

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ  
СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЗА РАХУНОК  
РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ БАТАРЕЙ**

Виконав студент VI курсу, групи ЕМм-61  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Пусь В.Б.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Белякова І.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Вакуленко О.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Тарасенко М.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент   
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2021

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра містить пояснювальну записку та графічну частину. Пояснювальна записка має 76 сторінок, 21 аркушів презентації, 33 ілюстрації, 3 таблиць та 19 використаних першоджерел.

**Об'єкт дослідження** – процес екстремального регулювання потужності сонячних батарей.

**Предмет дослідження** – автономні енергетичні установки на основі фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії.

**Метою кваліфікаційної роботи** є: підвищення енергетичної ефективності автономної фотоелектричної енергетичної установки шляхом реалізації режиму екстремального регулювання потужності сонячних батарей.

У роботі проведено огляд методів визначення параметрів і характеристик автономних фотоелектричних енергетичних установок, виявлено їх основні особливості та недоліки. Удосконалено методику проектування АФЕУ, засновану на розрахунку енергобалансу і статистичних значеннях графіка інсоляції, що дозволяє в процесі проектування оптимізувати структуру і технічні параметри енергетичної установки. Розглянуто способи регулювання максимуму потужності сонячних батарей і виявлено найбільш раціональний з них. Наведено опис розробленої імітаційної моделі автономної фотоелектричної енергетичної установки, проведено аналіз характеристик систем екстремального крокового регулювання потужності сонячної батареї і визначені їх параметри.

*Ключові слова: СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА, РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ, АВТОНОМНА ФОТОЕЛЕКТРИЧНА ЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА*

## ЗМІСТ

### ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	9
1.1 Типова структурна схема автономних фотоелектричних енергетичних установок .....	9
1.2 Характеристики та режими експлуатації сонячних та акумуляторних батарей.....	10
1.3 Енергоперетворювальні пристрої установок з фотоелектричними перетворювачами сонячної енергії.....	12
1.4 Способи підвищення енергетичної ефективності установок із фотоелектричними перетворювачами сонячної енергії.....	13
1.5 Висновки до розділу .....	16
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	17
2.1 Методи визначення параметрів і характеристик автономних фотоелектричних енергетичних установок.....	17
2.2 Методика проектування автономних енергетичних установок, заснована на розрахунку енергобалансу і статистичних значеннях графіка інсоляції .....	22
2.3 Порівняльний аналіз енергетичної ефективності і параметрів автономних фотоелектричних енергетичних установок.....	30
2.4 Висновки до розділу .....	34
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	35
3.1 Перетворювачі потужності сонячних батарей.....	35
3.2 Способи регулювання максимуму потужності сонячних батарей.....	44
3.3 Моделювання систем екстремального крокового регулювання потужності сонячної батареї.....	48
3.4 Висновки до розділу .....	63

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	65
4.1 Заходи безпеки при монтажі електроустановок .....	65
4.2 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В.....	67
4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час .....	69
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	73
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	74

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Коефіцієнт перетворення падаючої сонячної енергії сучасних автономних фотоелектричних енергетичних установок не перевищує 5 – 10 %. У ясну, сонячну погоду на кожен квадратний метр площі, перпендикулярної до сонячного вектору, падає до 1 кВт сонячної енергії, але з виходу автономних фотоелектричних енергетичних установок до споживача надходить значно менша кількість енергії. Факторами, що зменшують кількість перетвореної енергії, є невисокий ККД, широко використовувані в наземних енергетичних установках кремнієві сонячні батареї (СБ) (монокристалічні 17-23 %, полікристалічні 12-15 %, аморфні 6-8 %), і недовикористання генеруючих можливостей сонячної батареї.

Недовикористання енергії сонячних батарей до 30 % пояснюється відсутністю у більшості автономних фотоелектричних енергетичних установках (АФЕУ) систем регулювання максимуму потужності СБ, хоча доцільне їх використання при проектуванні і створенні АФЕУ, як з рухомими (система автоматичного наведення СБ на Сонце), так і нерухомими сонячними батареями.

Відомий ряд способів екстремального регулювання потужності (ЕРП) сонячних батарей, але в даний час не досліджена перевага будь-якого з них у відношенні систем на основі фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії. Також не визначено оптимальне співвідношення параметрів системи ЕРС СБ.

Для визначення структури і параметрів фотоелектричних енергетичних установок існує ряд методик, представлених в основному на сайтах виробників. Ефективність і адекватність результатів таких методик нічим не підтверджена і найчастіше спрямована на збільшення розмірів і вартості АФЕУ з метою штучного завищення ціни і отримання вигоди.

У роботі поставлена і вирішена задача підвищення енергетичної ефективності автономних енергетичних установок на основі фотоелектричних

перетворювачів сонячної енергії за рахунок реалізації екстремального крокового регулювання потужності сонячних батарей і розрахунку параметрів ФЕУ з урахуванням енергобалансу і статистичних значень графіка інсоляції конкретної місцевості.

**Мета і завдання дослідження.** Метою даної роботи є: підвищення енергетичної ефективності автономної фотоелектричної енергетичної установки шляхом реалізації режиму екстремального регулювання потужності сонячних батарей.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити структури автономних енергетичних установок на основі фотоелектричних перетворювачів;
- здійснити аналіз методів розрахунку технічних параметрів автономних фотоелектричних енергетичних установок;
- удосконалити методику проектування АФЕУ на основі розрахунку енергобалансу та статистичних значеннях графіка інсоляції конкретної місцевості;
- провести аналіз способів та алгоритмів регулювання екстремуму потужності сонячних батарей;
- розробити систему екстремального крокового регулювання потужності сонячних батарей;
- провести дослідження параметрів екстремального регулювання потужності сонячних батарей на імітаційній моделі у MatLab Simulink;

**Об'єкт дослідження** – процес екстремального регулювання потужності сонячних батарей.

**Предмет дослідження** – автономні енергетичні установки на основі фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Запропоновано методику проектування автономних фотоелектричних енергетичних установок, засновану на розрахунку енергобалансу та статистичних значеннях графіка інсоляції конкретної місцевості, що дозволяє

оптимізувати структуру та технічні параметри енергетичної установки.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Розроблено систему екстремального покрокового регулювання потужності сонячних батарей, що забезпечує високі енергетичні та експлуатаційні характеристики:

- Коефіцієнт енергетичної ефективності використання сонячної батареї вище 98 %;

- Стабільний пошук точки максимальної потужності ВАХ СБ.

**Апробація.** Результати досліджень за темою кваліфікаційної роботи були представлені на ІХ Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 25-26 листопада 2021 року. ТНТУ [1]

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (19 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини – 76 сторінок, 3 таблиці, 33 рисунки.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Типова структурна схема автономних фотоелектричних енергетичних установок

Автономні фотоелектричні енергетичні установки в загальному випадку складаються з масиву фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), акумуляторних батарей (АБ), інвертора – перетворювача постійної напруги в змінну (якщо необхідно споживачеві) та контролера заряду-розряду акумуляторних батарей (КЗАБ). З'єднання даних елементів системи проводиться згідно з структурною схемою АФЕУ.

Залежно від місця розташування та умов експлуатації до складу фотоелектричної установки можуть вводитися додаткові джерела енергії: вітрогенератор та дизель-генератор (бензо-генератор). Структурна схема такої гібридної АФЕУ представлена рис 1.1, де ДГ – дизель-генератор, ВГ – вітрогенератор. Підключення додаткових елементів системи здійснюється аналогічно через контролер.

Структура фотоелектричної установки (рис.1.2), в якій реалізовано екстремальне регулювання потужності сонячних батарей, так і автоматичне наведення СБ на Сонце. На схемі прийнято такі позначення: СБ – сонячна батарея; КНС - контролер наведення СБ на Сонце; ДШД1, ДШД2 – драйвери керування кроковими двигунами; М1, М2 - крокові двигуни; Р1 – Р4 – редуктори; КЗАБ – контролер заряду акумуляторних батарей; И – інвертор; АБ – акумуляторна батарея.

Склад та структура фотоелектричної установки в основному залежать від умов експлуатації та вимог кінцевого споживача. В даний час відомі різні методи визначення структури, параметрів та характеристик АФЕУ. В основному це методика або автоматичні програми розрахунку, представлені в інтернет-магазинах фірм-виробників та постачальників енергетичних



установок, які не є оптимальними і часто штучно збільшують склад та вартість АФЕУ для вигоди постачальника.

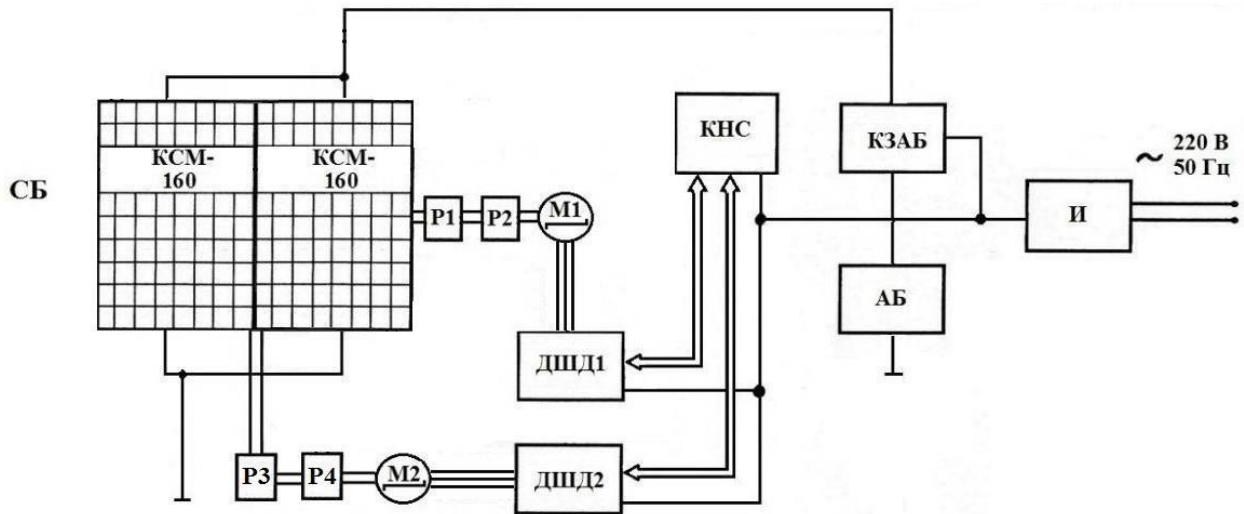


Рисунок 1.1 – Структурна схема АФЕУ з функцією наведення сонячних батарей на Сонце та екстремальним регулюванням потужності СБ

## 1.2 Характеристики та режими експлуатації сонячних та акумуляторних батарей

Сонячні батареї (фотоелектричні перетворювачі)– основна частина фотоелектричної енергетичної установки. В даний час на ринку сонячних батарей для наземних фотоелектричних енергетичних установок представлено кілька різних видів фотоелектричних перетворювачів. Вони поділяються на дві основні групи: кремнієві та плівкові. Кремнієві у свою чергу можна розділити на полікристалічні, монокристалічні та аморфні. Плівкові виготовляються на основі телуриду кадмію ( $CdTe$ ), селеніду міді-індії ( $CuInSe_2$ ) – полімерні.

Найбільше застосування у наземних АФЕУ отримали ФЕП на основі кремнію. Пояснюється це широким поширенням кремнію у земній корі, його відносно дешевизною та відносно високим показником продуктивності порівняно з деякими іншими видами сонячних батарей.

Сонячні батареї автономних фотоелектричних енергетичних установок використовуються за умов експлуатації, що значно змінюються, вони сильно схильні до впливу навколишнього середовища.

Вольт-ватні характеристики (ВВХ) мають яскраво виражений максимум потужності, що генерується, положення якого істотно змінюється від умов експлуатації (ресурсу, температури, освітленості) [2].

Основний вплив на ВАХ фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії мають ступінь освітленості та температура. Освітленість ФЕП знижується при зміні орієнтації по відношенню до Сонця, тобто при появі кута між сонячним вектором і вектором нормалі до панелей СБ. При куті 180 та попаданні в тінь освітленість падає практично до нульового значення. Пропорційно до зміни освітленості змінюється і струм СБ.

Часткове затінення СБ веде до зменшення її потужності, а також до виникнення високої зворотної напруги на затінених і паралельно з ними з'єднаних фотоперетворювачах, перегріву та деградації СБ. Навіть при повному усуненні негативного впливу часткових затінь та електризації прогнозоване зменшення потужності СБ може становити 15 -20 % до кінця п'ятого року експлуатації, і 30 % після 10 років роботи СБ.

Найбільш істотні зміни ВАХ відбуваються в момент виходу Сонця через хмари після тривалого затінення панелей. У літню пору, при середній температурі 20-25 градусів тепла і відсутності вітру, температура панелей сонячної батареї може підвищитися до 50-70 градусів. У цьому випадку напруга холостого ходу та оптимальної робочої точки може зменшитися на 25%. Час прогрівання панелей СБ залежить від конструкції та розташування, і, як правило, не перевищує 20 хвилин.

При інтенсивності освітлення, що відповідає сонячній, фото ЕРС перетворювачів з кремнію лінійно падає зі збільшенням температури з градієнтом 1,5-2,5 мВ К. За зміни температури від плюс 70 °С до мінус 30 °С напруга оптимальної робочої точки кремнієвої СБ збільшується орієнтовно в 1,5 рази (напруга кремнієвого фотоелемента змінюється в діапазоні 0,5-0,75).

Зміна температури панелей СБ веде до усунення ВАХ вздовж осі напруги. При цьому струм СБ залежить від температури.

Іншими факторами, що впливають на параметри СБ, є радіаційні дії, механічні пошкодження та електризація.

### **1.3 Енергоперетворювальні пристрої установок з фотоелектричними перетворювачами сонячної енергії**

Контролер заряду-розряду АБ, елемент в АФЕУ, який виконує функції забезпечення ефективної роботи сонячної батареї, регулювання струму заряду та розряду АБ (запобігаючи глибокому розряду та перезаряду, продовжуючи тим самим термін служби).

В даний час існує кілька типів контролерів – з широтно-імпульсною модуляцією струму заряду (ШІМ) та контролери (з ШІМ) з функцією екстремального регулювання потужності СБ [3]. Основним недоліком ШІМ контролерів є те, що для заряду акумуляторної батареї необхідно, щоб напруга СБ відповідала напрузі АБ, інакше енергія фотоелектричних перетворювачів не буде використовуватися. Тобто, для заряду 12 В акумулятора потрібна сонячна батарея з 36 сонячними елементами, послідовно з'єднаними. Для збільшення потужності таких кіл може бути кілька, з'єднаних паралельно.

Контролери з ЕРМ СБ технічно складніші, ніж звичайні ШІМ контролери, але до 30 % ефективніші. Асортимент контролерів на сучасному ринку великий, вони відрізняються вхідними та вихідними параметрами, сумісністю з різними типами акумуляторних батарей. Основна відмінність - це спосіб регулювання максимуму потужності сонячної батареї та підвищення за рахунок цього енергетичної ефективності СБ.

Відомі контролери заряду-розряду акумуляторних батарей з реалізацією функції екстремального регулювання потужності сонячних батарей фірм США, Німеччини, Китаю та Канади: OutbackFlexMax, Morningstar, EPSolarTracer , Xantrex XW-MPPT60-150.

#### **1.4 Способи підвищення енергетичної ефективності установок із фотоелектричними перетворювачами сонячної енергії**

Підвищити коефіцієнт перетворення сонячної енергії АФЕУ до максимально можливого рівня дозволяє одночасна реалізація наступних системних способів:

- реалізація режиму екстремального регулювання потужності сонячних батарей (відбір потужності в оптимальній робочій точці вольт-амперної характеристики сонячної батареї);
- безперервне автоматичне стеження СБ за Сонцем;
- оптимізація конструкції сонячної батареї з метою досягнення мінімального нагрівання фотоелементів, а також застосування концентраторів.

Фактором, що значно зменшує кількість енергії, є недовикористання генеруючих можливостей сонячних батарей. Сумарна енергетична ефективність більшості фотоелектричних енергетичних установок вбирається у 5 - 10 %.

Реалізація режиму екстремального регулювання потужності СБ є доцільною для енергетичних установок як у системах з безперервним автоматичним стеженням за Сонцем, так і в системах з нерухомими сонячними батареями (наприклад, на дахах будинків). ЕРМ може успішно застосовуватися для СБ будь-якої потужності. Різниця параметрів сонячних батарей від різних виробників також не має особливого значення, оскільки пошук оптимуму здійснюється автоматично.

Ефект застосування екстремального регулювання залежить від діапазону зміни температури панелей сонячних батарей. При здійсненні безперервного регулювання напруги СБ оптимальної робочої точці використання сонячної батареї за потужністю збільшується до 30%.

Безперервне автоматичне стеження СБ за Сонцем також дозволяє значно підвищити енергетичну ефективність автономних фотоелектричних енергетичних установок (щонайменше ніж 25-30%).

Однак технічна реалізація систем безперервного автоматичного стеження за Сонцем досить складна, оскільки повинна містити крім різних механічних пристроїв та пристроїв електричні приводи вертикального та горизонтального обертання з редукторами, блоки керування та фотоелектричні датчики.

На рис. 1.2 представлені фотографії енергетичних установок фірми Селтек. Дана конструкція дозволяє розміщувати сонячні батареї площею до  $6 \text{ м}^2$ . У системі стеження використовуються електродвигуни, контролер та датчики наведення СБ на Сонце. Наведення системи здійснюється з точності до 1 градуси.



Рисунок 1.8 – Енергетичні установки фірми Селтек

Невелика поширеність систем безперервного автоматичного стеження панелей за Сонцем пояснюється тим, що у багатьох випадках РБ розташовуються на дахах будинків. У разі розташування ФЕП на відкритих площадках виникає питання доцільності та економічної вигоди, тому що технічна реалізація складна і не визначена область раціонального використання систем безперервного автоматичного стеження залежно від рівня вихідної потужності або площі сонячної батареї. Реалізація таких систем технічно утруднена і найчастіше економічно недоцільна.

У деяких фотоелектричних енергетичних установках з автоматичним наведенням СБ на Сонце використовують сонячну батарею разом із лінзами

Френеля. Це складова лінза, яка складається з окремих концентричних кілець невеликої товщини, що примикають один до одного, які перерізі мають форму призми спеціального профілю (рисунок 1.9). Лінзи Френеля діляться на кільцеві та поясні. Кільцеві – спрямовують світловий потік в одному напрямку. Промені від точкового джерела, розміщеного у фокусі лінзи, після заломлення у кільцях виходять практично паралельним пучком. Поясні лінзи посилають світло від джерела в усіх напрямках у певній площині. Діаметр лінзи може становити від 10-20 см до кількох метрів.

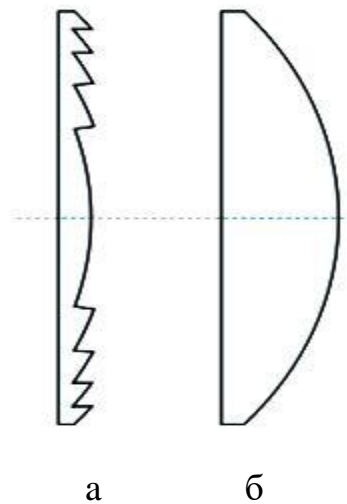


Рисунок 1.3 – Поперечний переріз лінзи Френеля (а) та звичайної лінзи (б)

Застосування лінз Френеля в АФЕУ дозволяє збільшити світловий потік, що припадає на одиницю площі фотоелектричних перетворювачів, що підвищує ефективність установки в цілому. Однак, внаслідок застосування лінз, збільшується температура ФЕП та швидкість їх деградації.

Також технологія монтажу фотоелектричної установки потребує великих трудовитрат.

Ще одним методом підвищення енергетичної ефективності є оптимізація конструкції сонячної батареї з метою досягнення мінімального нагрівання фотоелементів, так як підвищення температури ефективність роботи СБ

знижується. Інформації про роботи з дослідження ефективності конкретних заходів та механізмів примусового охолодження ФЕП практично немає.

#### **1.4 Висновки до розділу**

1. Автономні фотоелектричні енергетичні установки призначені для роботи як самостійно, так і спільно з вітрогенератором або дизельгенератором, в залежності від місця розташування і умов експлуатації системи. Структура АФЕУ включає в себе сонячні батареї, акумуляторні батареї, контролер заряду АБ і інвертор струму.

2. Фотоелектричні перетворювачі сонячних батарей мають нестабільні вольт-амперні та вольт-ватні характеристики, змінюються в великих діапазонах. Для підвищення енергетичної ефективності АФЕУ необхідне застосування контролерів з системою екстремального регулювання потужності сонячних батарей.

3. Реалізація системи безперервного автоматичного спостереження фотоелектричних панелей за Сонцем технічно складна і економічно не вигідна, тому доцільно застосовувати дані системи в рухомих і мобільних фотоелектричних енергетичних установках спеціального призначення, завданням яких є максимальна енергетична ефективність при малих габаритах сонячних батарей.

4. Існуючі методи розрахунку структури і параметрів автономних фотоелектричних енергетичних установок базуються на даних, представлених в інтернет-магазинах фірм виробників АФЕУ, які не раціональні і часто завищують розрахункові значення параметрів джерел енергії – сонячних і акумуляторних батарей.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Методи визначення параметрів і характеристик автономних фотоелектричних енергетичних установок

В даний час відомі різні способи і методи визначення параметрів і характеристик фотоелектричних установок, що дозволяють з тією чи іншою мірою точності розрахувати необхідні параметри її вузлів для заданих умов експлуатації. Вони розрізняються застосуванням математичним апаратом, закладеними в розрахунок характеристиками складових частин системи, різним часовим проміжком, за який використовуються дані про кліматичні умови.

Інтервал часу, для якого будується кліматична характеристика, варіюється від одного місяця [4] до декількох годин [5]. При цьому використовуються або середні багаторічні характеристики типового дня місяця [4], або тимчасові ряди вихідних даних, що включають температуру повітря, сонячну радіацію і швидкість вітру для кожного інтервалу в межах всього розрахункового періоду [5]. Використання точних погодинних даних дозволяє врахувати локальні особливості клімату, що призводять до стійкої асиметрії в добовому ході метеоданих. Такі точні кліматичні характеристики реєструються вкрай обмеженим числом метеостанцій, в результаті чого безпосереднє використання подібних розрахункових методів може бути складним, так як можливістю моделювання необхідних вихідних даних за інтегральними місячними характеристикам вони часто не володіють [5].

Комп'ютерні програми розрахунку фотоелектричних установок можна розділити на дві основні групи – проектуючі (розрахункові програми) та моделюючі програми. Ці групи розрізняються як за вихідними даними, так і за вихідними результатами. Проектуючі програми дозволяють за один розрахунковий цикл визначити параметри АФЕУ для заданого навантаження. Для моделюючих програм параметри системи повинні бути задані. Базовий алгоритм моделюючих – полягає в послідовному розгляді балансу енергії на



кожному кроці моделювання та фіксації основних параметрів роботи системи (енергія, вироблена СБ і споживана навантаженням, надлишок або недолік енергії і т.п.).

Програми, що відносяться до класу проектуючих алгоритмів, повинні не тільки моделювати розподіл енергетичних потоків в системі, а й визначати склад енергоустановки, виходячи із заданого переліку компонентів. Характерною рисою даних програм є те, що параметри АФЕУ визначаються без урахування енергобалансу на повному річному або, в окремому випадку, сезонному циклі роботи установки. Часто рівняння енергобалансу, що включає як акумуляторну, так і сонячну батареї, взагалі не розглядається. Сонячна батарея повинна забезпечити роботу навантаження протягом місяця з найгіршим співвідношенням інсоляції і енергоспоживання [6]. В результаті, подібні алгоритми дають мінімум інформації про можливі параметри АФЕУ (значення пікової потужності СБ і ємності АБ). Знайдена пара значень відповідає максимальній реально необхідній потужності СБ і, відповідно, мінімальній з можливих ємностей акумулятора. При таких параметрах системи сонячна батарея протягом року буде виробляти надлишкову енергію. У той же час, можна собі уявити фотоелектричну станцію, в якій СБ виробляє енергії рівно стільки, скільки потрібно для навантаження з урахуванням можливих втрат в системі. Потужність такої СБ буде мінімально можливою, а відповідна ємність АБ – максимальною для даної системи. Параметри цього та інших варіантів з проміжними співвідношеннями потужності і ємності, існуючі проектуючі програми визначити не в змозі.

Для розрахунку системи потрібно визначити і розглянути безліч її працездатних варіантів. Для пошуку цієї множини використовується метод перебору варіантів. Працездатність чергового варіанту перевіряється за допомогою моделюючих програм [6]. За результатами моделювання параметри системи коригуються, і розрахунковий цикл повторюється з новими вихідними даними до тих пір, поки не будуть отримані задовільні результати.

Відома методика розрахунку потужності автономних сонячних електростанцій (АСЕ) [7], яка полягає в розрахунку вихідної потужності автономної електростанції, ємності акумуляторної батареї, потужності зарядного пристрою, потужності основної шини; потужності сонячних батарей і автономних інверторів напруги.

На першому етапі розрахунку необхідно скласти список споживачів електроенергії, їх потужність і напругу. Потім проводиться оцінка часу, протягом якого використовуються електроприлади, і визначається щоденна потреба в електроенергії. Далі складається таблиця загального енергоспоживання за добу і графік енергоспоживання, на основі якого проводиться розрахунок сумарної потужності енергоспоживання навантаженням і необхідної вихідної потужності АСЕ за формулою:

$$P_{oc,i} = P_{n,i} / \eta_i$$

де  $P_{n,i}$  – потужність  $i$ -го споживача;

$P_{oc,i}$  – потужність  $i$ -го споживача, перерахована на основну шину АСЕ;

$\eta_i$  – ККД  $i$ -го автономного інвертора напруги.

На другому етапі проводиться розрахунок ємності акумуляторної батареї виходячи з потреби електроживлення навантаження в нічний час доби за формулою:

$$C_H = \frac{100 P_H}{S_p U_H} \Delta t_{HB}$$

де  $P_H$  – номінальна потужність навантаження;

$U_H$  – номінальна напруга навантаження;

$\Delta t_{HB}$  – інтервал нічного часу доби (в літній час  $\Delta t_{HB} = 10$  год, взимку –  $\Delta t_{HB} = 16$  год);

$S_p$  – ступінь розрядженості акумуляторної батареї.

Третій етап полягає в розрахунку потужності зарядного пристрою АСЕ. Проводиться вибір методу заряду акумуляторної батареї (при сталості струму або сталості напруги). Заряд при сталості струму виробляється значенням від 0,2 до 0,3 ємності акумулятора. Недолік такого способу заряду – необхідність постійного контролю і регулювання зарядного струму [7]. У заряді при сталості напруги рівень зарядженості акумуляторної батареї визначає значення зарядної напруги. Струм зарядного пристрою в перший момент включення може досягати 40-50 А і більше. Тому зарядний пристрій має комплектуватися схемними рішеннями, що обмежують максимальний струм заряду [7].

Для прискореного заряду акумуляторних батарей застосовується заряд в два етапи – при постійному струмі, а потім при постійній нарузі. Метод дозволяє значно скоротити час заряду АБ.

Далі слід провести розрахунок потужності і кількості сонячних батарей необхідних для заряду і електроживлення АСЕ. Основна увага приділяється погодним умовам місцевості, в якій передбачається експлуатація АСЕ. Враховується кількість сонячної енергії, на яку можна розраховувати, а також середньомісячні значення сонячної радіації при найгірших погодних умовах.

На завершення проводиться вибір інвертора напруги на основі отриманих значень розрахунку потужності навантаження в системі.

Також відомий реверсивно-балансовий метод визначення параметрів АФЕУ [8]. Основна його відмінність в тому, що визначаються параметри альтернативних варіантів фотоелектричних станцій, які можуть бути зведені до декількох найбільш «вигідних» варіантів шляхом оптимізації розрахунків. Даний метод дозволяє досліджувати закономірності побудови фотоелектричних установок, оцінити вплив параметрів і кліматичних даних в їх взаємозв'язку, на експлуатаційні характеристики.

У статті [9] описана імітаційна модель автономної системи електроживлення на основі СБ, АБ і навантаження. Управління станами сонячної і акумуляторної батареї забезпечується контролером СБ. Функціонування моделі відповідає логіці функціонування АФЕУ в реальному

часі. На рисунку 2.1 приведена модель АФЕУ і зображені параметри системи, які можуть задаватися користувачем.

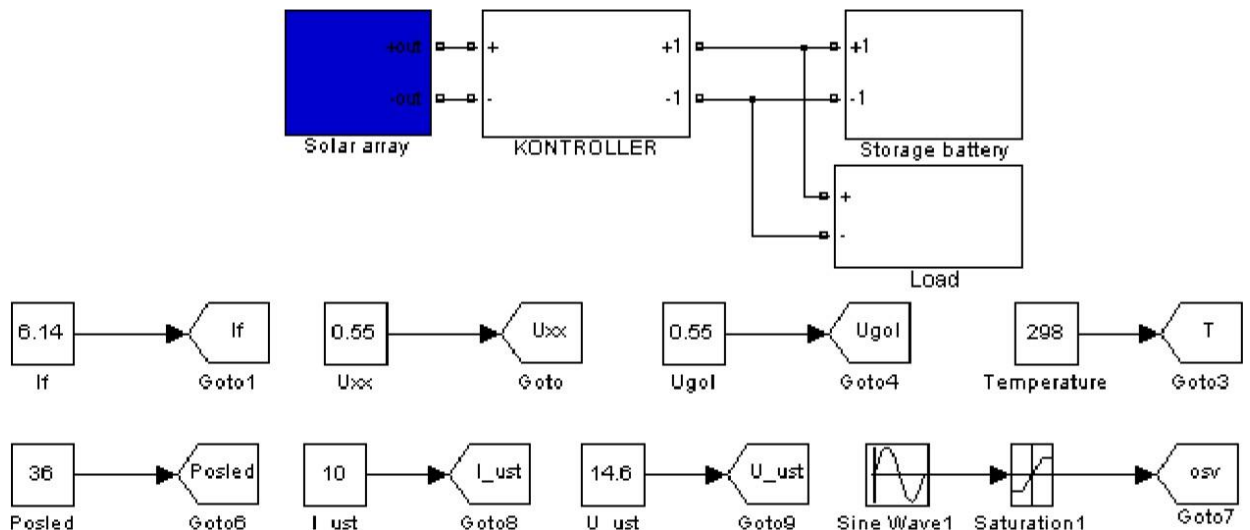


Рисунок 2.1 – Імітаційна модель автономної фотоелектричної установки

За заявою авторів, дана модель адекватно відображає роботу сонячної батареї, акумуляторної батареї, контролера сонячної батареї і навантаження, що дозволяє використовувати дану модель при проектуванні АФЕУ. В основному методики розрахунку параметрів автономних фотоелектричних енергетичних установок полягають в узгодженні графіків генерації і споживання енергії. Наявність в системі поновлюваних джерел енергії призводить до того, що повне узгодження цих графіків в більшості випадків неможливе або не вигідне, так як робота поновлюваних джерел залежить від кліматичних факторів. Як правило, в методиках розрахунок проводиться виходячи з середньорічної або середньомісячної оцінки погодних умов, а іноді з огляду на лише тривалості нічного часу доби. У всіх цих випадках основним недоліком є те, що не враховуються ситуації, в яких, не дивлячись на високе значення середньомісячної інсоляції, є тривалий період часу (кілька днів) без сонця. У таких випадках системи, розраховані на середньомісячні або середньорічні

кліматичні показники, не будуть забезпечувати безперебійне електроживлення споживача. Можлива і зворотна ситуація, коли при низькому рівні середньомісячної інсоляції кількість послідовних днів без сонця буде менша, і при розрахунку система виявиться з надлишковою закладеною потужністю.

## **2.2 Методика проектування автономних енергетичних установок, заснована на розрахунку енергобалансу і статистичних значеннях графіка інсоляції**

Завдання проектування автономних енергетичних установок полягає у визначенні їх необхідної потужності, виборі типу і параметрів сонячних і акумуляторних батарей, а також визначенні параметрів енергоперетворюючих пристроїв. Умовою енергобалансу є рівність нулю розрядної ємності АБ в кінці розрахункового періоду, тобто енергія АБ, що витрачається при перевищенні потужності навантаження над потужністю СБ, в кінці розрахункового періоду повинна бути повністю відновлена.

Основними необхідними даними для розрахунку потужності АФЕУ є параметри графіка енергоспоживання, який формується на основі наступних дій:

- визначення споживачів електроенергії і їх потужності;
- визначення типу споживача (змінної або постійної напруги);
- оцінка часу і тривалості роботи даних споживачів протягом доби.

Як приклад на рисунку 2.2 представлений доволно складений типовий графік енергоспоживання приміщення житлового або виробничого призначення в літній період пори року (де  $t_1 - t_2$  – тривалість світлового дня).

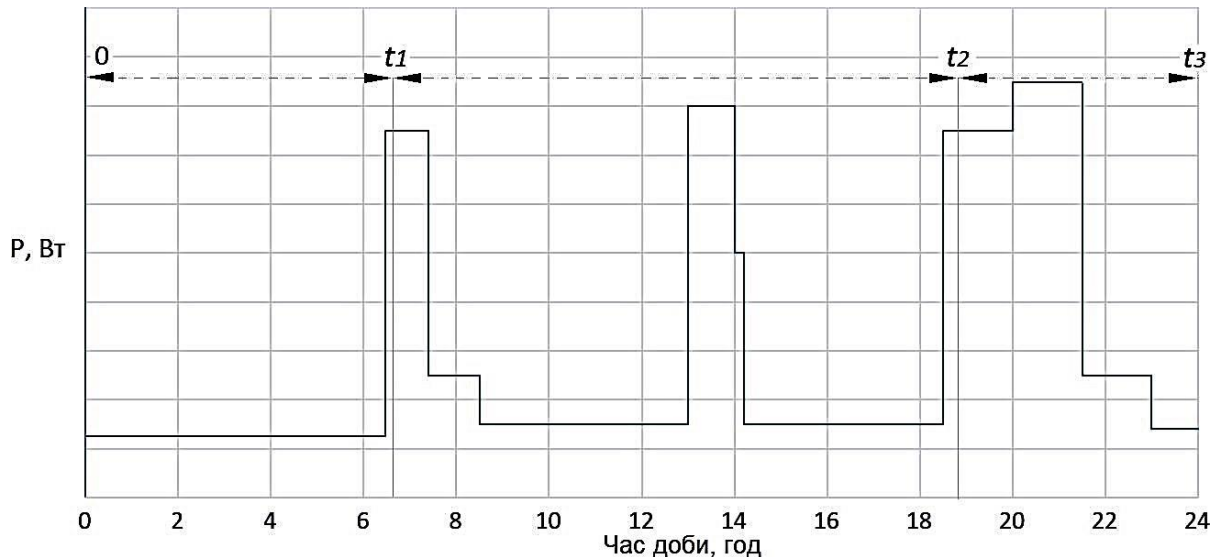


Рисунок 2.2 – Типовий графік енергоспоживання приміщення житлового або виробничого призначення

При складанні графіка важливо оптимізувати навантаження і, по можливості, зменшити споживання енергії. При наявності споживачів енергії, які не можна виключити, необхідно розглянути варіант, при якому вони будуть включені тільки в періоди з достатньою освітленістю сонячних батарей, а також розподілити підключення споживачів в часі так, щоб вихідна потужність АФЕУ прямувала до мінімуму.

Добова енергія, яка споживається навантаженням, розраховується за формулою:

$$W_{24} = \int_0^{24} P_H dt, \quad (2.1)$$

де  $P_H$  - добова потужність, яка споживається навантаженням.

Основними умовами при виборі акумуляторів є:

- стійкість до циклічного режиму роботи;
- здатність витримувати глибокий розряд;
- низький саморозряд;
- стійкість до порушення умов заряду і розряду;

- довговічність;
- простота в обслуговуванні.

Кількість, ємність і номінальна напруга акумуляторних батарей визначається на основі отриманого розрахункового графіка енергоспоживання. У більшості випадків рекомендується використовувати гетичні необслуговувані гелеві АБ загального призначення, які мають найбільш оптимальні експлуатаційно-економічними параметрами [10].

Використання акумулятора при глибокому розряді призводить до необхідності їх більш часті заміни і до подорожчання системи. Глибину розряду акумуляторів в сонячних системах прагнуть обмежити на рівні 30 ... 40 %, що досягається відключенням навантаження (зниженням потужності) або використанням акумуляторів більшої ємності [10].

Номінальна напруга АБ може становити 12, 24, 48 В, воно впливає на параметри інвертора і контролера заряду. Фотоелектричні енергетичні установки, що виробляють менше 1000-1500 Вт·год в день, краще всього поєднуються з напругою в 12 В, що виробляють 1000-3000 Вт·год – 24 В, а установки, що виробляють понад 3000 Вт·год в день, слід використовувати 48 В або вище.

Ємність акумуляторних батарей для забезпечення енергобалансу енергетичної установки доцільно вибирати з розрахунку кількості послідовних днів без сонця. На рисунку 2.3 наведено графік, який показує рівень прийдешньої сонячної радіації в місті Тернопіль за липень 2021 року, складений на основі даних інтернет ресурсу з календарем погоди. З аналізу графіка випливає, що кількість послідовних днів без сонця не перевищує трьох. Аналогічний графік рівня інсоляції можна отримати для будь-якої необхідної місцевості.

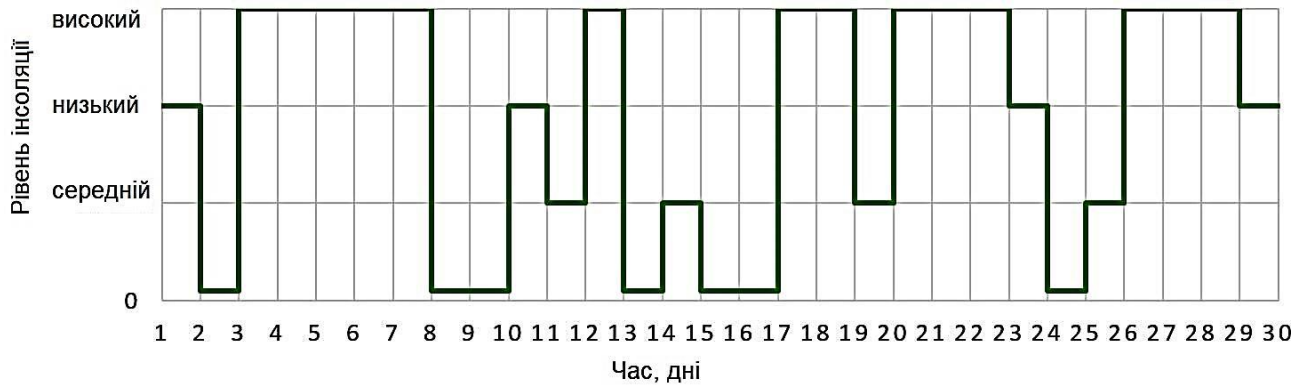


Рисунок 2.3 – Графік рівня інсоляції в місті Тернопіль за липень 2021 р

Таким чином, ємність акумуляторної батареї розраховується за формулою:

$$C_{AB} = \frac{W_{24} \cdot N}{U_{AB} \cdot \eta_p}, \quad (2.2)$$

де  $C_{AB}$  – необхідна ємність акумуляторної батареї (А·год);

$W_{24}$  – добова енергія, яка споживається навантаженням (Вт);

$N$  – кількість послідовних днів без заряду АБ від СБ;

$U_{AB}$  – номінальну напругу акумуляторної батареї (В);

$\eta_p$  – допустима глибина розряду (%). Значення з паспортних даних на акумуляторну батарею.

Аналіз графіків рівня інсоляції в різних регіонах України показує, що в південних областях країни кількість послідовних днів без сонця, як правило, не перевищує двох, і загальний рівень інсоляції близький до максимальної позначки. Для прикладу на рисунку 2.4 показаний графік рівня інсоляції для м. Одеси.



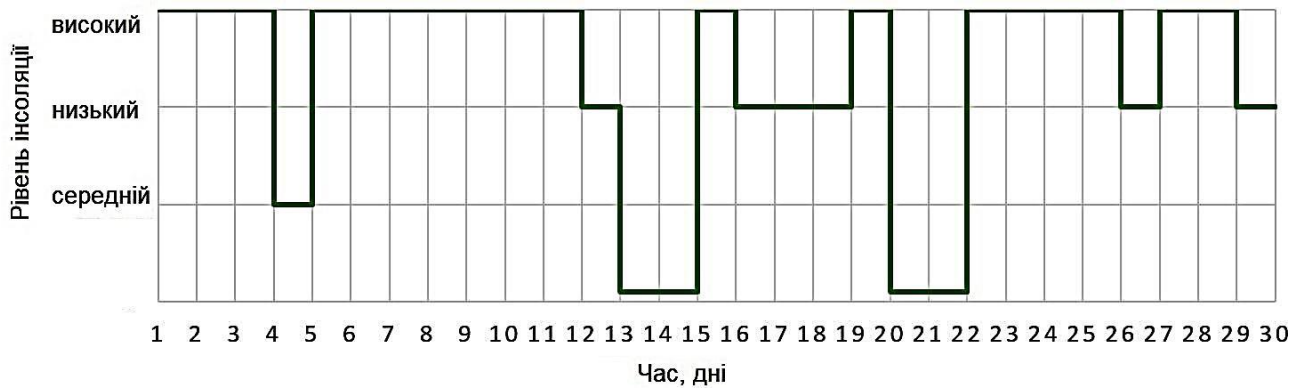


Рисунок 2.4 – Графік рівня інсоляції для м. Одеса за липень 2021 р

Протягом світлового дня сонячні батареї заряджають АБ і забезпечують енергією споживачів. Енергія від СБ, необхідна для живлення навантаження протягом періоду  $(k + m)$ , розраховується за формулою:

$$W_{CB\ k+m} = m \cdot 1,2 \int_0^{24} P_H dt + k \cdot 1,2 \int_0^{t_1} P_{H\ \text{мін}} dt + k \int_t^{t_2} P_{H\ \text{світло}} dt + k \cdot 1,2 \int_{t_2}^{t_3} P_{H\ \text{мін}} dt \quad (2.3)$$

де  $k$  – дні з достатньою (середньою) освітленістю;

$m$  – дні без сонця;

1,2 – коефіцієнт, що враховує ККД АБ.

Кількість днів  $k$  і  $m$  визначається за графіком інсоляції конкретної місцевості.

Необхідна добова енергія від СБ розраховується за формулою:

$$W_{CB\ 24} = \frac{W_{CB\ k+m}}{k} \quad (2.4)$$

Для визначення необхідної площі фотоелектричних панелей необхідно знати:

- номінальну потужність обраних фотоелектричних модулів;
- планований період використання АФЕУ;
- графік інсоляції конкретної місцевості;

- орієнтацію фотоелектричних модулів щодо сонця (нерухома установка ФЕП під заданим кутом, наявність системи автоматичного спостереження фотоелектричних панелей за Сонцем);

- наявність системи екстремального регулювання потужності СБ.

В сучасних АФЕУ переважно використовуються фотоелектричні модулі номінальною потужністю 120-180 Вт/м<sup>2</sup>. Кількість електроенергії, що виробляється сонячною батареєю безпосередньо залежить від періоду (пори року) використання АФЕУ і погодних умов. Значення графіка інсоляції для тієї чи іншої місцевості можна знайти в спеціальних виданнях на мапі інсоляції, а також в таблицях приходу сонячної енергії на інтернет-ресурсах.

Підвищити енергетичну ефективність сонячної батареї можливо наступними основними способами [10]:

- реалізацією режиму безперервного автоматичного спостереження фотоелектричних панелей за Сонцем;

- реалізацією режиму відбору потужності в оптимальній робочій точці вольт амперної характеристики СБ (реалізацією режиму екстремального регулювання потужності (ЕРП) сонячних батарей).

Енергетична ефективність із застосуванням двохвісної системи автоматичного спостереження за Сонцем фотоелектричних панелей складає до 50 %. Але такі системи мають складну конструкцію і досить дорогі, через що не завжди виправдовують себе.

Ефект від реалізації режиму ЕРС СБ залежить від діапазону зміни температури фотоелектричних панелей. Аналіз показує, що в порівнянні з системами з паралельним з'єднанням СБ і АБ (робоча напруга СБ дорівнює напрузі АБ), енергетична ефективність реалізації режиму екстремального регулювання потужності СБ може досягати 30 %.

Грунтуючись на необхідних вихідних даних, необхідна площа сонячної батареї може бути розрахована за формулою:

$$S_{CB} = \frac{W_{CB\ 24}}{W_{CBm^2\ 24}} \quad (2.5)$$

де  $W_{CBM^2(24)}$  – добова енергія, що виробляється 1 м<sup>2</sup> сонячної батареї, яка розраховується за формулою:

$$W_{CBM^2 24} = \frac{P_{CBM^2 \cdot t_1-t_2} \cdot K_{ЕРМ}}{K_{уст}} \quad (2.6)$$

де  $P_{CBM^2}$  – потужність одного м<sup>2</sup> СБ (при нормальних умовах) зазначена в технічних параметрах експлуатації;

$t_1 - t_2$  – тривалість світлового дня;

$K_{ЕРМ}$  – коефіцієнт збільшення енергетичної ефективності при екстремальному регулюванні потужності СБ щодо паралельно- послідовного з'єднання СБ і АБ (орієнтовно дорівнює 1,3);

$K_{уст}$  – поправочний коефіцієнт установки СБ в просторі.

Поправочний коефіцієнт установки СБ в просторі підтверджений на моделях і може приймати різні значення:

- при наявності двохвісної системи стеження за Сонцем значення коефіцієнта приймається рівним одиниці;
- при установці СБ під кутом, рівним широті місця розташування і орієнтованої на Південь, значення – 1,25;
- при відсутності двохвісної системи стеження за Сонцем і установкою СБ в положенні, близькому до горизонтального, значення коефіцієнта приймається 1,5.

Більш точні значення коефіцієнтів можна отримати на імітаційній моделі АФЕУ з урахуванням температури, освітленості та інших умов.

Контролер заряду АБ і регулювання потужності СБ є важливим елементом АФЕУ, так як забезпечує ефективну роботу сонячної батареї, регулює струм заряду і розряду АБ, оберігаючи її від глибокого розряду і перезаряду, продовжуючи тим самим термін служби.

При виборі контролерів необхідно враховувати робочі значення напруг СБ і АБ, а також значення номінального струму. Контролер з ШІМ вибирається по струму короткого замикання СБ з запасом 20-25 %. Контролер з ЕРП СБ

вибирається залежно від потужності системи з урахуванням напруги акумуляторних батарей в розрядженому стані. Крім того, швидкодія контролера з ЕРП має забезпечувати стійкий пошук точки екстремуму потужності при дрейфі ВАХ і ВВХ сонячної батареї.

Для перетворення постійного струму джерел живлення в змінний необхідний інвертор. Для всіх типів інверторів основний параметр – ККД (повинен бути більше 90 %).

Вихідна напруга інверторів становить 220 В (50/60 Гц), а в інверторах потужністю вище 10 кВт – 380 В. Вхідна напруга підбирається з ряду 12, 24, 48 В. До форми вихідного сигналу автономних інверторів пред'являються менш жорсткі вимоги. У ряді випадків (залежить від навантаження) можливе застосування інверторів з трапецієподібним вихідним сигналом. Їх вартість в кілька разів нижча інверторів з синусоїдальним вихідним сигналом.

До інвертору автономної фотоелектричної енергетичної установки ставляться такі вимоги:

- здатність витримувати перевантаження (як короткочасні, так і тривалі);
- низькі втрати при малих навантаженнях і на холостому ходу;
- стабілізація вихідної напруги;
- низький коефіцієнт гармонік;
- високий ККД.

При виборі інвертора необхідно враховувати всю сумарну потужність споживання електричних приладів, що підключаються до інвертору, і збільшити це значення на 40 %. Обраний на цю потужність перетворювач дозволить забезпечувати включення таких електроприладів, як компресорний холодильник, насоси та інші, з пусковими потужностями, що перевищують паспортні значення.

Таким чином, запропонована методика проектування автономних енергетичних установок, заснована на розрахунку енергобалансу і

статистичних значеннях графіка інсоляції конкретної місцевості, полягає в поетапному вирішенні наступних завдань:

- визначення необхідної потужності проектованої енергетичної установки;
- вибір типу і параметрів акумуляторних батарей;
- визначення площі і параметрів сонячних батарей;
- вибір параметрів контролера заряду АБ і регулювання потужності СБ;
- вибір параметрів інвертора.

### **2.3 Порівняльний аналіз енергетичної ефективності і параметрів автономних фотоелектричних енергетичних установок**

Удосконалена методика проектування АФЕУ дозволяє визначати оптимальні параметри, а також, в залежності від умов експлуатації і конкретних вимог кінцевого споживача, варіювати склад системи. Методика дозволяє проектувати фотоелектричні установки в наступних конфігураціях:

- 1) при установці сонячних батарей АФЕУ, орієнтованих на Південь під кутом, рівним широті місця розташування і стабілізації напруги СБ на заданому рівні (АФЕУ – ШМ);
- 2) при установці сонячних батарей АФЕУ, орієнтованих на Південь під кутом, рівним широті місця розташування з екстремальним кроковим регулятором потужності СБ (АФЕУ – ШМ ЕРП);
- 3) при двохвісному стеженні сонячних батарей за Сонцем і стабілізації напруги СБ на заданому рівні (АФЕУ – ДО) [11];
- 4) при двохвісному стеженні СБ за Сонцем і ЕРС потужності СБ (АФЕУ – ДО ЕРП).

Для порівняльного аналізу параметрів та енергетичної ефективності фотоелектричних енергетичних установок різних параметрів і конфігурації за удосконаленою методикою проведено розрахунок АФЕУ, призначеної для електроживлення житлового приміщення в теплому пору року, територіально

розташованого в м. Одеса. Для розрахунку використані дані графіка енергоспоживання (рис. 2.5) і графік інсоляції (рис. 2.4).

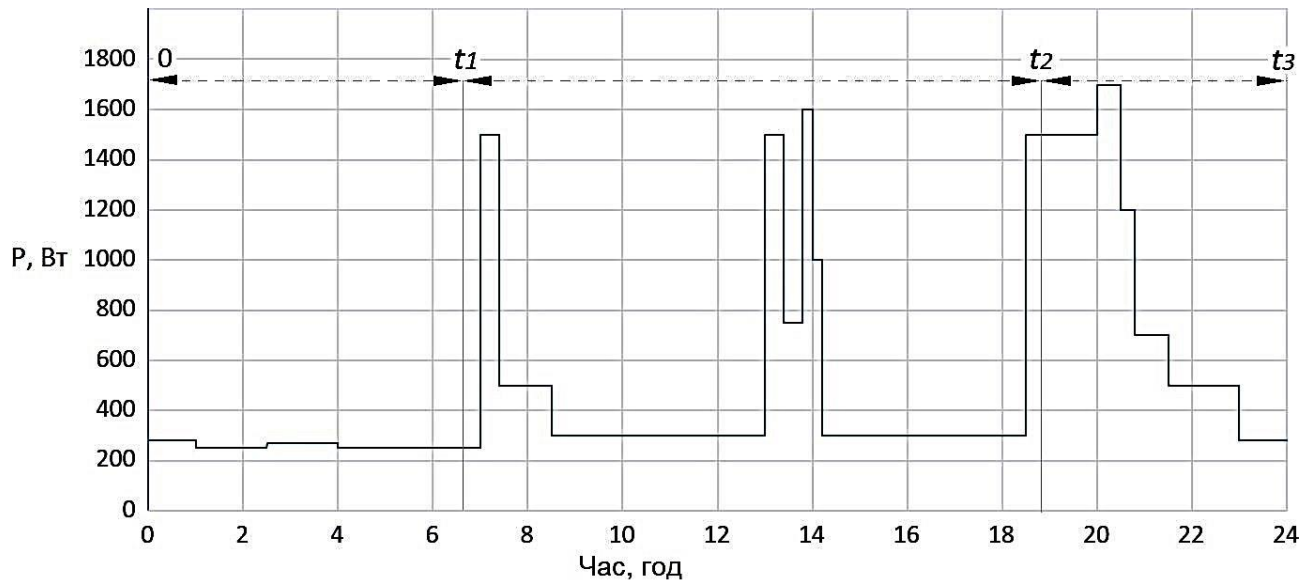


Рисунок 2.5 – Графік енергоспоживання житлового приміщення

Згідно з методикою, розрахунок добової енергії, яка споживається навантаженням, здійснюється за формулою (2.1):

$$W_{24} = \int_0^{24} P_H dt \approx 5600 \text{ Вт} \cdot \text{год} .$$

Розрахунок ємності акумуляторної батареї проводиться за формулою (2.2):

$$C_{AB} = \frac{W_{24} \cdot N}{U_{AB} \cdot \eta_p} = \frac{5600 \cdot 2}{48 \cdot 0,7} \approx 335 \text{ А} \cdot \text{год} .$$

Виходячи з отриманих даних, доцільне використання чотирьох послідовно з'єднаних свинцево-кислотних акумуляторних батарей (12 В, 90 А·год) загальною номінальною місткістю не менше 360 А·год і сумарним напругою 48 В.

Енергія від СБ, необхідна для електропостачання навантаження протягом періоду  $(k + m)$ , розраховується за формулою (2.3):

$$W_{CB\ k+m} = m \cdot 1,2 \int_0^{24} P_H dt + k \cdot 1,2 \int_0^{t_1} P_{H\ \text{мінь}} dt + k \int_{t_1}^{t_2} P_{H\ \text{світло}} dt + k \cdot 1,2 \int_{t_2}^t P_{H\ \text{мінь}} dt =$$

$$= 2 \cdot 1,2 \cdot 5600 + 5 \cdot 1,2 \cdot 800 + 5 \cdot 2400 + 5 \cdot 1,2 \cdot 2400 = 44600\ \text{Вт} \cdot \text{год}$$

Необхідна добова енергія СБ розраховується за формулою (2.4):

$$W_{CB\ 24} = \frac{W_{CB\ k+m}}{k} = \frac{44600}{5} = 8920\ \text{Вт} \cdot \text{год}$$

Сумарна добова енергія, що генерується ФЕП, безпосередньо залежить від структури і умов експлуатації СБ [12]. Нижче наведені розрахунки для кожного з варіантів структури АФЕУ, результати яких зведені в таблицю 2.1.

- 1) Структура АФЕУ – ШМ:

$$W_{CBM^2\ 24} = \frac{180 \cdot 10}{1,25} = 1440\ \text{Вт} \cdot \text{год}$$

- 2) Структура АФЕУ – ШМ ЕРП:

$$W_{CBM^2\ 24} = \frac{180 \cdot 10 \cdot 1,3}{1,25} = 1872\ \text{Вт} \cdot \text{год}$$

- 3) Структура АФЕУ – ДО:

$$W_{CBM^2\ 24} = \frac{180 \cdot 10}{1} = 1800\ \text{Вт} \cdot \text{год}$$

- 4) Структура АФЕУ – ДО ЕРП:

$$W_{CBM^2\ 24} = \frac{180 \cdot 10 \cdot 1,3}{1} = 2340\ \text{Вт} \cdot \text{год}$$

Необхідна площа сонячної батареї розраховується за формулою (2.5):

- 1)  $S_{CB} = \frac{8920}{1440} \approx 6,2 \text{ м}^2$  ;
- 2)  $S_{CB} = \frac{8920}{1872} \approx 4,8 \text{ м}^2$  ;
- 3)  $S_{CB} = \frac{8920}{1800} \approx 4,95 \text{ м}^2$  ;
- 4)  $S_{CB} = \frac{8920}{2340} \approx 3,8 \text{ м}^2$  .

Для розрахунку кількості сонячних батарей використані фотоелектричні перетворювачі «АХ-180М» потужністю 180 Вт і площею 1,3 м<sup>2</sup>. Вартість розрахована, виходячи з середньо ринкової на комплектуючі АФЕУ, і показує орієнтовну ціну кінцевої структури фотоелектричної установки.

Таблиця 2.1 – Зведена таблиця залежно необхідної площі фотоелектричних перетворювачів від структури АФЕУ

Структура АФЕУ	Площа ФЕП, м <sup>2</sup>	Необхідна кількість панелей СБ, шт	Орієнтовна * вартість конфігурації, грн
1) АФЕУ – ШМ	6,2	5	39126
2) АФЕУ – ШМ ЕРП	4,8	4	36953
3) АФЕУ – ДО	4,95	4	61166
4) АФЕУ – ДО ЕРП	3,8	3	57940
* Ціна вказана за окреме обладнання, а не за систему в зборі (Інформація з сайту e-ctr.com.ua)			

Таким чином, після проведення порівняльного аналізу енергетичної ефективності і параметрів АФЕУ виявлено, що обрана структура установки дуже впливає на необхідну площу сонячних батарей для одного і того ж графіка енергоспоживання. У варіантах структур з двохосним стеженням СБ за Сонцем і ЕРС (АФЕУ – ДО ЕРП) потужності СБ і структурі з установкою сонячних батарей, орієнтованих на Південь під кутом, рівним широті місця розташування



і стабілізації напруги СБ на заданому рівні, кількість СБ може варіюватися від 3 до 5 штук для АФЕУ малої потужності. Ефект від застосування системи ЕРС сонячних батарей можна порівняти з системою автоматичного стеження СБ за Сонцем, але в рази дешевше і простіше реалізується.

## 2.4 Висновки до розділу

1. Відомі різні способи і методи визначення параметрів і характеристик фотоелектричних установок, що дозволяють з тією чи іншою мірою точності розрахувати необхідні параметри її вузлів, але часто вони мають явно надмірну потужність або розраховуються, виходячи з даних інсоляції, які не дають точної цілорічної картини в конкретній місцевості.

2. Удосконалено методику проектування автономних енергетичних установок, яка базується на розрахунку енергобалансу і статистичних значеннях графіка інсоляції конкретної місцевості, що дозволяє в процесі проектування порівнювати і вибирати раціональний варіант структури та технічні параметри енергетичної установки для заданих умов експлуатації і графіка енергоспоживання.

3. Порівняльний аналіз енергетичної ефективності і параметрів автономних фотоелектричних енергетичних установок показав, що ефект від застосування системи екстремального регулювання потужності сонячних батарей можна порівняти з ефектом від системи автоматичного спостереження СБ за Сонцем, але ЕРП значно простіше реалізується.

4. Вартісний порівняльний аналіз структур автономних фотоелектричних енергетичних установок з установкою сонячних батарей, орієнтованих на Південь під кутом, рівним широті місця розташування і стабілізації напруги СБ на заданому рівні, а також з двохвісним стеженням СБ за Сонцем і ЕРС потужності СБ показав, що найбільш раціональним і вигідним варіантом побудови АФЕУ є структура з установкою сонячних батарей, орієнтованих на Південь і ЕРС.

## 3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Перетворювачі потужності сонячних батарей

Одним з найважливіших завдань, що виникають при проектуванні і створенні перетворювачів потужності (зарядних пристроїв) автономних фотоелектричних енергетичних установок, є узгодження рівнів напруги джерел енергії. З огляду на те, що напруга робочої точки вольт-амперної характеристики відповідає максимальній потужності нестабільно, перетворювач повинен бути регульованим. Необхідність забезпечення широкого діапазону регулювання напруги СБ при пошуку точки максимальної потужності істотно впливає на структуру побудови контролера заряду акумуляторних батарей і ускладнює визначення його енергетичних параметрів, а також розрахунок електрорадіоелементів силової схеми.

Контролери заряду будуються на основі безтрансформаторних перетворювачів постійної напруги, які забезпечують високе значення ККД за рахунок малої кількості силових елементів. Однак ці схеми мають обмежений діапазон регулювання, що ускладнює узгодження рівнів напруги сонячної і акумуляторної батарей. Узгодження досягається шляхом послідовного або паралельного з'єднання елементарних джерел, що складають АБ або СБ, що дозволяє налаштувати рівні напруги джерел таким чином, щоб діапазон регулювання перетворювача включав в себе точку максимальної потужності ВВХ з урахуванням її можливого дрейфу. При цьому не завжди вдається досягти прийнятних енергетичних характеристик системи.

Поширеним варіантом контролера заряду акумуляторних батарей (КЗАБ) на основі перетворювачів постійної напруги є найпростіший понижуючий перетворювач, представлений на рисунку 3.1,а. Перевагою схеми є стабільний струм заряду акумулятора, який забезпечувався б великою вихідною індуктивністю, однак переривчасте імпульсне споживання вхідного струму вимагає установки громіздкого С-фільтра. Регульовальна характеристика такого

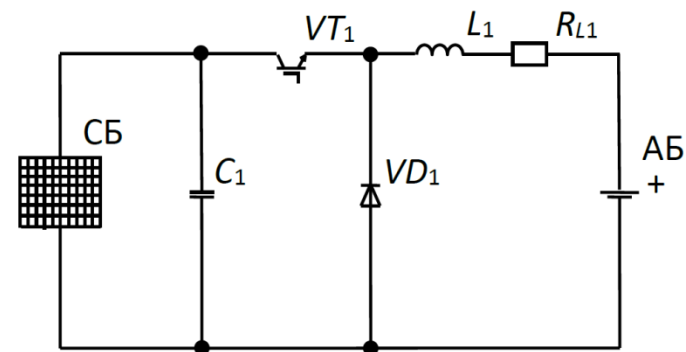
перетворювача, за умови безперервності струму дроселя, описується співвідношенням (3.1).

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

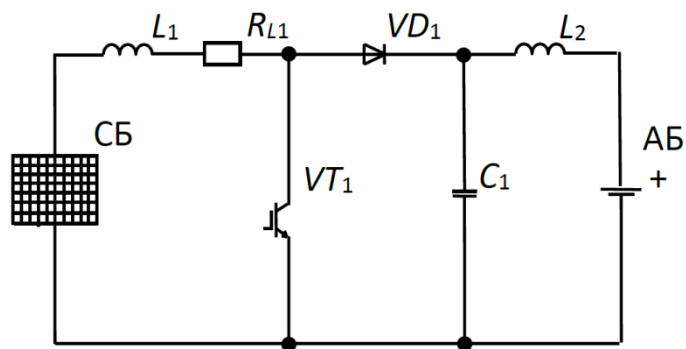
де  $\gamma$  – відносна тривалість відкритого стану транзистора;

$R_{L1}$  – активний опір дроселя  $L_1$ ;

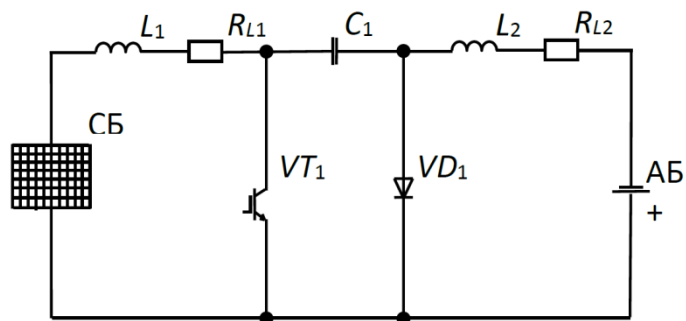
$R_H$  – опір навантаження.



а)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Регульовані перетворювачі енергії сонячної батареї:

а – понижуючий перетворювач; б – підвищуючий перетворювач;

в – перетворювач Кука

Регулювальна характеристика (3.1) відповідає роботі перетворювача від джерела ЕРС. При живленні перетворювача від сонячної батареї, що має нелінійну ВАХ, і роботі на акумуляторну батарею, яка є навантаженням з непостійним опором, характеристики істотно зміняться. Використовуючи вираз (3.1) і враховуючи, що регульованим параметром є напруга СБ, отримано наступний вираз.

$$U_{CB}^* = \frac{U_{CB}}{U_{AB}} = \frac{1 + R_{L1}/R_H}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{U_{AB}} \cdot I_{BHX}}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{U_{AB}} \cdot \frac{I_{BX}}{\gamma}}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}}{U_{AB}} \cdot \frac{I_{CB}}{\gamma^2}.$$

У зв'язку з істотною складністю виразів, що описують ВАХ реальної СБ, скористаємося математичною моделлю СБ, запропонованою в [13], де ВАХ задана трьома характерними точками: напругою холостого ходу  $U_{xx}$ , струмом короткого замикання  $I_{K3}$ , оптимальними значеннями струму  $I_0$  і напруги  $U_0$ :

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

використовуючи яке, отримаємо рівняння (3.3):

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

яке зв'язує регульований параметр  $U_{CB}$  з відносною тривалістю імпульсу управління  $\gamma$ . Опір втрат в дроселі зручно виразити відносною величиною  $R_{L1}^* = R_{L1} \cdot I_{K3} / U_{AB}$ .

Важливим параметром, що характеризує енергетичну ефективність КЗАБ, є коефіцієнт використання СБ – КР, який визначається співвідношенням фактично споживаної потужності від СБ і потужності оптимальної точки ВАХ:

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

Інший розглянутий критерій енергетичної ефективності – коефіцієнт корисної дії перетворювача ( $\eta$ ), який при нехтуванні втратами в транзисторі  $VT_1$ , тобто при обліку тільки втрат в дроселі  $L_1$ , можна отримати за виразом:

$$\eta = \frac{1}{U_{CB}^*} \cdot \frac{I_{BHX}}{I_{BX}} = \frac{1}{U_{CB}^*} \cdot \frac{1}{\gamma}.$$

Таким чином, задаючи ВАХ СБ за допомогою виразу (3.2), можна визначити залежності енергетичних параметрів перетворювача від керуючого впливу  $\gamma$ .

Доцільним є визначення енергетичних характеристик КЗАБ в крайніх точках його діапазону регулювання, тобто при ВАХ, відповідних крайніх значень напруги  $U_0$ . В результаті проведених досліджень встановлено, що для панелі АХ-180М максимальне значення напруги оптимальної точки відповідає сонячній погоді і температурі  $-30$  °С, при цьому ВАХ2 має параметри  $U_{xx} = 52$  В,  $I_{K3} = 4,8$  А,  $U_{01} = 43,1$  В,  $I_{01} = 4,3$ А. Мінімальне значення напруги оптимальної точки відповідає слабкій освітленості панелей при температурі від  $+60$  до  $+70$  °С. ВАХ1 в цьому випадку має параметри  $U_{xx} = 25,2$  В;  $I_{K3} = 2,1$  А;  $U_{02} = 21,8$  В;  $I_{02} = 1,8$  А. Графічно характеристики СБ представлені на рисунку 3.2.

Характеристики понижуючого перетворювача при роботі на ВАХ (рис. 3.2) при нарузі акумулятора  $U_{AB} = 24$  В і відносних втрати в дроселі  $R_{L1}^* = 0,05$  показані на рис. 3.3. При температурі  $-30$  °С, вхідна потужність перетворювача має максимум при  $\gamma = 0,59$ , що відповідає близькому до одиниці коефіцієнтом використання КР  $\rightarrow 1$ . Коефіцієнт корисної дії в цій точці має мінімум і становить  $0,93$  %. Слід зазначити, що у всьому діапазоні регулювання  $\gamma$  напруга СБ перевищує напруга АБ, тобто  $U_{CB}^* > 1$ . Збільшення напруги СБ обмежена

напругою холостого ходу СБ, яке досягається при  $\gamma = 0,46$ , в разі подальшого зменшення  $\gamma$  перетворювач переходить в режим переривчастого струму, і його параметри не можуть описуватися характеристикою (3.3), отриманою за умови безперервності струму дроселя.

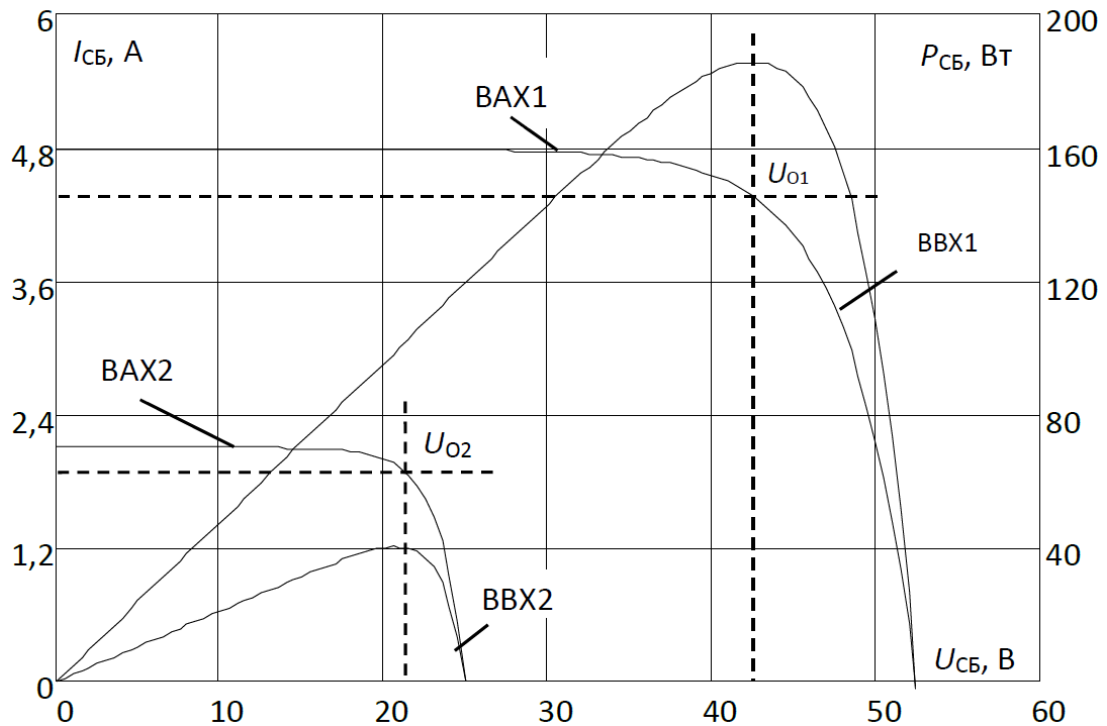


Рисунок 3.2 – Сімейство VAX і BBX фотоелектричних перетворювачів AX-180M

Зменшення напруги оптимальної точки VAX до значення  $U_0 = 21,8$  В при  $U_{AB} = 24$  В не дозволяє ефективно застосовувати перетворювач понижуючого типу, про що свідчать характеристики, представлені на рисунку 3.3, б. Видно, що діапазон регулювання перетворювача в цьому випадку дуже вузький, знаходиться в інтервалі 24-25В і не охоплює точку BBX з максимальною потужністю. Коефіцієнт використання в цьому випадку  $KP = 0,33$  при  $\gamma = 1$ . Результати говорять про ефективність застосування в цьому випадку підвищуючого перетворювача, що дозволяє отримати напругу СБ, яка менша напруги АБ ( $U_{CB} < U_{AB}$ ).

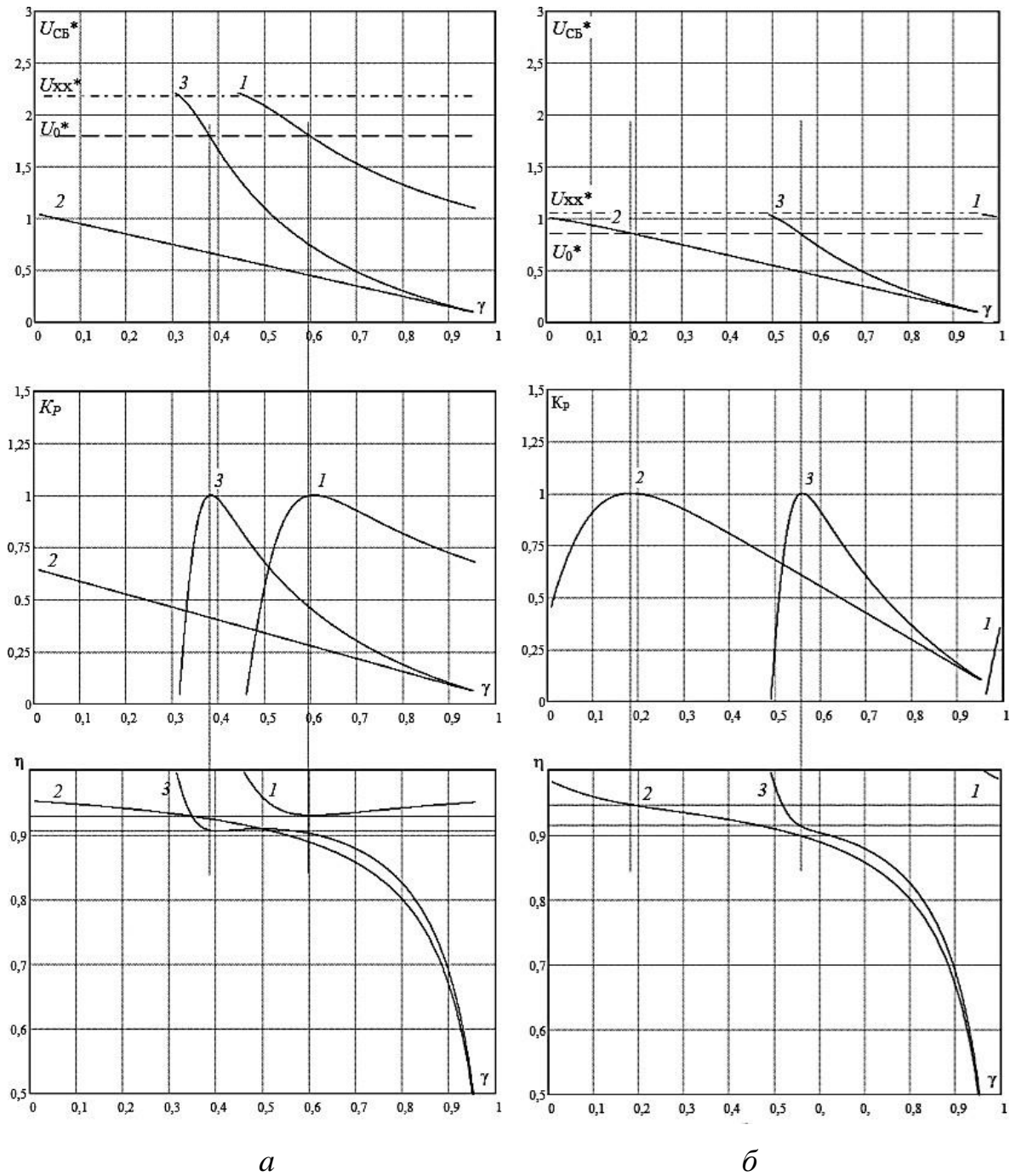


Рисунок 3.3 – Характеристики перетворювача енергії сонячної батареї на основі понижуючого перетворювача (1), підвищуючого (2), перетворювача Кука (3)

при  $U_{AB} = 24\text{В}$ ,  $R_{LI}^* = 0,05$  і параметрах:

*a*- ВАХ1  $U_0 > U_{AB}$ ; *б* – ВАХ2  $U_0 < U_{AB}$

Підвищуючий перетворювач (рисунок 3.1, б) має на вході дросель  $L_1$ , що забезпечує безперервність вхідного струму і стабільність робочої точки ВАХ по струму. З огляду на імпульсний режим заряду конденсатора  $C_1$ , необхідний вихідний дросель  $L_2$ , що забезпечує заряд АБ постійним струмом. Регульовальна характеристика підвищуючого перетворювача при роботі від ідеального джерела напруги за умови безперервності струму дроселя  $L_1$  описується співвідношенням (3.4).

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

Характеристика ідеального перетворювача показує збільшення напруги на всьому діапазоні регулювання, але наявність втрат у вхідному дроселі призводить до її спотворення при великих значеннях  $\gamma$ , що пов'язано з різким зростанням вхідного струму по відношенню до вихідного. Для визначення регульовальної характеристики, відповідної режиму роботи від СБ на навантаження у вигляді АБ, проведені перетворення, аналогічні проведеним для понижуючого перетворювача, і отримано вираз:

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

Характеристики підвищуючого перетворювача, отримані за формулою (3.5) при тих же параметрах, представлені графічно на рисунку 3.3. Результати показують, що перетворювач підвищуючого типу має лінійну регульовальну характеристику, при цьому обумовлена втратами вхідного дроселя нелінійність, властива рівнянню (3.4), в рівнянні (3.5) відсутня, що пояснюється тим, що робоча точка СБ в цьому випадку знаходиться на гілці стабілізації струму. Практичним висновком є неможливість цієї схеми налаштуватися на точку



ВАХ СБ з максимальною потужністю при  $U_0 > U_{AB}$ , в результаті чого коефіцієнт використання СБ становить  $KP = 0,65$  і відповідає  $\gamma = 0$ .

Домогтися успішного регулювання точки ВАХ з максимальною потужністю при будь-якому співвідношенні напруг  $U_{AB}$  і  $U_0$  можна за допомогою складеного широкодіапазонного перетворювача, наприклад, перетворювача Кука, який має вхідний каскад на основі підвищуючого, а вихідний на основі понижуючого перетворювача (рис. 3.1, в). Регулювальна характеристика перетворювача Кука описується співвідношенням [14]:

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

при цьому для співвідношення струмів виконується умова

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

Отримати характеристики перетворювача Кука при роботі від СБ на АБ

можна, вирішивши рівняння відносно змінної  $\gamma$ , при підстановці  $\psi = \frac{1-\gamma}{\gamma}$

рівняння набуде вигляду

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

і має один додатній корінь

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

який з урахуванням (3.2) дозволяє отримати шуканий аналітичний зв'язок.

Результати розв'язку рівняння представлені на рисунку 3.3. Видно, що перетворювач Кука дозволяє регулювати напругу СБ в точках, близьких до максимальної потужності, тобто отримати  $K_P \rightarrow 1$  як у випадку  $U_0 > U_{AB}$  при  $\gamma = 0,38$  з ККД, рівним  $\eta = 0,91$ , так і при  $U_0 < U_{AB}$  при  $\gamma = 0,58$  і  $\eta = 0,92$ .

Таким чином, при інших рівних умовах перетворювач Кука є єдиним безтрансформаторним перетворювачем, що дозволяє отримати близький до одиниці коефіцієнт використання СБ при будь-якому співвідношенні напруг  $U_0$  і  $U_{AB}$ . Слід враховувати, що перетворювач Кука здійснює подвійне перетворення енергії і має завищену – по відношенню до розглянутих схем – габаритну потужність силових елементів. Це проявляється при виборі транзистора, комутуючого сумарний струм АБ і СБ, а також в наявності відразу двох дроселів  $L_1$  і  $L_2$ . Погіршення ККД перетворювача, пов'язане з введенням додаткового дроселя, можна спостерігати за даними таблиці 3.1 і рисунка 3.3. Для спрощення порівняльного аналізу дані розрахунків зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри схем перетворювачів постійної напруги

Схема перетворювача	ВАХ1 ( $U_0 > U_{AB}$ )		ВАХ2 ( $U_0 < U_{AB}$ )	
	ККД, $\eta$	$K_P$	ККД, $\eta$	$K_P$
Понижуючий перетворювач	0,93	1	0,98	0,33
Підвищуючий перетворювач	0,95	0,65	0,95	1
Перетворювач Кука	0,91	1	0,92	1

Зіставлення перетворювачів постійної напруги за критеріями коефіцієнта використання потужності сонячної батареї і коефіцієнта корисної дії показує, що перетворювач Кука, за рахунок широкого діапазону регулювання, має кращий  $K_P$  фактично при будь-яких умовах роботи ( $K_P \rightarrow 1$ ), але гірші значення ККД.

Підвищуючий перетворювач працює в режимах СБ, які спостерігаються при затіненні або виході Сонця з тіні. Вони як правило, короткочасні, тому застосування даного перетворювача в КЗАБ недоцільно.

Понижуючий перетворювач найбільш просто узгоджується з системами екстремального регулювання потужності сонячних батарей шляхом регулювання шпаруватості роботи силових ключів і при стандартних ВАХ найбільш оптимальний для застосування в контролерах заряду АФЕУ з ЕРП СБ.

### **3.2 Способи регулювання максимуму потужності сонячних батарей**

Для отримання максимальної енергії від сонячної батареї необхідно здійснювати пошук точки оптимуму ВАХ фотоелектричних перетворювачів. Пошук і підтримка оптимального енергетичного режиму дозволяє отримати додаткову енергію, підвищивши тим самим енергетичну ефективність фотоелектричної установки [14].

Існує ряд систем екстремального регулювання з різними способами організації пошуку екстремуму: кроковим, обчислення похідної, напруги холостого ходу, струмової розгортки, гібридним, нечіткої логіки. Багато виробників контролерів заряду мають фірмові назви для свого методу пошуку точки максимальної потужності СБ, але в кінцевому рахунку всі ці методи є варіаціями крокового способу (ітерації навколо точки екстремуму).

У кроковому способі система пошуку екстремуму ВАХ на невелику величину змінює вхідний опір, внаслідок чого змінюється напруга масиву фотоперетворювачів. Після чого проводиться вимір потужності, якщо потужність збільшується – контролер продовжує змінювати напругу в цьому ж напрямку, поки потужність не буде зменшуватися. Алгоритм крокового способу представлений на рисунку 3.4. Поширеність даного способу обумовлена простотою його реалізації, незважаючи на те, що він призводить до коливань потужності [15].

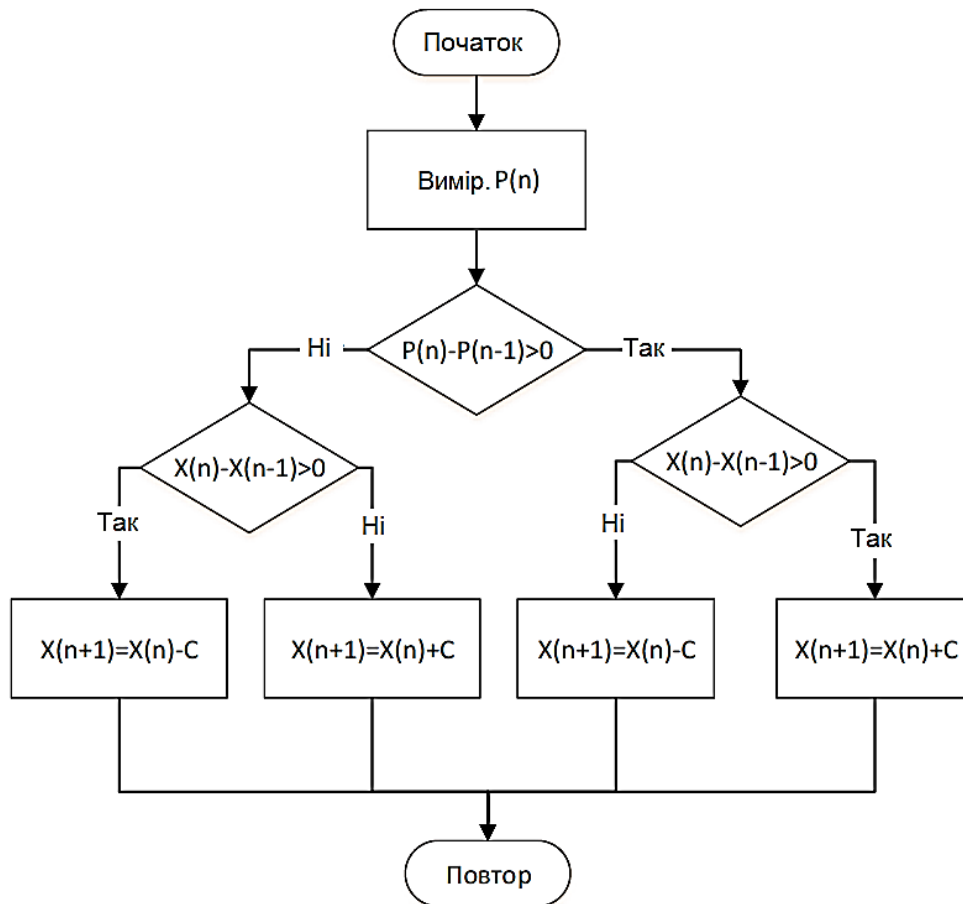


Рисунок 3.4 – Алгоритм крокового способу пошуку екстремуму

Спосіб обчислення похідної заснований на тому, що значення похідної в точці максимуму потужності ВАХ сонячної батареї дорівнює нулю. Контролер виробляє обчислення для визначення знака зміни потужності по відношенню до напруги, щоб передбачити ефект від зміни напруги. Відповідно до алгоритму способу обчислення похідної (рисунок 3.5) контролер проводить обчислення, визначаючи точку максимальної потужності і порівнюючи значення  $\Delta I/\Delta U$  з  $I/U$  [16].

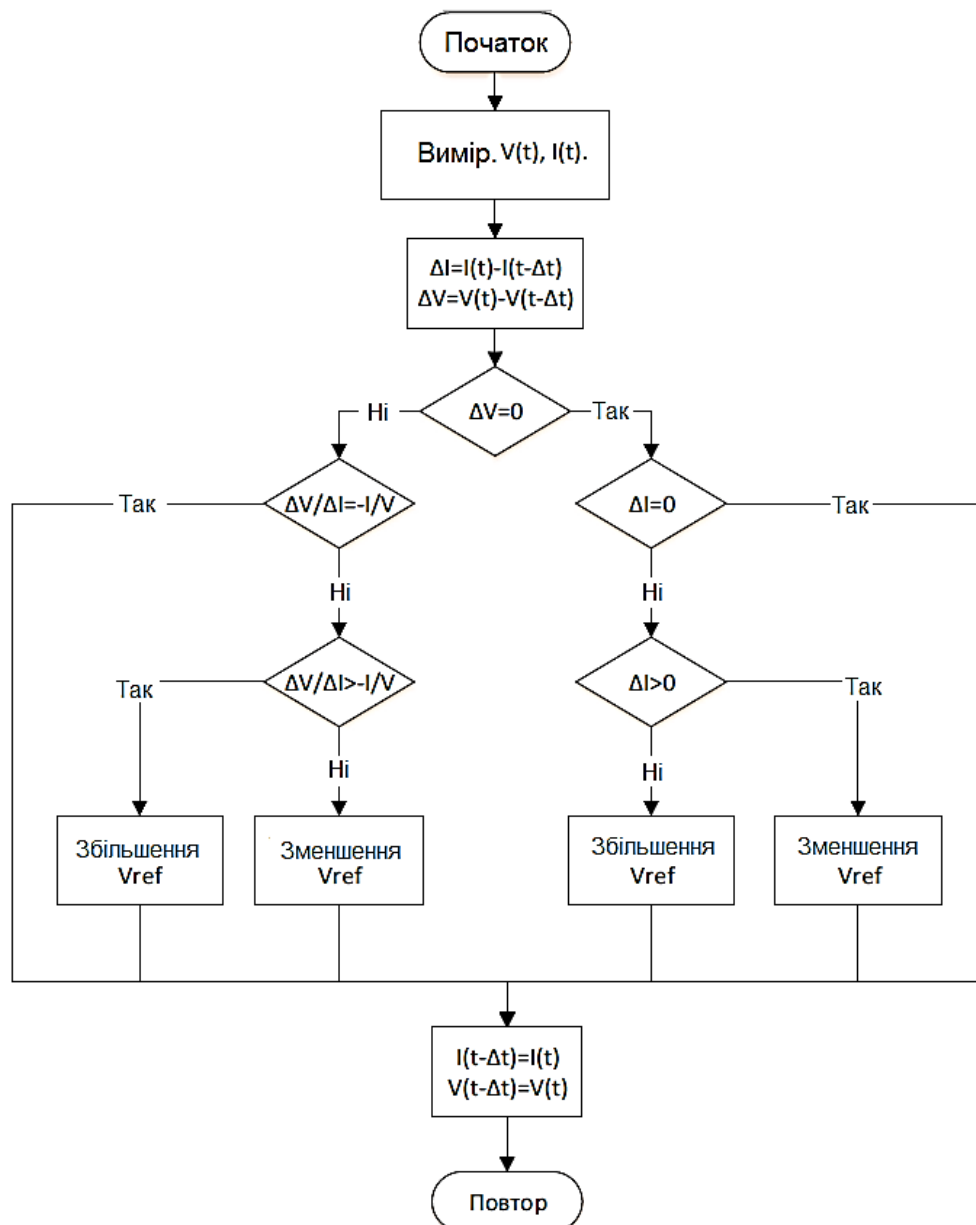


Рисунок 3.5 – Алгоритм способу пошуку екстремуму за похідною

За умови рівності величин ( $I/V = \Delta I/\Delta V$ ) вихідна напруга відповідає значенням максимальної потужності. Екстремальний регулятор підтримує цю напругу, поки не зміняться умови освітленості, після чого цикл алгоритму повторюється. Цей спосіб більш вимогливий до обчислювальної потужності контролера, але при інсоляції, яка швидко змінюється, здатний відстежувати точку максимуму краще крокової.

Також відомий спосіб напруги холостого ходу (постійної напруги). термін «спосіб постійної напруги» в класифікації способів ЕРП СБ

застосовується авторами для опису різних технік. Найчастіше це спосіб, при якому вихідна напруга регулюється постійною величиною незалежно від умов, або спосіб, в якому величина визначається відношенням поточної вихідної напруги до напруги холостого ходу. Робоча точка в даному випадку не є точкою максимальної потужності, але цей спосіб в постійних швидко мінливих умовах інсоляції, на відміну від інших, продовжує працювати. Найчастіше використовується спільно з іншими способами регулювання максимуму потужності.

Система екстремального регулювання, що функціонує за цим способом, відключає СБ від навантаження і проводить вимірювання напруги холостого ходу, після чого задає робоче значення напруги з постійним коефіцієнтом. Внаслідок чого робоча точка фотоелектричного модуля знаходиться поруч або безпосередньо в точці оптимуму ВАХ СБ [17].

Гібридний спосіб пошуку точки максимальної потужності ВАХ СБ поєднує в собі кілька способів пошуку екстремуму. Одне з найпоширеніших поєднань – це кроковий спосіб і спосіб напруги холостого ходу. Алгоритм представлений на рис. 3.6. Під час першого циклу пошуку точка максимуму потужності з малою точністю оцінюється на основі способу напруги холостого ходу. Після чого під час другого циклу алгоритму на основі крокового способу проводиться точне визначення екстремуму ВАХ СБ.

Кроковий спосіб і спосіб обчислення похідної можуть визначити локальний максимум потужності і забезпечити реальну точку екстремуму ВАХ СБ. Основним мінусом крокового способу є те, що система, перебуваючи в оптимальній точці ВАХ, створює коливання вихідної потужності ФЕП навіть при постійному рівні освітленості, що призводить до незначних втрат потужності.

Спосіб обчислення похідної в порівнянні з кроковим може визначити екстремум без коливань вихідної потужності. Але при швидко мінливих умовах інсоляції може працювати хаотично. Цей спосіб більш вимогливий до

обчислювальної потужності контролера, що може призвести до зниження частоти дискретизації і додаткових втрат енергії СБ.

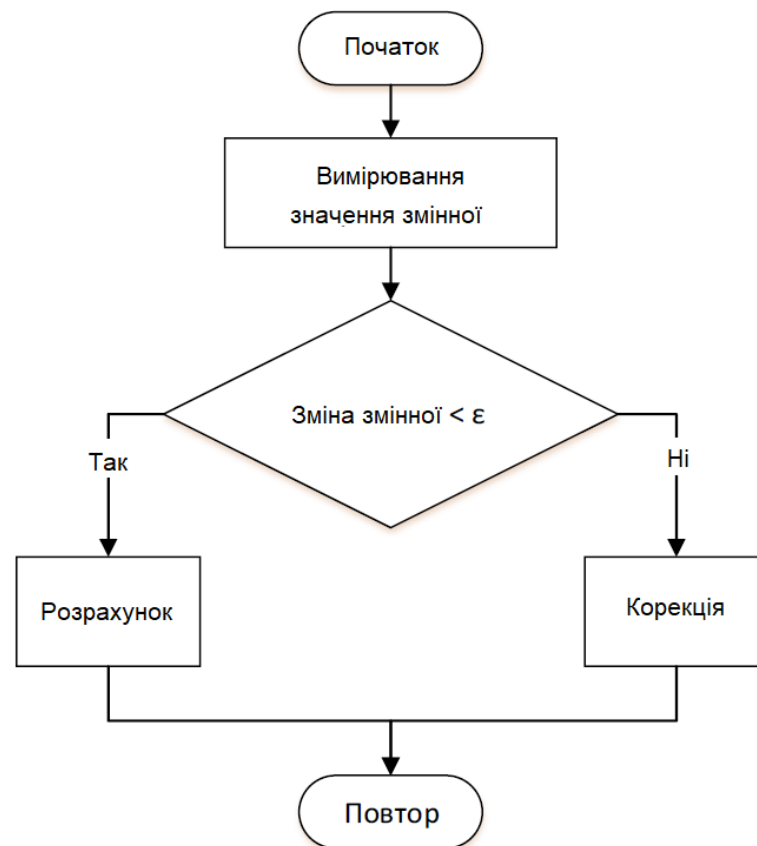


Рисунок 3.6 – Цикл алгоритму гібридного способу пошуку екстремуму

У способі напруги холостого ходу під час проведення вимірювань втрачається вироблена СБ енергія. Також приведена величина відношення точки максимальної потужності до напруги холостого ходу (як правило, 76 %) не завжди є точною для конкретного випадку.

### **3.3 Моделювання систем екстремального крокового регулювання потужності сонячної батареї**

Вимоги, що пред'являються до екстремальних систем, і особливо ВАХ СБ, обумовлюють необхідність дослідити точність регулювання екстремуму в

залежності від крокової зміни напруги стабілізації СБ ( $\Delta U_{cm}$ ) і визначити швидкодію екстремального регулятора, яка гарантуватиме стійкість системи при дрейфі вольт-амперної характеристики.

При проектуванні автономних фотоелектричних енергетичних установок з екстремальним кроковим регулятором (ЕКР) з метою прогнозування їх енергетичної ефективності необхідно знати залежність точності регулювання екстремуму від крокової зміни напруги стабілізації СБ. Для цього побудована імітаційна модель АФЕУ в графічному середовищі імітаційного моделювання MatLab Simulink (рис. 3.7).

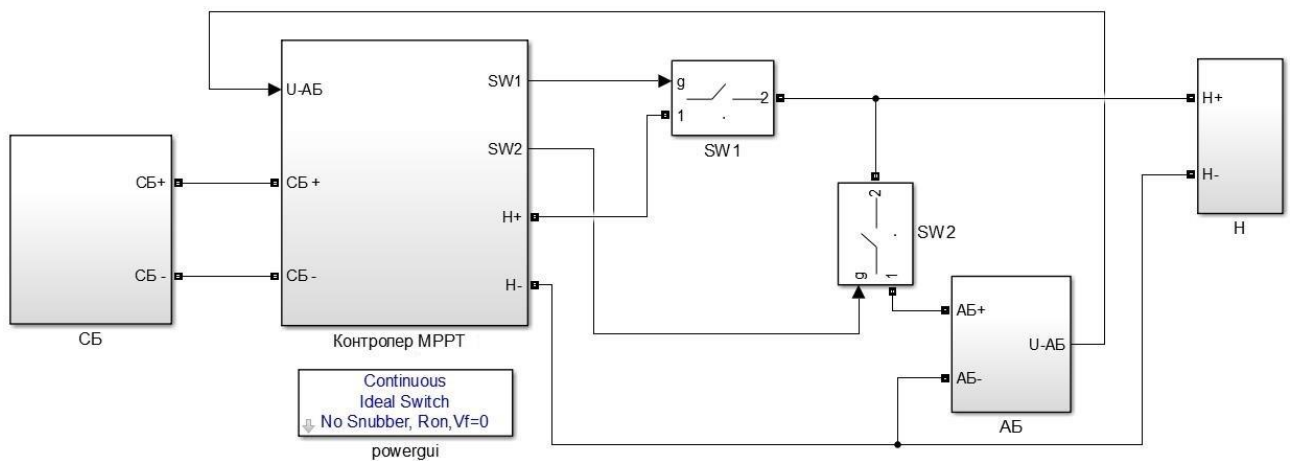


Рисунок 3.7 – Імітаційна модель АФЕУ

Модель складається з сонячної і акумуляторної батареї, навантаження (Н), контролера заряду з функцією екстремального регулювання потужності СБ (Контролер МРРТ) і ключів (SW1, SW2) для перемикання між режимами роботи енергетичної установки (електроживлення навантаження від АБ чи СБ). Нижче представлені моделі кожного блоку системи.

Модель контролера заряду АБ з функцією ЕКР СБ (рисунок 3.8) складається з датчиків струму і напруги (С.М.1, С.В.1), силової частини (понижуючий перетворювач) і блоку контролера, реалізованого за допомогою MatLab Function. У функції реалізований алгоритм екстремального крокового регулювання потужності з можливістю зміни його параметрів (частота кроку регулювання, величина кроку).



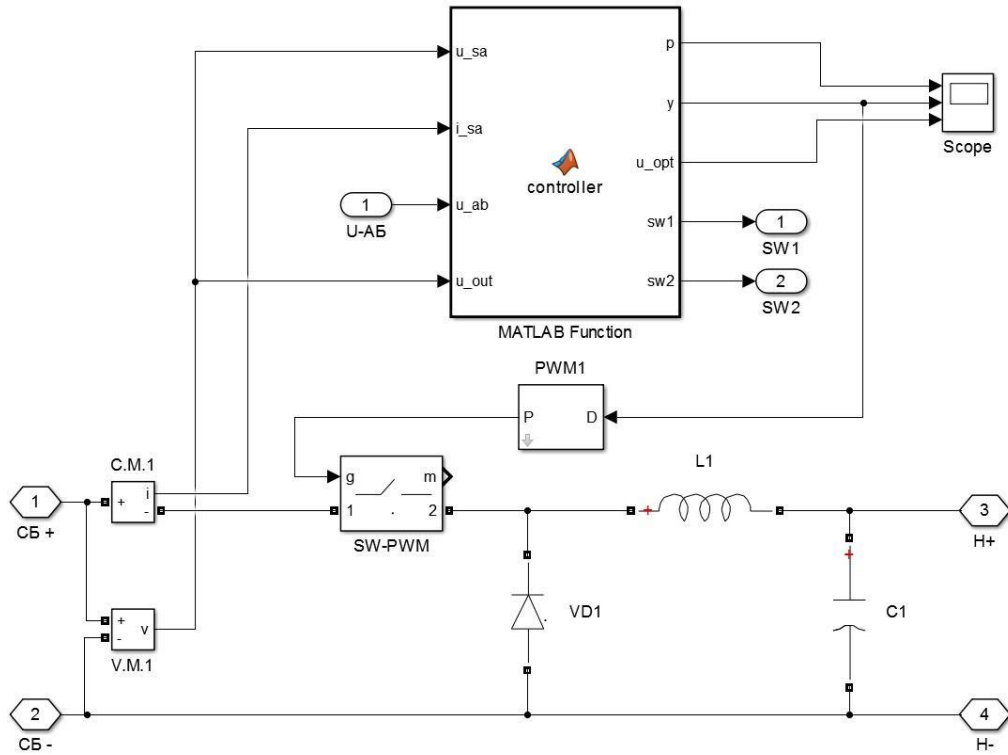


Рисунок 3.8 – Модель контролера заряду АБ з функцією ЕКР СБ

На рисунку 3.9 представлена розроблена модель сонячної батареї, в якій

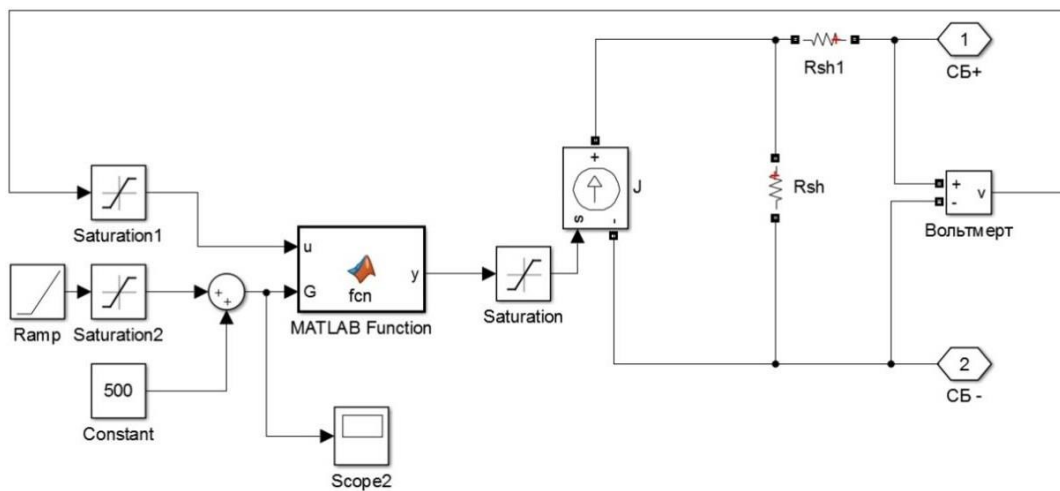


Рисунок 3.9 – Модель сонячної батареї

передбачена можливість задання таких параметрів, як струм короткого замикання, напруга холостого ходу сонячного елемента, температура

навколишнього середовища, рівень освітленості ФЕП, а також кількість фотоелектричних перетворювачів в СБ. Модель побудована на основі джерела струму і MatLab Function, а також блоку J, за допомогою якого задається освітленість СБ.

На рисунку 3.10 а представлена модель акумуляторної батареї, що входить до складу АФЕУ, яка реалізована на основі джерела напруги, з можливістю задання номінальної ємності і напруги, а також можливістю заряду і розряду (рис. 3.10, б).

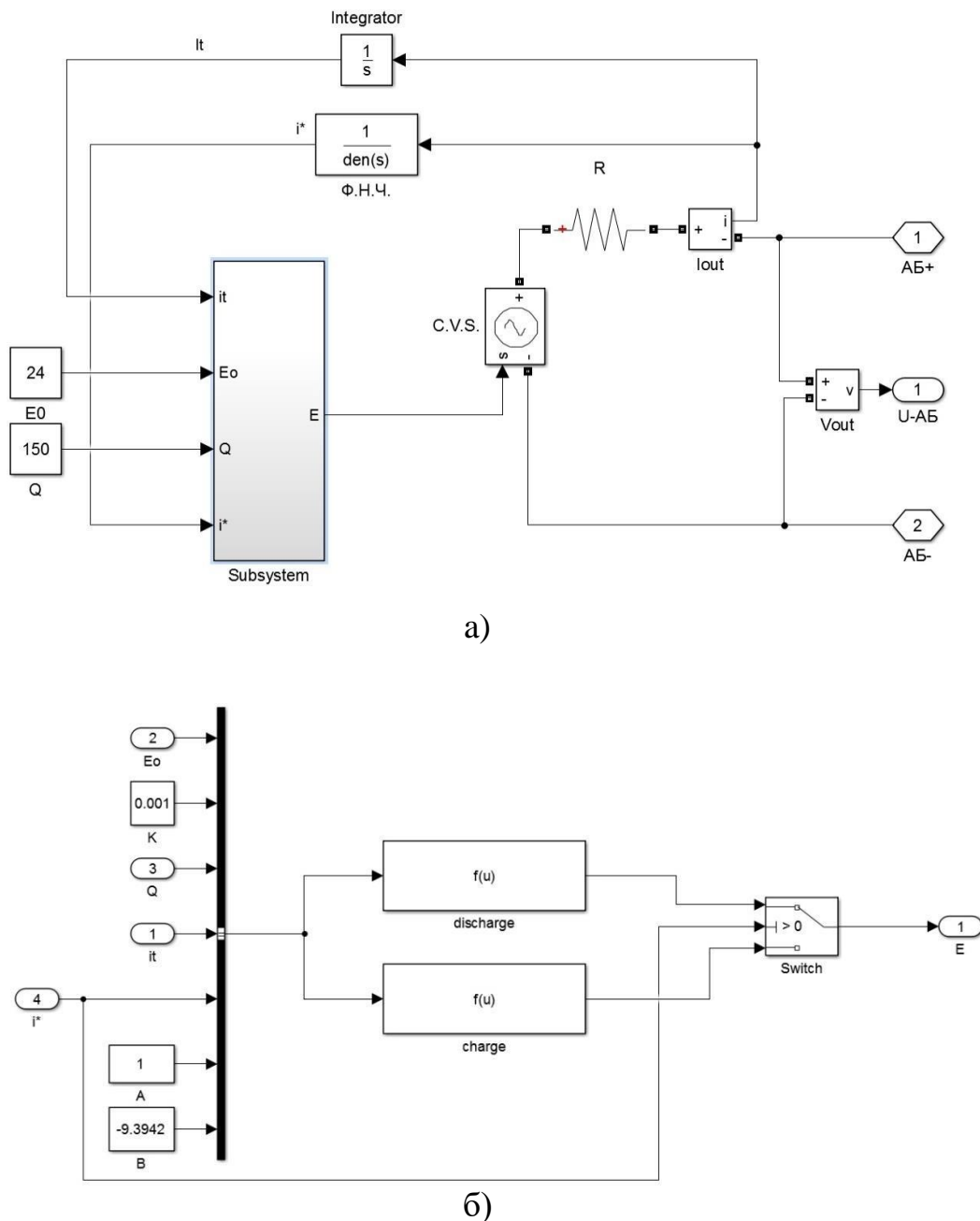


Рисунок 3.10 – Модель АБ входить до складу АФЕУ: а – структура моделі; б – підсистема (Subsystem)

Всі вимірювання проводяться за допомогою блоків вольтметрів, амперметрів і осцилографів. Параметри всіх блоків моделі АФЕУ були задані з урахуванням технічних характеристик, а також на основі отриманих експериментальних даних.

Розроблена модель АФЕУ адекватно відображає логіку роботи реальної енергетичної установки, що дозволяє використовувати її при проектуванні таких систем.

Вольт-амперні та вольт-ватні характеристики фотоелектричних панелей АХ-180М при різних значеннях температури і освітленості, виміряні в різні пори року, наведені на рис. 3.11, з аналізу яких випливає, що значення, яке генерується, істотно залежить від місця розташування сонячної батареї і умов її експлуатації, реальні практичні значення  $U_{opt}$  знаходяться в межах 22 – 44В.

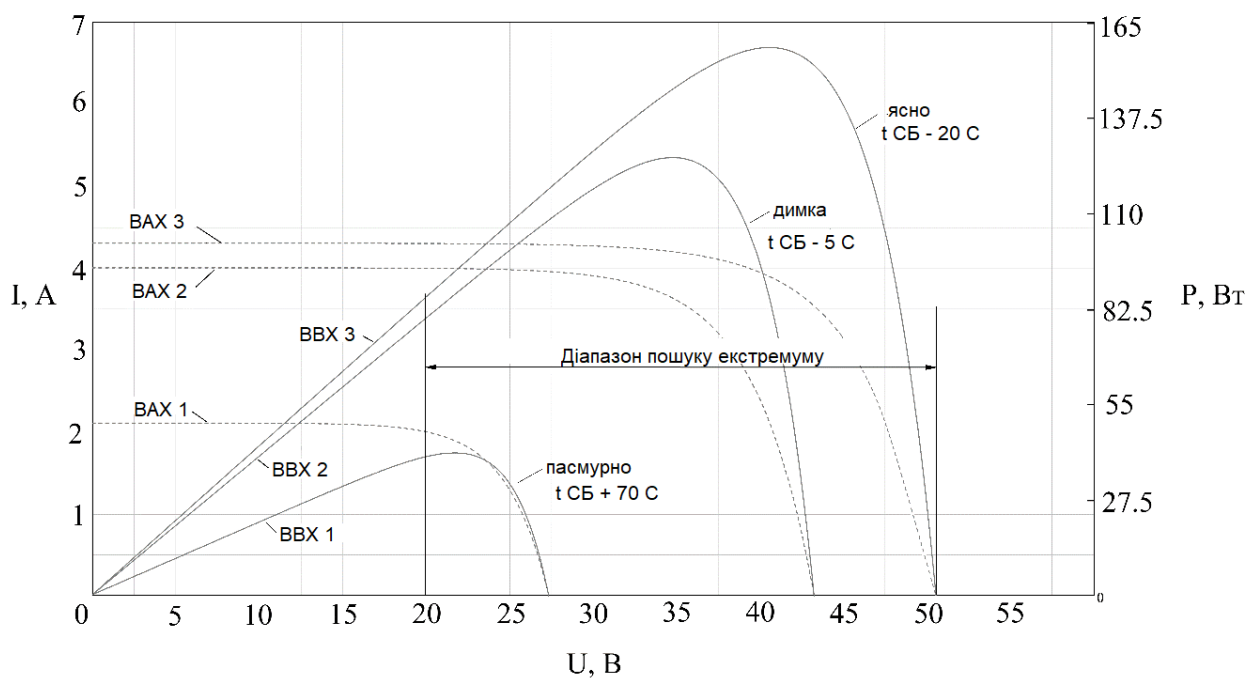


Рисунок 3.11 – Сімейство вольт-амперних і вольт-ватних характеристик фотоелектричних панелей АХ-180М при різній температурі і ступеня освітленості

Діапазон зміни  $U_{opt}$  22 – 35 В панелей АХ-180М, наведений в технічних характеристиках виробника СБ, відрізняється від експериментально виміряних

значень. Це пояснюється тим, що виробник фотоелектричних панелей приводить технічні характеристики при температурі модуля 25 °С.

Температура фотоелектричних панелей істотно залежить від конструкції, інтенсивності охолодження потоками вітру і рівня освітленості, і навіть взимку на відкритих майданчиках при слабкому вітрі перевищує температуру повітря на 10-20 градусів. Влітку, в закритих від вітру місцях, перегрів панелей сонячної батареї може досягати 30-40 °С. Таким чином, з аналізу ВАХ і ВВХ сонячних батарей слідує, що при проектуванні енергетичних установок з ЕКР необхідно приймати робочий температурний діапазон фотоелектричних модулів від -20 до + 70 °С, що веде до зміни  $U_{opt}$  і  $U_{xx}$  стандартних фотоелектричних панелей, наприклад АХ-180М, на 25 В.

Отже, робочий діапазон пошуку екстремуму потужності повинен бути не менше 30 В (20-50 В) (див. рис. 3.7).

На рисунках 3.12 – 3.20 представлені тимчасові діаграми, отримані за допомогою розробленої моделі АФЕУ. На них наведені характеристики контролера заряду АБ (струм, напруга, потужність) в режимі екстремального крокового регулювання потужності СБ, при постійному рівні освітленості і різних параметрах ЕКР.

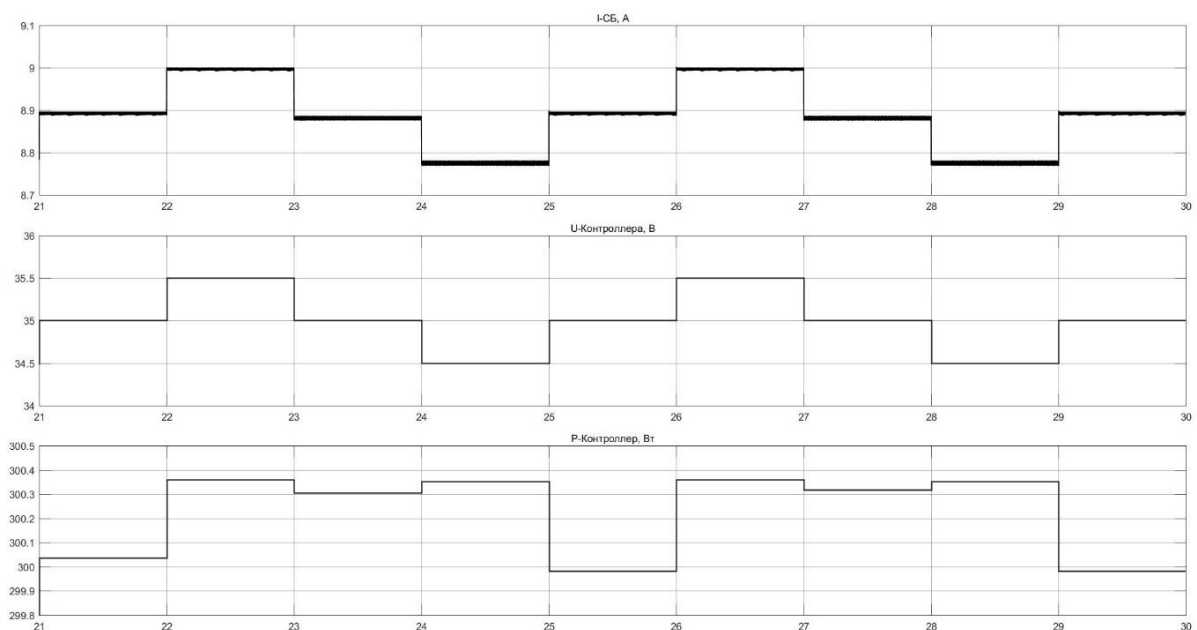


Рисунок 3.12 – Часові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР (величина кроку – 0,5 В, частота кроку – 1 Гц)

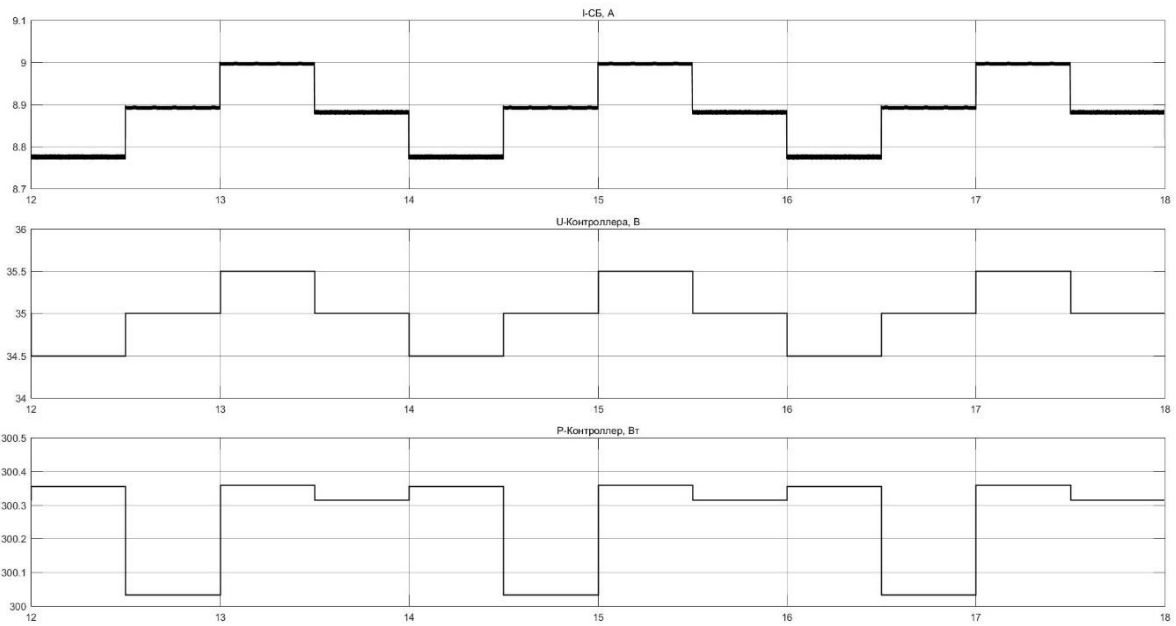


Рисунок 3.13 – Часові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР  
(величина кроку – 0,5 В, частота кроку – 2 Гц)

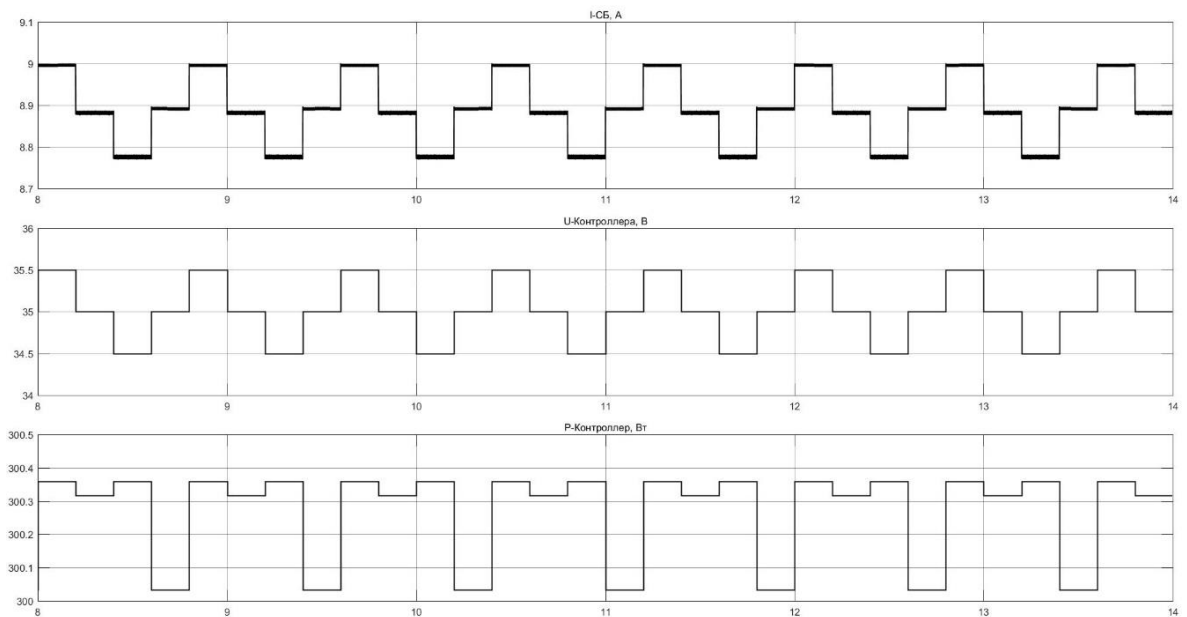


Рисунок 3.14 – Часові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР  
(величина кроку – 0,5 В, частота кроку – 5 Гц)

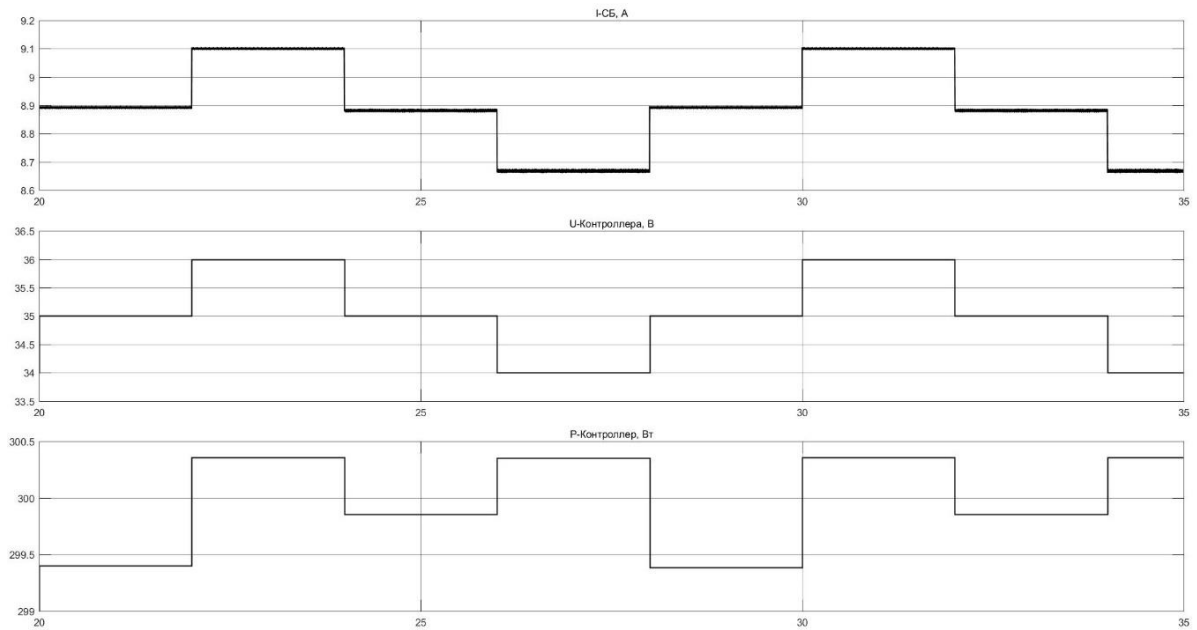


Рисунок 3.15 – Тимчасові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР (величина кроку – 1 В, частота кроку – 0,5 Гц)

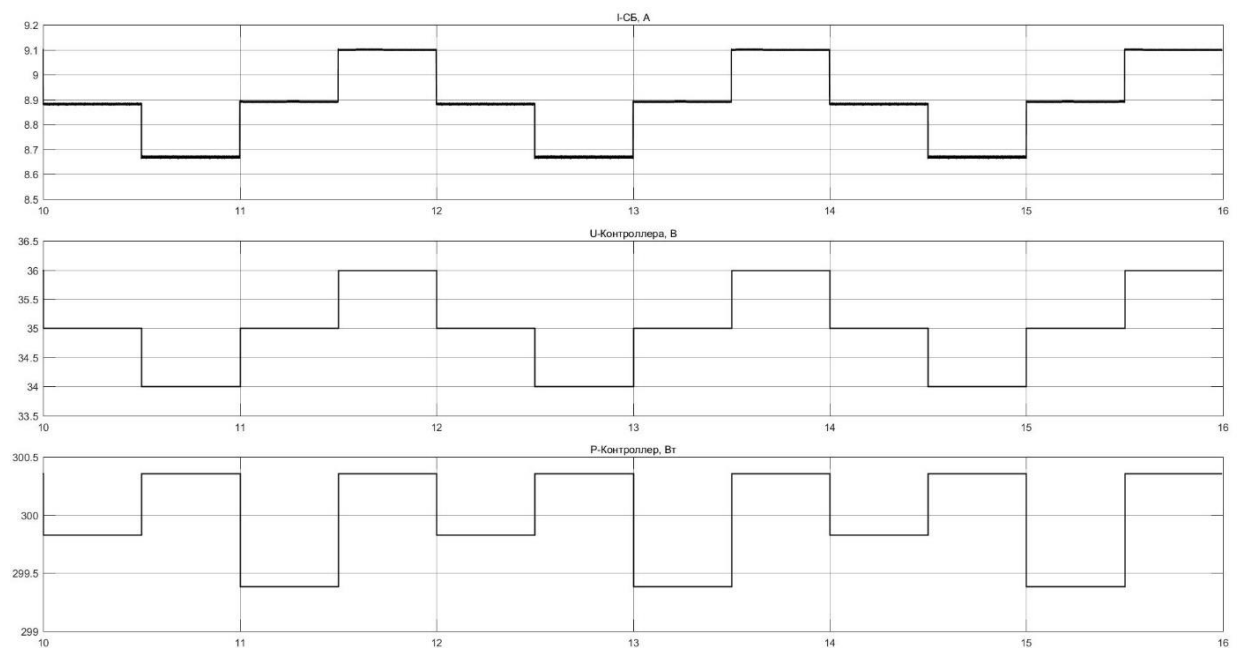


Рисунок 3.16 – Часові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР (величина кроку – 1 В, частота кроку – 2 Гц)

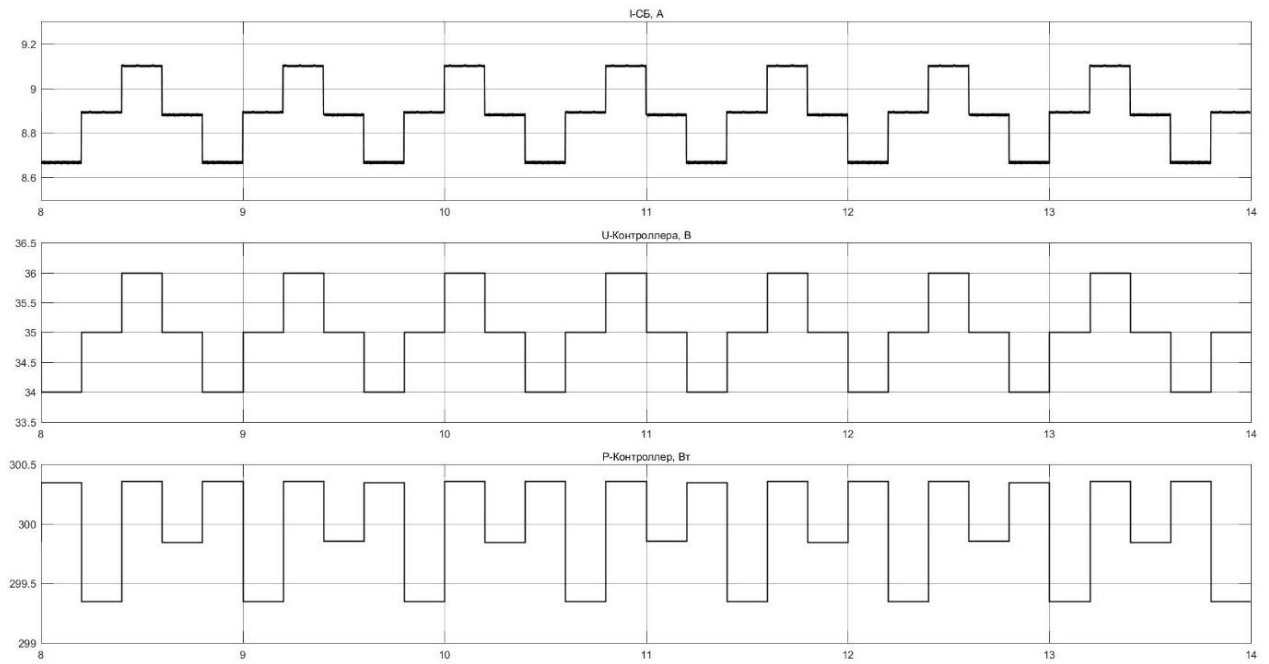


Рисунок 3.17 – Часові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР  
(величина кроку – 1 В, частота кроку – 5 Гц)

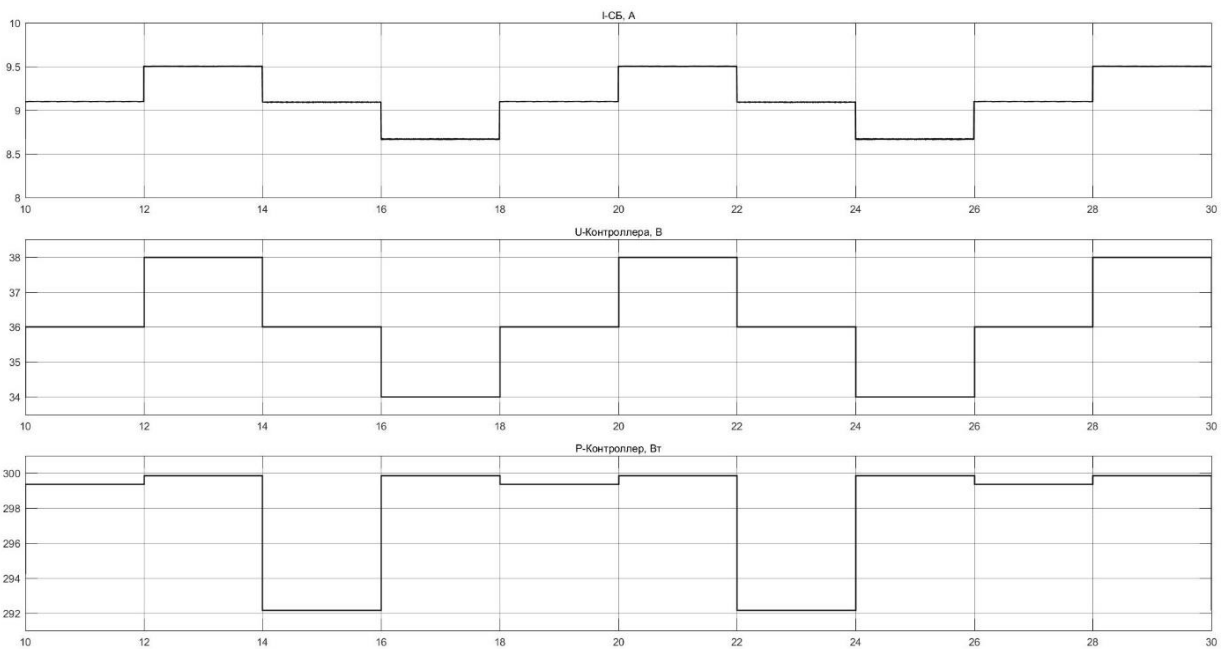


Рисунок 3.18 – Часові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР  
(величина кроку – 2 В, частота кроку – 0,5 Гц)

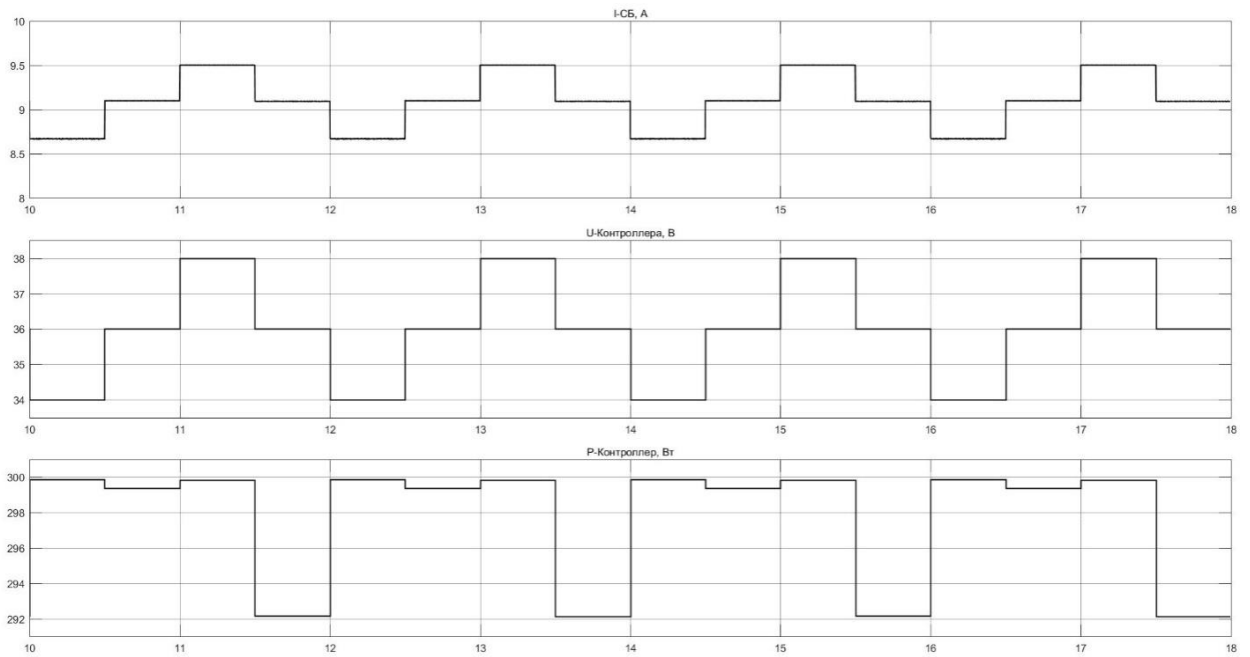


Рисунок 3.19 – Часові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР  
(величина кроку – 2 В, частота кроку – 2 Гц)

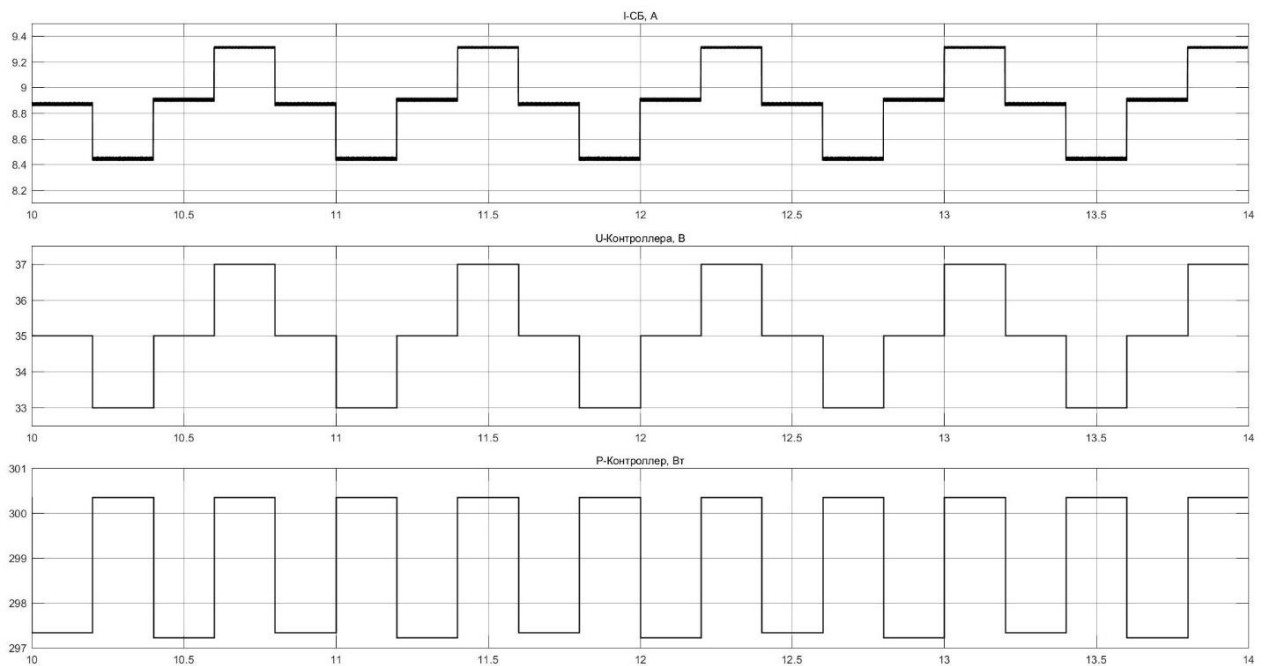


Рисунок 3.20 – Часові діаграми характеристик контролера заряду в режимі ЕКР  
(величина кроку – 2 В, частота кроку – 5 Гц)



На основі результатів моделювання розрахована залежність енергетичної ефективності використання СБ по потужності  $P_{СБ} / P_{макс.СБ}$  від значення крокової зміни  $U_{СБ}$  ( $\Delta U_{ст}$ ), результати наведені в таблиці 3.2 і на рисунку 3.21, де  $P_{нд}$  – недовикористана потужність СБ. З аналізу значень енергетичної ефективності використання СБ за потужністю виходить, що при покроковій зміні  $U_{СБ}$ , до 2 В гарантується відбір максимальної потужності від СБ з точністю не менше 98 % ( $P_{СБ} < 2 \% P_{макс.СБ}$ ).

Таблиця 3.2 – Значення енергетичної ефективності використання СБ по потужності від значення крокової зміни

Параметр	Значення			
$\Delta U_{ст}, В$	0,5	1	1,5	2
$P_{СБ} < P_{макс.СБ}, \%$	99,7	99,6	99,2	98,5

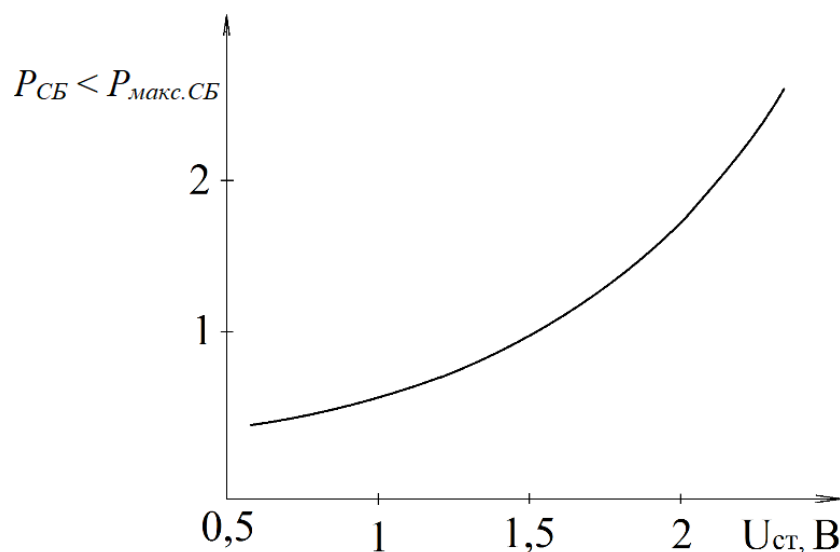


Рисунок 3.21 – Залежність енергетичної ефективності використання СБ по потужності від значення зміни кроку

В системі автоматичної оптимізації крокового типу при незмінних умовах експлуатації теоретично можлива мінімальна кількість кроків два або три [60]. Двокроковий режим пошуку екстремуму потужності здійснюється, коли робоча точка на ВВХ при черговій кроковій зміні  $U_{СБ}$  потрапляє в область

оптимального значення потужності СБ (рисунок 3.22) і при кожній другій кроковій зміні  $U_{CB}$  відбувається зменшення потужності, що генерується СБ.

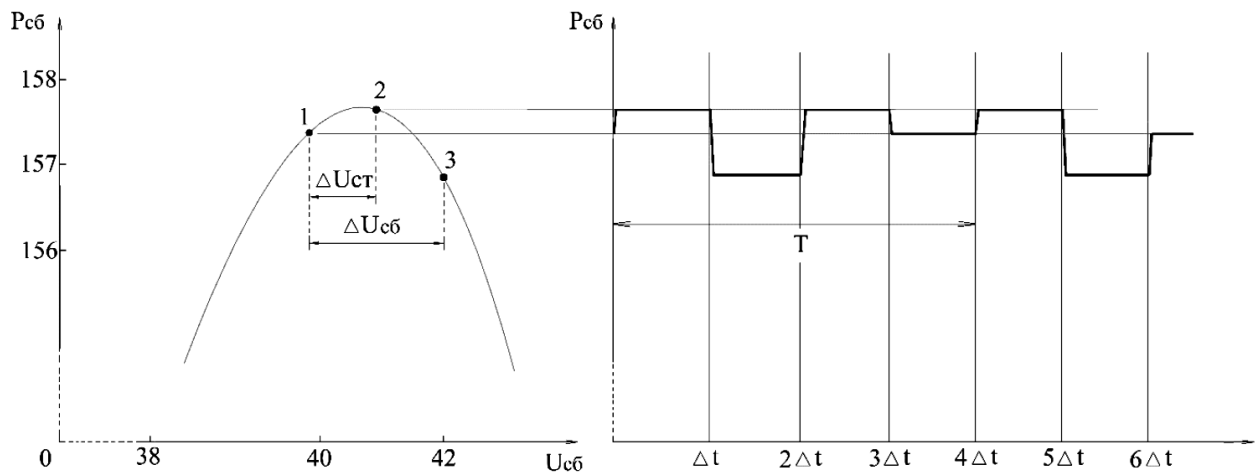


Рисунок 3.22 – Діаграма двокрокового режиму пошуку екстремуму потужності СБ

Трикроковий режим теоретично можливий в аналогових системах вимірювання потужності СБ і наявності гістерезису в системі порівняння потужності при кожній кроковій зміні  $U_{CB}$  ( $\Delta U_{cm}$ ). В системі автоматичної оптимізації крокового типу з цифровими системами вимірювання потужності СБ трьох кроковий режим практично неможливий.

Характеристики СБ (ВАХ, ВВХ) автономних енергетичних установок змінюються при зміні умов експлуатації. При затіненні фотоелектричних панелей хмарами змінюється освітленість. Час настання затінення як правило складає 5-10 секунд, проте при цьому переважно змінюється рівень потужності, яка генерується, але практично не встигає змінитися температура панелей, тому будь-яких ускладнень регулювання екстремуму потужності не відбувається. При великій швидкості зміни освітленості теоретично система може перейти в однокроковий режим, тобто напрямок пошуку екстремуму потужності змінюється після кожного кроку. Схематично процес регулювання в цьому випадку показаний на рис. 3.23. Вимірювання потужності екстремальним регулятором відбувається в точках 2 і 3'.

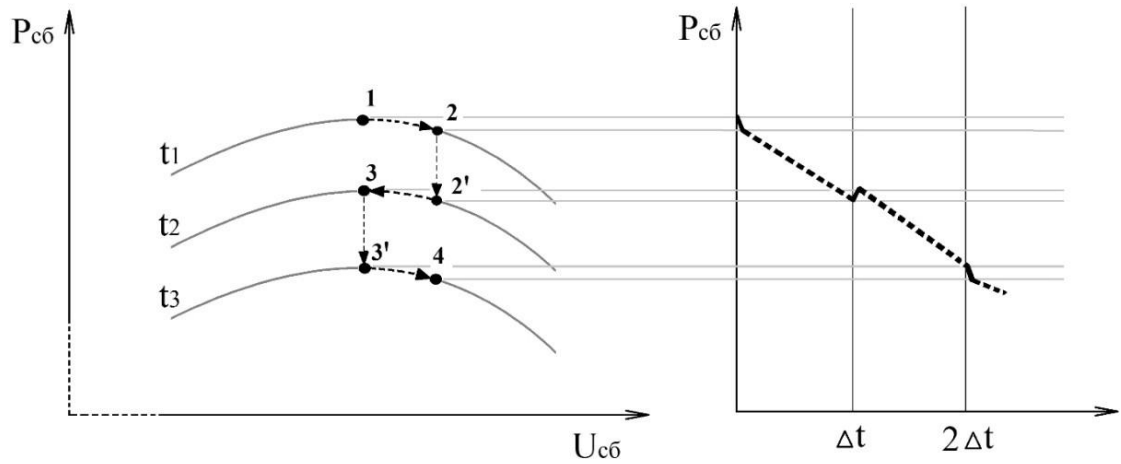


Рисунок 3.23 – Діаграми регулювання екстремуму потужності СБ при затіненні фотоелектричних панелей хмарами

Експериментально встановлено (рис. 3.24), що охолодження фотоелектричних панелей після їх щільного затінення хмарами до температури навколишнього повітря відбувається за 10-12 хвилин. При появі Сонця температура фотоелектричних панелей може максимально підвищитися на  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  також за 10-12 хвилин, тобто максимальне значення швидкості дрейфу ВВХ ( $V_{U_{СБ}}$ ) може становити  $\approx 0,03\text{ В/с}$ .

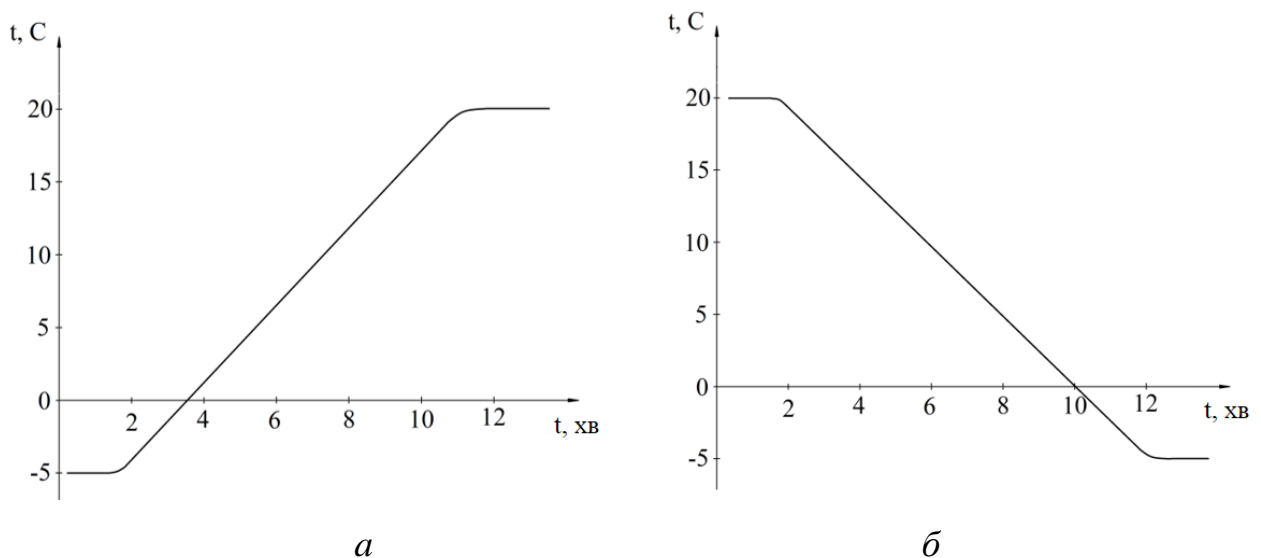


Рисунок 3.24 – Залежність зміни температури СБ від часу при нагріванні (а) і охолодженні (б) фотоелектричної панелі

Необхідна швидкодія екстремального регулятора в залежності від значення кроку  $\Delta U_{cm}$  знаходиться з виразу (3.6).

$$\Delta t = 1 / f_{eur} \leq \Delta U_{CT} / V_{UCB} \quad (3.6)$$

де  $V_{UCB}$  – швидкість зміни напруги СБ в оптимальній точці.

Але ця умова є достатньою лише для випадків горизонтального дрейфу ВВХ СБ, тобто при  $P_{CB\max}(t) = \text{const}$ . Такий режим можливий тільки теоретично, при пропорційному впливі на дрейф ВВХ температури і освітленості. Так як в переважній більшості випадків дрейф ВВХ при прогріванні панелей СБ супроводжується зменшенням екстремального значення потужності, то при некоректному виборі частоти кроку, близькому до критичного значення  $\Delta U_{cm} / V_{CB}$ , можливий реверс системи внаслідок зменшення потужності СБ навіть при русі робочої точки в бік екстремуму потужності (рис. 3.25). Тому для забезпечення стійкості необхідне виконання додаткової умови  $\Delta P_{CB} > 0$ , тобто збільшення потужності, викликане кроковою зміною  $U_{CB}$ , має компенсувати її зменшення, обумовлене дрейфом характеристики.

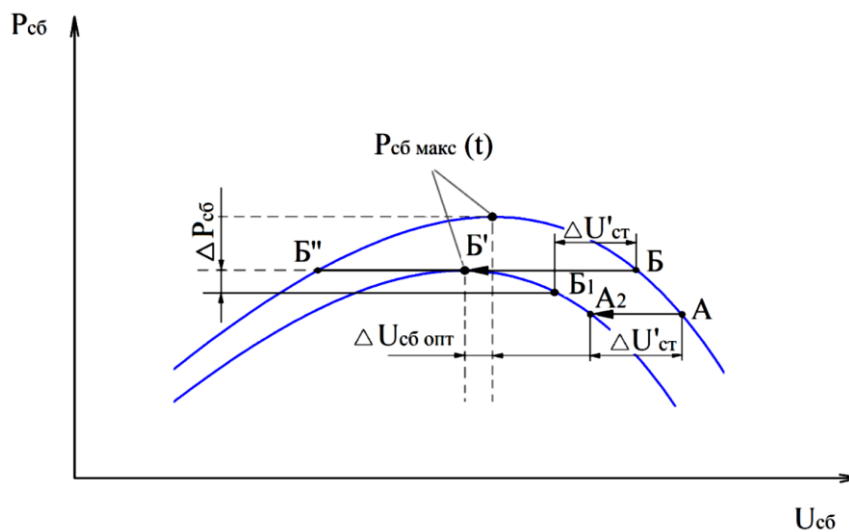


Рисунок 3.25 – Діаграми дрейфу ВВХ СБ

Рівняння дрейфуючої ВВХ, апроксимованої квадратичною параболою, має вигляд (3.7).

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

На підставі наведеного рівняння параболи визначається вираз для збільшення вихідного сигналу при допущенні, що характеристика дрейфує з малим спотворенням форми, тобто  $a(t) \gg \Delta a(t)$ :

$$\Delta P_{CB} = P_{CB} U_{CB};t - P_{CB} U_{CB} - \Delta U_{CB};t - \Delta t
 \tag{3.8}$$

або

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{CB} &= 2a t \Delta U_{CT} \left[ U_{CB} - U_{CBонм} t \right] - 2a t \Delta U_{CBонм} \Delta t \left[ U_{CB} - U_{CBонм} t \right] - \\
 &- a t \left[ \Delta U_{CT} - \Delta U_{CBонм} \Delta t \right]^2 + \Delta P_{CBмакс} \Delta t .
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

При заданих умовах дрейфу ( $\Delta U_{CBонм}(\Delta t)$ ;  $\Delta P_{CBмакс}(\Delta t)$ ) можна визначити співвідношення тривалостей кроків і значень одиничної зміни  $\Delta U_{CT}$ , що забезпечує стійку роботу ЕКР. Діапазон можливих значень параметра  $a(t)$  знаходиться за умови  $P_{CB}(U_{CB}, t) = 0$  і зміні  $U_{CB}$  від  $U_{xx}$  до  $2U_{CBонм}$ .

Таким чином, для контролера заряду АБ з кроковим екстремальним регулятором потужності СБ, що входять до складу автономної енергетичної установки зі стандартними фотоелектричними панелями з номінальною напругою 35 В (при температурі 25 °С), визначено діапазон пошуку екстремуму потужності в залежності від температури і освітленості СБ, рівний 30 В. При використанні цифрової системи управління і кроку екстремального регулятора від 0,5 до 1 В енергетична ефективність пристрою становить понад 98 % від максимально можливої потужності СБ. При змінних ВАХ під час нестабільних

зовнішніх умов система повинна показувати стабільну та ефективну роботу, здійснюючи пошук екстремуму в двокроковому та однокроковому режимах.

### **3.4 Висновки до розділу**

1. Понижуючий перетворювач постійної напруги найбільш просто узгоджується з системами екстремального регулювання потужності сонячних батарей шляхом регулювання шпаруватості роботи силових ключів і при стандартних ВАХ найбільш оптимальний для застосування в контролерах заряду АФЕУ з ЕРП СБ.

2. Система екстремального регулювання на основі способу обчислення похідної здатна визначити екстремум в умовах, які швидко змінюються, але може працювати хаотично і створювати значні коливання потужності. Також в порівнянні з кроковим способом збільшується час обчислень через ускладнення алгоритму, яке призводить до зниження частоти дискретизації, і додаткових втрат енергії сонячних батарей.

3. Кроковий спосіб пошуку екстремуму забезпечує стійке регулювання максимуму потужності сонячної батареї і коефіцієнт її використання не менше 98 % в будь-яких умовах експлуатації СБ. При коливаннях вихідної потужності фотоперетворювачів під час роботи системи втрата потужності незначна.

4. Для контролера заряду АБ з кроковим екстремальним регулятором потужності СБ визначено діапазон пошуку екстремуму потужності в залежності від температури і освітленості СБ, рівний 30 В. При використанні цифрової системи керування і кроці екстремального регулятора від 0,5 до 2 В енергетична ефективність пристрою становить понад 98 % від максимально можливої потужності СБ. При змінних ВАХ під час нестабільних зовнішніх умов система повинна показувати стабільну і ефективну роботу, здійснюючи пошук екстремуму в двокрокових і однокрокових режимах.

5. У середовищі MatLab Simulink розроблено імітаційну модель

автономної фотоелектричної енергетичної установки, що складається з сонячної і акумуляторної батарей, контролера заряду з функцією екстремального регулювання потужності СБ і навантаження. Дана модель адекватно відображає логіку роботи АФЕУ, що дозволяє використовувати її при проектуванні енергетичних установок.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

### **4.1 Заходи безпеки при монтажі електроустановок**

Роботи в електроустановках, що стосується заходів безпеки, діляться на три категорії [18]:

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

У випадку одночасної роботи в електроустановках напругою до і понад 1000 В категорії робіт визначаються як для установок більше 1000 В.

До робіт, які виконуються зі зняттям напруги, належать роботи, які здійснюються в електроустановці (або її частини), в якій з струмопровідних частин знято напругу і доступ в електроустановки (або їх частини), що знаходяться під напругою, стало неможливим.

До робіт, які виконуються без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них, належать роботи, що проводяться безпосередньо на цих частинах. Роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати не менше як двом працівникам, з яких керівник робіт повинен мати групу IV, інші – групу III.

В електроустановках напругою понад 1000 В роботи без зняття напруги на струмопровідних частинах і поблизу них слід виконувати із застосуванням засобів захисту для ізоляції працівника від струмопровідних частин або від землі. У випадку ізоляції працівника від землі роботи слід виконувати згідно спеціальних інструкцій або технологічними картами, в яких передбачені необхідні заходи безпеки.

Під час роботи в електроустановках напругою до 1000 В без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу від них необхідно:



- захистити розташовані поблизу робочого місця інші струмопровідні частини, які знаходяться під напругою, і до яких можливо випадковий дотик;
- працювати в діелектричній взуття, стоячи або на ізолювальних підставці або на діелектричному килимі;
- застосовувати інструмент з ізолювальними рукавами (у викруток, крім того, повинен бути ізольований стрижень); за відсутності такого інструменту слід користуватися діелектричними рукавичками.

Під час виконання робіт без зняття напруги на струмопровідних частинах за допомогою ізолювальних засобів захисту необхідно:

- Тримати ізолювальні частини засобів захисту за рукави до обмежувального кільця;
- Розміщувати ізолювальні частини засобів захисту так, щоб не виникла небезпека перекриття по поверхні ізоляції між струмопровідними частинами двох фаз чи замикання на землю;
- Користуватися тільки сухими і чистими ізолювальними частинами засобів захисту з непошкодженим лаковим покриттям.

У разі виявлення порушень лакового покриття чи інших несправностей ізолювальних частин засобів захисту користування ними забороняється.

У процесі роботи із застосуванням електрозахисних засобів (ізолювальні штанги та кліщі, електровимірювальні кліщі, покажчики напруги) допускається наближення працівника до струмопровідних частин на відстань, яка визначається довжиною ізолювальної частини цих коштів.

Всі працівники, які знаходяться у приміщеннях з чинним електрообладнанням електростанцій і підстанцій (за винятком щитів керування релейних та їм подібних приміщень), в ЗРУ, ВРУ, в колодязях, тунелях і траншеях зобов'язані користуватися захисними касками.

## 4.2 Допомога при ураженні електричним струмом в електроустановках напругою до 1000 В

Перша медична допомога — це комплекс заходів, спрямованих на відновлення або збереження здоров'я потерпілих, здійснюваних немедичними працівниками (взаємодопомога) або самим потерпілим (самодопомога) [18]. Найважливіше положення надання першої допомоги — її терміновість. Чим швидше вона надана, тим більше сподівань на сприятливий наслідок.

Послідовність надання першої допомоги:

- усунути вплив на організм ушкоджуючих факторів, котрі загрожують здоров'ю та життю потерпілих, оцінити стан потерпілого;
- визначити характер та важкість травми, найбільшу загрозу для життя потерпілого і послідовність заходів щодо його рятування;
- виконати необхідні заходи з рятування потерпілих в послідовності терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, здійснити штучне дихання, провести зовнішній масаж серця);
- підтримати основні життєві функції потерпілого до прибуття медичного працівника;
- викликати швидку медичну допомогу або вжити заходів щодо транспортування потерпілого до найближчого лікувального закладу.

Для звільнення потерпілого від струмоведучих частин або провода напругою до 1000 В слід скористатись канатом, палицею, дошкою або; будь-яким сухим предметом, що не проводить електричного струму.

Якщо електричний струм проходить в землю через потерпілого і він судорожно стискає один провід, то простіше перервати струм, відокремивши потерпілого від землі (підсунувши під нього суху дошку, або відтягнувши за ноги від землі вірьовкою, або відтягнувши за одяг), дотримуючись при цьому запобіжних заходів. Можна також перерубати дроти сокирою з сухою ручкою або перекусити їх інструментом з ізольованими ручками. Перерубувати або

перекушувати проводи слід пофазово, тобто кожний провід окремо, при цьому рекомендується стояти на сухих дошках, на дерев'яній драбині.

Заходи долікарської допомоги залежать від стану, в якому знаходиться потерпілий після звільнення від електричного струму. Після звільнення потерпілого від дії електричного струму необхідно оцінити його стан. У всіх випадках ураження електричним струмом необхідно обов'язково викликати лікаря незалежно від стану потерпілого.

Якщо потерпілий при свідомості та стійке дихання і є пульсом, але до цього втрачав свідомість, його слід покласти на підстилку з одягу, розстебнути одяг, котрий затруднює дихання, забезпечити приплив свіжого повітря, розтерти і зігріти тіло та забезпечити повний спокій, дати понюхати нашатирний спирт, сполоснути обличчя холодною водою. Якщо потерпілий, котрий знаходиться без свідомості, прийде до тями, слід дати йому випити 15—20 краплин настоянки валеріани і гарячого чаю.

Ні в якому разі не можна дозволяти потерпілому рухатися, а тим більше продовжувати роботу, оскільки відсутність важких симптомів після ураження не виключає можливості подальшого погіршення стану. Лише лікар може робити висновок про стан здоров'я потерпілого. Якщо потерпілий дихає рідко і судорожно, але у нього не намацується пульсу необхідно відразу зробити йому штучне дихання.

За відсутності дихання та пульсу у потерпілого внаслідок різкого погіршення кровообігу мозку розширюються зіниці, зростає синюшність шкіри та слизових оболонок. У таких випадках допомога повинна бути спрямована на відновлення життєвих функцій шляхом проведення штучного дихання та зовнішнього (непрямого) масажу серця.

Потерпілого слід переносити в інше місце лише в тих випадках, коли йому та особі, що надає допомогу, продовжує загрозовувати небезпека або коли надання допомоги на місці не можливе. Для того, щоб не втрачати час, не слід роздягати потерпілого. Не обов'язково, щоб при проведенні штучного дихання потерпілий знаходився в горизонтальному положенні. Якщо потерпілий

знаходиться на висоті, необхідно перед спуском на землю зробити штучне дихання безпосередньо в люльці, на щоглі і на опорі.

Опустивши потерпілого на землю, необхідно відразу розпочати проведення штучного дихання та масажу серця і робити це до появи самостійного дихання і відновлення діяльності серця або передачі потерпілого медичному персоналу.

### **4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики у воєнний час**

На основі всебічного аналізу факторів, що впливають на стійкість роботи об'єктів енергетики, робляться висновки про ймовірність виникнення аварій, стихійних лих, терористичних актів та їх впливу на виробничу діяльність і визначаються основні напрямки (шляхи) підвищення стійкості функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу [19]:

1. Забезпечення надійного захисту робітників та службовців від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих і засобів ураження
2. Захист основних виробничих фондів від впливу вражаючих факторів аварій, катастроф, стихійних лих та засобів ураження, в тому числі і від вторинних вражаючих факторів;
3. Забезпечення стабільності і безперервності управління виробництвом та ЦЗ;
4. Забезпечення надійності постачання об'єкта енергоносіями.

Для надійного функціонування об'єктів енергетики в надзвичайних ситуаціях завчасно організовуються і проводяться заходи, спрямовані на підвищення стійкості їх роботи. До них відносяться:

1. Інженерно-технічні заходи (ІТЗ).
2. Технологічні заходи.
3. Організаційні заходи.

*Інженерно-технічні заходи* – заходи, спрямовані на забезпечення підвищення стійкості будівель, споруд, обладнання, енергетичних систем до впливу НС.

*Технологічні заходи* – заходи, спрямовані на здійснення підвищення стійкості шляхом зміни технологічного режиму, що виключає виникнення вторинних факторів ураження.

*Організаційні заходи* – заходи, спрямовані на завчасну розробку і планування дій керівного складу, особового складу, штабу ЦЗ, служб, невоєнізованих формувань об'єктів енергетики в умовах надзвичайних ситуацій.

Основними напрямками підвищення стійкості функціонування є наступне:

- забезпечення захисту населення і його життєдіяльності;
- раціональне розміщення виробничих сил та потужностей на території об'єкта енергетики, регіону;
- підготовка до роботи в умовах НС мирного та воєнного часу;
- підготовка до виконання робіт по відновленню об'єктів в умовах НС;
- підготовка системи управління.

Всі ці заходи повинні забезпечити максимально можливе зниження втрат і руйнувань та зменшити можливість виникнення повторних зон зараження при впливі РР, ОР та НХР. Зміст таких заходів, виходячи з галузевих і інших нормативних документів, конкретизується для кожної територіальної ланки..

Ми знаємо, що електропостачання є основою всякого виробництва. Для забезпечення надійного електропостачання в НС при його проектуванні та будівництві повинні бути враховані наступні основні вимоги, що впливають із завдань цивільного захисту:

1. Електропостачання повинно здійснюватися від енергосистем, до складу яких входять електростанції, що працюють на різних видах палива.

2. Великі електростанції слід розміщувати одну від одної і від великих міст на значних відстанях.

3. Районні понижуючі підстанції, диспетчерські пункти енергосистем та лінії електропередач необхідно розміщувати розсереджено і надійно захищати.

4. Постачання електроенергією великих міст слід передбачати від двох незалежних джерел.

Крім того, необхідно створювати автономні резервні джерела електропостачання. Для цього можна використовувати рухливі електростанції на залізничних платформах, малопотужні електростанції, не включені до енергосистеми. Система електропостачання повинна мати грозозахисту систему та захист від впливу електромагнітного імпульсу ядерного вибуху.

Енергетичні споруди та електричні мережі повинні проектуватися з урахуванням забезпечення стійкого електропостачання категорійних міст і об'єктів. Схема електричних мереж енергосистем при необхідності повинна передбачати можливість автоматичного розподілу енергосистеми на збалансовані, незалежно працюючі частини. При проектуванні енергетичних систем і їхнього об'єднання теплові (конденсаційні) електростанції слід розміщати поза зонами можливого катастрофічного затоплення. У категорійних містах припускається розміщення тільки теплоелектроцентралей незалежно від їхньої встановленої потужності з максимальним віддаленням їх від центрів житлової і промислової забудов. Нові атомні електростанції та атомні теплоелектроцентралі повинні розміщатися з урахуванням їх впливу на навколишнє середовище і радіаційну безпеку населення. На існуючих та на тих, що проектуються і будуються атомних станціях, передбачається створення систем автоматизованого контролю за радіаційною обстановкою на території станції і в зоні спостереження цих станцій, оповіщення та інформаційного забезпечення обслуговуючого персоналу і населення про радіаційну небезпеку, а також захищених пунктів керування протиаварійними діями на території станції і в пристанційних селищах.

При проектуванні схем зовнішнього електропостачання категорійних міст необхідно передбачати їхнє електропостачання від декількох незалежних та територіально рознесених джерел живлення (електростанції і підстанції),

частина з яких повинна розташовуватися за межами зон можливих руйнувань. При цьому зазначені джерела і їхні лінії електропередачі повинні, як правило, знаходитися на відстані одне від одного, що виключає можливість їхнього одночасного виходу з ладу. Системи електропостачання категорійних міст повинні враховувати можливість забезпечення транзиту електроенергії в обхід зруйнованих об'єктів за рахунок спорудження коротких перемичок повітряними лініями електропередачі. Нові лінії електропередачі, що живлять особливо важливих споживачів, слід проектувати в кабельному виконанні. Для забезпечення можливості зниження електричного навантаження в категорійних містах системи електропостачання об'єктів, які не відключаються у воєнний час, повинні бути відділені від систем електропостачання інших об'єктів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено дослідження структур автономних енергетичних установок на основі фотоелектричних перетворювачів з реалізацією способів підвищення їх енергетичної ефективності. Показано, що реалізація екстремального регулювання потужності сонячних батарей – найбільш дієвий спосіб підвищення енергетичної ефективності АФЕУ, який можна порівняти зі способом автоматичного спостереження сонячних батарей за Сонцем, але простіше реалізований практично.

2. Удосконалено методику проектування автономних енергетичних установок, яка заснована на розрахунку енергобалансу і статистичних значеннях графіка інсоляції конкретної місцевості, що дозволяє визначити раціональну структуру і технічні параметри енергетичної установки для заданих умов експлуатації і графіка енергоспоживання.

3. Проведено аналіз способів і алгоритмів регулювання екстремуму потужності сонячних батарей і показано, що кроковий спосіб забезпечує стійке регулювання точки екстремуму потужності на ВВХ в будь-яких умовах експлуатації СБ, що змінюються.

4. Розроблено систему екстремального крокового регулювання потужності сонячних батарей, що забезпечує стійке регулювання максимуму потужності сонячної батареї і коефіцієнт її використання не менше 98 %:

- частота крокової зміни напруги СБ – не менше 1 Гц;
- допустима величина крокової зміни напруги СБ – від 0,5 до 1 В.

5. Проведено дослідження параметрів екстремального регулювання потужності сонячних батарей на імітаційній моделі у MatLab Simulink. Визначено робочий діапазон пошуку екстремуму потужності для наземних АФЕУ в залежності від температури і освітленості СБ – 30 В.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Стецюк В.Г. Підвищення енергоефективності системи освітлення птахоферми // В.Г.Стецюк / Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей X міжнар. наук.-практ. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 24–25 листоп. 2021.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон.техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: 2021. Т. 2. – 43.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. / Г. Раушенбах. - М.: Энергоатомиздат, 1983. - 360 с.
3. 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.
4. Groumpos P.P., Papageorgiou G. (1987) An optimal sizing method for standalone photovoltaic power systems. Solar Energy., v. 38, 5, pp. 341-351.
5. Hybrid2. (1996). The Hybrid System Simulation Model. Theory Manual. University of Massachusetts. Amherst, Massachusetts. 195 pp.
6. 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.
7. Охоткин Г.П. Методика расчета мощности солнечных электростанций/ Г.П. Охоткин // Вестник Чувашского университета. – 2013.- № 3.- С. 222-230.
8. Иродионов А.Е. Реверсивно-балансовый метод проектирования автономных солнечных фотоэлектрических установок: дис. ... кандидата технических наук : 05.14.08 / Всерос. НИИ электрофикации сельского хозяйства. - Москва, 2000. - 23 с.
9. Иванчура В.И. Имитационная модель автономной системы электропитания/ В.И. Иванчура, Ю.В. Краснобаев, С.С. Пост// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2014. – Т.325 №4.- С. 111-120.
10. Коваль В.П. Збільшення ефективності використання сонячних

панелей. / Я.О. Філюк, С.І.Гергега // Матеріали III Всеукраїнської науково-технічної конференції „Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування“, 8-9 червня 2017 року. — Т. : ТНТУ, 2017. — С. 202.

11. 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

12. Філюк Я.О. Використання даних метеослужб для оцінки енергетичного потенціалу сонячного випромінювання / Я.О. Філюк, В.А. Андрійчук. // Матеріали III всеукраїнська науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування», 8-9 червня 2017 року. – Т.: ТНТУ, 2017. – С. 233.

13. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.

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>, свободный.

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. В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, О. В. Мельников — Вид. 2-е, стереотипне. — Львів: Афіша, 2000. — 348 с.

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