

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва, транспорту та енергетики  
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»  
Зав. кафедрою АВП  
к.т.н., доцент  
Олександр Дідик  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти  
на тему:

*«Інтелектуальна модель з нечітким регулятором для системи  
енергозабезпечення з сонячними панелями»*

Виконала здобувачка вищої освіти  
2 курсу, групи АК-24Мз  
ОПП «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»  
спеціальності 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані  
технології та робототехніка»  
\_\_\_\_\_ Олесь ШИЛО  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Керівник роботи  
доцент, к.т.н.  
\_\_\_\_\_ Олена ГОЛИК  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Рецензент  
к.т.н., доц.  
кафедри ЕТСЕМ  
ЦНТУ  
\_\_\_\_\_ Василь ЗІНЗУРА  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

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

Шило Олесі Володимирівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Інтелектуальна модель з нечітким регулятором для системи енергозабезпечення з сонячними панелями»

2. Керівник роботи

Голик Олена Петрівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання роботи до захисту 23.12.2025 року

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи створення інтелектуальної моделі нечіткого регулятора для забезпечення наявності максимальної потужності від сонячних панелей, з метою підвищення ефективності системи енергозабезпечення з сонячними панелями.

5. Перелік графічного матеріалу залежності основних параметрів сонячних панелей; структура системи енергозабезпечення; структура системи моніторингу наявної потужності від сонячної панелі; функції належності;

вихідні характеристики нечіткого регулятора; модель інтелектуальної системи наявності максимальної потужності.

6. Консультанти розділів роботи \_\_\_\_\_

Розділ (Додатки)	Прізвище, ініціали консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Жесан Р.В.		

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичний аналіз систем енергозабезпечення на основі сонячних панелей	15.09.2025	
2	Теоретичне дослідження роботи системи енергозабезпечення на основі сонячних панелей	30.09.2025	
3	Опис застосування механізму нечіткого логічного висновку для розробки нечіткого регулятора	13.10.2025	
4	Розробка інтелектуальної моделі нечіткого регулятора	27.10.2025	
5	Дослідження характеристик роботи інтелектуальної моделі нечіткого регулятора	07.11.2025	
6	Моделювання роботи інтелектуальної моделі нечіткого регулятора	28.11.2025	
7	Заходи з охорони праці	08.12.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки та доповіді до захисту	19.12.2025	

Дата видачі завдання

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## **АНОТАЦІЯ**

Магістерська робота спрямована на розробку системи керування енергозабезпеченням на основі сонячних панелей шляхом створення інтелектуальної моделі нечіткого регулятора, призначеного для моніторингу та забезпечення відбору максимальної потужності.

У дослідженні розглянуто конфігурації систем електроживлення та класифіковано методи регулювання їх режимів роботи. Виконано теоретичний аналіз джерел живлення та навантажень, побудовано функції належності для джерел енергії, визначено режими функціонування сонячних панелей та досліджено характеристики нечіткого регулятора.

Описано принцип роботи системи та умови відбору максимальної потужності із застосуванням широтно-імпульсного перетворювача.

У роботі також передбачено заходи з охорони праці.

## **ABSTRACT**

The master's thesis is aimed at the development of a control system for power supply based on solar panels through the design of an intelligent fuzzy controller model intended for monitoring and ensuring maximum power extraction. The study considers the configurations of power supply systems and provides a classification of methods for regulating their operating modes.

A theoretical analysis of power sources and loads has been carried out, membership functions for energy sources have been constructed, the operating modes of solar panels have been identified, and the characteristics of the fuzzy controller have been investigated. The principle of system operation and the conditions for maximum power extraction using a pulse-width converter are described.

The thesis also provides occupational safety measures.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА ВИКОРИСТАННІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	6
1.1 Структура системи енергозабезпечення.....	6
1.2 Конфігурації систем енергозабезпечення на базі сонячних панелей.....	7
1.3 Класифікація методів регулювання режимів функціонування систем енергозабезпечення.....	8
Висновки до розділу.....	15
2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ УСТАНОВОК.....	16
2.1 Дослідження динаміки навантаження в контексті функціонування системи енергозабезпечення.....	16
2.2 Дослідження сонячних панелей.....	17
2.3 Дослідження акумуляторної батареї.....	23
Висновки до розділу.....	28
3. ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗМУ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ РЕГУЛЯТОРА.....	29
3.1 Структура системи енергозабезпечення на базі сонячних панелей.....	29
3.2 Побудова функцій належності.....	31
Висновки до розділу.....	41
4. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕЖИМУ ВІДБОРУ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІД СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ.....	43
4.1 Система керування для забезпечення максимальної потужності фотоелектричного модуля.....	43
4.2 Аналіз режимів функціонування сонячної панелі.....	47
4.3 Характеристики нечіткого регулятора.....	52
Висновки до розділу.....	57

5. МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВІДБОРУ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ.....	58
5.1 Механізм роботи системи електропостачання з сонячними панелями.....	58
5.2 Реалізація режиму максимальної потужності сонячної панелі.....	60
5.3 Заряд акумуляторної батареї.....	73
Висновки до розділу.....	76
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
ДОДАТКИ.....	84

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Сонячна енергія є одним із найперспективніших і найпоширеніших джерел відновлюваної енергії, що активно інтегрується як у автономні системи електроживлення, так і в енергетичні комплекси, пов'язані з централізованими мережами. Одним із ключових обмежень використання сонячної енергії є її стохастичний характер, що зумовлює доцільність створення комп'ютерно-інтегровано адаптивних систем керування, які будуть забезпечувати ефективне функціонування енергетичних установок за умов змінної інтенсивності сонячного випромінювання. Особливої уваги потребує задача максимального відбору потужності від сонячної панелі (СП), яка є критичною для підвищення енергоефективності системи. Незважаючи на значну кількість теоретичних і прикладних досліджень у даній сфері, актуальною залишається проблема розробки практично реалізовуваних алгоритмів керування, здатних забезпечити стабільність та відповідність вхідних і вихідних параметрів системи енергозабезпечення заданим технічним вимогам. У сучасних дослідженнях все ширше застосовуються методи нечіткої логіки, зокрема нечіткі регулятори, які демонструють високу ефективність у задачах керування в умовах невизначеності та нелінійності. У зв'язку з цим тема магістерської роботи, присвячена розробці нечіткого регулятора для реалізації відбирання найбільшої потужності у системі енергозабезпечення на основі СП, є науково та технічно обґрунтованою і має високу актуальність.

*Об'єктом дослідження* є система енергозабезпечення з сонячними панелями, електромережею та акумуляторними батареями.

*Предметом дослідження* є методи і засоби відбирання максимальної потужності від сонячної панелі.

*Мета та задачі дослідження* - розробка інтелектуальної моделі нечіткого регулятора для відбирання максимальної потужності від сонячної панелі на основі методу нечіткої логіки для підвищення ефективності системи енергозабезпечення на базі сонячних панелей.

Для досягнення мети слід розв'язати наступні завдання:

- провести аналіз та сформувані функції належності для навантажень системи енергозабезпечення та джерел енергії;
- визначити умови, за яких забезпечується максимальний відбір енергії від сонячної панелі;
- розробити систему нечіткого керування з подальшим дослідженням її робочих характеристик, зокрема ефективність нечіткого регулятора;
- обрати оптимальні методи заряджання акумуляторної батареї.

**Методи дослідження:** В магістерській роботі застосовано методи нечіткої логіки, математичного моделювання, обчислювальної математики, а також елементи теорії електричних кіл. Для реалізації та дослідження запропонованих рішень використано програмні засоби Matlab та MathCAD.

**Наукова новизна одержаних результатів:** Доведено, що для розв'язання поставленої задачі найбільш ефективним є використання симетричних термів трикутної та трапецеїдальної форми у поєднанні з методом дефазифікації «центроїд», імплікацією за принципом **min** та агрегацією за принципом **max**. Застосування цих підходів забезпечує точність відтворення теоретичних залежностей з похибкою, що не перевищує 5% і залежить від кількості термів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичну зацікавленість викликає запропонований алгоритм нечіткого керування для широтно-імпульсного перетворювача підвищувального та знижувального типу шляхом зміни коефіцієнта заповнення імпульсів, що базується на використанні аналітичної залежності енергії на виході сонячної панелі від коефіцієнта заповнення імпульсів широтно-імпульсного перетворювача для широкого діапазону змін параметрів сонячної панелі і акумуляторної батареї.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.** Наукові положення, висновки та рекомендації, представлені в магістерській роботі, підтвержені відповідними посиланнями на джерела

літератури, коректним застосуванням математичного апарату, а також використанням методів комп'ютерного моделювання.

**Апробація результатів досліджень.** Прийнято участь у Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні питання науки, освіти і суспільства в умовах сучасних викликів» (21 лютого 2025 року, м. Рівне, ЦФЕНД). Наукова конференція здобувачів вищої освіти, присвячена Дню Науки 2025 року (24-25 квітня 2025, м. Кропивницький, ЦНТУ), секція автоматизації виробничих процесів та електронних комунікацій, тема доповіді «Пошук оптимального складу джерел енергії для індивідуального електропостачання».

**Публікації.** За темою магістерської роботи опубліковано 1 наукову працю у збірнику тез доповідей до Міжнародної науково-практичній конференції «Актуальні питання науки, освіти і суспільства в умовах сучасних викликів» на тему «Reasoning for the development of a robotic complex with artificial intelligence for water ecosystem cleaning measures» [34].

**Структура та обсяг магістерської роботи.** Магістерська робота складається з п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Містить 47 рисунків та 12 таблиць, список використаних джерел 37. Обсяг пояснювальної записки становить 83 сторінки. Загальний обсяг кваліфікаційної роботи з додатками становить 101 сторінка.

# 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА ВИКОРИСТАННІ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

## 1.1. Структура системи енергозабезпечення

Системи енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) зазвичай включають кілька джерел електропостачання або генераторів, серед яких — електрична мережа, резервні чи накопичувальні джерела, а також відновлювані джерела енергії. Крім того, до складу таких систем входять споживачі електроенергії (навантаження) [5, 33, 36].

Для інтеграції генераторів та накопичувачів у єдину систему з узгодженими параметрами застосовуються перетворювачі, які забезпечують трансформацію механічної, світлової, теплової енергії, а також енергії, накопиченої в акумуляторах, у електричну енергію з необхідними характеристиками (рис. 1.1).

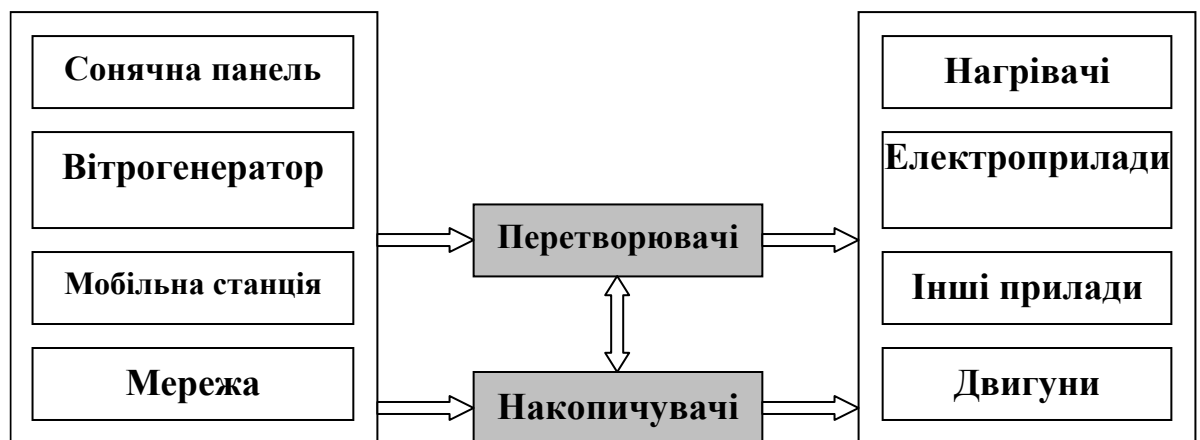


Рисунок 1.1 – Структурна схема системи енергозабезпечення з ВДЕ

Одним із перспективних напрямів є створення системи, яка забезпечує максимально ефективне використання енергії шляхом інтеграції центрального керуючого пристрою з окремими електротехнічними елементами.

Для реалізації керування різнорідними пристроями необхідно, щоб усі компоненти системи були узгоджені за набором однотипних параметрів. У

контексті електротехнічної системи це означає, що всі пристрої мають споживати електроенергію з однаковими характеристиками, незалежно від джерела її надходження.

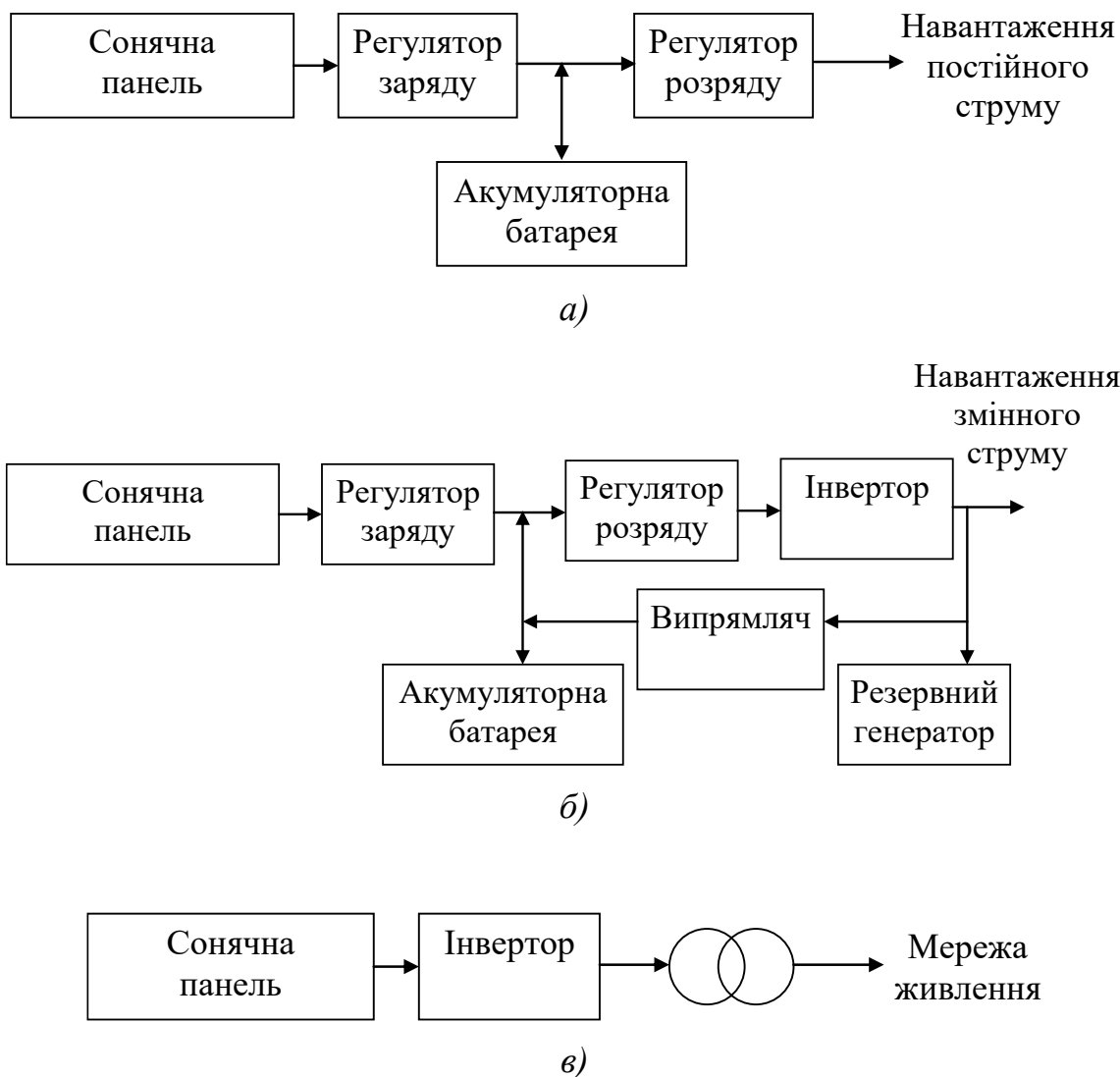
## **1.2. Конфігурації систем енергозабезпечення на базі сонячних панелей**

Серед широкого спектра конфігурацій систем енергозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії можна виокремити три основні типи:

- автономні системи,
- гібридні системи,
- системи, підключені до електромережі (з використанням або без використання акумуляторної батареї) (рис. 1.2).

Вибір конкретної конфігурації системи енергозабезпечення залежить від поставлених завдань, які вона має виконувати. До таких завдань належать:

- живлення навантажень змінного або постійного струму, а також навантажень обох типів;
- вимоги до якості електроенергії, що подається на навантаження;
- рівень споживаної потужності;
- можливість використання резервних джерел живлення;
- необхідна тривалість автономної роботи системи за несприятливих погодних умов;
- наявність або відсутність доступу до централізованої електромережі;
- інші технічні та експлуатаційні фактори.



**Рисунок 1.2 – Схеми систем енергозабезпечення на базі сонячних панелей: а – автономна, б – гібридна, в – підключена до мережі (без акумуляторної батареї)**

### **1.3. Класифікація методів регулювання режимів функціонування систем енергозабезпечення**

Оптимальною вважається така система автоматичного керування, в якій закон керування сформовано на основі максимізації або мінімізації певного показника якості. Залежно від задачі, закон керування може бути як лінійним, так і нелінійним [5, 33, 36].

Оптимізація системи автоматичного керування може здійснюватися за такими критеріями [5, 33, 36]:

- максимальна точність керування об'єктом.
- максимальна швидкодія переходу між режимами без обмеження потужності.
- мінімальні енергетичні витрати при заданих зовнішніх умовах.
- максимальна надійність при обмеженій масі апаратури.
- мінімальна вартість системи за умови забезпечення необхідної якості керування.

Слід враховувати, що оптимізація одного з показників може обмежувати інші характеристики системи, оскільки реальні системи мають обмеження щодо потужності, точності, надійності, інерційності та інших параметрів.

Кожен із методів оптимізації має свою область застосування, яку можна розширити шляхом комбінування з методами динамічного програмування або принципом максимуму.

Задача оптимізації енергоспоживання в системах з перетворювачами є багатостадійною, оскільки умови роботи змінюються. Найбільш доцільним у цьому випадку є використання методів нечіткої логіки.

Одним із важливих режимів роботи системи є перехідні процеси — ввімкнення приладів, розгін двигунів, заряд акумуляторів, зміна режимів навантаження. У ці моменти система керування повинна генерувати сигнали, які забезпечують мінімальні витрати енергії, мінімальний час переходу або мінімальні перевантаження [5, 33, 36].

Традиційні методи оптимізації в електротехніці потребують точного знання параметрів усіх джерел і навантажень. Проте навіть незначні відхилення умов можуть зробити розв'язок неактуальним, що потребує його уточнення або повного перерахунку. Виходом є застосування методів керування на основі нечіткої логіки, які оперують нечіткими множинами [5, 33, 36].

Оптимізація енергоспоживання в таких системах передбачає два етапи. Перший етап — розрахунок функції керування на основі усереднених

параметрів, що визначає загальну стратегію. Другий етап — формування конкретних сигналів керування на основі нечітких змінних, які описують поточний стан пристроїв.

Для задачі виведення навантаження на заданий режим, інтервал керування поділяється на підінтервали, для кожного з яких визначається оптимальна напруга. У реальному часі керування здійснюється в межах допустимого діапазону навколо розрахованого значення, що дозволяє адаптуватися до змін параметрів без повного перерахунку.

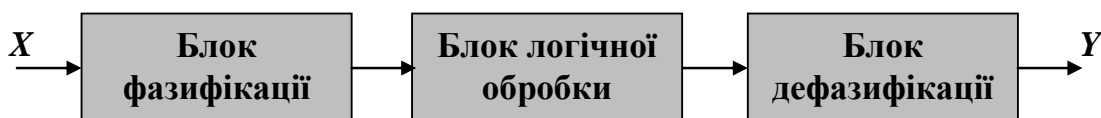
Нечіткі числа мають переваги над ймовірнісними методами — вони не потребують нормалізації, адитивності та мають ширший набір функцій для аналізу. При зростанні точності нечітка логіка наближається до булевої. Порівняно з ймовірнісними методами, нечітка логіка дозволяє зменшити обсяг обчислень і підвищити швидкодію системи [3, 6, 22, 23].

У нечіткому регуляторі перетворення вхідних сигналів у керуючі здійснюється в три етапи (рис. 1.3) [3, 6, 22, 23]:

1. Фазифікація — перетворення чітких значень у нечіткі вхідні дані в нечітких множинах за допомогою функцій приналежності. Що дозволяє враховувати невизначеність і неточність у вхідних параметрах.).

2. Логічна обробка — використання бази правил булевої нечіткої логіки (як правило, у вигляді "якщо–то") для аналізу фазифікованих даних і формування нечітких вихідних сигналів.).

3. Дефазифікація — перетворення нечітких результатів у чіткі керуючі сигнали (перетворення нечітких вихідних сигналів у чітке значення, яке можна в подальшому використати в якості керуючого сигналу для системи. Найчастіше застосовується метод центроїда (центру ваги)).



### Рисунок 1.3 – Основні етапи аналізу та обробки інформації нечітким регулятором

Нечіткий регулятор перетворює чіткі вхідні сигнали у керуючі дії через три основні етапи [3, 6, 22, 23]: **фазифікацію, логічну обробку та дефазифікацію.**

#### 1. Фазифікація

На цьому етапі чіткі вхідні сигнали  $X_{XX}$  трансформуються у нечіткі змінні. Область визначення кожної змінної описується набором термів — нечітких множин, які зазвичай мають **трикутну** або **трапецеїдальну** форму.

Ці геометричні форми обрані через їхню високу точність, швидкість обчислень і простоту реалізації. Функція належності визначає ступінь відповідності чіткого значення певному терму і може мати значення в інтервалі від нуля до одиниці.

#### 2. Логічна обробка

Цей етап включає перетворення вхідних нечітких змінних у вихідні на основі **логічних правил**, сформованих за допомогою якісного аналізу.

Застосовуються оператори:

**I:**

- $\min$  — вибирається мінімальне значення ступеня належності;
- $\text{prob}$  — обчислюється добуток ступенів належності.

**АБО:**

- $\max$  — вибирається максимальне значення;
- $\text{probor}$  — обчислюється як сума ступенів належності мінус їх добуток.

#### 3. Імплікація та агрегація

Перед дефазифікацією здійснюються:

**Імплікація** — формування термів вихідної змінної на основі ступенів активації:

- `min` — обрізання терма по висоті;
- `prod` — масштабування терма.

**Агрегація** — об'єднання термів у єдиний вихідний терм:

- `max` — точковий максимум;
- `sum` — точкова сума;
- `probor` — сума мінус добуток.

#### 4. Дефазифікація

На завершальному етапі нечітка вихідна змінна перетворюється у чіткий керуючий сигнал.

Застосовуються методи:

- **SOM** — найменший максимум;
- **MOM** — середній максимум;
- **LOM** — найбільший максимум;
- **Bisector** — бісектор;
- **Centroid** — центр ваги (найпоширеніший метод, див. рис. 1.4).

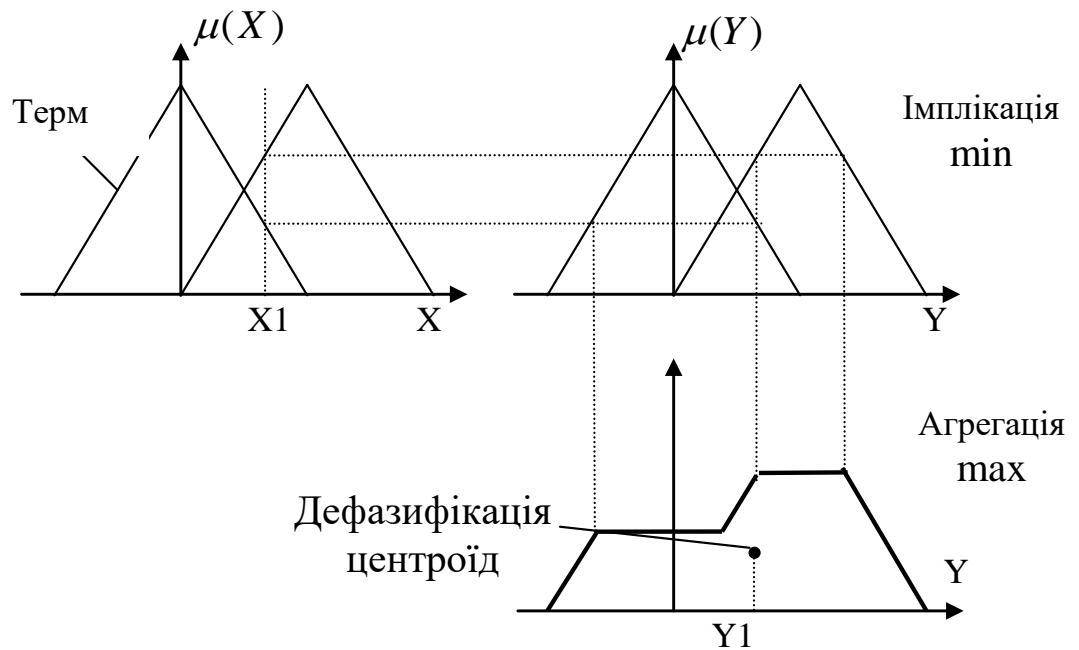
Алгоритм побудови нечіткого регулятора для керування енергозабезпеченням локального об'єкта полягає у розробці нечіткого регулятора, яка здійснюється поетапно [3, 6, 22, 23], з урахуванням специфіки об'єкта керування та умов його функціонування.

Етап 1: Аналіз об'єкта керування

На першому етапі проводиться детальне дослідження об'єкта:

- визначаються його **технічні характеристики**;
- уточнюється **технологічне призначення**;
- формується **розрахункова динамічна модель**.

У випадку, коли математичний опис об'єкта відсутній, його поведінка оцінюється **експериментально** — шляхом аналізу реакції на тестові сигнали через канали керування та збудження.



**Рисунок 1.4 – Графічна інтерпретація процесів імплікації, агрегації та дефазифікації**

Етапи побудови нечіткого регулятора для керування енергозабезпеченням було представлено як блок-схему, наведену на рис. 1.5.

1. **Аналіз об'єкта керування.** Виконується дослідження технічних характеристик і технологічного призначення об'єкта. Формується розрахункова динамічна модель. Якщо математичний опис відсутній, реакція об'єкта оцінюється експериментально за допомогою тестових впливів.

2. **Уточнення задачі керування.** Визначається, чи буде оптимізація процесу повністю реалізована нечітким керуванням, або нечітке керування виконуватиме корегувальну функцію в існуючій системі.



**Рисунок 1.5 – Блок-схема алгоритму побудови нечіткого регулятора**

3. **Вибір змінних і термів.** Оцінюються діапазони зміни вхідних і вихідних фізичних змінних. Виділяються терми, визначається їх кількість і назви. Збільшення кількості термів підвищує точність, але ускладнює алгоритм і підвищує вимоги до швидкодії.

4. **Формування правил.** Створюється база правил для забезпечення плавного керування. Області змінних повинні перекриватися хоча б двома правилами. Додаткові правила перевіряються тестуванням для збереження стабільності системи.

5. **Вибір функцій належності.** Встановлюються параметри функцій належності (ліва границя, центр, права границя). Для спрощення обчислень використовуються трикутні або трапецеїдальні форми.

6. **Моделювання і налаштування.** Виконується моделювання об'єкта керування та порівняння результатів із заданими. При необхідності коригуються правила (грубе налаштування) або параметри функцій належності (тонке налаштування). Після досягнення бажаного результату параметри алгоритму заносяться до діючого нечіткого регулятора.

### **Висновки до розділу**

З наведеного в даному розділі можна зробити такі висновки:

1. Обґрунтовано та запропоновано застосування методу нечіткої логіки для безпосереднього формування керуючих сигналів у системі енергозабезпечення, що базується на сонячних панелях.

2. Розробку нечіткого регулятора слід виконувати згідно побудованого алгоритму, який дасть можливість врахувати стохастичний характер надходження сонячної енергії.

## 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА ОСНОВІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СОНЯЧНИХ УСТАНОВОК

### 2.1. Дослідження динаміки навантаження в контексті функціонування системи енергозабезпечення

Усі типи електротехнічних навантажень умовно можна згрупувати за їх електричними характеристиками на три основні категорії (рис. 2.1 а, б) [5]:

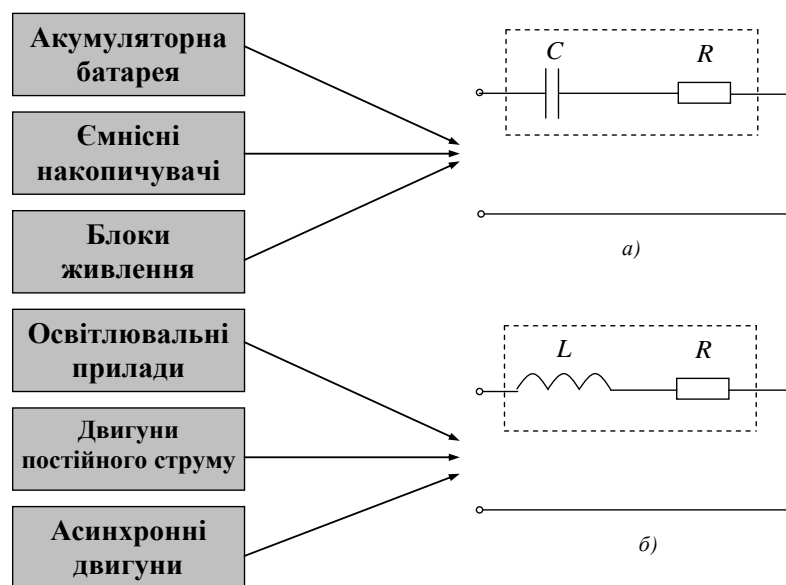


Рисунок 2.1 – Схеми навантажень:

а) активно-ємнісне, б) активно-індуктивне

1. *Активно-індуктивні навантаження* — характеризуються наявністю активного та індуктивного компонентів. Прикладом таких навантажень є освітлювальні прилади, зокрема лампи розжарювання, які мають індуктивний характер споживання електроенергії.

2. *Активно-ємнісні навантаження* — включають елементи з активним та ємнісним опором. До цієї групи належать акумуляторні батареї, блоки живлення комп'ютерної техніки, лампи денного світла, а також іонізуючі пристрої.

3. *Динамічні навантаження* — це навантаження, що змінюються в часі та мають складну електромеханічну природу. До них належать електродвигуни різних типів, зокрема двигуни постійного струму та асинхронні двигуни.

Під час розгляду електромагнітних процесів у навантаженнях, що моделюються схемами типу RL (резистор–індуктивність) та RC (резистор–конденсатор), приймаються такі допущення:

- Активні втрати потужності, що виникають у дроселі та конденсаторі, враховуються через опір елемента RRR.
- Дросель та конденсатор розглядаються як лінійні елементи, тобто їх параметри не змінюються залежно від струму або напруги.

На основі цих припущень визначаються еквівалентні електричні схеми найбільш поширених типів навантажень, що застосовуються в системах енергозабезпечення. Також встановлюються умови, за яких доцільно використовувати ту чи іншу модель навантаження, залежно від характеру споживача та режиму його роботи.

## **2.2. Дослідження сонячних панелей**

Сонячне випромінювання є екологічно чистим та практично невичерпним джерелом енергії, що зумовлює його використання як основного відновлюваного ресурсу в складі системи енергозабезпечення досліджуваної електротехнічної установки. Основним елементом такої системи є сонячна панель (СП), яка формується з певної кількості фотоелектричних елементів (сегментів), з'єднаних між собою для створення шини постійного струму.

Кількість елементів, з'єднаних послідовно, визначається необхідним рівнем постійної напруги, тоді як кількість паралельних секцій залежить від вимог до потужності СП. Еквівалентна електрична схема всієї батареї включає

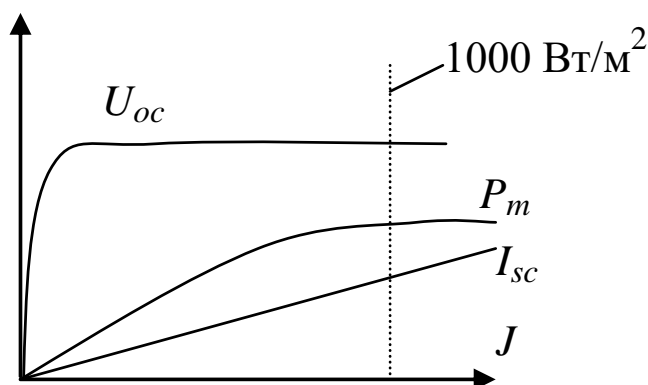
комбінацію схем окремих фотоелементів, опори з'єднувальних провідників та блокувальний діод [5, 17, 25, 29, 35].

На ефективність роботи СП впливають такі основні чинники:

1. Інтенсивність потоку сонячної енергії;
2. Температура фотоелементів;
3. Кут падіння сонячного випромінювання;
4. Електричний опір з'єднувальної проводки;
5. Втрати напруги на блокувальних діодах;
6. Забруднення поверхні захисного скла;
7. Дефекти або електричне руйнування окремих елементів;
8. Часткове затінення фотоелементів.

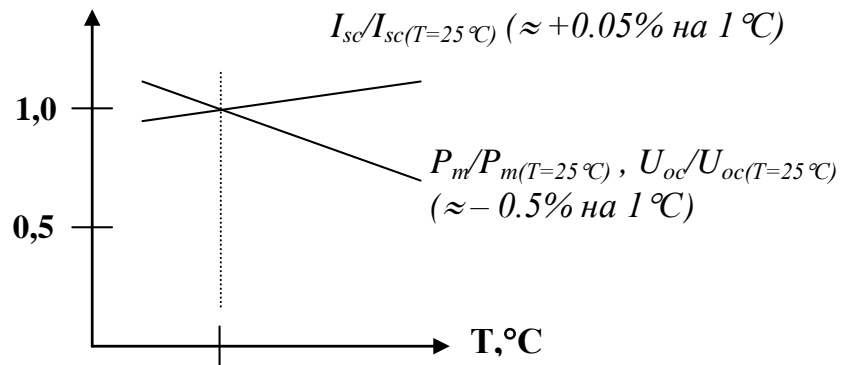
Ключовим параметром, що визначає продуктивність СП, є поверхнева густина потоку сонячного випромінювання, яка змінюється залежно від пори року, часу доби та спектрального складу випромінювання. Максимальне значення цього параметра становить  $1353 \text{ Вт/м}^2$  — так звана сонячна стала (спектр АМ0, що відповідає умовам поза атмосферою).

На рис. 2.2 наведено залежності основних характеристик СП: інтенсивності сонячного випромінювання  $J$  від максимальної потужності  $P_m$ , струму короткого замикання  $I_{sc}$  та напруги холостого ходу  $U_{oc}$ .

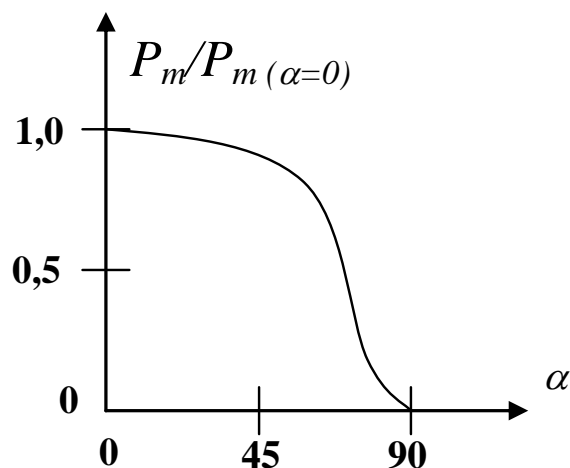


**Рисунок 2.2 – Залежність основних параметрів СП від інтенсивності сонячного випромінювання**

Рис. 2.3 демонструє зміну цих параметрів залежно від температури, а рис. 2.4 — залежність потужності від кута падіння сонячних променів [5, 17, 25, 29, 35].



**Рисунок 2.3 – Температурна залежність параметрів СП**



**Рисунок 2.4 – Залежність потужності СП від кута падіння сонячних променів**

Зі збільшенням інтенсивності сонячного випромінювання пропорційно зростають струм, що генерується фотоелементами, та максимальна потужність, яку може забезпечити сонячна батарея. Однак для модулів із значним послідовним опором спостерігається зниження потужності при рівнях освітленості в межах 600–800 Вт/м<sup>2</sup>, що пов'язано з внутрішніми втратами енергії.

Напруга холостого ходу вказує на логарифмічну залежність від інтенсивності випромінювання (див. рис. 2.4). Зі зростанням температури фотоелементів на кожен градус Цельсія:

- Струм збільшується приблизно на 0,05 %;
- Потужність і напруга зменшуються на 0,5 %.

Це пояснюється термічним впливом на напівпровідникові властивості матеріалів, з яких виготовлені сонячні елементи. Крім того, зі збільшенням струму навантаження, тобто струму, що протікає через батарею, підвищується її температура, що, своєю чергою, призводить до зниження потужності.

Залежність струму та потужності від кута падіння сонячного випромінювання має наближену косинусоїдальну форму. У діапазоні кутів від  $0^\circ$  до  $45^\circ$  зміни характеристик є незначними, тоді як у межах  $45^\circ$ – $90^\circ$  спостерігається різке зниження ефективності. При кутах понад  $80^\circ$  форма залежності відхиляється від косинусоїдальної через посилений вплив відбивання променів від поверхні сонячної панелі (див. рис. 2.4).

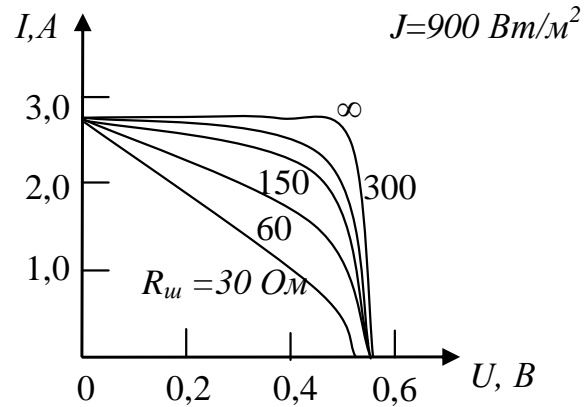
Потужність, яку виробляє СП, змінюється від нуля (при відсутності освітлення) до максимального значення, яке необхідно підтримувати для забезпечення оптимального енергетичного відбору.

Зв'язок між струмом ( $i$ ) та напругою ( $u$ ) на фотоелементі описується відповідним математичним співвідношенням [5, 17, 25, 29, 35]:

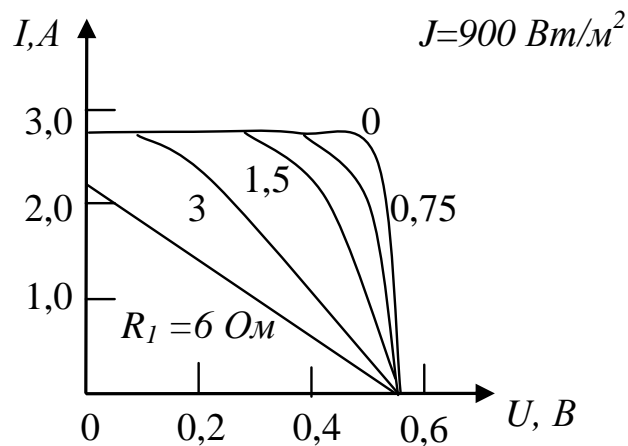
$$i = i_T (e^{\lambda u} - 1) - i_\phi, \quad (2.1)$$

де  $\frac{1}{\lambda} = \frac{kT}{e} \beta$ ;  $\beta$  - величина, яка враховує матеріал напівпровідника (для германію  $\beta = 1$ , для кремнію  $\beta > 1$ );  $k$  - постійна Больцмана;  $e$  - заряд електрона;  $T$  - температура, °К;  $i_\phi$  та  $i_T$  - густина фотоструму та темного струму, відповідно.

На рис. 2.5 показано залежність впливу зворотнього темнового опору сонячного елемента, а на рис. 2.6 залежність впливу послідовного опору на вольт-амперні характеристики фотоелемента [5, 17, 25, 29, 35].



**Рисунок 2.5 – Вплив шунтового опору на вольт-амперні характеристики СП**



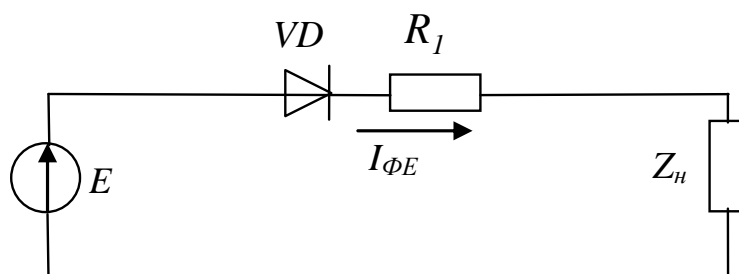
**Рисунок 2.6 – Вплив послідовного опору на вольт-амперні характеристики фотоелемента**

Сучасні фотоелементи характеризуються високим значенням шунтового опору  $R_{ш} > 3000 \text{ Ohm}$ . З огляду на це, вплив цього параметра на вольт-амперну характеристику можна практично ігнорувати без суттєвої втрати точності, оскільки нахил верхньої частини кривої залишається мінімальним (рис. 2.6).

Еквівалентний послідовний опір  $R_l$  розподілений між напівпровідниковим матеріалом та омичними контактами, причому найбільший внесок забезпечує опір дифузійного шару. Для високоякісних кремнієвих сонячних елементів цей опір зазвичай становить **0,1–0,3 Ом** [5, 17, 25, 29, 35].

У випадку пошкодження або затінення одного чи кількох фотоелементів (навіть одного), на них прикладається значна зворотна напруга. Для системи з номінальною напругою **24 В** вона може досягати **–10...–20 В**, що призводить до локального перегрівання та руйнування елемента. Для запобігання цьому явищу паралельно групам послідовно з'єднаних фотоелементів (зазвичай від 18 до 36) встановлюють **шунтувальні діоди**, які забезпечують обхід струму при затіненні.

Спрощена еквівалентна схема сонячної батареї, що враховує послідовний опір, наведена на **рис. 2.7**. При цьому слід враховувати, що внутрішній опір СП є змінним, тоді як ЕРС для спрощення приймається сталою.



**Рисунок 2.7 – Еквівалентна схема елемента ФЕ**

### **2.3. Дослідження акумуляторної батареї**

Одним з основних елементів системи енергозабезпечення локального об'єкту, необхідним для її нормального функціонування, є накопичувач електричної енергії – АБ. Вона забезпечує накопичування енергії

відновлювальних джерел для подальшого живлення навантаження або передачі надлишкової енергії у мережу після відповідного перетворення.

Розглянемо електричні характеристики АБ на прикладі найбільш поширеного їх типу – свинцево-кислотних акумуляторів [20]. Рівняння електричної рівноваги АБ  $E = IR_n + IR_{вн}$  визначає зовнішню характеристику АБ  $U = f(I)$  [5, 17, 25, 29, 35].

Значення ЕРС  $E$  залежить від складу електрохімічної системи активних речовин електродів і електроліту. Напряга  $U = IR_n$  на зовнішньому опорі  $R_n$  навантаження складає  $U = E - IR_{вн}$  і змінюється в залежності від ЕРС, струму розряду  $I$  та повного внутрішнього опору  $R_{вн}$  АБ, при тому що  $R_n$  є функцією низки факторів: струму  $I$ , робочої температури елемента  $T$ , розмірів і конструкції електродів, складу електроліту. Значення  $R_{вн}$  зменшується зі збільшенням об'єму АБ і робочої температури через інтенсивніше протікання електрохімічних процесів. Під час розряду АБ  $R_{вн}$  збільшується внаслідок варіювання концентрації (густини) електроліту і зміни структури поверхневого шару електродів. Повний внутрішній опір визначається з такого виразу [5, 17, 25, 29, 35]:

$$R_{вн} = R_{e.n.} + R_{e.n.} + R_{ел} + R_{пер} + R_{пол}, \quad (2.2)$$

де  $R_{e.n.}$ ,  $R_{e.n.}$  – опір позитивного і негативного електродів;  $R_{ел}$  – опір електроліту;  $R_{пер}$  – перехідний опір між електродами і електролітом;  $R_{пол}$  – опір поляризації, обумовлений появою на поверхнях електродів подвійного шару різноіменних зарядів (при проходженні постійного струму) і зміною потенціалу на кожному з електродів.

Найважливішим параметром АБ є розрядна ємність [5, 17, 25, 29, 35]:

$$q_p = \int_{t_0}^{t_p} i dt, \quad (2.3)$$

де  $t_0$ ,  $t_p$  – час початку і закінчення експлуатаційного режиму зі струмом  $i=i(t)$ .

При постійному значенні струму розряду  $I=const$  ємність  $q_p = I \cdot (t_p - t_0)$ , причому  $(t_p - t_0) = t_{p,p}$  - час роботи в розрядному режимі. Величину  $q_p$  прийнято визначати в ампер-годинах.

Зберігання розімкнених АБ фактично супроводжується шкідливим явищем – саморозрядом, питомий показник якого [5, 17, 25, 29, 35]:

$$\Delta q_{num} = (q_0 - q_x) / q_0 t_x, \quad (2.4)$$

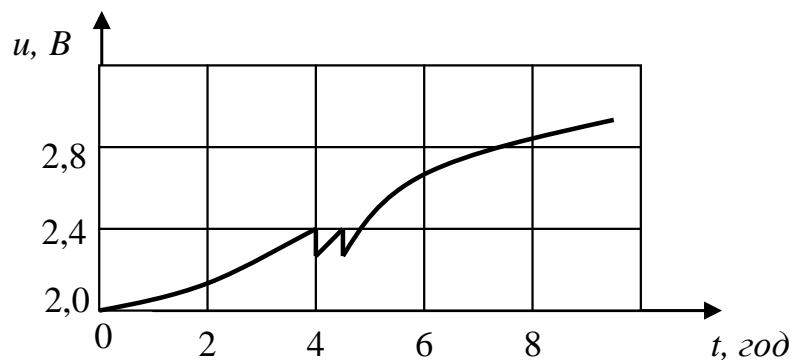
де  $q_0$  і  $q_x$  – початкова ємність АБ та її ємність після зберігання протягом часу у  $t_x$  діб.

Ємність  $q_p$  залежить від температури, розрядного струму, режиму проведення заряду. Наближено вплив температури на рівень  $q_p$  для діапазону зміни температури від  $-50^\circ\text{C}$  до  $+30^\circ\text{C}$  можна визначити лінійною функцією [5, 17, 25, 29, 35]:

$$q_T = q_{T_0} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)), \quad (2.5)$$

де  $\alpha \leq 0,01 \text{ A} \cdot \text{год} / \text{K}$  - температурний коефіцієнт ємності,  $T_0$  – нормальна температура АБ (300 К).

Основні режими роботи АБ характеризують за допомогою розрядних  $u=f(t)$  і зарядних  $u=u(t)$ ,  $i=i(t)$  кривих напруги або струму як функції часу. Типовими розрядними кривими є характеристики при 5-годинному режимі розряду при постійній температурі  $T=298$  К. Для свинцево-кислотної АБ зарядні криві наведені на рис. 2.8.



## Рисунок 2.8 – Зарядні характеристики свинцево-кислотної АБ при постійному значенні струму

Для аналізу процесів заряду і розряду доцільно користуватися еквівалентною схемою заміщення акумулятора (рис. 2.9 а, б) [5, 17, 25, 29, 35].

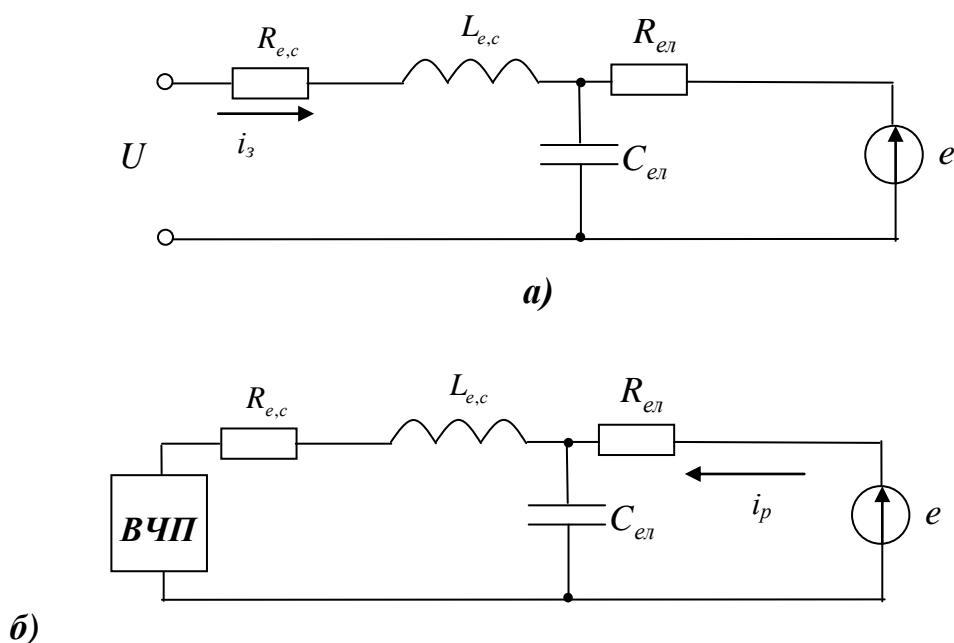


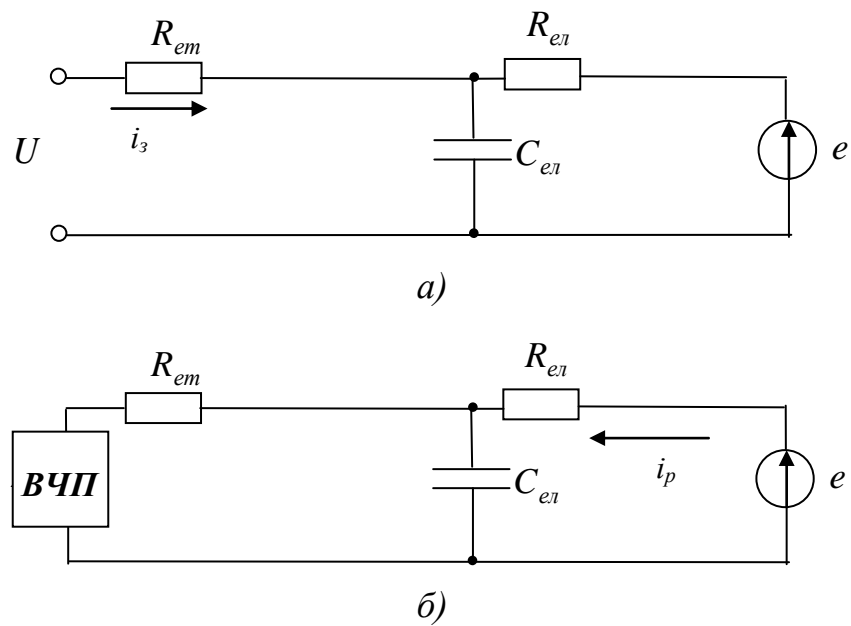
Рисунок 2.9 – Електричні схеми заміщення елемента АБ для:  
а) заряду, б) розряду

Електричне поле поляризації і ємність електродів, розділених шаром електроліту, наближено враховують за допомогою еквівалентної ємності  $C_e$ . Параметри електродів разом з струмовідводами – це опір  $R_{e,c}$  та  $L_{e,c}$  (рис. 2.9). Опір електроліту  $R_{el}$  дає основний внесок до внутрішнього опору акумуляторної батареї  $R_{en} = R_{el} + R_{e,c}$ , тому значенням  $R_{e,c}$  при незначній втраті точності можна знехтувати, і розглядати лише опір  $R_{el}$ . Досить малим значенням індуктивності  $L_{e,c}$  також можна знехтувати.

Якщо не враховувати приелектродні явища (зміну густини електроліту в порах пластин, рухливість іонів і т. ін.), то значення ємності  $C_e$  в першому

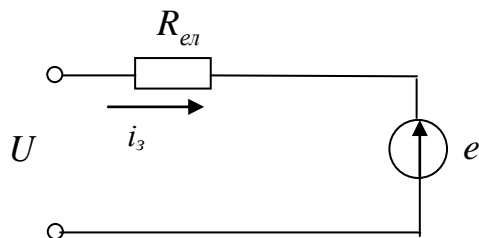
наближенні можна розраховувати подібно до ємності плоского конденсатора, а  $R_{el}$  – подібно опорю шару електроліту між електродами.

При розгляді високочастотних перехідних процесів напругу на АБ можна вважати сталою. Таким чином, еквівалентні схеми АБ для аналізу високочастотних процесів заряду і розряду можуть бути представлені у такому вигляді, як це показано відповідно на рис. 2.10 а, б.



**Рисунок 2.10 – Схеми АБ для аналізу високочастотних процесів:  
а) заряду, б) розряду**

Значення напруги АБ для довготривалого заряду не є постійним, а змінюється у його процесі. Еквівалентна схема АБ для довготривалого процесу заряду набуде такого вигляду (рис. 2.11).

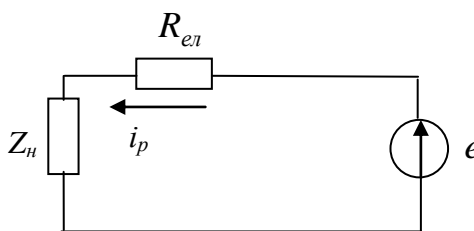


### Рисунок 2.11 – Спрощена схема заміщення АБ для довготривалого процесу заряду

На початковому етапі розряду напруга майже не змінюється, при чому тривалість цього етапу залежить від струму розряду – чим менше струм розряду, тим більше відносна тривалість цього етапу. Після цього починається експоненціальне зменшення напруги. Таким чином, якщо не розряджати АБ до напруги меншої 1,9 В, то напругу можна наближено вважати сталою [5, 17, 25, 29, 35].

Таким чином, еквівалентна схема АБ для довготривалого процесу розряду набуде вигляду, показаного на рис. 2.12.

Отже, для короткотривалого процесу заряду вибираємо схему рис. 2.11, для довготривалого процесу заряду – схему рис. 2.12.



### Рисунок 2.12 – Спрощена еквівалентна схема заміщення АБ довготривалого процесу розряду

#### Висновки до розділу

З наведеного в даному розділі можна зробити такі висновки:

1. Результати дослідження навантаження та джерел живлення в системі енергозабезпечення слугують основою для розробки нечіткого регулятора, що функціонує на базі сонячних батарей. Такий регулятор використовується для формування алгоритмів раціонального та ефективного використання електроенергії.

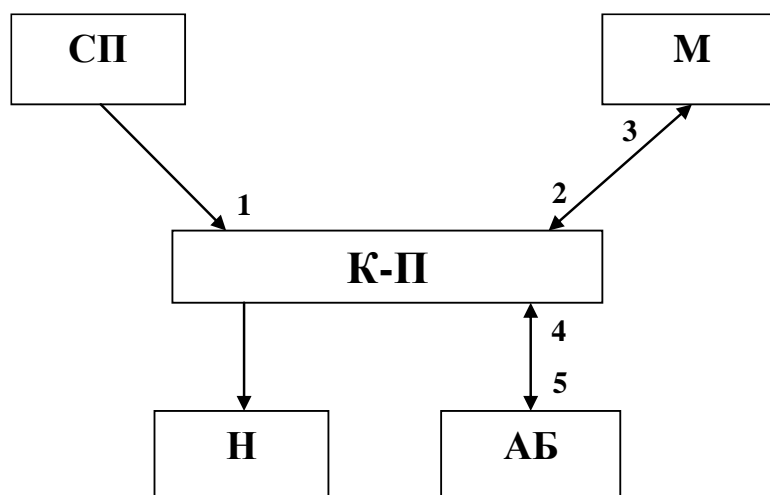
### **3 ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗМУ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИСНОВКУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ РЕГУЛЯТОРА**

#### **3.1. Структура системи енергозабезпечення на базі сонячних панелей**

Створення систем керування навантаженнями та джерелами енергії ускладнюється наявністю складних взаємозв'язків між змінами зовнішніх факторів, що впливають на вихідні параметри відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), характеристиками навантажень та параметрами мережі живлення. Додатковою проблемою є постійна динаміка цих параметрів.

Це обумовлює необхідність розробки нових інтелектуальних систем керування, здатних оперативно аналізувати та обробляти отриману інформацію, а також формувати відповідні керуючі сигнали. Одним із перспективних підходів є застосування методів, що базуються на теорії нечітких множин та нечіткій логіці.

Для прикладу розглянемо систему енергозабезпечення (рис. 3.1), яка включає сонячну електростанцію (СП), акумуляторну батарею (АБ), мережу (М) та навантаження (Н).



**Рисунок 3.1 – Структурна схема системи енергозабезпечення на базі сонячних панелей**

До складу системи входить також комутатор потоків електроенергії і

перетворювач її параметрів (К-П), який виконує наступні функції:

- 1) підключення СП до АБ;
- 2) підключення мережі до перетворювача для живлення навантаження і підзаряджання АБ;
- 3) підключення АБ до перетворювача для передачі енергії в навантаження/мережу;
- 4) перетворення постійного струму в змінний;
- 5) перетворення змінного струму в постійний.

Цифри на рис. 3.1 позначають підключення відповідного елемента до комутатора-перетворювача К-П, або комутуючі змінні:

- 1 - підключення СП;
- 2 – підключення мережі до К-П для передачі енергії від мережі;
- 3- підключення мережі до К-П для передачі енергії до мережі;
- 4 – підключення АБ до К-П для її заряду;
- 5 – підключення АБ до К-П для її розряду.

**Навантаження постійно підключене до К-П, тому для нього не визначається комутуюча змінна. Перехід з низького на високий рівень кожної з цих комутуючих змінних відбувається за сигналом вихідних змінних кожного елемента системи – СП, АБ і мережі. При цьому вид перетворення енергії визначається напрямком руху енергії – від мережі або в мережу живлення.**

Потрібно забезпечити наступні умови:

- 1) повне забезпечення навантаження енергією;
- 2) мінімальне споживання енергії при виведенні на режим різних видів навантажень;
- 3) відбирання від ВДЕ максимальної потужності;
- 4) виключення можливості глибокого розрядження АБ;
- 5) у разі недостатньої енергії, що надходить від ВДЕ – забезпечення живлення навантаження і заряду АБ від мережі.

### **3.2. Побудова функцій належності**

### Функції належності для сонячних панелей.

У якості термів обрано функції належності у формі трикутників та трапецій. Далі сформулюємо правила, що встановлюють зв'язок між нормалізованими вхідними змінними  $X_{\phi}$  сонячної панелі — інтенсивністю сонячного випромінювання, температурою, кутом падіння сонячних променів, струмом навантаження — та вихідною змінною  $Y_{\phi}$ , яка визначає кількість секцій панелі, що підлягають шунтуванню.

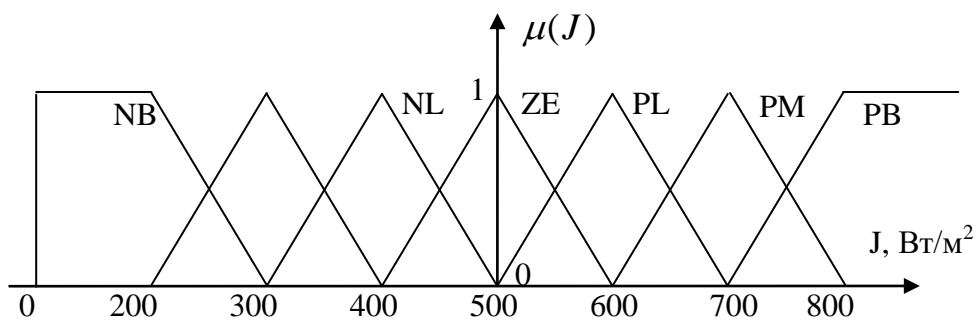
В табл. 3.1 введено позначення термів вхідних та вихідних змінних.

**Таблиця 3.1 – Умовні позначення термів змінних**

<b>N</b>	<i>Негативне</i>
<b>NB</b>	<i>Негативне велике</i>
<b>NM</b>	<i>Негативне середнє</i>
<b>NL</b>	<i>Негативне мале</i>
<b>ZE</b>	<i>Близьке до нуля</i>
<b>PL</b>	<i>Позитивне мале</i>
<b>PM</b>	<i>Позитивне середнє</i>
<b>PB</b>	<i>Позитивне велике</i>
<b>PVB</b>	<i>Позитивне дуже велике</i>
<b>PVL</b>	<i>Позитивне дуже мале</i>

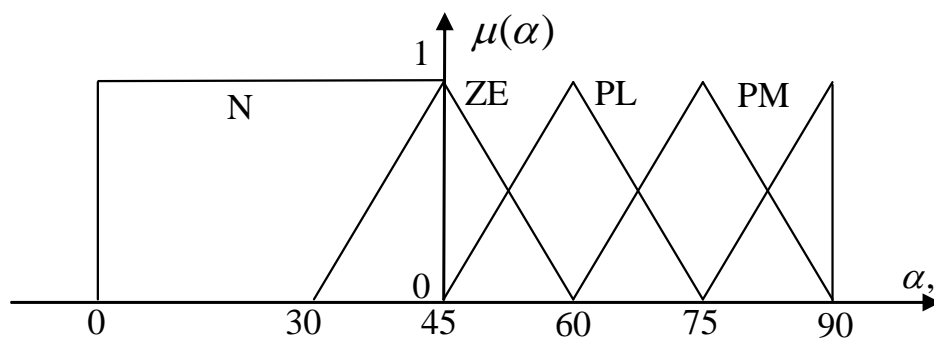
Встановимо відповідність між лінгвістичними змінними [1, 4, 13, 19, 24, 26, 28, 31, 32] та їх реальними значеннями. Критерієм керування виступає максимальне відбирання потужності від СП, що в даному випадку досягається при рівності вихідного струму СП та струму навантаження.

Нечіткі множини, що описують інтенсивність сонячного випромінювання, наведено на рис. 3.2.

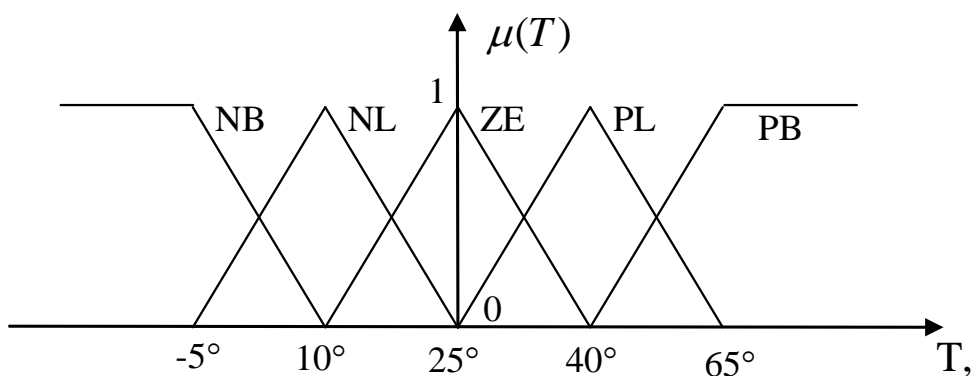


**Рисунок 3.2 – Нечіткі множини для вхідної нечіткої змінної СП  $\mu(X_{\phi 1})$**

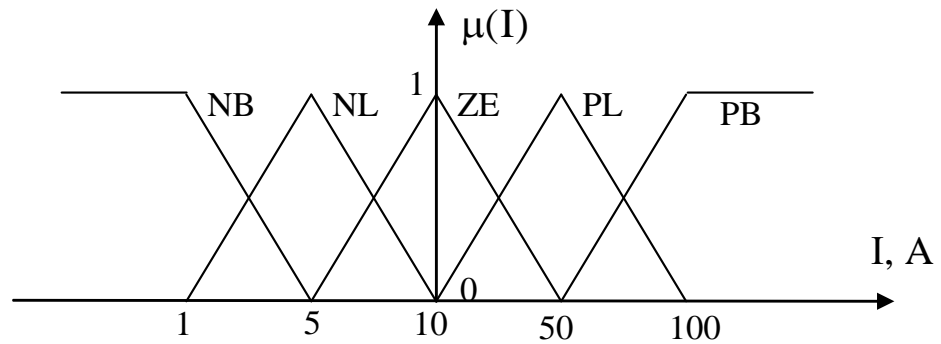
Для кута падіння сонячних променів на рис. 3.3, для температури поверхні СП на рис. 3.4, для струму навантаження на рис. 3.5 відповідно.



**Рисунок 3.3 – Нечіткі множини для вхідної нечіткої змінної СП  $\alpha(X_{\phi 2})$**

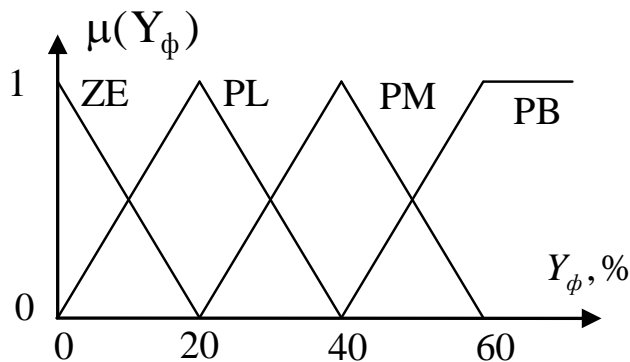


**Рисунок 3.4 – Нечіткі множини для вхідної нечіткої змінної СП  $T(X_{\phi 3})$**



**Рисунок 3.5 – Нечіткі множини для вхідної нечіткої змінної СП  $I(X_{\phi 4})$**

Для вихідної нечіткої змінної було обрано 4 нечіткі множини, діапазон яких визначається для кожної конкретної СП індивідуально в залежності від її характеристик (показує відносну кількість чарунок, яку необхідно зашунтувати) рис. 3.6.



**Рисунок 3.6 – Нечіткі множини для вихідної нечіткої змінної СП ( $Y_{\phi}$ )**

Наступним етапом є формування правил, що встановлюють взаємозв'язок між вхідними та вихідною нечіткими змінними. База правил створюється на основі теоретичного аналізу роботи СП. Представимо їх у такому форматі:

Якщо

$X_{\phi 1} \in \mathbf{NB}$  або  $\mathbf{NM}$  і  $X_{\phi 2} \in \mathbf{NB}$  і  $X_{\phi 3} \in \mathbf{NB}$  і  $X_{\phi 4} \in \mathbf{NB}$ , то  $Y_{\phi} \in \mathbf{PB}$  і т.д.

У табл.3.2 наведено повний набір правил для СП.

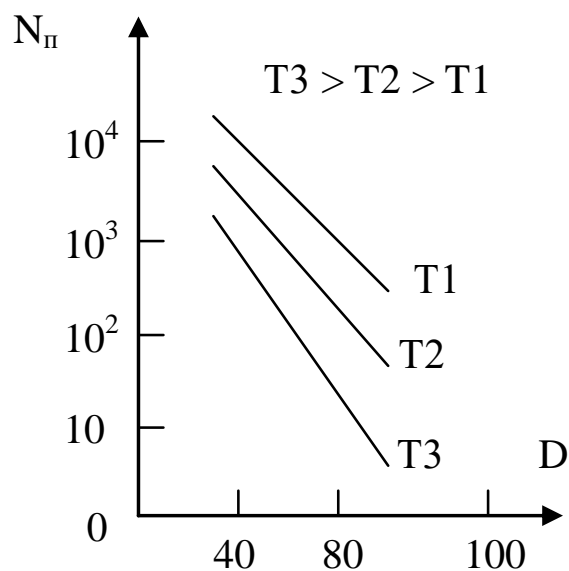
Таблиця 3.2 – База правил зв'язку вхідних та вихідних змінних СП

№ прав и-ла	Освітленість, $J$	Кут падіння, $\alpha$	Температура, $T$	Струм навантаження, $I_n$	Вихідна змінна, $Y_\phi$
1	PB	N	ZE	NB NL	PB
2	PB	N	ZE	ZE	PM
3	PB	N	ZE	PL	PL
4	PB	N	ZE	PB	ZE
5	PB	PL	ZE	NB	PB
6	PB	PL	ZE	NL	PM
7	PB	PL	ZE	ZE	PL
8	PB	PL	ZE	PL	ZE
9	PB	PL	ZE	PB	-
10	PB	PB PM	ZE	NB	PM
11	PB	PB PM	ZE	NL	PL
12	PB	PB PM	ZE	ZE	ZE
13	PB	PB PM	-	PL PB	-
14	PL	N	NL	NB	PB
15	PL	N	PL	NL	PM
16	PL	N	PL	ZE	PL
17	PL	N	PL	PL	ZE
18	PL	N	PL	PB	-
19	PL	PL	PL	NB	PM
20	PL	PL	PL	NL	PL
21	PL	PL	PL	ZE	ZE
22	PL	PL	PL	PL PB	-
23	PL	PB PM	PB	NB	PL
24	PL	PB PM	PB	NL	ZE
25	PL	PB PM	PB PL	PL PB ZE	-
26	NL	N	PB	NB	PL
27	NL	N	PB ZE	NL	-
28	NL	N	NB ZE	-	ZE
29	NL	PL	ZE	NB NL ZE	-
30	NL	PL	ZE	PL PB	ZE
31	NL	PB PM	ZE	-	-
32	NB	N ZE	ZE	NB NL ZE	ZE
33	NB	PL PB  PM	ZE	PL PB	-

Наведені правила встановлюють взаємозв'язок між вхідними та вихідною нечіткою змінною для всіх можливих комбінацій зміни вхідних параметрів. Це дозволяє обрати такий режим роботи системи, за якого вихідна потужність досягає максимального значення.

#### Функції належності для акумуляторної батареї.

Параметрами, що є визначальними і впливають на строк служби та ефективність роботи АБ, є глибина розряду і температура. Залежність числа кількості циклів перезарядження АБ  $N_n$  від глибини розряду  $D$  та температури  $T$  наведена на рис. 3.7.



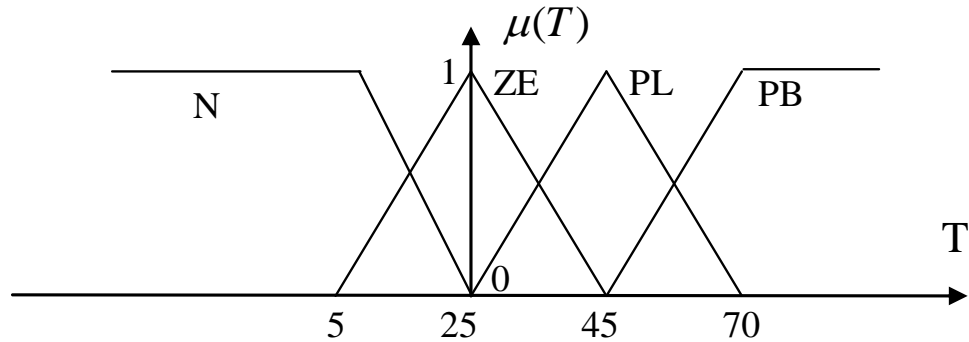
**Рисунок 3.7 – Залежність циклів перезаряду АБ  $N_n$  від глибини розряду  $D$  і температури  $T$**

Необхідно забезпечити максимальний рівень зарядженості АБ при мінімальних витратах енергії, одночасно гарантуючи максимальне відбирання потужності від ВДЕ.

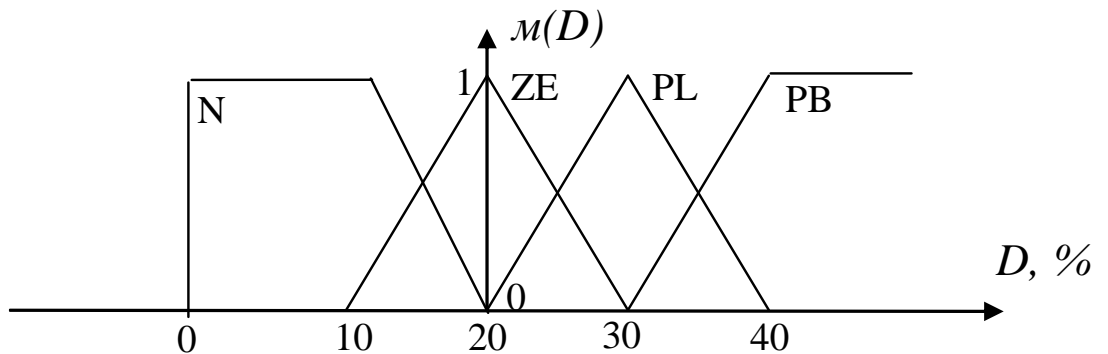
Для цього в магістерській роботі було сформульовано правила, що встановлюють зв'язок між вхідними змінними  $X_a$  АБ — температурою, глибиною розряду, струмом заряду від ВДЕ — та вихідною змінною  $Y_a$ , яка

визначає доцільність виконання заряду або розряду батареї в поточний момент часу.

Відповідності між лінгвістичними та реальними змінними наведено на рис. 3.8 та рис. 3.9.



**Рисунок 3.8 – Нечіткі множини для вхідної нечіткої змінної АБ  $T$**



**Рисунок 3.9 – Нечіткі множини для вхідної нечіткої змінної АБ  $D$**

Терми для струму заряду АБ приймаються аналогічними до термів для струму навантаження СП (див. рис. 3.5). Вихідна змінна для АБ може набувати лише двох значень: Р (розряд) та З (заряд).

До табл. 3.3 введені правила зв'язків вхідних та вихідних змінних АБ.

**Таблиця 3.3 – Набір правил для АБ**

№ правила	Вхідні змінні			Вихідна змінна $Y_a$
	Температура, $T$	Глибина розряду, %	Струм заряду, $I_z$	
1	-	PB	-	З(АРЯД)
2	N	N	NB	P(ОЗРЯД)
3	ZE PL	ZE	ZE	P
4	-	PL	ZE PL PB	З
5	-	PL	NB NL	P
6	N	N	PB	P

Правила, наведені в таблиці 3.3, визначають доцільність виконання заряду або розряду акумуляторної батареї в конкретний момент часу. Це означає прийняття рішення щодо передачі енергії з АБ через перетворювач у мережу живлення чи навантаження, або, навпаки, заряджання АБ від відновлюваних джерел енергії чи мережі.

#### Функції належності для мережі живлення.

Енергія, що постачається з мережі живлення, може тарифікуватися за кількома рівнями. Припустимо, існує три тарифи [1, 4, 13, 19, 24, 26, 28, 31, 32]: низький — у нічні години, середній — у денні години, та високий — у ранкові й вечірні години.

Слід прагнути мінімізувати відбирання енергії з мережі під час дії високого або навіть середнього тарифу. Якщо потужності відновлюваних джерел недостатньо для забезпечення нормальної роботи навантаження, енергія береться з мережі, бажано під час дії низького тарифу.

Заряджання акумуляторної батареї (АБ) у такому випадку також доцільно виконувати в період низького тарифу, за умови відсутності достатньої потужності від ВДЕ. Під час високого тарифу, якщо АБ має достатній рівень заряду для живлення навантаження, оптимальним є передача надлишкової енергії від ВДЕ у мережу, що сприяє зменшенню загальної вартості енергії, коли-небудь спожитої з мережі.

База правил для тарифів

Вхідні змінні:

- Т — тариф (низький, середній, високий)
- $E_{ВДЕ}$  — потужність відновлюваних джерел
- SOC — рівень заряду АБ

Вихідна змінна:

- Дія (заряд АБ, розряд АБ, віддача в мережу, споживання з мережі)

### Приклади правил (у форматі IF–THEN):

1. **IF** тариф = високий **AND** SOC = високий **AND**  $E_{ВДЕ}$  = достатня **THEN** віддавати енергію в мережу.
2. **IF** тариф = високий **AND** SOC = низький **AND**  $E_{ВДЕ}$  = недостатня **THEN** жити навантаження з АБ, не брати енергію з мережі.
3. **IF** тариф = середній **AND**  $E_{ВДЕ}$  = достатня **THEN** жити навантаження від ВДЕ, заряд АБ за можливості.
4. **IF** тариф = середній **AND**  $E_{ВДЕ}$  = недостатня **AND** SOC = низький **THEN** мінімізувати споживання з мережі, частково жити навантаження з АБ.
5. **IF** тариф = низький **AND** SOC = низький **THEN** заряджати АБ від мережі.
6. **IF** тариф = низький **AND** SOC = високий **THEN** жити навантаження від ВДЕ, не брати енергію з мережі.

База правил для тарифів працює за принципом нечіткої логіки, де кожне правило описує оптимальну дію системи залежно від комбінації вхідних параметрів: тариф, потужність від ВДЕ та рівень заряду АБ (SOC).

Алгоритм роботи наступний:

1. Фазифікація (перетворення вхідних даних у нечіткі множини):
  - поточний тариф (низький, середній, високий) визначається як лінгвістична змінна.
  - потужність ВДЕ та SOC також переводяться у нечіткі терми (наприклад, «низький», «середній», «високий»).
2. Застосування правил:
  - система перевіряє всі правила типу **IF–THEN**.

- наприклад:

*IF тариф = високий AND SOC = високий AND потужність ВДЕ = достатня THEN віддавати енергію в мережу.*

- кожне правило має ступінь виконання (ступінь належності до нечіткої множини).

### 3. Агрегація результатів:

- якщо кілька правил активні одночасно, їхні результати комбінуються (методами max, sum тощо).

### 4. Дефазифікація (отримання чіткого рішення):

- на основі агрегованих результатів система видає конкретну дію:
  - заряд АБ від мережі (якщо тариф низький і SOC низький).
  - розряд АБ (якщо тариф високий і SOC високий).
  - віддача енергії в мережу (якщо тариф високий і є надлишок ВДЕ).
  - мінімальне споживання з мережі (якщо тариф середній або високий і SOC низький).

Вхідними змінними для мережі виступають тарифний план, сумарна потужність ВДЕ та рівень зарядженості АБ. Вихідна змінна в цьому випадку визначає напрямок передачі енергії: у мережу (IN), з мережі (OUT) або повне невикористання мережі. Відповідні правила наведено в таблиці 3.4.

Таким чином, залежно від поточного режиму роботи визначається необхідність підключення мережі для живлення навантаження, заряджання АБ або передачі надлишкової енергії в мережу під час дії високого чи середнього тарифу.

Комутатор-перетворювач (див. рис. 3.1) виконує дефазифікацію, тобто перетворює нечіткі вихідні змінні кожного елемента системи у чіткі сигнали, що керують підключенням відповідних компонентів у потрібний момент часу.

**Таблиця 3.4 – Набір правил для мережі**

<b>Вхідні змінні</b>
----------------------

№ правила	Тарифний план	Сумарна вихідна потужність ВДЕ	Рівень зарядженості АБ	Напрямок руху енергії з/в мережу $Y_m$
1	<i>N</i>	<i>PB PM PL</i>	<i>PB</i>	-
2	<i>N</i>	<i>PL</i>	<i>PL</i>	<i>OUT</i>
3	<i>Z</i>	<i>PB PM</i>	<i>PB</i>	<i>IN</i>
4	<i>Z</i>	<i>PB PM</i>	<i>PL</i>	-
5	<i>Z</i>	<i>PL</i>	<i>PL</i>	<i>OUT</i>
6	<i>P</i>	<i>PB PM</i>	<i>PB</i>	<i>IN</i>
7	<i>P</i>	<i>PL</i>	<i>PB</i>	-
8	<i>P</i>	<i>PL</i>	<i>PL</i>	<i>OUT</i>

Це забезпечує один із п'яти можливих режимів роботи системи:

- X1** — підключення СП до комутатора-перетворювача (К-П);
- X2** — підключення мережі до К-П для отримання енергії;
- X3** — підключення мережі до К-П для передачі енергії в мережу;
- X4** — підключення АБ до К-П для заряджання;
- X5** — підключення АБ до К-П для розряджання.

Навантаження функціонує в умовах безперервного електричного з'єднання з керувальним перетворювальним пристроєм, який забезпечує регулювання параметрів енергопередавання в системі. Характер та режим перетворення енергії визначається переважаючим напрямком її руху — як у напрямку від живильної мережі до споживача, так і у зворотному напрямку з можливістю рекуперації енергії до мережі електроживлення.

У таблиці 3.5 у спрощеній, але узагальненій формі відображено концептуальну модель процесу дефазифікації в межах функціонування досліджуваної системи. Зазначена модель представлена у вигляді системи логіко-алгоритмічних правил, що формалізують залежності між вхідними змінними впливу та вихідними параметрами системи енергозабезпечення.

**Таблиця 3.5 – Таблиця комутації К-П**

№ правила	$Y_{cб}$	$Y_a$	$Y_m$	X1	X2	X3	X4	X5
1	PB	3	OU	1	1	0	0	1
2	-	P	OU	0	1	0	1	0
3	PM	P	IN	1	0	1	1	0
4	-	P	IN	0	0	1	1	0
5	NB	3	OU	0	1	0	0	1
6	PM	3	IN	1	0	1	0	1
7	ZE	3	OU	1	1	0	0	1

Різноманітні комбінації вхідних змінних  $Y_{cб}$ ,  $Y_a$ ,  $Y_m$  створюють основу для ідентифікації режимів, за яких досліджувана система демонструє найвищі показники енергоефективності у процесі споживання електричної енергії. Аналіз цих комбінацій дає змогу визначити оптимальні умови функціонування системи з урахуванням змінних навантажень та зовнішніх впливів.

У результаті інтеграції апарату нечіткої логіки з класичними методами аналізу детермінованих (чітких) змінних досягається можливість декомпозиції комплексної задачі оптимізації електроспоживання на сукупність взаємопов'язаних, але відносно автономних підзадач. На наступному етапі значення вихідних змінних, отримані в процесі розв'язання локальних підзадач, застосовуються як вхідні параметри при формуванні та розв'язанні узагальненої оптимізаційної задачі, орієнтованої на підвищення загальної енергетичної ефективності системи.

### **Висновки до розділу**

З наведеного в даному розділі можна зробити такі висновки:

1. Обґрунтовано принцип ієрархічної взаємодії підзадач оптимізації, згідно з яким результати (вихідні змінні), отримані на локальному рівні керування, слугують вхідними параметрами для формування та розв'язання узагальненої задачі керування енергозабезпеченням. Така організація обчислювального процесу дозволяє реалізувати структурну модель системи у вигляді інтегрованого функціонального блока комутації та перетворення

параметрів електричної енергії, розміщеного між джерелами генерації та навантаженнями.

2. Теоретично та методично обґрунтовано застосування нечіткої логіки в алгоритмі керування ШІП, що забезпечує адаптивний вибір режиму відбору максимальної потужності від сонячної панелі. Запропонований підхід сприяє підвищенню швидкодії системи керування та забезпечує адекватне врахування динамічних змін параметрів як генераційного джерела, так і споживчого навантаження.

3. Показано, що інтеграція нечітких правил з аналізом детермінованих змінних дозволяє підвищити стійкість та ефективність функціонування системи енергозабезпечення в умовах змінних режимів роботи та зовнішніх впливів, що є важливою передумовою для оптимізації процесів електроспоживання.

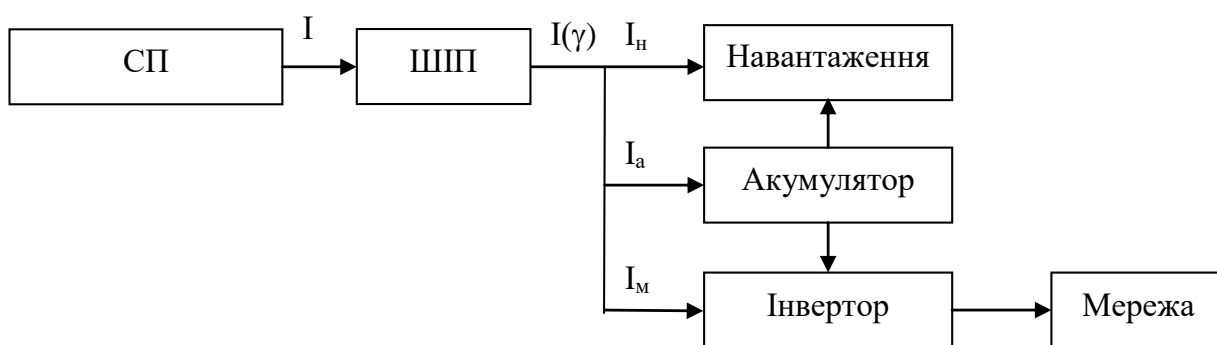
4. Запропонована структура та алгоритмічне забезпечення системи керування створюють передумови для зниження втрат електричної енергії, покращення якості енергетичних показників та підвищення загального коефіцієнта корисної дії досліджуваної системи.

## 4 РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ СТРУКТУРИ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕЖИМУ ВІДБОРУ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІД СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

### 4.1. Система керування для забезпечення максимальної потужності фотоелектричного модуля

Електричні параметри сонячної батареї суттєво залежать від зміни рівня освітленості та температурних умов у процесі її функціонування. Внаслідок цього характер і обсяг електричної енергії, яка передається до навантаження, є змінними та детермінуються сукупністю зовнішніх природних чинників, що динамічно впливають на генераційні властивості фотоелектричного джерела. За таких умов забезпечення стабільного й ефективного відбору енергії протягом усього періоду роботи системи набуває особливої актуальності та потребує застосування адаптивних методів керування.

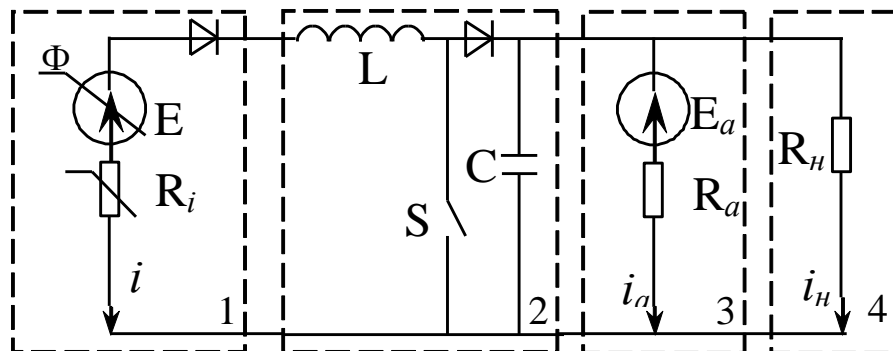
Розглянемо енергетичну систему, яка включає в себе джерело електричної енергії у вигляді СП, накопичувач енергії – АБ, споживче навантаження, а також інвертор, призначений для перетворення та подальшої передачі надлишкової електричної енергії в мережу електроживлення (рис. 4.1).



**Рисунок 4.1 – Структурна схема системи відбирання потужності від СП**

З огляду на те, що значення навантаження у досліджуваній системі не підлягає прямому регулюванню, зміна вихідного струму СП  $I$  можлива через коригування зарядного струму АБ  $I_a$  та струму мережі  $I_m$ .

Сонячна панель, представлена у схемі на рис. 4.2, характеризується електрорушійною силою ЕРС  $E$ , яка змінюється у залежності від рівня освітленості  $\Phi$ , внутрішнім опором  $R_i$  та вихідним струмом  $I$ . ШПП виконує функцію пристрою відбирання максимальної потужності, регулюючи коефіцієнт заповнення імпульсів та забезпечуючи оптимальне узгодження параметрів СП з навантаженням та АБ.



**Рисунок 4.2 – Функціональна схема пристрою відбирання максимальної потужності від СП без врахування віддавання надлишкової енергії до мережі**

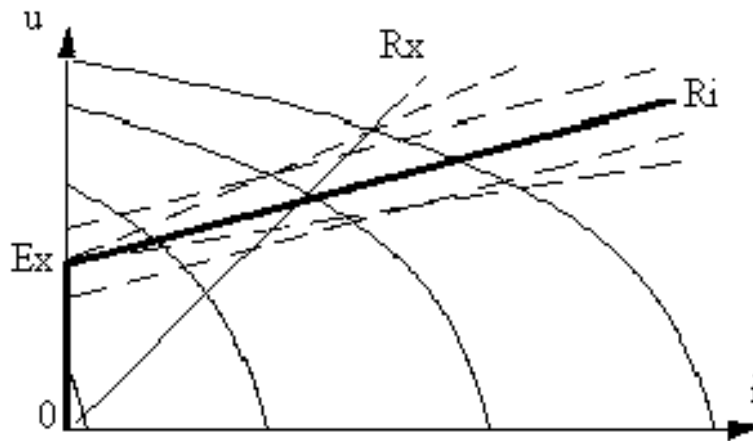
Для спрощення моделювання вважається, що навантаження є чисто активним. Акумуляторна батарея характеризується напругою на виводах АБ  $E_a$ , внутрішній опір  $R_a$ , зарядний струм  $I_a$ , що визначає можливості накопичення та віддачі енергії у систему.

Оскільки розглядувана система включає АБ, необхідною умовою віддачі електричної енергії без застосування ШПП є виконання нерівності, за якої ЕРС СП  $E$  перевищує напругу еквівалентного навантаження  $E_x$ , що формується АБ та споживачем [17]:

$$E > E_x, \quad (4.1)$$

де  $E_x = E_a R_n / (R_n + R_a)$ .

На рис. 4.3 представлені сімейства вольт-амперних характеристик навантаження і СП в залежності від освітленості [17, 35], відповідно з траєкторією робочої точки СП ("жирною" лінією).



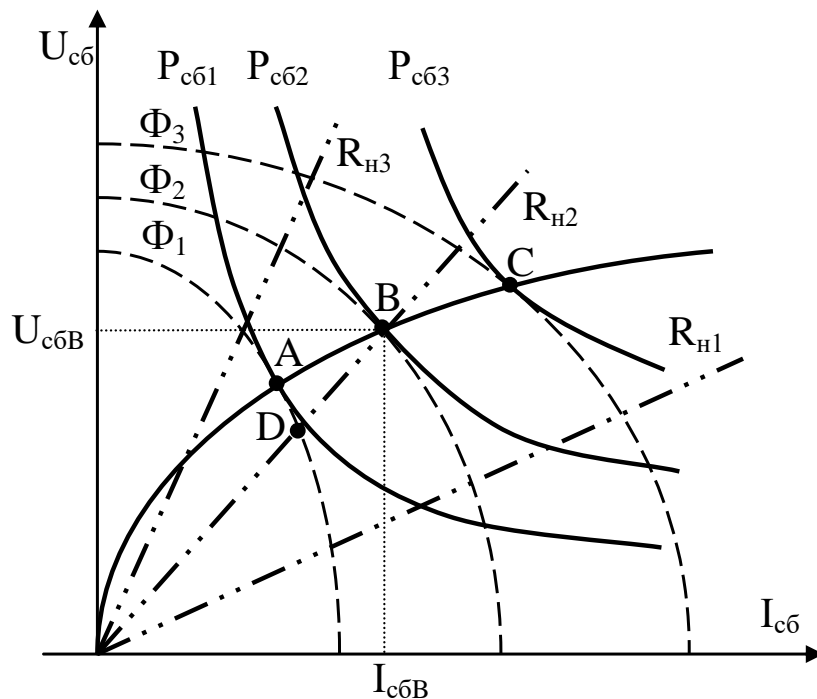
**Рисунок 4.3 – Залежності освітленості від ВАХ СП, навантаження**

Нахилена ділянка траєкторії переміщення робочої точки, що відповідає процесу передачі енергії від СП до навантаження, змінює своє положення залежно від ступеня заряду АБ, що ілюструється пунктирною лінією на рис. 4.3. Водночас еквівалентний опір навантаження змінюється при коливаннях параметрів споживання, що призводить до додаткової динаміки положення робочої точки.

Серед основних недоліків розглядуваної системи слід відзначити те, що відбираєна потужність від СП, у загальному випадку, є меншою за максимальну потужність, яку СП здатна віддати за тих самих умов освітленості та температури. У разі зниження інсоляції нижче критичного рівня, при якому виконується рівність електрорушійної сили ЕРС СП  $E$  та напруги еквівалентного навантаження  $E_x$ , передача енергії до навантаження стає неможливою.

З метою підвищення енергоефективності фотоелектричних систем доцільно впроваджувати пристрої відбирання максимальної потужності (ПВМП), що дозволяють усунути зазначені обмеження шляхом забезпечення оптимального положення робочої точки СП незалежно від коливань зовнішніх факторів. Для ефективного проектування цих систем слід знайти область робочих режимів, у якій система здатна передавати максимальну потужність [17, 35].

На рис. 4.4 представлені ВАХ СП, що відповідають освітленостям  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  ( $\Phi_1 < \Phi_2 < \Phi_3$ ).



**Рисунок 4.4 – ВАХ СП, навантажень та криві максимальної потужності**

Лінії, що відповідають максимально можливій потужності СП при різних рівнях освітленості  $\Phi_1$ – $\Phi_3$ , позначені як  $P_{сб1}$ – $P_{сб3}$ . Відбирання максимальної потужності здійснюється вздовж кривої, яка проходить через точки А, В, С, що відповідають перетину ліній максимальної потужності з відповідними рівнями освітленості.

Навантаження у системі характеризується сімейством ліній, позначених  $R_{н1}, R_{н2}, R_{н3}$ , яким відповідають еквівалентні опори  $R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}$  ( $R_{x3} > R_{x2} > R_{x1}$ ) за умови  $R_{x3} > R_{x2} > R_{x1}$ . Ця залежність відображає зміни еквівалентного опору навантаження при різних режимах споживання, що суттєво впливає на положення робочої точки та наявності можливості забрати максимальну потужність від СП.

#### 4.2. Аналіз режимів функціонування сонячної панелі

Можливі режими роботи СП представлено у табл. 4.1.

**Таблиця 4.1 – Режими роботи сонячної панелі**

1	$P_{стmax} = P_{сн} = P_{н}$	Потужність, що виробляється СП, повністю віддається у навантаження. В цьому режимі робоча точка рухається по кривій АВС (рис. 4.4).
2	$P_{стmax} = P_{сн} > P_{н}$	Потужність, що виробляється СП, перевищує потужність навантаження. Надлишок енергії витрачається на заряд АБ або віддається в зовнішню мережу.
3	$P_{стmax} > P_{сн} > P_{н}$	Потужність, що виробляється СП, перевищує потужність навантаження; додаткових споживачів немає. Система працює в режимі стабілізації напруги. В цьому режимі не відбувається відбирання максимальної потужності.
4	$P_{стmax} = P_{сн} < P_{н}$	Потужність, що виробляється СП, недостатня для живлення навантаження; присутні додаткові джерела (АБ, зовнішня мережа). Недостача енергії для живлення навантаження компенсується за рахунок АБ і/або мережі.
5	$P_{стmax} = P_{сн} < P_{н}$	Потужність, що виробляється СП, недостатня, АБ розряджена, зовнішньої мережі немає. Система працює в режимі стабілізації струму або аварійно відключається.
6	$P_{стmax} = P_{сн} < P_0$	$P_0$ - потужність, еквівалентна сумі втрат в установці і потужності системи управління. Система переходить до нерегульованого виду або аварійно відключається.

Аналіз даних табл. 4.1 свідчить, що забезпечення відбору максимальної потужності можливе майже в усіх режимах роботи фотоелектричної системи, за винятком випадків перевиробництва енергії СП порівняно зі споживанням навантаженням. Отже, найбільш раціональним для практичного використання є комбінований режим, що включає стабілізацію напруги, передачу максимальної потужності та обмеження струму.

Окремо відмитимо, що відбір максимальної потужності можливий лише в певному та конкретному діапазоні зміни коефіцієнта заповнення імпульсів, відповідно до якого система забезпечує допустимі значення напруги та струму на виході ШП. Надлишкова енергія, що перевищує потреби навантаження або АБ, через перетворювач передається в мережу живлення, підтримуючи стабільні параметри струму та напруги на навантаженні або АБ.

Розглянемо систему з підвищувальним ШП при відключеній АБ (рис. 4.2). Диференціальні рівняння, що описують процеси в схемі при замкнутому та розімкнутому ключі S, мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 a) \quad E &= L \frac{di_L}{dt} + i_L R_i, \\
 C \frac{du_C}{dt} &= -\frac{u_C}{R_n}, \\
 b) \quad E &= L \frac{di_L}{dt} + i_L R_i + u_C, \\
 i_L &= C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C}{R_n}.
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

де  $E$  – ЕРС СП,

$E_x$  – еквівалентна ЕРС АБ,

$R_i$  – внутрішній опір СП,

$R_n$  – опір навантаження.

Припустимо, що ЕРС сонячної панелі та АБ не залежать від опору навантаження і залишаються сталими. Наближений розв'язок диференціальних рівнянь системи (4.2) можна отримати, застосувавши розкладання у ряд Тейлора [15, 16, 20, 21, 27], обмежившись двома першими членами цього розкладу.

$$\begin{aligned}
& i_{1L}(t) = I_{1L}(0) + \frac{E - R_i I_{1L}(0)}{L} t \\
\text{а)} \quad & u_{1C}(t) = U_{1C}(0) - \frac{U_{1C}(0)}{R_h C} t \\
& i_{2L}(t) = I_{2L}(0) + \frac{E - R_i I_{2L}(0) - U_{2C}(0)}{L} t, \\
\text{б)} \quad & u_{2C}(t) = U_{2C}(0) + \frac{R_h I_{2L}(0) - U_{2C}(0)}{R_h C} t
\end{aligned} \tag{4.3}$$

де  $I_{1L}(0)$ ,  $U_{1C}(0)$ ,  $I_{2L}(0)$ ,  $U_{2C}(0)$  - початкові значення струму дроселя і напруги на конденсаторі на інтервалах роботи ШПП.

**Якщо величина пульсацій струму в дроселі і напруги на конденсаторі на періоді роботи не перевищує 1-2%, можна записати наступні приблизні вирази [15, 16, 20, 21, 27]:**

$$\begin{aligned}
I_{1L}(0) &= i_{2L}(T - \tau) \approx I_{2L}(0) = i_{1L}(\tau) = I(0), \\
U_{1C}(0) &= u_{2C}(T - \tau) \approx U_{2C}(0) = u_{1C}(\tau) = U(0),
\end{aligned} \tag{4.4}$$

де  $T$  - період ШПП,

$\tau$  – інтервал відкритого стану транзистора ШПП.

Підставляючи в перші два рівняння системи (4.3) значення  $t = \tau$ , а в другі два  $t = T - \tau$ , знайдемо початкове значення струму в дроселі:

$$I(0) = \frac{E}{R_i + R_h(1 - \gamma)^2}, \tag{4.5}$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт заповнення імпульсів ШПП.

Напруга на конденсаторі:

$$U(0) = \frac{E \cdot R_h(1 - \gamma)}{R_i + R_h(1 - \gamma)^2}, \tag{4.6}$$

Вихідна потужність СП визначається таким виразом:

$$P = E \cdot I(0) - R_i \cdot I(0)^2 = \frac{E^2 R_n (1 - \gamma)^2}{(R_i + R_n (1 - \gamma)^2)}, \quad (4.7)$$

Взявши першу похідну за опором навантаження від виразу (4.7), отримуємо вираз опору навантаження за умови відбирання максимальної енергії:

$$R_n = \frac{R_i}{(1 - \gamma)^2 + 2 \frac{dR_i}{dR_n}}, \quad (4.8)$$

Виконання умови (4.8) реалізується за допомогою зміни коефіцієнта заповнення імпульсів  $\gamma$  ШПП.

Таким чином, застосування схем ШПП дає змогу реалізувати умови відбору максимально-найбільшої потужності від СП шляхом регулювання шпаруватості імпульсів відповідно до заданих законів при зміні параметрів еквівалентної схеми фотоелемента залежно від зовнішніх умов та типу навантаження.

Далі розглянемо особливості роботи схеми (рис. 4.2) з урахуванням опору та ЕРС АБ, підключеної паралельно до активного навантаження. Диференціальні рівняння, за допомогою яких можна описати процеси у схемі із застосуванням ШПП в умовах якщо замкнутий та розімкнутий ключ S, мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} a) \quad E &= L \frac{di_L}{dt} + i_L R_i, \\ C \frac{du_C}{dt} &= - \frac{u_C - E_x}{R_i}; \\ b) \quad E &= L \frac{di_L}{dt} + i_L R_i + u_C, \\ i_L &= C \frac{du_C}{dt} + \frac{u_C - E_x}{R_i}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Використовуючи аналогічні міркування, як і у випадку із відключеною АБ, визначимо початкові значення струму в дроселі:

$$I(0) = \frac{E - E_x(1 - \gamma)}{R_i + R_x(1 - \gamma)^2}, \quad (4.10)$$

напруги на конденсаторі:

$$U(0) = \frac{E \cdot R_x(1 - \gamma) + E_x R_i}{R_i + R_x(1 - \gamma)^2}, \quad (4.11)$$

Енергію на виході СП можна визначити наступним чином:

$$P = E \cdot I(0) - R_i \cdot I(0)^2 = \frac{(1 - \gamma) \cdot (E \cdot R_x \cdot (1 - \gamma) + E_x \cdot R_i) \cdot (E - E_x \cdot (1 - \gamma))}{(R_i + R_x(1 - \gamma)^2)^2}, \quad (4.12)$$

Для забезпечення умови відбору максимальної енергії необхідно регулювати коефіцієнт заповнення імпульсів  $\gamma$  ШПП у такий спосіб, щоб внутрішній опір СП дорівнював еквівалентному вихідному опору навантаження.

Перша похідна потужності  $P$  по  $R_x$  як  $P_{R_x}$ , і прирівняна до нуля:

$$P_{R_x} = \frac{dP}{dR_x} = 0, \quad (4.13)$$

Опір навантаження може змінюватися безпосередньо лише при зміні струму навантаження, тобто шляхом підключення або відключення окремих споживачів чи зміни внутрішнього опору АБ. Оскільки навантаження підключаються незалежно від роботи системи керування, регулювання еквівалентного опору здійснюється шляхом зміни коефіцієнта заповнення імпульсів ШПП. Для визначення умови відбору максимальної потужності в цьому випадку візьмемо похідну по коефіцієнту заповнення імпульсів  $\gamma$  та прирівняємо отриманий вираз до нуля.

$$P_\gamma = \frac{dP}{d\gamma} = 0, \quad (4.14)$$

З огляду на те, що аналітичний вираз першої похідної потужності за коефіцієнтом заповнення імпульсів  $P_\gamma$  у цьому випадку є рівнянням третього порядку.

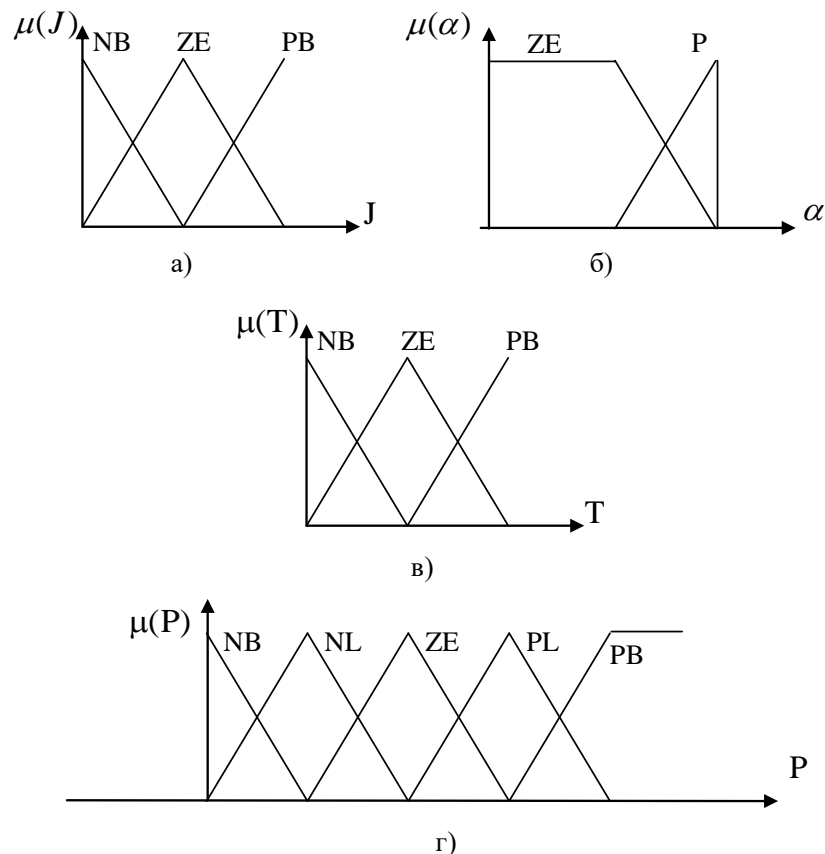
Також враховуючи постійну зміну внутрішнього опору СП, еквівалентного опору та напруги навантаження, доцільним є застосування нечіткої логіки для керування ШПП. Це означає не точне обчислення значення  $\gamma$  на кожному кроці керування, а його наближене коригування відносно певного номінального значення для даного режиму, використовуючи критерії типу «більше» або «менше».

### **4.3. Характеристики нечіткого регулятора**

Для розробки ефективних систем керування на основі нечітких регуляторів важливо коректно визначати нечіткі дані та правила, що забезпечують оптимальне керування за обраними критеріями. Нечіткий регулятор характеризується великою кількістю параметрів, зміна яких суттєво впливає на вихідний сигнал, зокрема: кількість, форма та параметри термів вхідних і вихідних змінних, кількість вхідних змінних, правила логічної обробки та методи дефазифікації. Збільшення кількості правил або термів покращує точність керування, але водночас ускладнює та сповільнює процес перетворення вхідних і вихідних змінних, що знижує швидкодію регулятора. Тому необхідно визначити доцільність використання тих чи інших параметрів для забезпечення оптимального керування в кожен момент часу. Залежність параметрів нечіткого регулятора від його вихідних характеристик розглянемо на прикладі керування відбором потужності від СП. Для оцінки точності керування при використанні різних операторів розглянемо задачу, описану в підрозділі 4.1, у модифікованому вигляді.

У цій задачі вхідними змінними залишаються ті самі, за винятком струму навантаження: кут падіння сонячних променів, інтенсивність сонячного випромінювання та температура, а вихідною змінною є вихідна потужність сонячної панелі. Це дозволяє перевірити теоретичні залежності вихідної змінної (потужності СП) від трьох вхідних параметрів. Для початку розглянемо найпростіший випадок: терми вхідних і вихідних змінних мають трикутну та

трапецеїдальну форму; кількість термів для кожної вхідної змінної не перевищує трьох, а для вихідної — п'ять. У такому випадку максимальна кількість правил становитиме 18 при переборі всіх нечітких множин (рис. 4.5). Використаємо алгоритм Мамдані [9, 12, 37] з інференс-операторами AND (I) типу **min**, у процедурі імплікації застосуємо оператор **min**, для агрегації — оператор **max**, а для дефазифікації — метод центроїда.

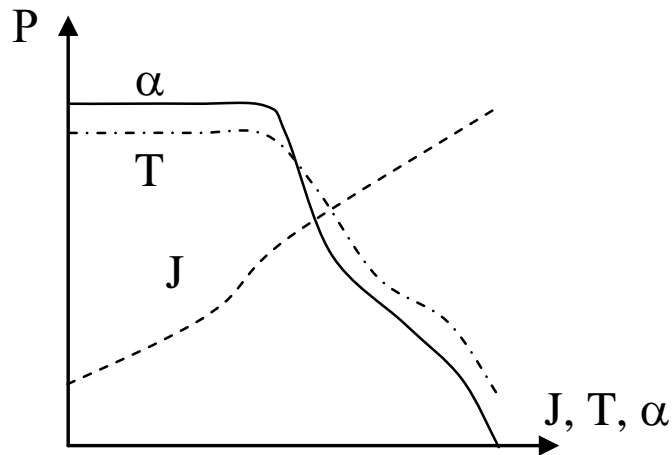


**Рисунок 4.5 – Функції належності вхідних і вихідної нечітких змінних:**

*a – інтенсивності, б – кута падіння,*

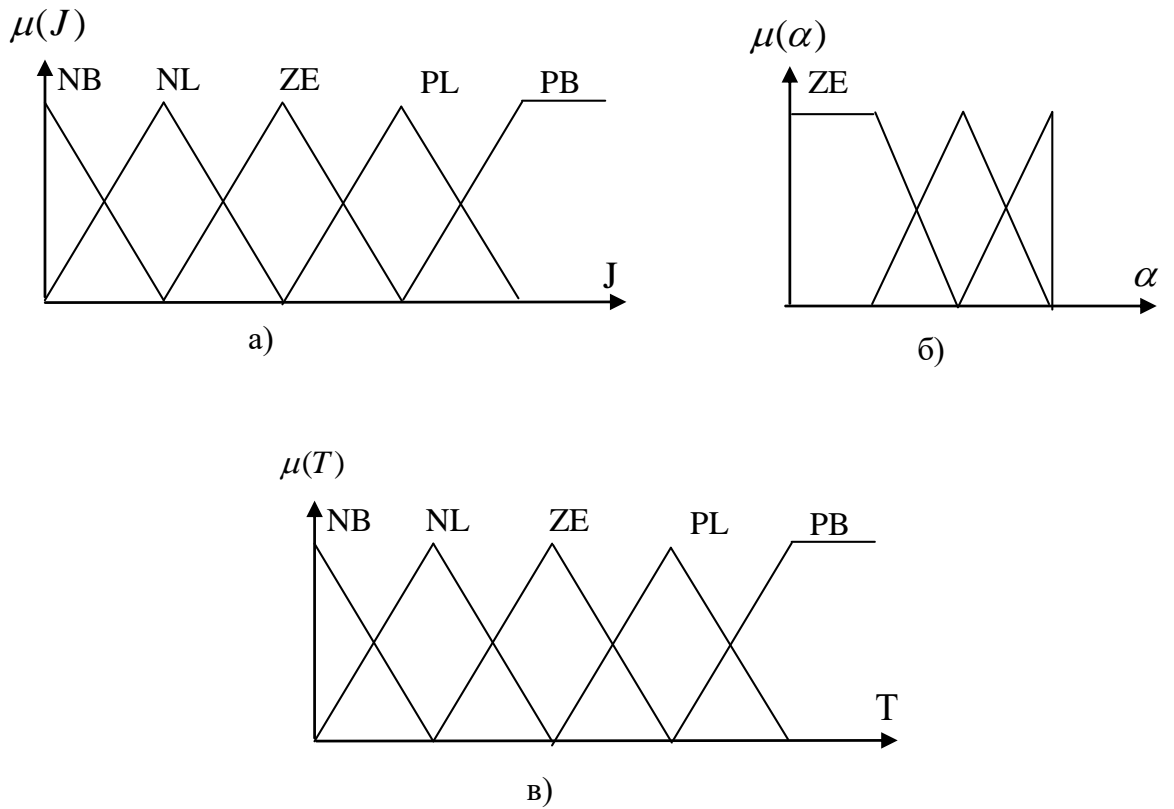
*в – температури, г – вихідної потужності*

У результаті отримуємо вихідні характеристики нечіткого регулятора, тобто залежності вихідної потужності від вхідних змінних при зміні параметрів термів, що наведені на рис. 4.6.



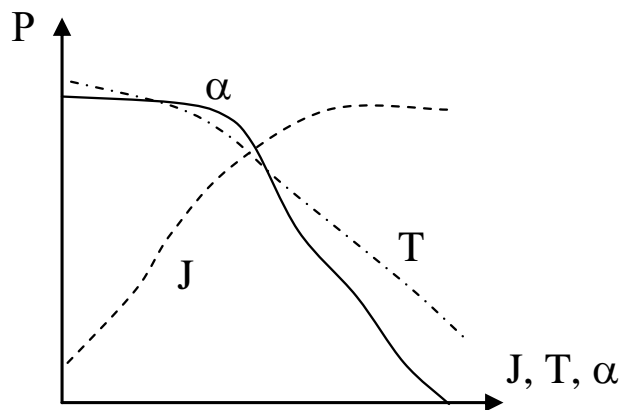
**Рисунок 4.6 – Вихідні характеристики нечіткого регулятора**

Як видно з рис. 4.6, при обраних операторах і формах термів вхідних змінних вихідні характеристики відображають лише загальний характер реальних залежностей. Наприклад, не враховано спад потужності при високих значеннях інтенсивності сонячного випромінювання; потужність залишається незмінною при куті нахилу менше  $50^\circ$ , хоча на практиці вона зменшується і в цьому діапазоні; температурна залежність потужності також істотно відрізняється від отриманої. Крім того, найбільший вплив на вихідну потужність має зміна інтенсивності випромінювання, тому необхідно збільшити вагу цієї вхідної змінної порівняно з іншими. Введення трапецеїдальних термів для кута падіння сприяє стабілізації вихідного сигналу в межах дії цього терму. Для визначення впливу форми та кількості термів вхідних змінних на вихідні характеристики регулятора збільшимо кількість термів (рис. 4.7). Внаслідок зміни вхідних змінних і відповідного збільшення кількості правил вихідні характеристики регулятора набувають вигляду, показаного на рис. 4.8.



**Рисунок 4.7 – Нечіткі множини вхідних і вихідної нечітких змінних у випадках збільшення кількості термів:**

*a – інтенсивності, б – кута падіння, в – температури*



**Рисунок 4.8 – Вихідні характеристики нечіткого регулятора при збільшенні кількості термів**

Збільшення кількості вхідних термів підвищує точність регулювання, проте одночасно призводить до трикратного зростання кількості правил, що,

відповідно, знижує швидкодію регулятора. Таким чином, просте нарощування кількості термів і правил є недоцільним через значне збільшення часу обробки інформації в нечіткій системі. За великої кількості вхідних змінних ключовим стає не кількість термів і правил, а їх здатність адекватно відобразити фізичні процеси в об'єкті керування. Використання термів, що мають синусоїдальну форму або базуються на розподілі Гауса, хоча й підвищує точність, є складним для реалізації, тому для даної задачі недоцільне. Натомість правильне розташування трикутних і трапецеїдальних термів, зміна їх перекриття та зон взаємодії дозволяє отримати необхідну форму вихідного сигналу регулятора [9, 12, 37]. Далі проаналізуємо вплив зміни операторів та методів дефазифікації на вихідні характеристики регулятора при незмінних термах і правилах.

Аналіз показує, що при використанні оператора імплікації *min* та одного з операторів агрегації *sum* або *probor* вихідні характеристики регулятора практично не відрізняються незалежно від застосованого методу дефазифікації. При використанні методів *tom*, *lom* та *som* у поєднанні з оператором агрегації *prod*, незалежно від оператора імплікації, вихідні характеристики набувають релейного характеру (щаблів), що є неприйнятним для даної задачі. Метод дефазифікації *бісектор* формує більш нелінійні характеристики порівняно з методом *центроїд*, навіть за симетричних термів. Тому найбільш прийнятним є метод дефазифікації *центроїд*.

Враховуючи проведений аналіз, оптимальним для даної задачі є використання симетричних термів трикутної та трапецеїдальної форми з методом дефазифікації *центроїд*, оператором імплікації *min* та оператором агрегації *max*, або комбінація методу дефазифікації *бісектор* з оператором імплікації *min* та агрегації *sum*, оскільки ці варіанти забезпечують високу швидкодію та достатню точність відтворення теоретичних залежностей.

## **Висновки до розділу**

З наведеного в даному розділі можна зробити такі висновки:

5. Проведено аналіз методів побудови нечітких регуляторів для відбору максимальної потужності від СП і визначено, що найбільш доцільним є застосування симетричних нечітких термів трикутної та трапецеїдальної форми. Такий вибір забезпечує простоту побудови функцій належності та їх інтерпретацію в термінах фізичних параметрів системи.

6. Обґрунтовано використання методу дефазифікації центроїда, який дозволяє отримувати неперервні та гладкі вихідні значення керувального сигналу, що забезпечує стабільну роботу системи при зміні вхідних параметрів.

7. Показано доцільність застосування методу імплікації  $\min$  для формування висновків нечітких правил та методу агрегації  $\max$  для об'єднання результатів усіх правил. Така комбінація дозволяє забезпечити логічну узгодженість вихідних сигналів і точне відтворення очікуваних теоретичних залежностей.

8. Емпірично встановлено, що при використанні зазначених методів похибка відтворення теоретичних залежностей не перевищує 5%, причому величина похибки прямо залежить від кількості нечітких термів у системі. Це підтверджує ефективність обраної структури нечіткого регулятора.

9. Використання запропонованих методів дозволяє забезпечити оптимальне положення робочої точки СП, що підвищує енергоефективність системи та забезпечує максимальний відбір потужності за змінних умов освітленості і температури.

10. Загалом, обрана конфігурація нечіткої системи керування забезпечує баланс між точністю моделювання та обчислювальною ефективністю, що робить її придатною для практичного впровадження в автономні та гібридні фотоелектричні системи.

## 5 МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ВІДБОРУ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

### 5.1. Механізм роботи системи електропостачання з сонячними панелями

Структурна схема системи енергозабезпечення зображена на рис. 5.1. До складу цієї системи входять такі блоки:

- 1) СП;
- 2) пристрій відбирання потужності – ШПІ;
- 3) пристрій накопичення енергії – АБ;
- 4) інвертор напруги;
- 5) система керування;
- 6) навантаження;
- 7) регулятор заряду від мережі.

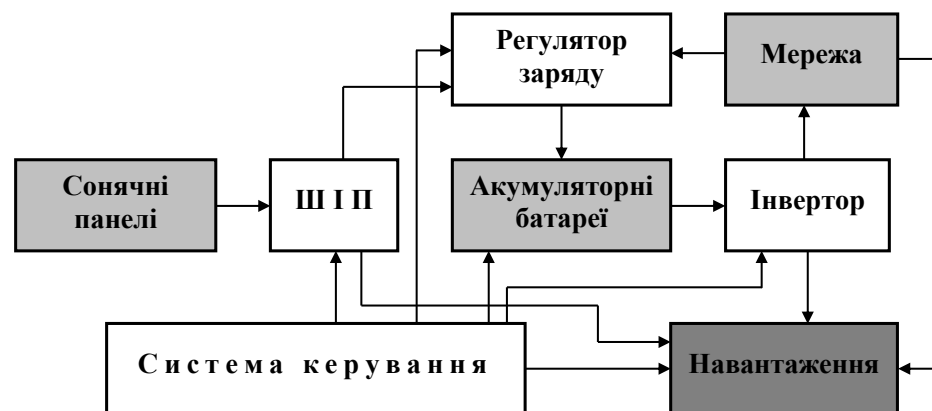


Рисунок 5.1 – Структурна схема системи енергозабезпечення на базі СП

Блок СП складається з двох паралельно з'єднаних секцій по шість послідовно з'єднаних панелей, тобто з дванадцяти панелей. Кожна панель має такі параметри: вихідна номінальна напруга 16 В, вихідний номінальний струм

4А; ККД перетворення сонячної енергії 12%; таким чином, загальна вихідна номінальна потужність СП дорівнює  $P_{\max} = 2 \cdot (4A \cdot (6 \cdot 16V)) = 768 \text{ Вт}$ .

Внутрішній опір СП, який моделює зміну напруги при зміні інтенсивності сонячного випромінювання, змінюється в інтервалі від 0,1 до 100 Ом.

Пристрій відбирання потужності від СП являє собою ШПП підвищувального типу (або знижувального типу). Шляхом зміни коефіцієнта заповнення імпульсів реалізуються різні режими роботи системи: відбирання максимальної потужності від СП, стабілізацію вихідної напруги або струму за рахунок схеми зворотного зв'язку, регулювання швидкості заряду акумуляторних батарей. ШПП має такі параметри: вихідний струм 8 А, вихідна напруга 85 В.

Пристрій накопичення енергії складається з 6 послідовно з'єднаних батарей ємністю 85...110 А·год, напруга кожної з яких 12 В. Заряд АБ відбувається при відімкненому навантаженні або незначній його потужності. Вихідний струм АБ складає порядку 8 А. При заряді батареї, наприклад, протягом 5 годин ємність АБ підвищиться на 40 А·год. Перед введенням в експлуатацію проводиться початковий заряд до мінімальної ємності 40 А·год. Максимальна потужність навантаження, яке можна підключати на вихід даної АБ, складає 500 Вт. Внутрішній опір АБ дорівнює  $12 \text{ В} / 600 \text{ А} = 0,02 \text{ Ом}$ .

До виходу буферного каскаду АБ підключається інвертор з трансформаторним зв'язком [15, 16, 20, 21, 27], який перетворює постійну вихідну напругу АБ у змінну, що дозволяє жити побутові пристрої стандартною змінною напругою 220 В частотою 50 Гц. Максимальна вихідна потужність інвертора  $P_{\max} = 500 \text{ Вт}$ . При зниженні напруги інвертора нижче певного рівня система керування переключає навантаження до мережі живлення. При використанні активного навантаження воно змінюється в діапазоні від 22 Ом до 10 кОм.

Система керування складається із системи керування ШПП, зарядом акумулятора, інвертором на базі мікроконтролерів; системи датчиків: датчика

інтенсивності сонячного випромінювання і температури СБ ESTI ES1457, датчиків напруги і струму СП, АБ та навантаження; каналів передачі і перетворення сигналів: послідовних і паралельних портів, модемів, мікроконтролерів, АЦП, реле; а також комп'ютера, за допомогою якого відслідковується та керується робота всієї системи.

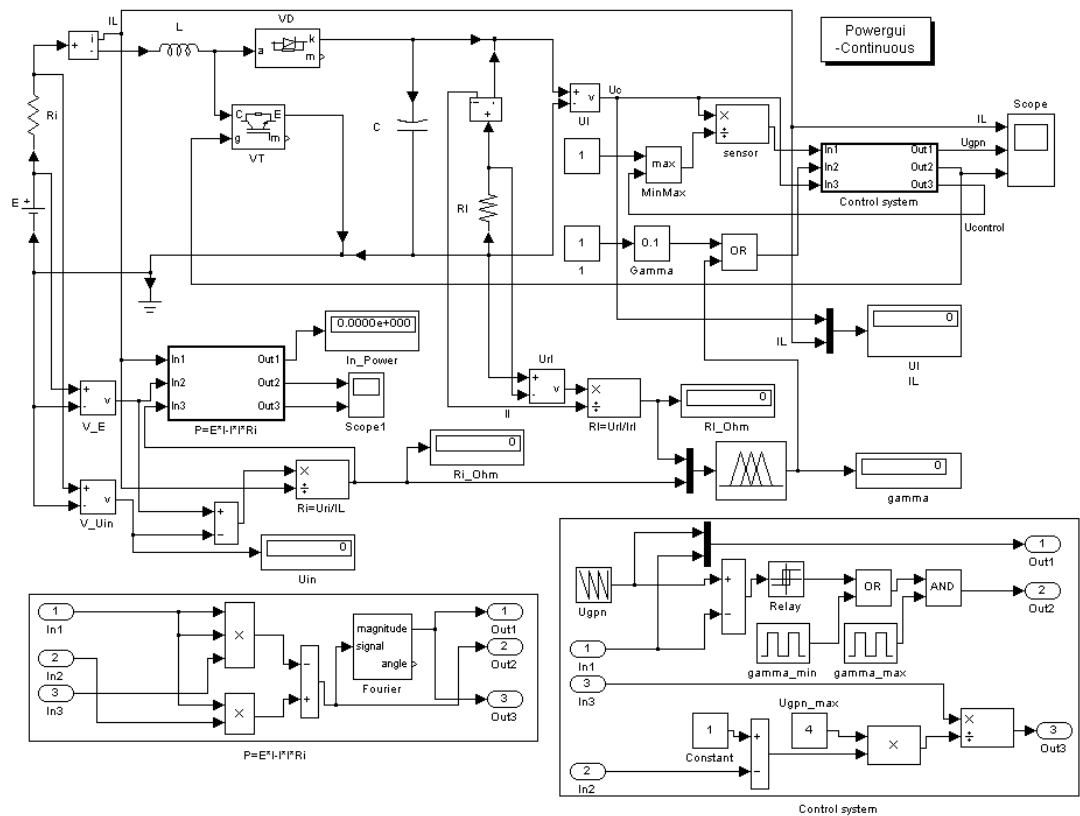
Система керування ШПП здійснює постійний контроль ступеня зарядженості АБ. При ємності 100 А·год заряд припиняється. Інформація про поточний стан зарядженості передається на комп'ютер і зберігається в пам'яті. Комп'ютерна програма дозволяє вибрати навантаження, підключити або відключити необхідну їх кількість.

На комп'ютер через паралельний і послідовний порти надходить така інформація: величина інтенсивності сонячного випромінювання, температура СП, струм та напруга СП, струм заряду/розряду АБ, ступінь заряду АБ, потужність навантаження (кількість підключених навантажень). Вся ця інформація зберігається на жорсткому диску через задані інтервали часу та використовується для побудови часових залежностей.

## **5.2. Реалізація режиму максимальної потужності сонячної панелі**

Цей режим відбувається одночасно з режимом заряду АБ або живленням навантаження безпосередньо від СП.

Розглянемо два можливих варіанти роботи системи у режимі відбирання максимальної енергії – при відімкненій АБ та увімкненій АБ. Для аналізу роботи системи будемо використовувати програму MATLAB 6.1 [9, 12, 37], до складу якої входить інструментальна панель Fuzzy Logic Toolbox, та пакет Simulink 5, які дають можливість побудувати модель системи енергозабезпечення з системою нечіткого керування. На рис. 5.2 показано систему відбирання енергії від СП на основі ШПП підвищувального типу.



**Рисунок 5.2 – Модель системи відбирання максимальної потужності**

Модуль включає основні елементи ШПП: ЕРС  $E$ , яка моделює номінальну напругу сонячної батареї, опір  $R_i$ , що моделює внутрішній опір СП і зміна якого відображує зміну напруги на виході СП при зміні освітлення, дросель  $L$  та конденсатор  $C$ , відповідно індуктивність та ємність яких вибрані для забезпечення коефіцієнту пульсацій напруги на виході ШПП не більше 1%, силовий IGBT транзистор  $VT$ , та силовий діод  $VD$ , і нарешті опір навантаження  $R_L$ .

В схемі використано:

- чотири вольтметри  $V_E$  – номінальної напруги СП,  $V_{Uin}$  – напруги на виході СБ,  $U_{rl}$  – напруги на навантаженні,  $U_l$  – аналогічно  $U_{rl}$  у випадку відімкненої АБ;
- два амперметри: для вимірювання струму індуктивності  $L$  та струму навантаження;

- шість індикаторів:  $in\_power$  – потужності, що відбирається від СП,  $U_{in}$  – напруги на виході СП,  $R_{i\_Ohm}$  – внутрішнього опору СБ,  $R_{l\_Ohm}$  – опору навантаження,  $\gamma$  – коефіцієнту заповнення імпульсів ( $\gamma$ ) системи нечіткого керування,  $U_l$ ,  $I_l$  – напруги на конденсаторі та струму в індуктивності;

- два осцилографи:  $scope$  – для відображення струму в індуктивності, напруг системи керування та напруги керування транзистором,  $scope1$  – миттєвого та середнього значення потужності, що відбирається від СП.

До складу системи також входять: - блоки для обчислення внутрішнього опору СП та опору навантаження на основі суматорів та дільників; система початкового запуску ШПІ на елементах 1 та MinMax, а також блок ручної зміни  $\gamma$ .

Для обчислення потужності, що відбирається від СП, використано підсистему  $P=E*I-I*I*R$ .

Систему керування реалізовано у підсистемі Control system, в якій передбачено обмеження зміни  $\gamma$ . Для аналізу усталених режимів роботи системи у схему введено блок Powergui-Continuous. Для моделювання системи при підключеній АБ послідовно з опором навантаження (який у даному випадку не буде змінюватися) підключається ЕРС  $E_x$ , що відображує напругу АБ.

Визначимо залежність потужності на виході СП від  $\gamma$ , внутрішнього опору СБ ( $R_i=0,1\text{ч}100$  Ом) та опору навантаження ( $R_l=0,1\text{ч}10000$  Ом) при відімкненій АБ для подальшого програмування системи нечіткого керування.

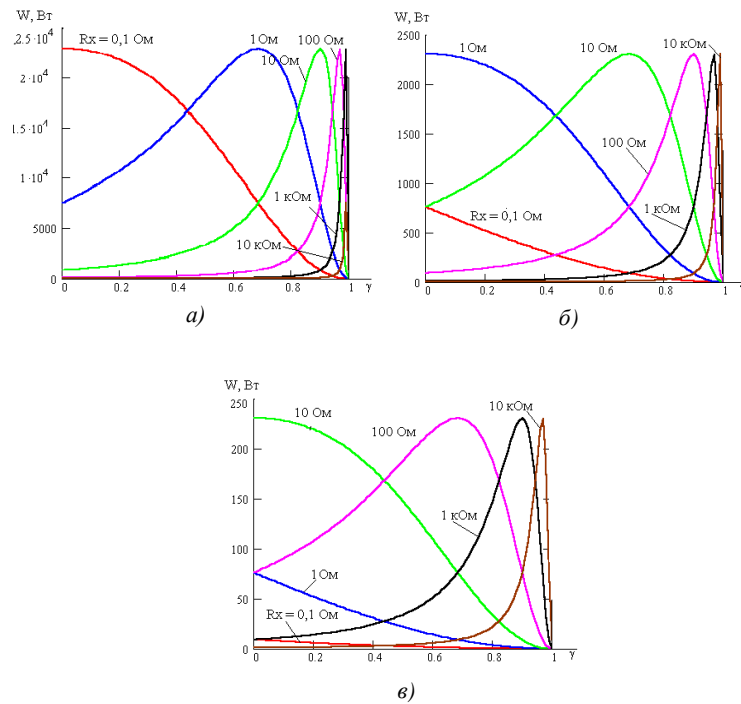
У табл. 5.1 показані  $\gamma$  для певних значень опору навантаження, при яких від СП відбирається максимальна енергія, а також напруга на навантаженні для цих значень  $\gamma$ .

**Таблиця 5.1 – Умови відбирання максимальної потужності для ШПІ підвищувального типу з відімкненою АБ**

Внутрішній опір СБ, $R_i$ , Ом	Опір навантаження, $R_n$ , Ом	Максимальна потужність на виході СБ, $W_{СБ}$ , Вт	Коефіцієнт заповнення імпульсів, $\gamma$	Напруга на навантаженні, В
<b>0,1</b>	0,1	23040	0	48
	1	23040	0,683	152
	10	23040	0,900	(480)
	100	23040	0,968	(1518)
	1000	23040	0,990	(4800)
	10000	23040	-	-
<b>0,5</b>	0,1	2560	0	21
	1	4608	0,292	68
	10	4608	0,776	215
	100	4608	0,929	(679)
	1000	4608	0,978	(2147)
	10000	4608	0,993	(6788)
<b>1</b>	0,1	762	0	9
	1	2304	0	48
	10	2304	0,683	152
	100	2304	0,900	(480)
	1000	2304	0,968	(1518)
	10000	2304	0,990	(4800)
<b>10</b>	0,1	9	0	0,95
	1	76	0	9
	10	230	0	48
	100	230	0,684	152
	1000	230	0,9	(480)
	10000	230	0,968	(1518)
<b>100</b>	0,1	0,09	0	0,1
	1	0,9	0	0,95
	10	7,6	0	8,7
	100	23	0	48
	1000	23	0,684	152
	10000	23	0,9	(480)

Як видно з табл. 5.1, значення максимальної вихідної потужності СП для даного значення внутрішнього опору зростає зі зростанням опору навантаження, досягає свого найбільшого значення при збігові опору навантаження і внутрішнього опору і після цього вже не змінюється, однак для підтримання максимального значення потужності, що відбирається від СП, необхідно змінювати  $\gamma$  ШП. В останній колонці, де показано напругу на

навантаженні, значення, взяті у дужки, відповідають недопустимим режимам роботи, в яких система буде недієздатною. На рис. 5.3 для трьох значень внутрішнього опору СП ( $R_{i1}=0,1$  Ом,  $R_{i2}=1$  Ом,  $R_{i3}=10$  Ом) зображено сімейство характеристик залежності потужності, що відбирається від СП, від  $\gamma$  для різних значень опору навантаження.

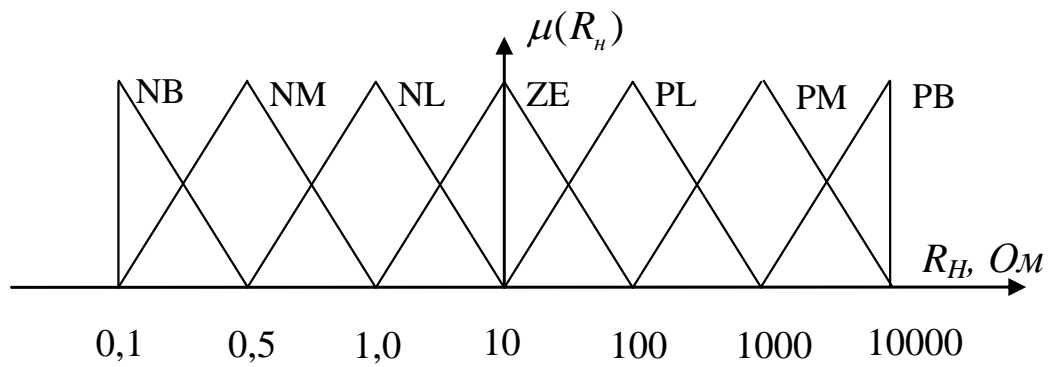


**Рисунок 5.3 – Залежність потужності на виході СП від коефіцієнта заповнення імпульсів ШП підвищувального типу та опору навантаження для трьох значень внутрішнього опору СП:**

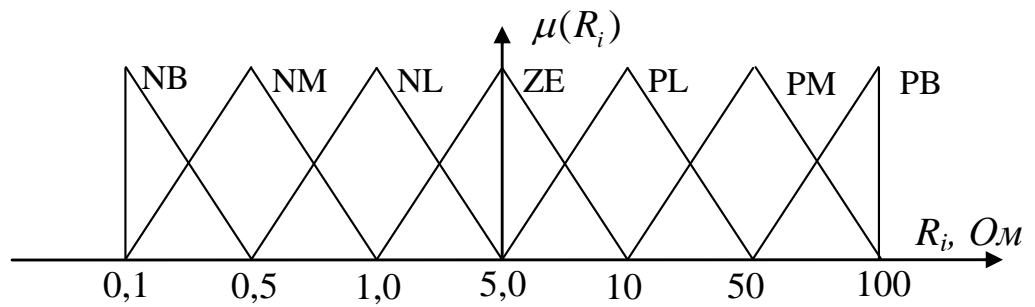
***а)  $R_i=0.1$  Ом;***

***б)  $R_i=1$  Ом; в)  $R_i=10$  Ом***

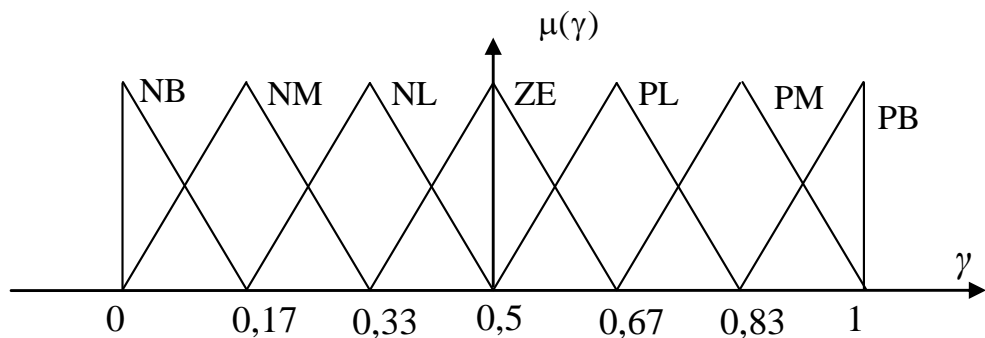
Система нечіткого керування має дві вхідні змінні, якими є внутрішній опір СП  $R_i$  та опір навантаження  $R_n$ , а також одну вихідну змінну – коефіцієнт заповнення імпульсів  $\gamma$ . На базі отриманих залежностей складемо функції належності вхідних та вихідних нечітких змінних (рис. 5.4).



a)



б)



в)

**Рисунок 5.4 – Функції належності вхідних та вихідних нечітких змінних системи відбирання максимальної потужності**

У табл. 5.2 представлено правила, що зв'язують вхідні та вихідні нечіткі змінні для системи з ШПП підвищувального типу.

**Таблиця 5.2 – База правил нечіткого регулятора в системі відбирання максимальної енергії від СП з ШПП підвищувального типу**

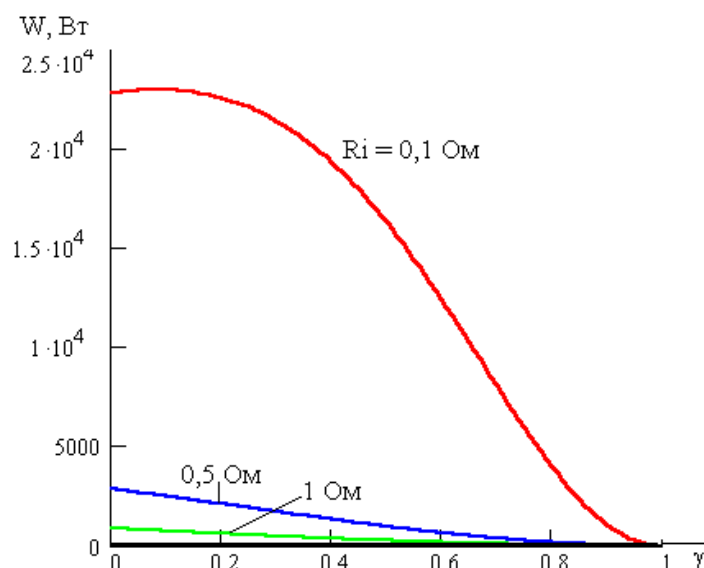
№	Якщо	$R_H$	І/АБО	$R_i$	то	$\gamma$
---	------	-------	-------	-------	----	----------

<b>правила</b>						
<b>1</b>	- // -	<i>NB</i>	<i>I</i>	<i>NB</i>	- // -	<i>NB</i>
<b>2</b>	- // -	<i>NM</i>	<i>I</i>	<i>NB</i>	- // -	<i>NM</i>
<b>3</b>	- // -	<i>NL</i>	<i>I</i>	<i>NB</i>	- // -	<i>ZE</i>
<b>4</b>	- // -	<i>ZE PL PM </i>	<i>I</i>	<i>NB</i>	- // -	<i>PB</i>
<b>5</b>	- // -	<i>NB NM</i>	<i>I</i>	<i>NM</i>	- // -	<i>NB</i>
<b>6</b>	- // -	<i>NL</i>	<i>I</i>	<i>NM</i>	- // -	<i>NL</i>
<b>7</b>	- // -	<i>ZE</i>	<i>I</i>	<i>NM</i>	- // -	<i>PM</i>
<b>8</b>	- // -	<i>PL PM PB</i>	<i>I</i>	<i>NM</i>	- // -	<i>PB</i>
<b>9</b>	- // -	<i>NB NM</i>	<i>I</i>	<i>NL</i>	- // -	<i>NB</i>
<b>10</b>	- // -	<i>NL</i>	<i>I</i>	<i>NL</i>	- // -	<i>NM</i>
<b>11</b>	- // -	<i>ZE</i>	<i>I</i>	<i>NL</i>	- // -	<i>ZE</i>
<b>12</b>	- // -	<i>PL</i>	<i>I</i>	<i>NL</i>	- // -	<i>PL</i>
<b>13</b>	- // -	<i>PM PB</i>	<i>I</i>	<i>NL</i>	- // -	<i>PB</i>
<b>14</b>	- // -	<i>NL NM </i>	<i>I</i>	<i>ZE</i>	- // -	<i>NB</i>
<b>15</b>	- // -	<i>ZE</i>	<i>I</i>	<i>ZE</i>	- // -	<i>NL</i>
<b>16</b>	- // -	<i>PL</i>	<i>I</i>	<i>ZE</i>	- // -	<i>PM</i>
<b>17</b>	- // -	<i>PM PB</i>	<i>I</i>	<i>ZE</i>	- // -	<i>PB</i>
<b>18</b>	- // -	<i>NB NM </i>	<i>I</i>	<i>PL</i>	- // -	<i>NB</i>
<b>19</b>	- // -	<i>ZE</i>	<i>I</i>	<i>PL</i>	- // -	<i>ZE</i>
<b>20</b>	- // -	<i>PL</i>	<i>I</i>	<i>PL</i>	- // -	<i>PM</i>
<b>21</b>	- // -	<i>PM PB</i>	<i>I</i>	<i>PL</i>	- // -	<i>PB</i>
<b>22</b>	- // -	<i>NB NM </i>	<i>I</i>	<i>PM</i>	- // -	<i>NB</i>
<b>23</b>	- // -	<i>PL</i>	<i>I</i>	<i>PM</i>	- // -	<i>PL</i>
<b>24</b>	- // -	<i>PM PB</i>	<i>I</i>	<i>PM</i>	- // -	<i>PB</i>
<b>25</b>	- // -	<i>NB NM </i>	<i>I</i>	<i>PB</i>	- // -	<i>NB</i>
<b>26</b>	- // -	<i>PL</i>	<i>I</i>	<i>PB</i>	- // -	<i>ZE</i>
<b>27</b>	- // -	<i>PM PB</i>	<i>I</i>	<i>PB</i>	- // -	<i>PB</i>

Розглянемо залежність потужності на виході СП від коефіцієнта заповнення імпульсів ШПІ, внутрішнього опору СП та опору навантаження при підключеній АБ.

В цьому випадку вихідний еквівалентний опір буде дорівнювати внутрішньому опоріві АБ, тобто 0,12 Ом, оскільки при заряді АБ навантаження від неї відключаються.

Залежність потужності на виході СП від  $\gamma$  зображено на рис. 5.5 для різних значень внутрішнього опору СП, а до табл. 5.3 зведено значення  $\gamma$ , за яких для даного внутрішнього опору СП відбирається максимальна енергія.



**Рисунок 5.5 – Залежність потужності на виході СП від  $\gamma$  для п'яти значень внутрішнього опору СП при під'єднанні АБ для ШПП підвищувального типу**

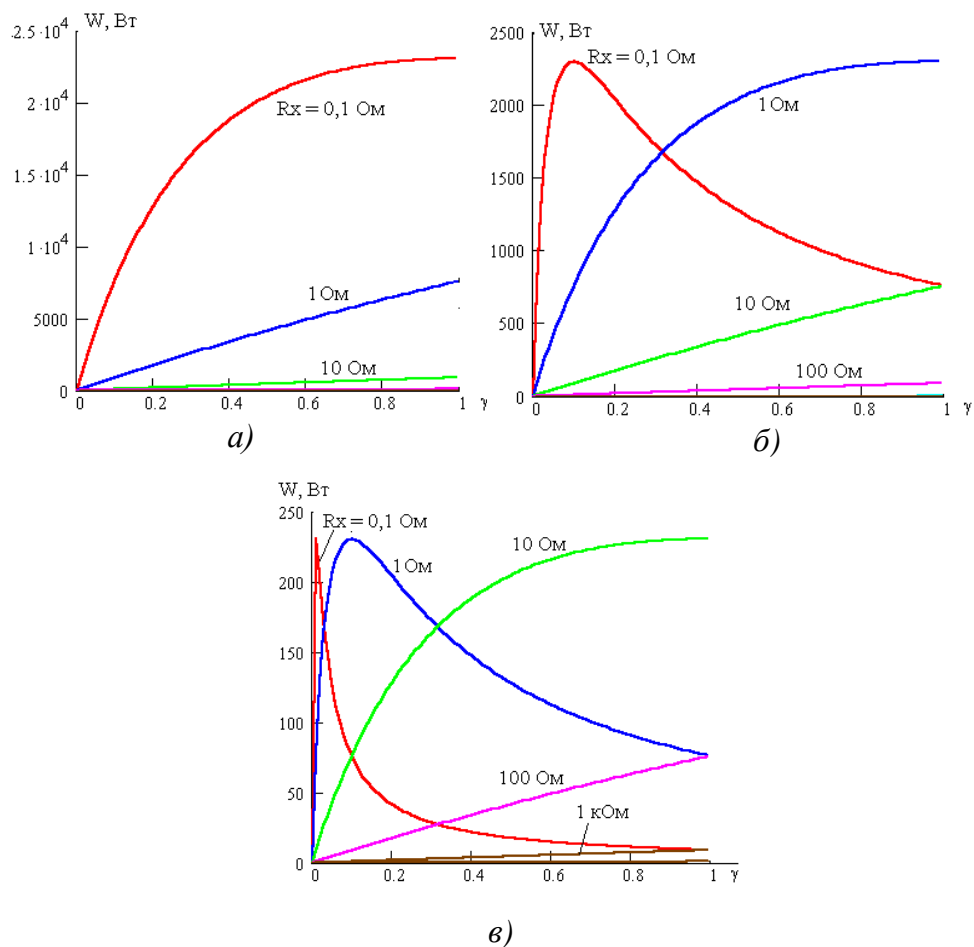
**Таблиця 5.3 – Умови відбирання максимальної потужності для ШПП підвищувального типу з підключеною АБ**

Еквівалентний опір навантаження $R_x$ , Ом	Внутрішній опір СБ, $R_i$ , Ом	Максимальна потужність на виході СБ, $W_{СБ}$ , Вт	Коефіцієнт заповнення імпульсів, $\gamma$
0,12	0,1	23040	0.09
	0,5	2877	0
	1,0	881	0
	10	11	0
	100	0,11	0

Як впливає з табл. 5.3, вихідна потужність СП зменшується зі зростанням внутрішнього опору СП, причому досить незначні зміни цього опору призводять до значних змін вихідної потужності, а діапазон регулювання  $\gamma$  в цьому випадку досить невеликий.

При використанні в якості пристрою відбирання максимальної потужності ШПП знижувального типу модель системи практично нічим не відрізняється від схеми, зображеної на рис. 5.2, окрім силової частини.

Характеристики та залежності для цього пристрою представлені відповідно на рис. 5.6 та у табл. 5.4.



**Рисунок 5.6 – Залежність потужності на виході СП від  $\gamma$  ШПІ знижувального типу та опору навантаження для значень внутрішнього опору СП: а)  $R_i=0,1\text{Ом}$ ; б)  $R_i=1 \text{ Ом}$ ; в)  $R_i=10 \text{ Ом}$**

**Таблиця 5.4 – Умови відбирання максимальної потужності для ШПІ знижувального типу з відключеною АБ**

Внутрішній опір СБ, $R_i, \text{Ом}$	Опір навантаження, $R_n, \text{Ом}$	Максимальна потужність на виході СБ, $W_{СБ}, \text{Вт}$	Коефіцієнт заповнення імпульсів, $\gamma$	Напруга на навантаженні, $U_n, \text{В}$
0,1	0,1	23040	1	48
	1	7617	1	87
	10	903	1	95
	100	92	1	96
	1000	9,2	1	96
	10000	0,9	1	96

<b>0,5</b>	0,1	4608	0,2	9,6
	1	4096	1	64
	10	836	1	91
	100	91	1	96
	1000	9,2	1	96
	10000	0,92	1	96
<b>1</b>	0.1	2304	0,1	4,8
	1	2304	1	48
	10	762	1	87
	100	90	1	95
	1000	9	1	96
	10000	0,92	1	96
<b>10</b>	0,1	230	0,01	0,48
	1	230	0,1	4,8
	10	230	1	48
	100	76	1	87
	1000	9	1	95
	10000	0,92	1	96
<b>100</b>	0.1	23	0,0001	0,05
	1	23	0,01	0,48
	10	23	0,1	4,8
	100	23	1	48
	1000	7,6	1	87
	10000	0,9	1	95

Як видно з табл. 5.4, значення максимальної вихідної потужності СП для даного значення внутрішнього опору при малих значеннях опору навантаження має максимальне значення, при зростанні опору навантаження коефіцієнт заповнення імпульсів повинен зростати, а при співпадінні внутрішнього опору СП та вихідного опору і при подальшому зростанні останнього потужність спадає і максимальне її значення буде при незмінному  $\gamma$ , рівному одиниці.

Отримані залежності дають можливість сформулювати функції належності вхідних та вихідних нечітких змінних. Кількість та форма термів вхідних та вихідних змінних буде такою ж, як і у випадку ШПП підвищувального типу, однак зміняться правила, наведені у табл. 5.5.

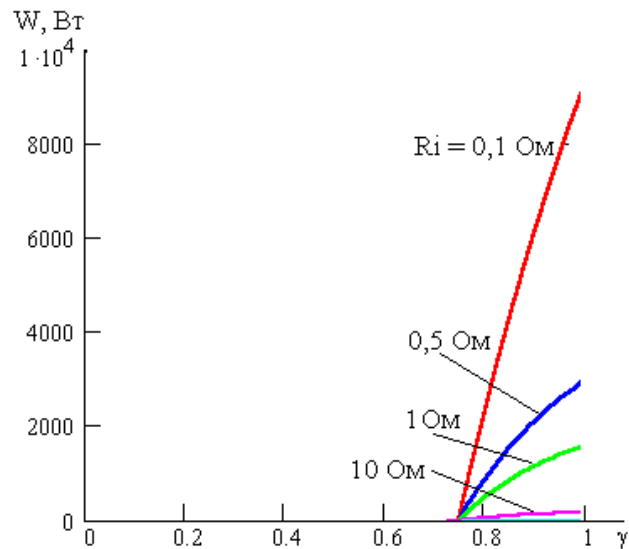
**Таблиця 5.5 – База правил нечіткого регулятора в системі відбирання максимальної енергії від СП з ШПП знижувального типу**

№ правила	Якщо	$R_n$	I/АБО	$R_i$	то	$\gamma$
1	- // -	NB	I	NB	- // -	PM
2	- // -	NM NL ZE PL	I	NB	- // -	PB
3	- // -	NB	I	NM	- // -	NM
4	- // -	NM	I	NM	- // -	PM
5	- // -	NL ZE PL PM	I	NM	- // -	PB
6	- // -	NB	I	NL	- // -	NB
7	- // -	NM	I	NL	- // -	NM
8	- // -	NL	I	NL	- // -	PM
9	- // -	ZE PL PM PB	I	NL	- // -	PB
10	- // -	NB NM	I	ZE	- // -	NB
11	- // -	NL	I	ZE	- // -	ZE
12	- // -	ZE	I	ZE	- // -	PM
13	- // -	PL PM PB	I	ZE	- // -	PB
14	- // -	NB NM	I	PL	- // -	NB
15	- // -	NL	I	PL	- // -	NM
16	- // -	ZE	I	PL	- // -	PL
17	- // -	PL PM PB	I	PL	- // -	PB
18	- // -	NB NM NL	I	PM	- // -	NB
19	- // -	ZE	I	PM	- // -	NL
20	- // -	PL	I	PM	- // -	PM
21	- // -	PM PB	I	PM	- // -	PB
22	- // -	NB NM NL	I	PB	- // -	NB
23	- // -	ZE	I	PB	- // -	NM
24	- // -	PL	I	PB	- // -	PM
25	- // -	PM PB	I	PB	- // -	PB

У випадку підключення АБ до виходу ШПП знижувального типу співвідношення між максимальною потужністю на виході СП та  $\gamma$  стає таким, як це представлено у табл. 5.6 та на рис. 5.7. Як випливає з табл. 5.5, вихідна потужність СП зменшується зі зростанням внутрішнього опору СП. Діапазон регулювання  $\gamma$  незначний, його збільшення приводить до зростання потужності, що відбирається, максимальна ж потужність відбирається, коли  $\gamma$  прямує до максимально допустимого значення.

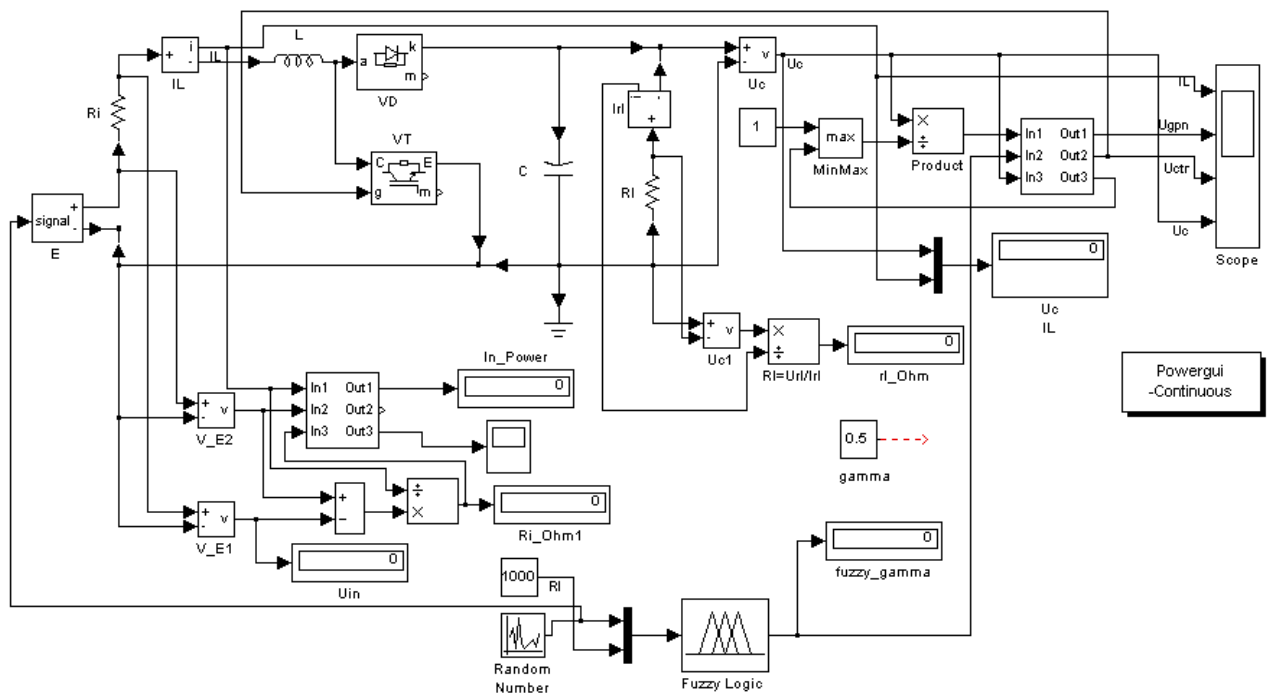
**Таблиця 5.6 – Умови відбирання максимальної потужності для ШПП знижувального типу з включеною АБ**

Еквівалентний опір навантаження $R_x$ , Ом	Внутрішній опір СБ, $R_i$ Ом	Максимальна потужність на виході СБ, $W_{СБ}$ , Вт	Коефіцієнт заповнення імпульсів, $\gamma$
0,12	0,1	9283	(1)
	0,5	2967	(1)
	1,0	1598	(1)
	10	171	(1)
	100	17	(1)



**Рисунок 5.7 – Залежність потужності на виході СБ від  $\gamma$  для значень внутрішнього опору СП при під'єднанні АБ для ШПП знижувального типу**

Для аналізу ефективності використання нечіткого керування ШПП з метою відбирання максимальної потужності від СП модифікуємо модель на рис. 5.2 введенням генератора випадкових чисел Uniform Random Number для моделювання процесу зміни інтенсивності сонячного випромінювання з часом, а отже зміни ЕРС СП (рис. 5.8).

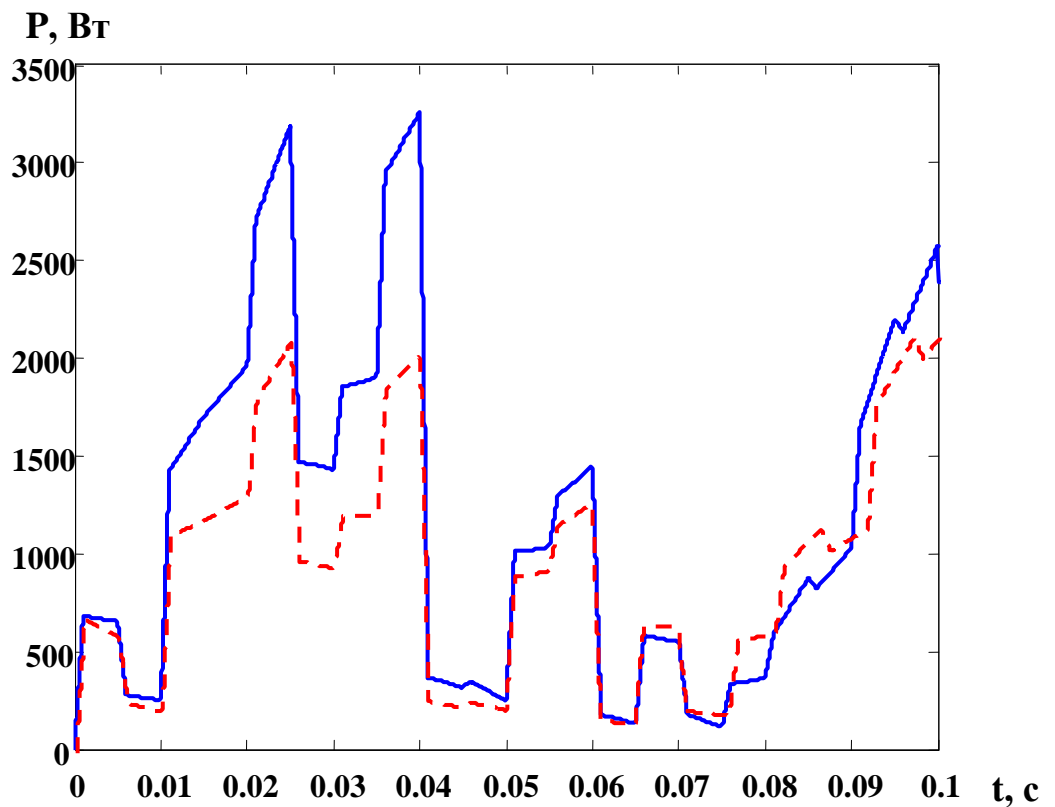


**Рисунок 5.8 – Модель системи відбирання максимальної потужності з моделюванням зміни ЕРС СП**

На рис. 5.9 наведено залежність вихідної потужності СП від часу для опору навантаження 10 Ом.

Потужність, що відбирається від СП, в системі з нечітким керуванням позначена суцільною лінією, за відсутності такого керування – пунктирною лінією.

Як видно з рис. 5.9, середнє значення потужності за наявності нечіткого керування підвищується приблизно на 33% (середня потужність відповідно 1265 Вт і 847 Вт).



**Рисунок 5.9 – Часова залежність потужності, що відбирається від СП, для опору навантаження 10 Ом**

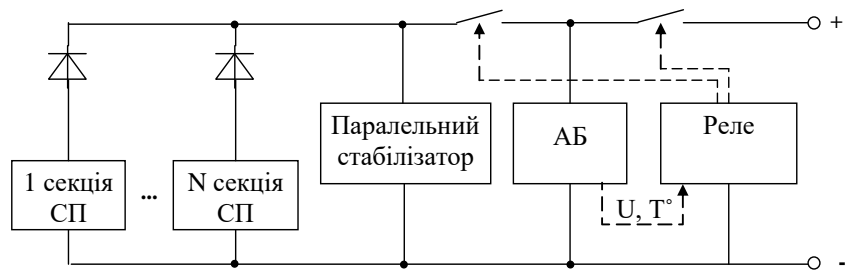
### **5.3. Заряд акумуляторної батареї**

Для заряду АБ в системах з відновлюваними джерелами електроенергії використовуються такі основні способи:

- релейне керування;
- система буферної підзарядки;
- керування за допомогою ШП;
- шунтування секцій СП і часткове шунтування секцій СП.

Розглянемо кожен з цих способів більш докладно.

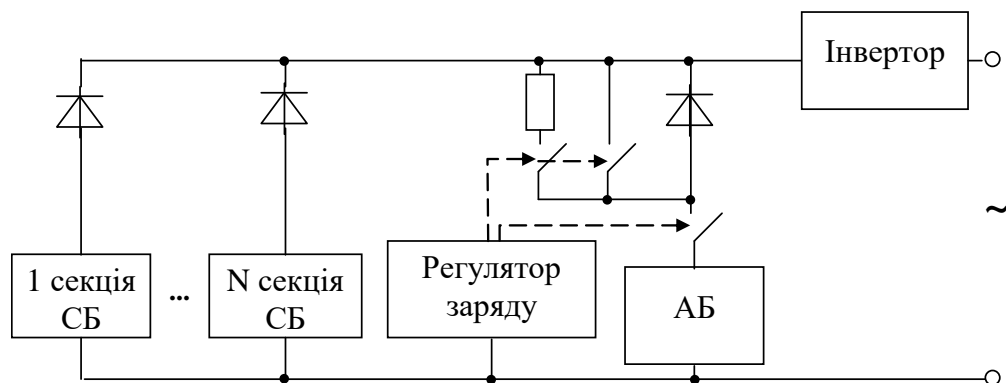
1) Регулювання заряду АБ на основі релейного керування (рис. 5.10).



**Рисунок 5.10 – Структурна схема системи енергозабезпечення з регулятором заряду і розряду АБ на базі реле**

Використовується такий спосіб у невеликих автономних системах заряду, які забезпечують одночасний захист від перевантаження при заряді і надмірного розряду АБ. В цьому випадку напруга на вході АБ змінюється, але залишається в допустимому діапазоні. Коли напруга АБ досягає нижнього граничного значення, реле відключає її від навантажень і переключає на підзарядку. Заряд завершується при досягненні напруги на АБ верхнього граничного значення.

2) Регулятор заряду АБ з резистором для буферної підзарядки (рис. 5.11). Після досягнення граничного рівня напруги на чарунці АБ, підключається резистор і відбувається заряд зниженим струмом. Цей тип заряду використовується обмежено для великих станцій фотоелектричних батарей.

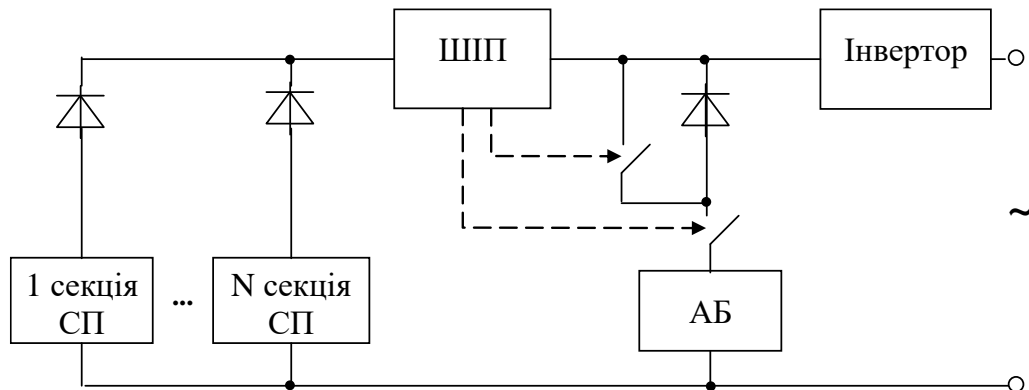


**Рисунок 5.11 – Структурна схема системи енергозабезпечення з регулятором заряду АБ на базі буферного резистора**

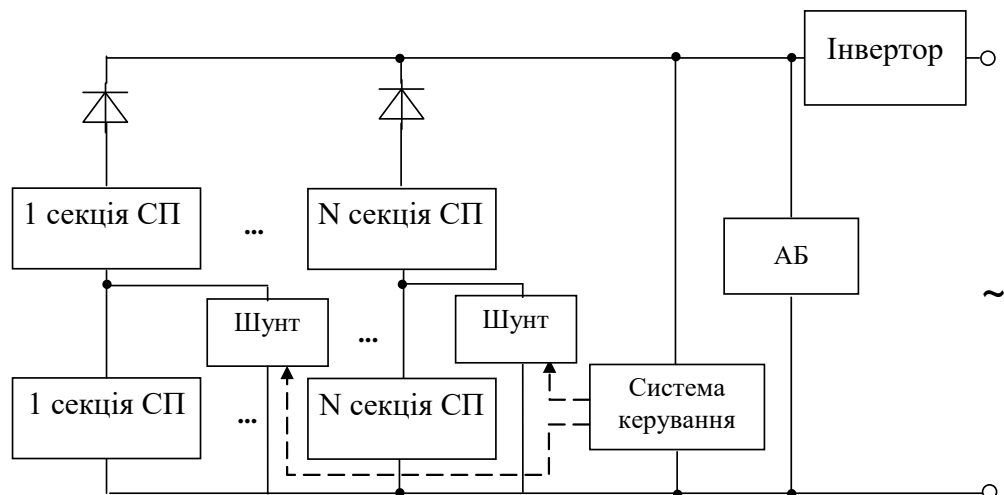
3) Регулятор заряду АБ за допомогою ШПІ (рис. 5.12).

Регулювання напруги на вході АБ відбувається шляхом зміни коефіцієнта заповнення імпульсів ШПП. В цьому випадку ШПП може використовуватися в якості пристрою відбирання максимальної потужності.

4) Регулятор заряду АБ за допомогою часткового шунтування секцій СП (рис. 5.13). Цей тип керування використовується для фотоелектричних станцій середньої і великої потужності.



**Рисунок 5.12 – Структурна схема системи енергозабезпечення з регулятором заряду на основі ШПП**



**Рисунок 5.13 – Структурна схема системи енергозабезпечення з частковим шунтуванням секцій СП**

В такій системі зміна напруги на вході АБ регулюється шляхом шунтування послідовно з'єднаних секцій СП. Напруга і струм в цьому разі

можуть приймати лише певні дискретні значення, тобто змінюватися східчасто. Для визначення оптимального закону заряду АБ будується сітка напруг і струмів залежно від часу заряду. Напряга АБ не повинна перевищувати певних граничних значень. Базуючись на отриманій оптимальній траєкторії, залежностях параметрів АБ від температури, напруги АБ від струму заряду, будується система нечіткого керування зарядом АБ. Вхідними змінними є поточна напруга АБ, її температура і напруга секцій СП, вихідною змінною – необхідна величина напруги заряду, а конкретно – кількість секцій СП, які необхідно шунтувати.

### **Висновки до розділу**

З наведеного в даному розділі можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз режимів роботи системи енергозабезпечення на основі сонячної панелі, і встановлено, що на ефективність відбору електричної енергії істотний вплив мають два ключові режими: **відбирання максимальної потужності від сонячної панелі**, яке реалізується шляхом регулювання коефіцієнта заповнення імпульсів широтно-імпульсного перетворювача (ШПП) за допомогою нечіткої логіки; **заряд акумуляторної батареї**, що здійснюється шляхом шунтування певної кількості секцій сонячної панелі або зміни напруги через ШПП, забезпечуючи оптимальне накопичення енергії.

2. Розрахунково-експериментальне моделювання показало, що застосування системи нечіткого керування ШПП забезпечує: **збільшення середньої потужності відбору від сонячної панелі до 35%** порівняно з традиційними алгоритмами керування; **зниження необхідної тактової частоти мікроконтролера до 10–15 кГц**, що більш ніж у два рази менше порівняно з відомими алгоритмами, що істотно знижує обчислювальні навантаження на апаратну частину системи.

3. Встановлено, що запропонований підхід забезпечує оптимальне положення робочої точки сонячної панелі при динамічних змінах зовнішніх параметрів, таких як освітленість та температура, що підвищує **стабільність та надійність роботи системи**.

4. Використання нечіткого регулятора дозволяє досягти **балансу між точністю відбору потужності та ефективністю обчислювальних алгоритмів**, що робить запроповану систему придатною для практичного впровадження в автономних та гібридних фотоелектричних установках, де важливе одночасне підвищення енергетичної ефективності та зниження витрат на апаратне забезпечення.

5. Отримані результати свідчать про **доцільність використання нечіткої логіки для керування ШП у системах**, оскільки вона дозволяє забезпечити адаптивну роботу регулятора в умовах змінних навантажень і коливань зовнішніх факторів, мінімізуючи втрати електроенергії та підвищуючи ефективність роботи всієї системи енергозабезпечення.

## ВИСНОВКИ

1. В ході дослідження обґрунтовано доцільність застосування методу нечіткої логіки для безпосереднього формування сигналів керування системою енергозабезпечення на базі сонячних панелей, що забезпечує підвищення ефективності використання електроенергії.

2. Проведено комплексний аналіз навантаження та джерел живлення системи енергозабезпечення, що стало базою для розробки нечіткого регулятора та алгоритмів ефективного керування енергоспоживанням.

3. Для спрощення процесу керування споживанням запропоновано розбити загальну задачу на підзадачі для кожного окремого елемента системи, що дозволяє підвищити точність та швидкість обробки сигналів.

4. Розроблена структура системи керування на основі вихідних змінних підзадач як вхідних змінних для загальної задачі реалізує блок комутації та перетворення параметрів електричної енергії між генераторами та навантаженнями.

5. Запропоновано використання нечіткої логіки для керування ШПД, що дозволяє відбирати максимальну потужність від сонячних панелей, враховувати змінність параметрів панелей і навантаження та підвищувати швидкість обробки сигналів керування.

6. Встановлено, що найбільш ефективним для даної задачі є використання симетричних термів трикутної та трапецеїдальної форми з центроїдним методом дефазифікації, методом імплікації  $\min$  та агрегації  $\max$ , що забезпечує похибку відтворення теоретичних залежностей не більше 5% залежно від кількості термів.

7. Розроблено алгоритм нечіткого керування для ШПД підвищувального та знижувального типу на основі зміни коефіцієнта заповнення імпульсів, що дозволяє відбирати максимальну потужність від сонячних панелей у широкому діапазоні зміни параметрів сонячних панелей і акумуляторних батарей.

8. Показано, що ефективність використання електроенергії в системі визначається режимами відбирання максимальної потужності від сонячних панелей та зарядом акумуляторних батарей шляхом шунтування секцій сонячних батарей або зміни напруги за допомогою ШПП із застосуванням нечіткої логіки.

9. Розрахунки показали, що при використанні системи нечіткого керування ШПП середня потужність, відбрана від сонячних панелей, зростає до 35%, а необхідна частота мікроконтролера зменшується до 10–15 кГц, що більш ніж удвічі перевищує показники відомих алгоритмів.

10. В ході виконання роботи забезпечено дотримання заходів охорони праці, зокрема розрахунок захисного заземлення.

11. Отримані результати підтверджують практичну ефективність запропонованих методів та алгоритмів і відкривають перспективи їх використання для підвищення енергоефективності систем енергозабезпечення на основі сонячних панелей.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Архангельський В. І. Нейроні мережі в системах автоматизації / В. І. Архангельський, І. Н. Богасенко, Г. Г. Грабовський, Н. А. Рюмшин – К.: Техніка, 1999. – 364 с.
2. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/12089>.
3. Воронін А. М. Інформаційні системи прийняття рішень: навчальний посібник. / Воронін А. М., Зіатдінов Ю. К., Климова А. С. – К. : НАУ-друк, 2019. – 136с.
4. Гліненко Л.К., Сухоносів О.Г. Основи моделювання технічних систем. – Навч. посібник. – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2003. – 176 с.
5. Енергозбереження та використання поновлюваних джерел енергії. Частина І: навчальний посібник для здобувачів освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Уклад.: О.П. Голик, Р.В. Жесан, І.В. Волков [та ін.]. – Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2020 – 192 с. Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/9295>
6. Єрохов В. Ю., Дружинін А. О., Єрохова О. В. Construction of hybrid autonomous and backup power supply for complex solar systems. *Technology audit and production reserves*. 2015. Vol. 2, no. 1(22). P. 33. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.41412>
7. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с. URL: [http://library.kpi.kharkov.ua/files/new\\_postupleniya/zhidetskyu.pdf](http://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/zhidetskyu.pdf).
8. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с. URL: [http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Zhidetskiy\\_2000\\_352.pdf](http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Zhidetskiy_2000_352.pdf).

9. Калюжний О.Я. Моделювання систем передачі сигналів в обчислювальному середовищі MATLAB-Simulink: Навч. Посібник. –К.: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2004. - 136 с.

10. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text>.

11. Конституція України : від 28.06.1996 № 254к/96-ВР : станом на 1 січ. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254к/96-вр#Text> .

12. Лазарєв Ю. Ф. Моделювання динамічних систем у Matlab. Електронний навчальний посібник. – Київ: НТУУ "КПІ", 2011. – 421 с. URL:[https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds\\_matlab.pdf](https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/mds_matlab.pdf).

13. Нейротехнології та нейрокомп'ютерні системи: підручник / Л.С. Ямпольський, О.І. Лісовиченко, В.В. Олійник – К.: «Дорадо-Друк», 2016. – 576 с. ISBN 978-966-2077-69-8.

14. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text>.

15. Основи метрології та вимірювальної техніки: в 2 т. / М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник та ін. — [під ред. Б. Стадника]. — Львів.: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. — Т.1: Основи метрології. — 530 с.

16. Перетворювальна техніка. Підручник. Ч.2 / Гончаров Ю.П. та ін. За ред. Руденка В.С. – Харків: Фоліо, 2000. –360 с.

17. Петергеря Ю. С. Забезпечення умов відбирання максимальної потужності від автономних джерел живлення // Техн. електродинаміка. – 2000. - №3. - С. 28 – 32.

18. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text>.

19. Пушкар, О. І., Гіковатий В. М., Євсєєв О. С., Потрашкова Л. В. Системи підтримки прийняття рішень: навч. посібник. Харків : Инжек, 2006. 304с.

20. Радченко О. М. Математичний аналіз : У 2-х ч. Київ : ТВіМС, 1999.  
Т. 1 : Диференціальне та інтегральне числення функцій однієї змінної. 152 с.
21. Радченко О. М. Математичний аналіз. Київ : ТВіМС, 2000. Т. 2 :  
Ряди та інтеграли з параметром. Функції декількох змінних. 152 с.
22. Разак А. Нестационарні процеси в електричних колах з  
фотоелектричними джерелами живлення: Дис... канд. техн. наук: 05.14.08. – К.,  
1998. - 139 с.
23. Розроблення оптимальних автоматичних регуляторів. Монографія /  
Ю.О. Ромасевич, В.С. Ловейкін, А.П. Ляшко, О.Г. Шевчук, В.В. Макарець. – К.:  
ЦП „КОМПРИНТ”, 2021. – 250 с.  
URL: <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/8f81b3ec-1fe0-4525-9c5d-d2abac60e849/content>
24. Системи і методи підтримки прийняття рішень : підручник /  
П. І. Бідюк та ін. Київ : «Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського», 2022. 610 с.  
URL:  
[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48418/1/Systemy\\_i\\_metody\\_pidtrymky\\_pryiniattia\\_rishen.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48418/1/Systemy_i_metody_pidtrymky_pryiniattia_rishen.pdf)
25. Системи керування та обліку в електроенергетиці та  
електромеханіці: навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА  
спеціальності 8(7).05060201 «Гідроенергетика» рівня «магістр» та «спеціаліст»  
всіх форм навчання / Скалько Ю. С.; Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя:  
ЗДІА, 2015. – 138 с. URL: <http://surl.li/ejdsae>.
26. Сікора Л.С. Систематологія прийняття рішень на управління в  
складних технологічних структурах – Львів.: Каменярь, 1998. – 453с.
27. Схемотехніка: Пристрої цифрової електроніки : підручник /  
В. Рябенський та ін. Київ, 2016. URL: [https://eds.kpi.ua/wp-content/uploads/2015/05/СТ\\_том\\_1\\_електронне\\_видання.pdf](https://eds.kpi.ua/wp-content/uploads/2015/05/СТ_том_1_електронне_видання.pdf).
28. Томашевський В. М. Моделювання систем [під ред. М. З.  
Згуровського] / В. М. Томашевський – К. : Видавнича група ВНУ, 2005. – 352с.

29. Формування умов оптимальності неоднорідних електричних систем за принципом найменшої дії: thesis / П. Д. Лежнюк та ін. 2005. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/7119> .

30. Шидловська Н.А., Кравченко О.П. Аналіз процесів у колі фотобатарея – електрохімічний накопичувач // Технічна електродинаміка. – 1998. Спец. випуск, т.2. С.229-232.

31. Application of fuzzy controllers in automatic ship motion control systems / O. Melnyk et al. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 3948. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3948-3957> .

32. Chang C. S., Fu W. Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers. *Electric Power Systems Research*. 1997. Vol. 42, no. 2. P. 145–152. URL: [https://doi.org/10.1016/s0378-7796\(96\)01199-6](https://doi.org/10.1016/s0378-7796(96)01199-6) .

33. Holyk O. Preparation of the structure of a fuzzy-neural network for control process of power supply with solar panels and wind turbine / Holyk O.P., Zhesan R.V., Holyk O.S. // “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві”: Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної on-line конференції (м. Кропивницький, 11-12 листопада 2020 р.). – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. – 212 с. С. 128-130.

34. Holyk O.P., Petrenko D.P., Shylo O.V. Reasoning for the development of a robotic complex with artificial intelligence for water ecosystem cleaning measures. Актуальні питання науки, освіти і суспільства в умовах сучасних викликів: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Рівне, 21 лютого 2025 р.): у 2 ч. Рівне: ЦФЕНД, 2025. Ч. 2. 63 с. С. 36-38 УДК 37:082.2(06) <https://www.economics.in.ua/2025/02/21-2.html>.

35. Holyk O., Zhesan R., Korsikov O., Nerush O. Methodology for Studying the Current-Voltage Characteristics of Solar Cells in Artificial Conditions. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Part. 1, № 11(42). С. 190–197. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).1.190-197](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).1.190-197) <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10342>.

36. Kravtsov S., Zhesan R., Holyk O. Renewable Energy Sources and Other Basic Components of Increasing Energy Efficiency and Energy Independence. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2023. T. 1, № 8(39). C. 48–56. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8\(39\).1.48-56](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.8(39).1.48-56)

37. Simulink - Simulation and Model-Based Design. *MathWorks - Maker of MATLAB and Simulink - MATLAB & Simulink*. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> .

# ДОДАТКИ