 –Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 0,5 \text{ В}$, $\Delta f = 1 \text{ Гц}$)

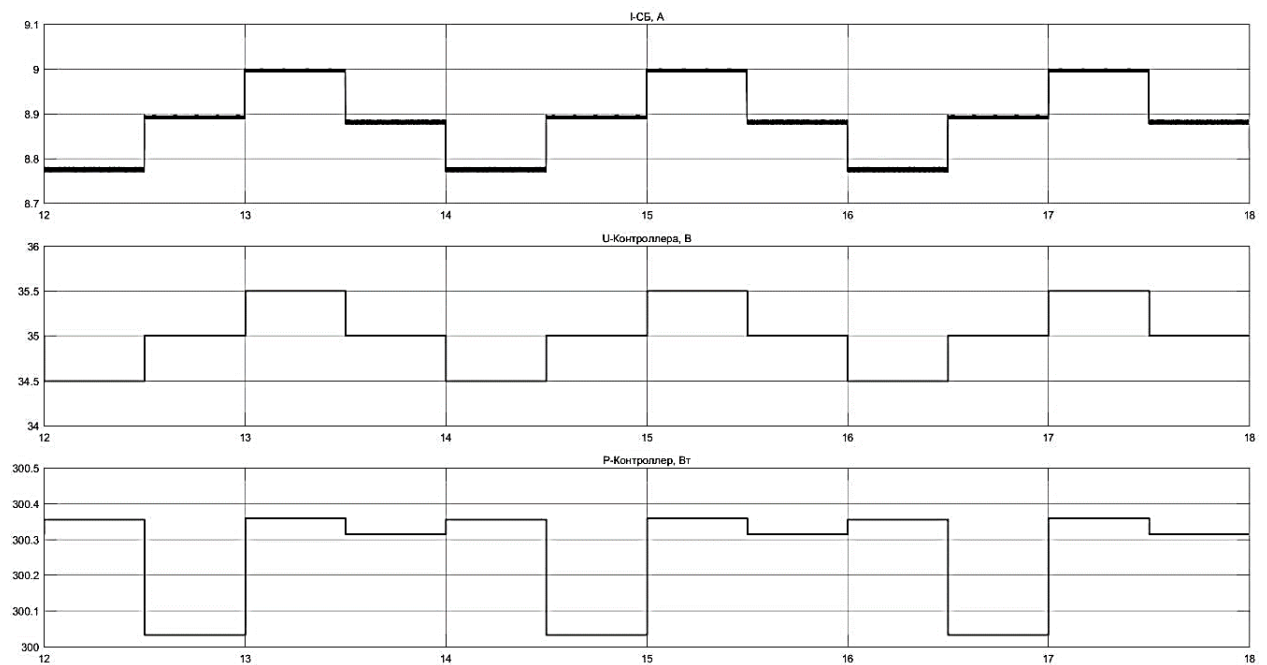


Рисунок 3.10 – Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 0,5 \text{ В}$, $\Delta f = 2 \text{ Гц}$)

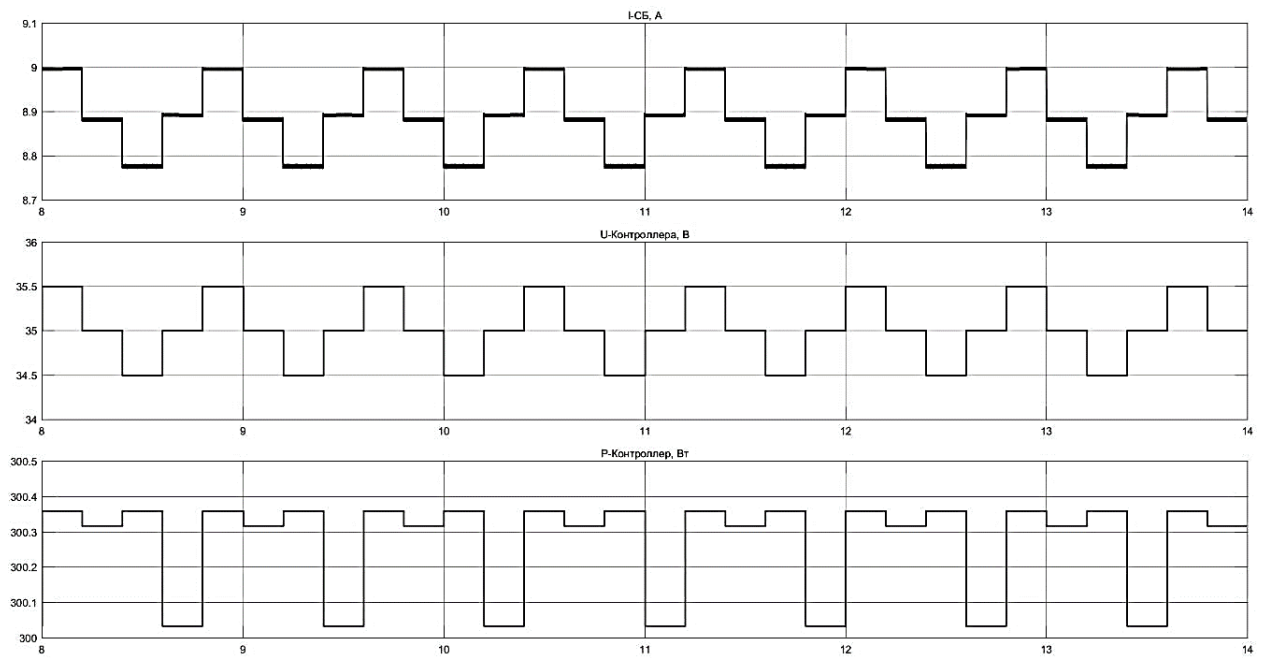


Рисунок 3.11 – Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 0,5$ В, $\Delta f = 5$ Гц)

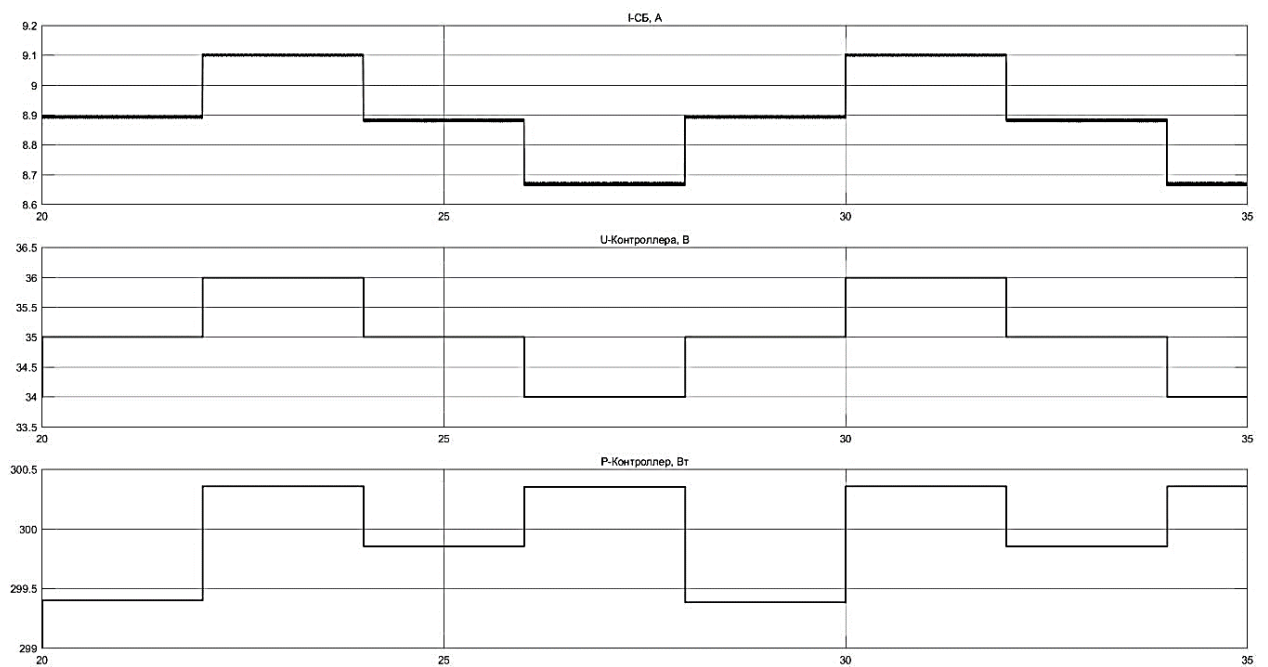


Рисунок 3.12 – Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 1$ В, $\Delta f = 0,5$ Гц)

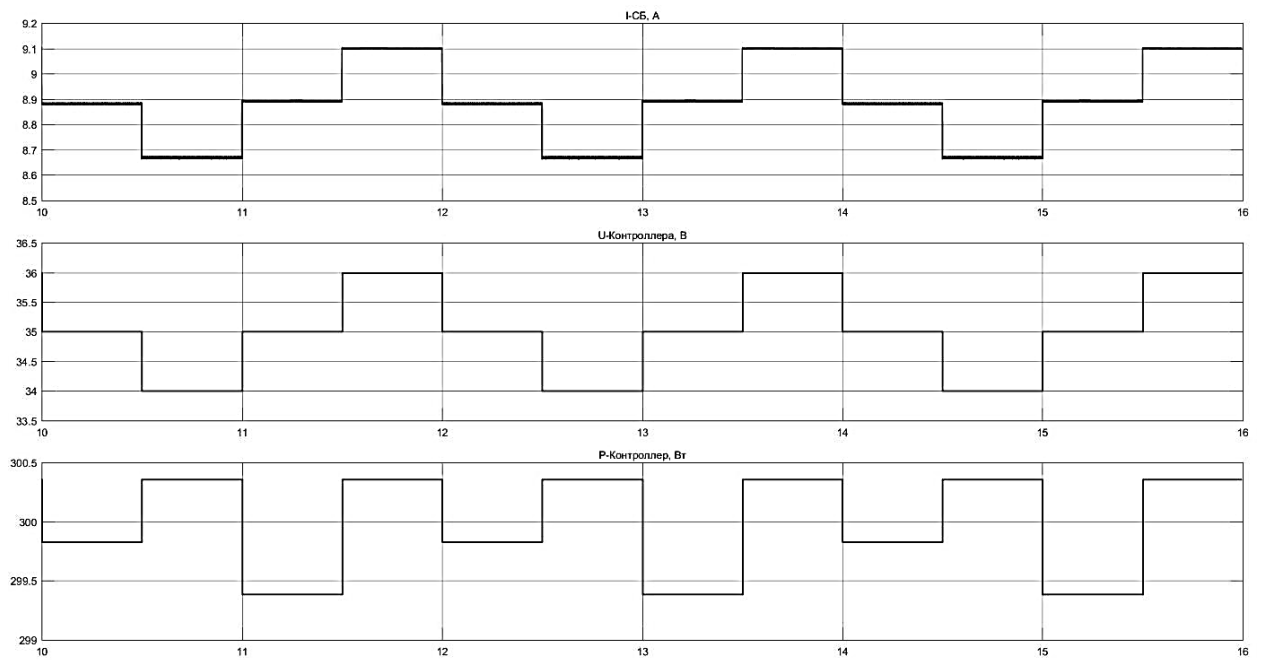


Рисунок 3.13 – Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 1$ В, $\Delta f = 2$ Гц)

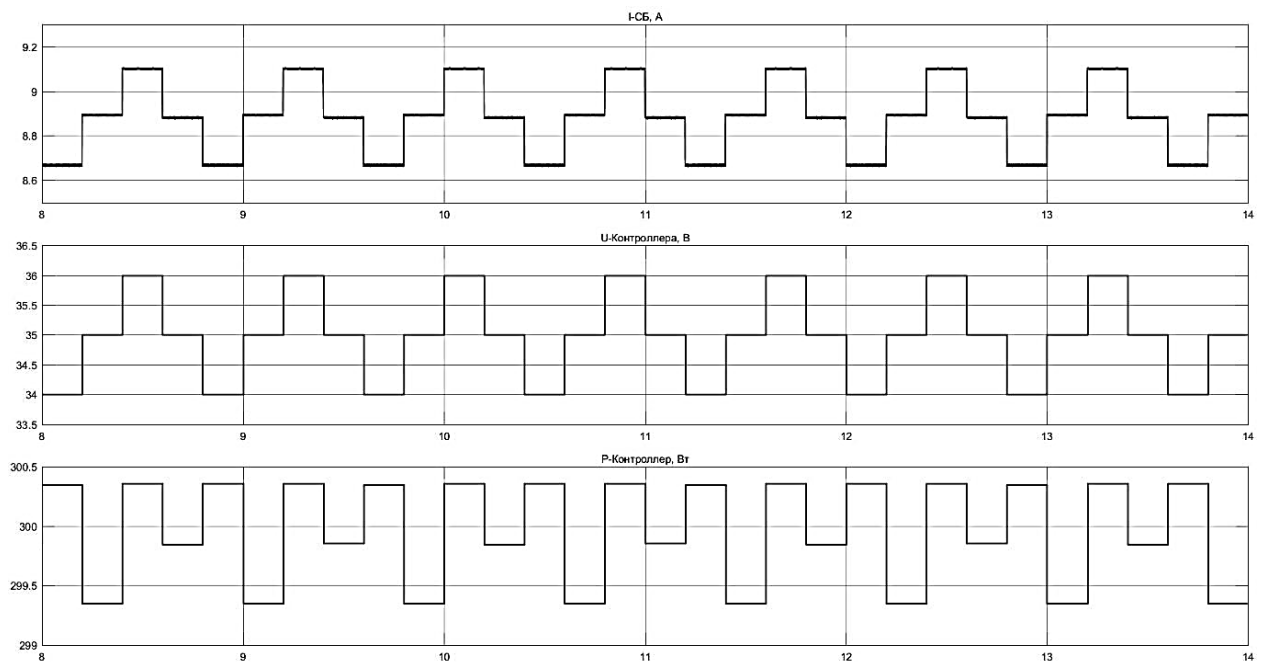


Рисунок 3.14 – Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 1$ В, $\Delta f = 5$ Гц)

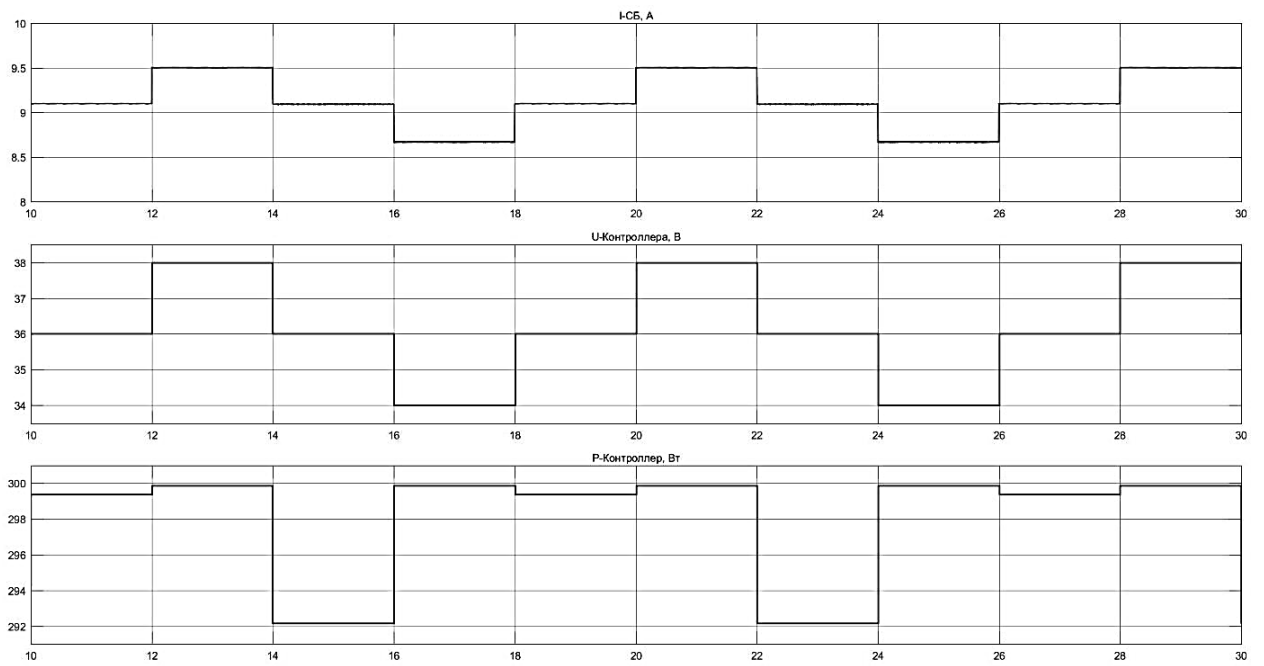


Рисунок 3.15 – Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 2$ В, $\Delta f = 0,5$ Гц)

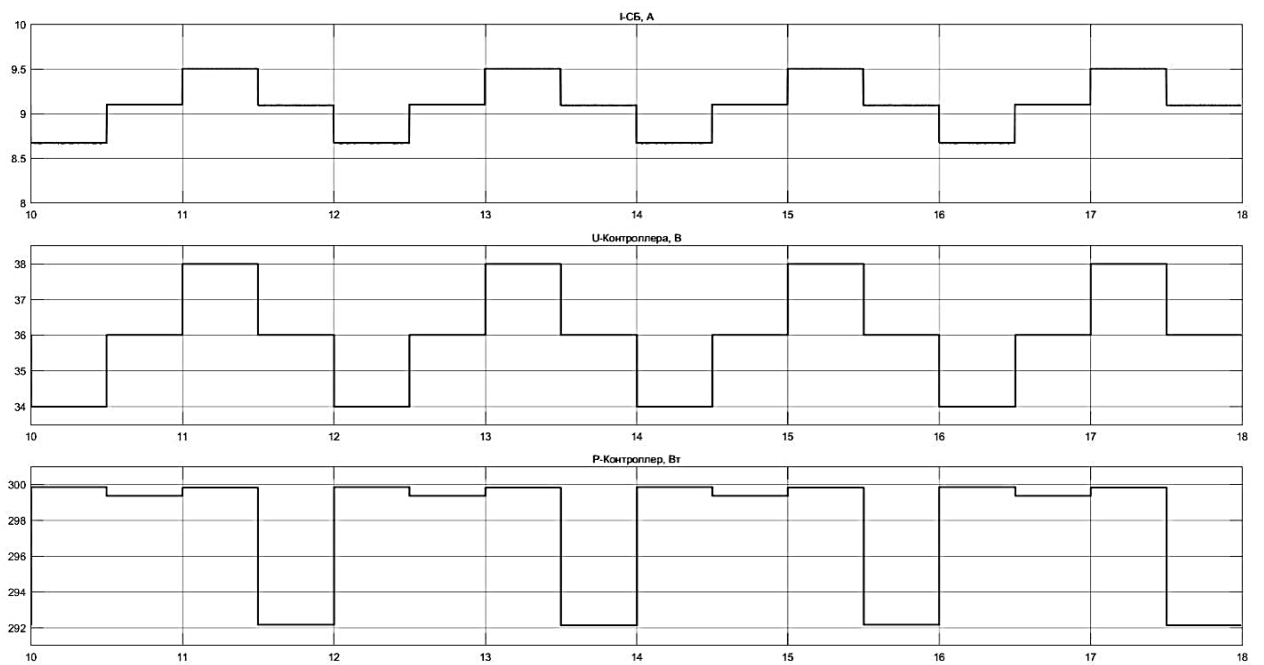


Рисунок 3.16 – Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 2$ В, $\Delta f = 2$ Гц)

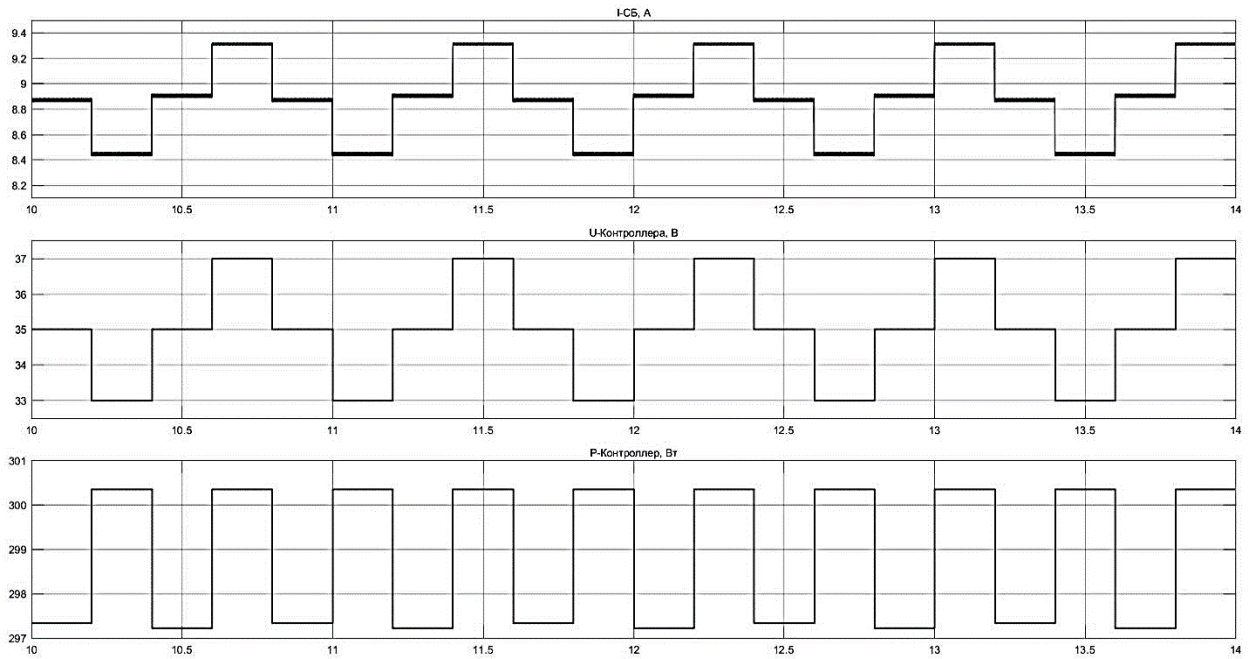


Рисунок 3.17 – Часові діаграми режимних параметрів ($\Delta U = 2$ В, $\Delta f = 5$ Гц)

Ці діаграми ілюструють ефективність розробленого алгоритму пошуку точки максимальної потужності за різних умов функціонування системи та дозволяють оцінити вплив зміни параметрів на роботу контролера заряду. Подальший аналіз отриманих результатів дасть змогу оптимізувати алгоритм для конкретних умов експлуатації.

Використовуючи результати виконаного моделювання було розраховано залежність енергетичної ефективності застосування фотоелектричної батареї по потужності $P_{\text{СБ}} / P_{\text{макс.СБ}}$ від величини зміни кроку напруги $U_{\text{СБ}}$ ($\Delta U_{\text{см}}$). Результати приведені на рис 3.18, де позначено $P_{\text{нд}}$ – потужність фотоелектричної батареї, що не була використана. Аналіз значень енергетичної ефективності використання фотоелектричної батареї за потужністю показує, що за умови покрокової зміни напруги $U_{\text{СБ}}$ в діапазоні від 0,5 В до 2 В здійснюється відбір максимальної потужності з точністю не менше 98%, тобто не використаною лишається менше 2% максимальної потужності сонячної фотоелектричної батареї.

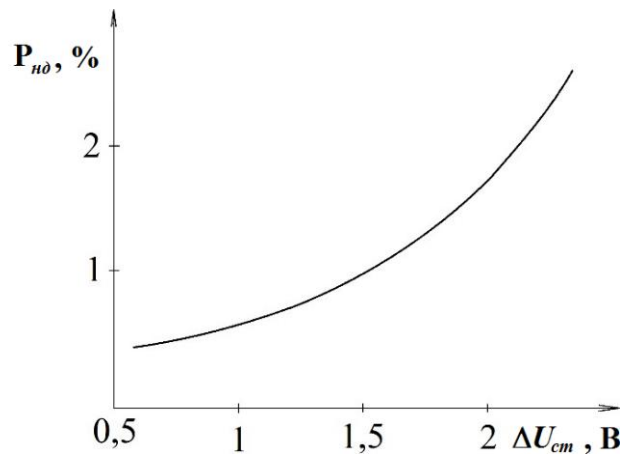


Рисунок 3.18 – Крива залежності відносного значення недовикористаної потужності фотоелектричної батареї від зміни кроку напруги

У системах автоматичної оптимізації шляхом покрокового сканування при заданих умов роботи теоретично може бути мінімум два або три кроки. Режим пошуку екстремуму потужності за два кроки реалізується, коли при черговій зміні напруги управління сонячною батареєю її робоча точка на вольт-ватній характеристиці потрапляє в зону оптимального значення потужності сонячної батареї (див. рис. 3.19), а при кожній наступній кроковій зміні напруги сонячної батареї відбувається зменшення генерованої нею потужності.

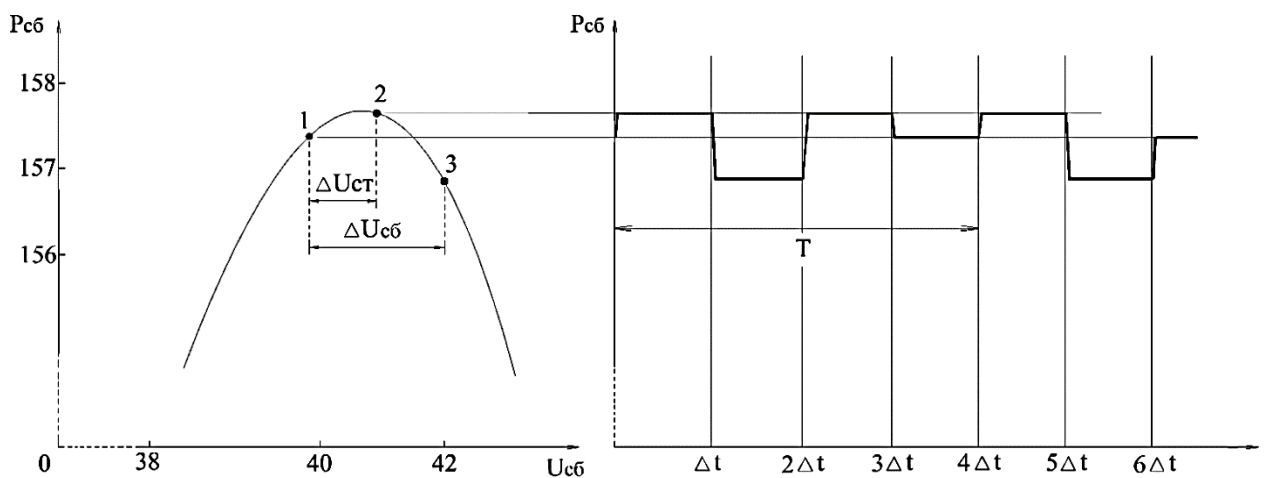


Рисунок 3.19 – Діаграма пошуку екстремуму потужності за два кроки

У системах з аналоговим вимірюванням потужності сонячної батареї та наявністю гістерезису в схемі порівняння потужності при кожному кроці зміни напруги сонячної батареї (ΔU_{cm}) теоретично можливий трикроковий режим. Проте в системах автоматичної оптимізації крокового типу, що використовують цифрові пристрої вимірювання потужності сонячної батареї, трикроковий режим практично неможливий через вищу точність вимірювань.

Характеристики фотоелектричних батарей (вольт-амперні та вольт-ватні) змінюються при зміні умов роботи. Наприклад, при затіненні фотопанелей хмарами зменшується освітленість. Тривалість затінення зазвичай становить 5-10 секунд, при цьому встигає змінитися величина генерованої потужності, а от температура панелей внаслідок теплової інерції змінитися не встигає. Тому суттєвих ускладнень у регулюванні екстремуму потужності не відбувається. У разі стрімкої зміни освітленості теоретично система працювати в однокроковому режимі, коли напрямок пошуку максимуму потужності змінюється з кожним кроком. Схема такого процесу регулювання показана на рис. 3.20. Визначення потужності регулятором виконується в точках 2' і 3'.

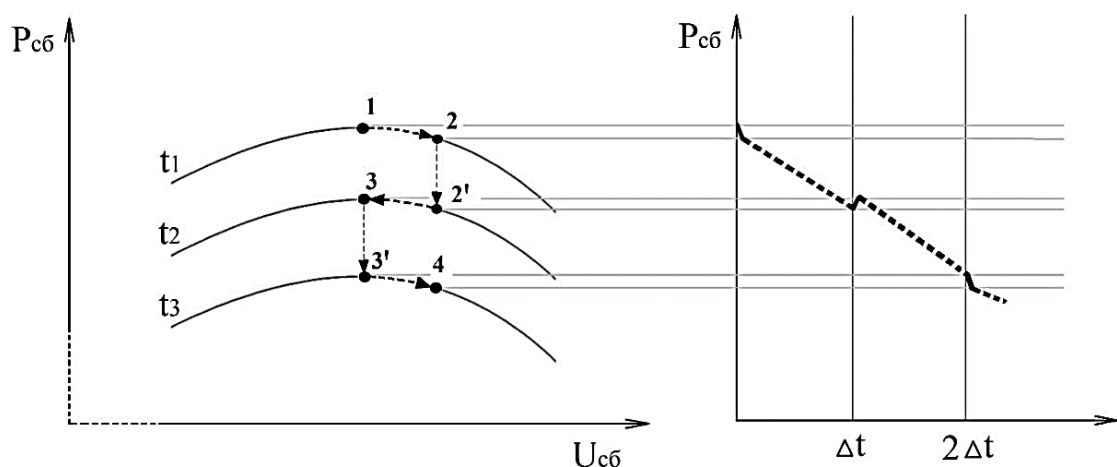
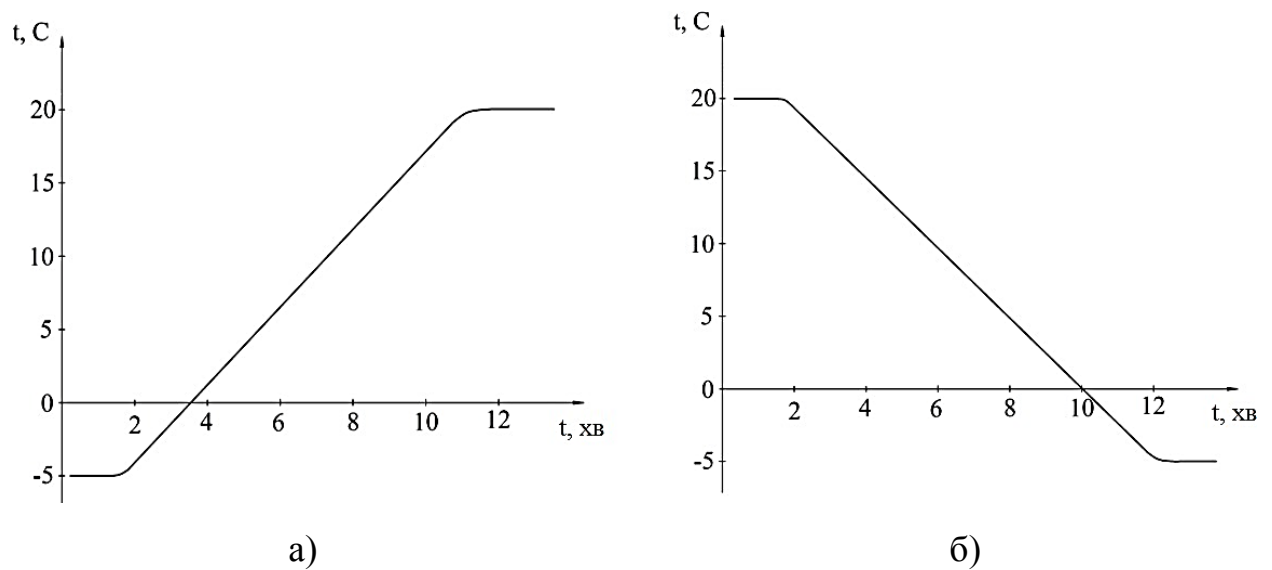


Рисунок 3.20 – Регулювання максимуму потужності фотоелектричної батареї при захмаренні установок

Експериментальні дослідження (рис. 3.21) демонструють, що охолодження фотопанелей після їх внаслідок тривалого захмарення до температури оточуючого повітря триває близько 10 хвилин. Коли сонце знову виходить із-за хмар, то температура фотопанелей може підвищитися на 40°C теж протягом 10 хвилин. Отже, максимальне значення швидкості дрейфу напруги холостого ходу ($V_{УСБ}$) може становити близько 0,03 В/с.



а – нагрівання, б - охолодження

Рисунок 3.21 – Швидкість зміни температури фотоелектричної панелі

Розрахункова швидкодія регулятора залежно від кроку ступені регулювання напруги визначається:

$$\Delta t = 1 / f_{\text{шп}} \leq \Delta U_{\text{СТ}} / V_{\text{УСБ}} \quad (3.6)$$

де $V_{\text{УСБ}}$ – швидкість зміни напруги фотоелектричної батареї в точці оптимального відбору потужності.

Ця умова достатня лише для випадків горизонтального дрейфу напруги холостого ходу сонячної батареї, тобто коли максимальне значення

потужності фотобатареї не змінюється. Зазначений режим можливий лише теоретично, за пропорційного впливу на дрейф напруги температури та освітленості. Оскільки в переважній більшості випадків дрейф напруги при прогріванні панелей супроводжується зменшенням максимуму потужності, то за некоректного вибору частоти кроку, близької до критичної величини $\Delta U_{cm} / V_{CB}$, може спостерігатися реверс системи по причині спаду потужності через зсув робочої точки в бік екстремуму потужності, як показано на рис. 3.22. Отже, для забезпечення стійкості потрібне додаткове виконання умови $\Delta P_{CB} > 0$, тобто ріст потужності від покрокової зміни напруги має компенсувати її зменшення через дрейф характеристики.

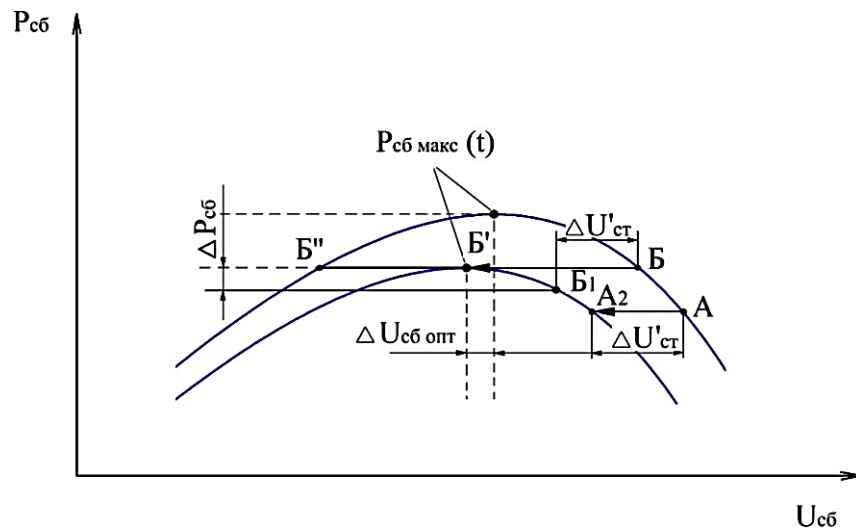


Рисунок 3.22 – Ілюстрація дрейфу вольт-ватної характеристики фотоелектричної батареї

Можна виконати апроксимацію квадратичною параболою рівняння дрейфуючої вольт-ватної характеристики:

$$\begin{aligned}
 P_{CB} U_{CB}; t &= a t \left[U_{CB} - U_{CB\text{опт}} t \right]^2 + P_{CB\text{макс}} t, \\
 P_{CB\text{макс}} t &= P_{CB\text{макс}} t - \Delta t + \Delta P_{CB\text{макс}} \Delta t; \\
 U_{CB\text{опт}} t &= U_{CB\text{опт}} t - \Delta t + \Delta U_{CB\text{опт}} \Delta t; \\
 a t &= a t - \Delta t = \Delta a \Delta t.
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Зробимо припущення, що характеристика дрейфує при малому викривленні форми ($a(t) \gg \Delta a(t)$), тоді вираз для збільшення вихідної потужності:

$$\Delta P_{CB} = P_{CB} U_{CB;t} - P_{CB} U_{CB} - \Delta U_{CB;t} - \Delta t \quad (3.8)$$

або

$$\Delta P_{CB} = 2a \cdot t \cdot \Delta U_{CT} [U_{CB} - U_{CB_{opt}} \cdot t] - 2a \cdot t \cdot \Delta U_{CB_{opt}} \cdot \Delta t [U_{CB} - U_{CB_{opt}} \cdot t] - a \cdot t [\Delta U_{CT} - \Delta U_{CB_{opt}} \cdot \Delta t]^2 + \Delta P_{CB_{max}} \cdot \Delta t. \quad (3.9)$$

За заданих умов дрейфу можливим є визначити співвідношення тривалості кроків та значень одиничної зміни ΔU_{CT} , при якому спостерігається стійка робота екстремального керування режимом. Діапазон допустимих значень параметра $a(t)$ визначається із виразу $P_{CB}(U_{CB}, t) = 0$ та зміни U_{CB} від напруги холостого ходу до подвоєної оптимальної напруги. Отже, підбираючи тривалість кроку і величину зміни напруги в межах цього діапазону, можна досягти стійкої роботи системи за наявності дрейфу характеристики та потужності сонячної батареї.

Можна підсумувати, що для зарядного контролера, який побудований на основі екстремального регулятора потужності, було визначено значення 30 В як доцільну область пошуку максимуму потужності залежно від температури та освітленості фотоелектричних батарей. При цьому слід зазначити, що для фотобатарей, які були використані для моделювання, номінальна напруга за температури 25 °C складає 30 В.

Система керування та екстремальний регулятор з кроком від 0,5 В до 1 В дозволяють забезпечити енергетичну ефективність за потужністю для контролера заряду понад 98% від рівня максимально можливої потужності.

Одночасно за умов нестабільних зовнішніх умов освітлення батарей система керування повинна забезпечувати стабільну роботу з пошуку точки максимальної потужності в дво- та однокроковому режимах.

3.4 Висновки до третього розділу

1. Понижувальний перетворювач постійної напруги найпростіше узгоджується із системою екстремального регулювання величини потужності фотоелектричних батарей за рахунок зміни коефіцієнта заповнення імпульсів керування силовими ключами. За стандартних вольт-амперних характеристик він є найбільш оптимальним для застосування в контролерах заряду автономних фотоелектричних установок з екстремальним регулюванням потужності сонячних батарей.

2. Система екстремального регулювання на основі обчислення похідної здатна визначати екстремум за швидкозмінних умов, але може працювати хаотично та створювати значні коливання потужності. Порівняно з кроковим способом зростає час розрахунку внаслідок ускладнення алгоритму, що призводить до зниження частоти дискретизації та додаткових втрат енергії. Тож кроковий спосіб є більш надійним та ефективним для практичного застосування.

3. Спосіб покрокового сканування для визначення екстремуму забезпечує стійке регулювання максимального значення потужності фотоелектричної батареї, а коефіцієнт її використання становить не менше 98% за будь-яких умов експлуатації. За наявності коливань вихідної потужності фотоелементів в процесі роботи системи втрата потужності є незначною. Таким чином, кроковий алгоритм демонструє надійність та ефективність у підтриманні максимальної потужності сонячних батарей.

4. Для зарядного контролера, який побудований на основі екстремального регулятора потужності, було визначено значення 30 В як доцільну область пошуку максимуму потужності залежно від температури та

освітленості фотоелектричних батарей, за умови що номінальна напруга фотоелектричних батарей при температурі 25 °C складає 30 В. Система керування та екстремальний регулятор з кроком від 0,5 В до 1 В дозволяють забезпечити енергетичну ефективність за потужністю для контролера заряду понад 98% від рівня максимально можливої потужності. Одночасно за умов нестабільних зовнішніх умов освітлення батарей система керування повинна забезпечувати стабільну роботу з пошуку точки максимальної потужності в дво- та однокроковому режимах.

5. Розроблена комп'ютерна імітаційна модель фотоелектричної установки автономного типу в складі сонячної батареї, батареї акумуляторів, зарядного контролера з екстремальним регулюванням. Розроблена модель дозволяє проводити дослідження режимів роботи та проектування автономних фотоелектричних систем.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Забезпечення дотримання заходів безпеки під час монтажу електроустановок

Заходи безпеки при роботах в електроустановках поділяються на три категорії:

- 1) роботи зі зняттям напруги;
- 2) роботи без зняття напруги на струмоведучих частинах і поблизу них;
- 3) роботи без зняття напруги не на струмоведучих частинах, які знаходяться під напругою.

За умови одночасних робіт в електроустановках напругою до і понад 1кВ категорії робіт вважаються як для установок понад 1кВ.

До робіт, які проводяться зі зняттям напруги, належать такі види робіт в електроустановці (або її частині), зі струмоведучих частин якої знято напругу і доступ до частин, що знаходяться під напругою, унеможливлений.

До робіт без зняття напруги на струмоведучих частинах та поблизу них належать роботи, що безпосередньо проводяться на цих частинах. Такі роботи мають виконуватися не менше ніж двома працівниками, з яких особа що керує роботами повинен мати групу IV, а інші - групу III.

В електроустановках напругою понад 1 кВ роботи без зняття напруги на струмоведучих частинах чи поблизу них слід проводити із застосуванням спеціальних засобів захисту для відсторонення працівника від струмоведучих частин або від землі. За умови відсторонення працівника від землі роботи виконуються згідно спеціальних інструкцій чи технологічних карт, де передбачено необхідні заходи безпеки.

В процесі виконання робіт в діючих електроустановках напругою до 1 кВ без зняття напруги на струмоведучих частинах або поблизу них необхідно:

- захистити розташовані поруч з робочим місцем інші струмоведучі частини під напругою, до яких можливий випадковий дотик;
- працювати у діелектричному взутті, стоячи на ізолювальних підставках чи діелектричному килимку;
- використовувати інструмент з ізолювальними рукоятками (у викруток додатково має бути ізольований стрижень); за відсутності зазначеного інструменту слід застосовувати діелектричні рукавички.

В процесі виконання робіт без зняття напруги на струмоведучих частинах з використанням ізолювальних засобів захисту потрібно:

- тримати ізолювальні складові засобів захисту за тримачі до обмежувального кільця;
- утримувати ізолювальні частини так, щоб уникнути небезпеки перекриття ізоляції між фазами або замикання на землю;
- використовувати лише сухі та чисті ізолювальні частини із неущодженим лаковим покриттям.

У разі виявлення пошкоджень лакового покриття або несправностей іншого роду ізолювальних частин захисних засобів користування ними забороняється.

Під час роботи із застосуванням засобів електрозахисту допускається наближення працівника до струмоведучих частин на відстань, яка дозволяється довжиною ізолювальної частини цих засобів.

Усі працівники, які перебувають у приміщеннях з діючим електрообладнанням (окрім щитів керування), у закритих розподільних пристроях, відкритих розподільних пристроях, відкритих розподільних пристроях, колодязях, тунелях і траншеях, повинні використовувати захисні каски.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано огляд структурних схем фотоелектричних установок автономного типу з реалізацією методів підвищення їх енергоефективності. Визначено, що впровадження екстремального регулювання величини потужності фотоелектричних батарей є найбільш дієвим способом збільшення енергетичної ефективності таких систем. Цей метод можна порівняти за ефективністю з автоматичним слідкуванням сонячних панелей за Сонцем, проте на практиці його простіше реалізувати.

2. Покращено методику розробки фотоелектроустановок автономного типу шляхом виконання розрахунку енергобалансу та застосування статистичних даних щодо інсоляції конкретної місцевості. Це дає можливість визначити доцільний склад та технічні параметри енергоустановки для заданих умов експлуатації та графіка енергоспоживання. Такий підхід сприяє проектуванню оптимальних за потужністю і вартістю автономних систем.

3. Проведено аналіз методів і алгоритмів регулювання максимальної потужності фотобатарей. Показано, що кроковий метод забезпечує стійке регулювання точки максимуму потужності на вольт-ватній характеристиці за будь-яких змінних умов експлуатації фотобатарей, що гарантує роботу системи в оптимальному режимі незалежно від погодних факторів.

4. Обрана систему регулювання потужності фотоелектричних панелей забезпечує стійке відслідковування максимуму потужності та коефіцієнт використання сонячної батареї не менше 98%.

5. Виконане моделювання роботи системи регулювання потужності фотоелектричних панелей за допомогою імітаційної моделі в середовищі MATLAB Simulink. Визначено робочий діапазон пошуку максимуму потужності для наземних автономних фотоелектричних систем залежно від температури та освітленості сонячних панелей – 30 В. Отримані результати дозволяють оптимізувати налаштування систем екстремального регулювання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Renewable Energy Statistics 2022. Режим доступу: <https://www.irena.org>.
2. BP Statistical Review of World Energy. Solar energy – statistical review. Режим доступу: <https://www.bp.com>.
3. Сонячна енергетика в Україні. Режим доступу: <http://saee.gov.ua>.
4. IEA World Energy Outlook 2020. Режим доступу: <https://www.iea.org>.
5. Гриб О.Г., Васько П.Ф. Теоретичні основи сонячної фотоенергетики. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 260 с.
6. Альошинський Є.С., Маковей В.В., Ситник О.М. Відновлювана енергетика. Вінниця: ВНТУ, 2020. 130 с.
7. Будько Д.О., Бєсова І.О. Стан та перспективи використання локальних фотоелектричних станцій в Україні: аналіт. доп. Київ: НІСД, 2020. 76 с.
8. Філюк Я.О. Експериментальні вимірювання енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук // XX наукова конференція Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 17 травня 2017 року. – Т.: ТНТУ, 2017. – С. 176-177.
9. Groumpos P.P., Papageorgiou G. (1987) An optimal sizing method for standalone photovoltaic power systems. Solar Energy., v. 38, 5, pp. 341-351.
10. Hybrid2. (1996). The Hybrid System Simulation Model. Theory Manual. University of Massachusetts. Amherst, Massachusetts. 195 pp.
11. Ashenayi K., Ramakumar R. (1986). Design of solar energy systems for supplying power to remote communications centers. INTELEC 86: Int. Telecommun. Energy Conf., Toronto, pp 325 - 332.
12. Коваль В.П. Збільшення ефективності використання сонячних панелей. / Я.О. Філюк, С.І.Герєга // Матеріали III Всеукраїнської науково-

технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування—, 8-9 червня 2017 року. – Т. : ТНТУ, 2017. – С. 202.

13. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасенчко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10

14. All About Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controllers [Электронный ресурс] // Электрон. текстовые дан. – 2013. – Режим доступа: <https://www.solar-electric.com/mppt-solar-charge-controllers.html>

15. Hohm D. P., Ropp M. E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental, programmable, maximum power point tracking test bed //Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the TwentyEighth IEEE. – IEEE, 2000. – С. 1699-1702.

16. Hohm D. P., Ropp M. E. Comparative study of maximum power point tracking algorithms //Progress in photovoltaics: Research and Applications. – 2003. – Т. 11. – №. 1. – С. 47-62.

17. Tung Y. M., Hu A. P., Nair N. K. Evaluation of micro controller based maximum power point tracking methods using dSPACE platform //Australian university power engineering conference. – 2006

18. Цивільна оборона та цивільний захист: Підручник. – 2-ге вид., перероб. Затверджено МОН / Стеблюк М.І. – К., 2010. – 487 с.