

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра інформаційних та комп'ютерних технологій
(повне найменування інституту, назва факультету)

Дипломна магістерська робота

на тему Система адаптивного керування фотоелектричною системою

Виконав: студент 2 курсу, групи МгАк-20
спеціальності

151 -Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології

за освітньою програмою

Комп'ютерно-інтегровані технологічні
процеси і виробництва

Бабецький Ілля

Керівник зав. каф. Наталія ШИБИЦЬКА

Рецензент к.т.н. Світлана ДЕМІЩОНКОВА

Київ – 2021

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ДИЗАЙНУ
Факультет мехатроніки та комп'ютерних технологій
Кафедра інформаційних та комп'ютерних технологій
Спеціальність 151 - автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології
Освітня програма – комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та
виробництва

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКТ
_____ Наталія ШИБИЦЬКА

“ ___ ” _____ 2021 р.

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Бабецькому Іллі Сергійовичу

1. Тема роботи «Система адаптивного керування фотоелектричною системою», науковий керівник роботи Шибицька Наталія Миколаївна, к.е.н., доц, затверджені наказом вищого навчального закладу від ___ вересня 2021 року, № ____ -уч.
2. Строк подання студентом роботи - ___ грудня 2021 р.
3. Вихідні дані до роботи: рівень освітленості 90-100% у день, температура 20 °С, вологість 75 %, кут падіння сонячних променів близький до 90°, крок пошукового алгоритму 0,5 В , сонячна батарея заряджає акумулятор з номінальною напругою $U_{ab} = 12$ В разряджений до 80 %.
4. Зміст дипломної роботи (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ. Розділ 1. Аналіз стану фотоелектричних систем та енергетично ефективних технологій. Розділ 2. Моделювання фотоелектричної системи з автоматизованою системою керування на основі адаптивних алгоритмів. Розділ 3. Моделювання фотоелектричної системи з різними адаптивними алгоритмами. Розділ 4. Дослідження експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням. Загальні висновки.

5. Консультанти розділів роботи (проекту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Вступ	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Розділ 1	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Розділ 2	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Розділ 3	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Розділ 4	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		
Висновки	Шибицька Н.М., к.т.н., доц		

6. Дата видачі завдання 04.10. 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи (проекту)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	10.10.2021р	
2	Розділ 1 Аналіз стану фотоелектричних систем та енергетично ефективних технологій	16.10.2021р	
3	Розділ 2 Моделювання фотоелектричної системи з автоматизованою системою керування на основі адаптивних алгоритмів	28.10.2021р	
4	Розділ 3 Моделювання фотоелектричної системи з різними адаптивними алгоритмами	08.11.2021р	
5	Розділ 4 Дослідження експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням	17.11.2021р	
6	Висновки	23.11.2021р	
7	Оформлення магістерської роботи (чистовий варіант)	29.11.2021р	
8	Здача магістерської роботи на кафедру для рецензування (за 14 днів до захисту)	01.12.2021р	
9	Перевірка магістерської роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	03.12.2021р	
10	Подання роботи на затвердження завідувачу кафедри (за 7 днів до захисту)	08.12.2021р	

Студент

_____ (підпис)

Ілля БАБЕЦЬКИЙ

Науковий керівник роботи

_____ (підпис)

Наталія ШИБИЦЬКА

Директор НМЦПФ

_____ (підпис)

Олена ГРИГОРЕВСЬКА

АНОТАЦІЯ

Бабецький І. С. Система адаптивного керування фотоелектричною системою

Дипломна магістерська робота за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2021 рік.

Дипломна магістерська робота присвячена підвищенню ефективності процесу перетворення енергії в фотоелектричній системі шляхом розробки алгоритмів екстремального регулювання потужності, які здатні функціонувати в умовах нестачі інформації про об'єкт управління. Для цього були розроблені моделі елементів фотоелектричної системи і адаптивні алгоритми регулювання потужності для управління процесом перетворення енергії в фотоелектричній системі, та проведено комп'ютерне моделювання роботи фотоелектричної системи з адаптивною системою управління.

За результатами досліджень розроблені адаптивні алгоритми екстремального регулювання потужності для управління процесом енергоперетворення в фотоелектричних системах. Алгоритм екстремального регулювання потужності для управління процесом перетворення енергії в фотоелектричній системі та алгоритм з налаштуванням пошукового кроку дозволяють враховувати фактор часткового затінення, що поліпшує показники якості управління.

Ключові слова: адаптивне керування, фотоелектрична система, екстремальне регулювання, алгоритм, пошуковий крок.

АННОТАЦИЯ

Бабецкий И. С. Система адаптивного управление фотоэлектрической системой

Дипломная магистерская работа по специальности 151 – автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии. – Киевский национальный университет технологий и дизайна, Киев, 2021 год.

Дипломная магистерская работа посвящена повышению эффективности процесса преобразования энергии в фотоэлектрической системе путем разработки алгоритмов экстремального регулирования мощности, способных функционировать в условиях недостатка информации об объекте управления. Для этого были разработаны модели элементов фотоэлектрической системы и адаптивные алгоритмы регулирования мощности для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе, и проведено компьютерное моделирование работы фотоэлектрической системы с адаптивной системой управления.

По результатам исследований разработаны адаптивные алгоритмы экстремального регулирования мощности для управления процессом энергопреобразования в фотоэлектрических системах. Алгоритм экстремальной регулировки мощности для управления процессом преобразования энергии в фотоэлектрической системе и алгоритм с настройкой поискового шага позволяют учитывать фактор частичного затенения, что улучшает показатели качества управления.

Ключевые слова: адаптивное управление, фотоэлектрическая система, экстремальная регулировка, алгоритм, поисковый шаг.

ANNOTATION

Babetsky I.S. Adaptive control system of photovoltaic system

Master's thesis in specialty 151 - Automation and computer-integrated technologies. - Kyiv National University of Technology and Design, Kyiv, 2021.

This thesis is devoted to improving the efficiency of energy conversion in the photovoltaic system by developing algorithms for extreme power control, which are able to operate in the absence of information about the object of control. To do this, models of photovoltaic system elements and adaptive power control algorithms for controlling the process of energy conversion in the photovoltaic system were developed, and computer modeling of the photovoltaic system with an adaptive control system was performed.

According to the results of research, adaptive algorithms of extreme power control for control of energy conversion process in photovoltaic systems have been developed. The algorithm of extreme power control to control the process of energy conversion in the photovoltaic system and the algorithm with the adjustment of the search step allow you to take into account the factor of partial shading, which improves the quality of control.

Keywords: adaptive control, photovoltaic system, extreme control, algorithm, search step.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АБ - акумуляторна батарея

ФЕС - фотоелектрична система

ФМ - фотоелектричний модуль

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЕРП - екстремальне регулювання потужності

MPPT - Maximum Power Point Tracking – відстеження точки максимальної потужності

ТМП - точка максимальної потужності

ЗіС - збурення і спостереження

ВВХ - вольт-ватна характеристика

СФЭУ - сонячна фотоелектрична установка

ФЕУ - фотоелектрична установка

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	14
1.1 Загальна характеристика фотоелектричних систем	14
1.2. Підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем	18
1.3. Адаптивне керування в фотоелектричних системах	25
Висновки до розділу 1	38
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З АВТОМАТИЗОВАНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ	39
2.1 Моделювання фотоелектричної системи	39
2.2. Моделювання навантаження	50
2.3. Модель фотоелектричної системи	53
Висновки до розділу 2	56
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З РІЗНИМИ АДАПТИВНИМИ АЛГОРИТМАМИ	57
3.1. Модель системи з алгоритмом з налаштуванням пошукового кроку	57
3.2. Модель системи з алгоритмом з передбачуваною адаптацією	60
3.3. Модель системи з налаштуванням нечітким регулятором	61
Висновки до розділу 3	82
ГЛАВА 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З АДАПТИВНИМ КЕРУВАННЯМ	83
4.1 Постановка завдання	83
4.2. Елементна база експериментального зразка ФЕС	84
4.3. Програмне забезпечення прототипу фотоелектричної системи	88

4.4 Аналіз роботи експериментального зразка фотоелектричної системи	89
Висновки до розділу 4	93
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	95

ВСТУП

Актуальність теми магістерської дипломної роботи. В умовах зменшення запасів природного палива все більше уваги приділяється використанню сонячної енергії в якості перспективного основного енергоресурсу [1]. В даний час сонячні електростанції будуються не тільки в країнах з високою сонячною активністю, а і практично у всіх регіонах світу з різними кліматичними умовами. У зв'язку з тим, що вартість традиційних джерел енергії зберігає тенденцію зростання, в даний час в регіонах без стаціонарних мереж електроживлення збільшується рівень впровадження фотоелектричних систем (ФЕС). Це не тільки дозволяє знизити екологічне навантаження, але є економічно вигідним [2].

Сучасні ФЕС мають відносно невеликий коефіцієнт перетворення падаючої сонячної енергії. У ясний сонячний день на кожен квадратний метр площі фотоелектричного модуля (ФМ), перпендикулярного вектору сонячних променів, надходить приблизно 1 кВт енергії, але до споживача надходить тільки частина цієї енергії. Невисокі показники реального ККД кремнієвих фотоелементів масового виробництва (в середньому 20 %), а також невикористання усіх можливостей фотоелектричного модуля є факторами, що негативно впливають на кількість енергії, що генерується. Як наслідок – сумарний ККД звичайної ФЕС дорівнює приблизно 10 -15 %. У зв'язку з невисокими показниками ККД ФЕС, виникає питання про підвищення їх ефективності [3-6].

Існують різні підходи і методи підвищення енергетичної ефективності ФЕС. До найбільш ефективних методів підвищення енергетичної ефективності ФЕС відносяться:

- метод удосконалення конструкції елементів ФЕС;
- метод застосування технології наведення сонячних панелей на сонці

(сонячний трекер);

- метод використання режиму екстремального регулювання потужності (ЕРП), також відомий як технологія MPPT (Maximum Power Point Tracking – відстеження точки максимальної потужності).

Найбільш поширеним алгоритмом, що підтримує пошук точки максимальної потужності (ТМП), є алгоритм «збурення і спостереження» (ZiC). У цьому методі керуючий пристрій по крокам змінює напругу і вимірює потужність, якщо потужність збільшується - контролер продовжує змінювати напругу в цьому ж напрямку, поки потужність не перестане збільшуватися, тобто не буде досягнутий екстремум вольт-ватної характеристики (ВВХ) [7-9].

Недоліками алгоритму «збурення і спостереження» є коливання потужності і фіксований час «сходження» (час пошуку точки максимальної потужності). Зменшення часу «сходження» призводить до збільшення амплітуди коливань, що веде до зменшення потужності. Зменшення амплітуди коливань потужності призводить до збільшення часу пошуку ТМП [10-12]. Також з огляду на те, що ККД фотоелектричного перетворення суттєво залежить від зовнішніх умов (рівня освітленості, температури, кута падіння сонячних променів, затінення) і внутрішніх характеристик системи (струму короткого замикання, напруги холостого ходу, деградації фотоелементів), реалізація екстремального регулювання потужності буде найбільш ефективною тільки в разі застосування адаптивних алгоритмів.

Зазначені проблеми стимулюють дослідження, метою яких є розробка найбільш ефективних алгоритмів пошуку ТМП, що забезпечують необхідну якість відбору енергії в фотоелектричних системах [13,14]. Серед перспективних шляхів реалізації адаптивних алгоритмів пошуку ТМП можна виділити такі, як: застосування нечіткої логіки [15,16]; використання систем з моделлю-еталоном [17, 18, 19]; реалізація підбору ТМП на базі нейро - нечіткої мережі [20,21-23].

Проаналізувавши ступінь вивченості проблеми алгоритмів пошуку ТМП, можна дійти висновку, що питання реалізації ефективних рішень

залишається відкритим через як відсутність порівняльної бази методів адаптивного пошуку ТМП, так і появи нових рішень. У зв'язку з вищевикладеним виникає протиріччя між необхідністю вибору і реалізації адаптивного алгоритму з необхідними характеристиками і недостатньою оціночною базою тих чи інших адаптивних алгоритмів пошуку ТМП.

Мета роботи - поліпшення ефективності процесу перетворення енергії в фотоелектричній системі шляхом розробки і дослідження алгоритмів екстремального регулювання потужності, здатних функціонувати при нестачі інформації про об'єкт управління.

Завдання дослідження - розробка моделей елементів фотоелектричної системи; розробка адаптивних алгоритмів регулювання потужності для управління процесом перетворення енергії в фотоелектричній системі; проведення комп'ютерного моделювання роботи фотоелектричної системи з адаптивною системою управління.

Об'єкт дослідження – процес підвищення ефективності роботи фотоелектричних систем.

Предмет дослідження - розробка фотоелектричної системи з адаптивним управлінням, що має підвищений ККД.

Наукова новизна магістерської дипломної роботи:

1. Розроблено алгоритм екстремального регулювання потужності з передбачуваною адаптацією для управління процесом перетворення енергії в фотоелектричній системі, що забезпечує поліпшення якості керування.
2. Розроблений алгоритм екстремального регулювання потужності для управління процесом перетворення енергії в фотоелектричній системі та алгоритм з налаштуванням пошукового кроку що відрізняються від існуючих здатністю враховувати фактор часткового затінення і поліпшеними показниками якості управління.

Практична значимість магістерської дипломної роботи. Розроблені адаптивні алгоритми екстремального регулювання потужності для управління процесом енергоперетворення в фотоелектричних системах мають значення

для вирішення технічних проблем ФЕС, пов'язаних з їх низьким ККД. Крім підвищення енергетичної ефективності, адаптивні алгоритми дозволяють максимізувати час роботи автономних систем. Створені в результаті виконання магістерської дипломної роботи моделі елементів фотоелектричної системи можуть застосовуватися для досліджень у суміжних галузях, наприклад, у робототехніці. Результати магістерської дипломної роботи також можуть використовуватися в задачах автономного енергопостачання, проектування фотоелектричних систем, в системах з екстремальним управлінням.

Методи дослідження. В рамках виконання магістерської дипломної роботи, для вирішення поставлених завдань використовувалися методи математичного та комп'ютерного моделювання, теорія нечітких множин, теорія адаптивного управління, результати теорії та практики застосування фотоелектричних систем.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Загальна характеристика фотоелектричних систем

Сонячні фотоелектричні установки (СФЭУ) або спрощено – фотоелектричні установки (ФЕУ), а також фотоелектричні системи (ФЕС) - це технологічні системи для отримання електричної енергії шляхом перетворення сонячної енергії, яка сприймається світлочутливими елементами таких систем, а також для накопичення і передачі отриманої енергії споживачам [24].

Відомо, що частина ФЕС в галузі енергопостачання зберігає тенденцію зростання [25]. Фотоелектричні установки знаходять своє застосування в різних галузях науки і техніки: космічній галузі, робототехніці, міському і сільському електропостачанні, автономних системах, побутовій електроніці та інших [26].

В даний час сонячні електростанції будуються не тільки в країнах з високою сонячною активністю, але практично у всіх регіонах світу з різними кліматичними умовами [27-29]. У зв'язку з тим, що вартість традиційних джерел енергії безперервно зростає, в даний час в регіонах без стаціонарних мереж електроживлення збільшується рівень впровадження сонячних фотоелектричних установок [30]. Це не тільки дозволяє знизити екологічне навантаження, але і економити значні кошти [31].

Фотоелектричні системи в загальному випадку являють собою структуру, наведену на рис. 1.1. Вони включають в себе масив перетворювачів енергії - фотоелектричні (сонячні) модулі (ФМ), керуючий пристрій – контролер заряду-розряду, елементи зберігання енергії – акумуляторні батареї (АБ), перетворювач постійної напруги в змінну – інвертор.

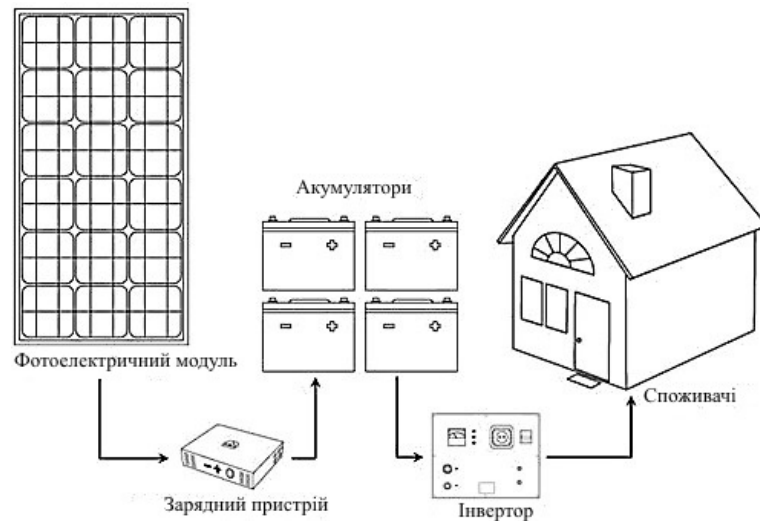


Рис. 1.1. Загальний вигляд фотоелектричної системи

В залежності від техніко-експлуатаційних вимог склад фотоелектричних систем може змінюватись [31,32].

Фотоелектричні системи за принципом побудови поділяються на такі основні типи:

1. **Автономний.** Такі системи є відособленими, закритими і здійснюють самозабезпечення енергією. Така компоновка застосовується, коли відсутня можливість підключення до центральної мережі енергопостачання. В автономних системах фотоелектричні модулі генерують електрику для повсякденних потреб. Для зберігання енергії використовуються акумуляторні батареї, а в якості резервного джерела енергії застосовується рідкопаливний електрогенератор.

2. **Сполучені з мережею.** У випадках, коли об'єкт енергопостачання має підключення до мереж центрального електропостачання, фотоелектричні модулі використовуються для генерації енергії, що покриває частину навантаження. Надлишок енергії надходить в мережу і за рахунок спеціальних лічильників електроенергії відбувається перерахунок придбаної/проданої електричної енергії. Таким чином, забезпечується не тільки зниження витрат на електроенергію, але і з'являється можливість забезпечити нульове споживання електроенергії за рік у вартісному розумінні.

3. **Резервні (гібридні) системи.** В цьому випадку фотоелектрична

система підключається до мереж незадовільної якості. У разі аварій, розриву мережі або недостатньої якості енергопостачання, для покриття навантаження використовується фотоелектрична система. У цьому випадку застосовуються акумулятори, блоки безперебійного живлення або інше джерело, наприклад генератор. У разі використання рідкопаливного або газового генератора за рахунок фотоелектричної системи істотно зменшується споживання палива під час перерв в мережевому електропостачанні.

Структурні схеми представлених вище різновидів фотоелектричних систем наведені на рис. 1.2.

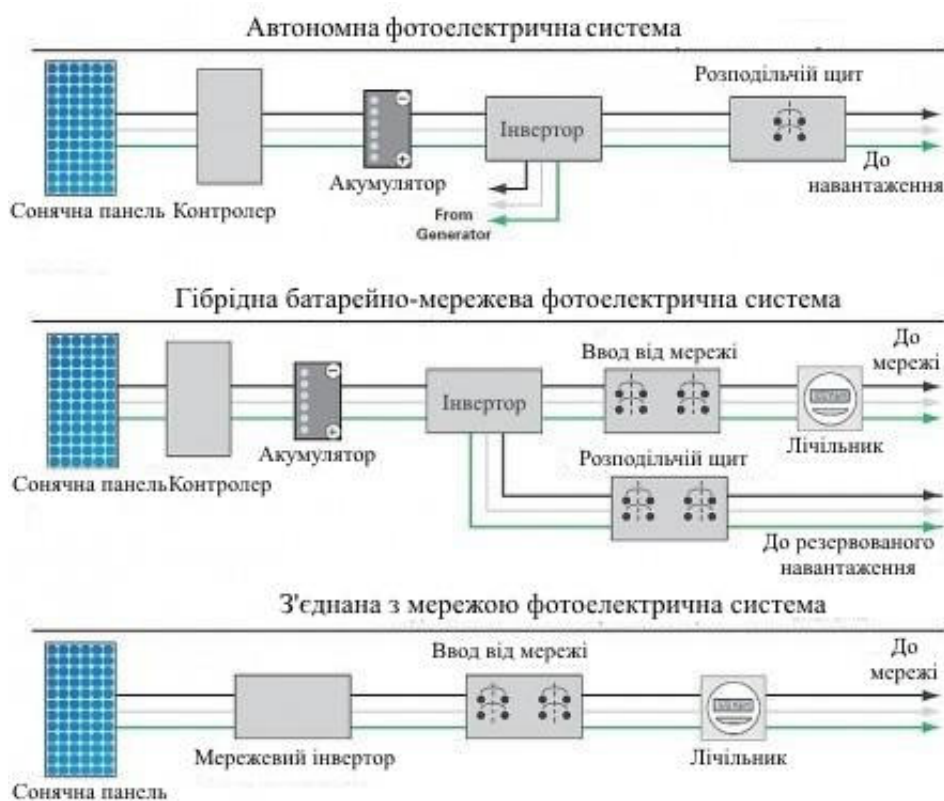


Рис. 1.2. Структурні схеми основних типів фотоелектричних систем

Інтерес до впровадження фотоелектричних систем в різних галузях людської діяльності пов'язаний, в тому числі, і з їх перевагами, в порівнянні з традиційними джерелами енергії:

- Відновлюваність.** На відміну від органічних видів палива – вугілля, нафти, газу сонячна енергія є поновлюваним, невичерпним ресурсом.

2. **Потенціал.** На поверхню Землі падає приблизно 120 тис. тераВат сонячної енергії, що 20 тисяч разів покриває загальносвітову потребу в енергії.

3. **Універсальність.** Сонячна енергія має широкий спектр застосування - від автономного енергопостачання приватних будинків до використання на космічних апаратах.

4. **Екологічність.** Враховуючи загальносвітову тенденцію в напрямку підвищення екологічної чистоти, сонячна енергетика - це одна з перспективних альтернатив виробництва енергії.

5. **Економічність, низькі експлуатаційні витрати.** Обслуговування фотоелектричних систем характеризується низькими витратами на обслуговування.

Однак застосування фотоелектричних систем також супроводжується низкою складнощів:

1. Висока вартість елементів фотоелектричної системи.
2. Непостійність. Вироблення електричної енергії здійснюється тільки при наявності сонячного світла.
3. Низький ККД. У сучасних фотоелектричних систем він становить приблизно 10-15 %

Проблема низького ККД фотоелектричних систем є найбільш важливою. Відомо, що втрати енергії у ФЕС відбуваються на всіх етапах перетворення-передачі електроенергії:

-втрати в фотоелектричних модулях, при фотоелектричному перетворенні;

-втрати енергії при використанні неоптимального відбору енергії від фотоелектричних модулів (неоптимальне управління процесами в фотоелектричній системі);

-втрати при передачі енергії споживачеві (перетворення в інверторах, внутрішній опір провідників).

Виходячи з вищенаведеного, можна прийти до висновку, що

фотоелектричні системи займають найважливіше місце в галузі альтернативного енергопостачання і, незважаючи на низькі показники ККД, продовжують нарощувати свою присутність на ринку, в зв'язку з чим виникає протиріччя між затребуваністю фотоелектричних установок і низькою ефективністю таких систем. Це призводить до завдання підвищення ефективності ФЕС.

1.2. Підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем

Під енергетичною ефективністю мається на увазі відносна оцінка корисного ефекту від використання енергетичних ресурсів до витрат енергетичних ресурсів, вироблених з метою отримання такого ефекту [33-35]. До параметрів, що характеризують енергетичну ефективність ФЕС, можна віднести:

1. Коефіцієнт використання фотоелектричного модуля (ФМ) - K_p , який визначається співвідношенням фактично споживаної потужності від ФМ і потужністю оптимальної точки ВВХ (рис 1.3):

1. Коефіцієнт корисної дії перетворювача:

$$K_p = \frac{P_{\text{ФМ}}}{P_{\text{ФМ,max}}} = \frac{U_{\text{ФМ}} I_{\text{ФМ}}}{U_0 I_0}.$$

2. Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{1}{U_{\text{ФМ}}} \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}.$$

Наведені показники дозволяють оцінити ефект від застосування тих чи інших методів підвищення енергетичної ефективності.

Існують кілька найбільш ефективних методів підвищення енергетичної ефективності ФЕС:

- реалізація режиму відбору потужності в оптимальній робочій точці ВВХ-режим екстремального регулювання потужності (ЕРП);

- реалізація режиму безперервного автоматичного наведення фотоелектричних модулів на Сонце (сонячний трекер);
- оптимізація конструкції фотоелектричного модуля з метою досягнення мінімального нагріву фотоелементів;
- установка на фотоелектричні модулі спеціальних пристроїв-концентраторів, що забезпечують більш ефективний «збір» сонячного випромінювання.

Удосконалення фотоелектричних установок, перш за все, залежить від поліпшення технічних характеристик таких елементів, як фотоелектричні модулі та акумуляторні батареї (ФМ, АБ). Однак навіть мати володіти незадовільні енергетичні характеристики через нераціональне використання їх можливостей. Тому при розробці ФЕС повинна вирішуватися комплексна задача, що об'єднує питання ефективності фотоелектричних модулів і раціонального підходу до їх використання [32].

Питанням підвищення енергетичної ефективності ФЕС присвячено значну кількість науково-практичних робіт. Однак, незважаючи на постійний розвиток сонячної енергетики, залишається ряд проблем і питань, пов'язаних як з ефективністю використання ФЕСУ, так і з моделюванням елементів фотоелектричних систем.

В першу чергу це стосується безпосередньо самих фотоелектричних модулів [34]. Навіть сучасні фотоелектричні модулі мають невеликий коефіцієнт перетворення падаючої сонячної енергії в електричну енергію: в ясний сонячний день на кожен квадратний метр площі фотоелектричних модулів (ФМ), встановлених перпендикулярно вектору сонячних променів, надходить приблизно 1 кВт енергії, однак значна частина її втрачається.

Основні енергетичні втрати фотоелектричного модуля приходяться на:

- відбиття частини сонячного випромінювання від поверхні ФМ;
- проходження частини сонячного випромінювання через ФМ без поглинання;
- перетворення сонячного випромінювання в теплову енергію;

- внутрішній опір ФМ.

З часом ефективність фотоелектричних модулів збільшується за рахунок застосування нових технологій їх виготовлення та обробки [36-38]. Серед методів зменшення втрат енергії і збільшення ККД фотоелектричних модулів можна виділити наступні:

- використання напівпровідників з оптимальною шириною забороненої зони;
- оптимальне легування та створення вбудованих електричних полів;
- використання гетерогенних напівпровідникових структур;
- поліпшення конструкції осередків фотоелементів (чистота контактної сітки, товщина базового шару, глибина p-n переходу);
- створення ФМ із двосторонньою чутливістю;
- розробка люмінесцентних перевипромінюючих структур.

Чимало уваги приділяється в теперішній час також такому методу, як тепловідвід від фотоелементів. Оскільки при нагріванні фотоелементів ефективність фотоелектричного перетворення пропорційно знижується, застосування тепловідведення є ефективним методом збільшення ККД фотоелектричного модуля. Так, наприклад, в роботі [39] розглянуто застосування додаткової поверхні для відведення тепла від фотоелементів, а також наведена методика розрахунку тепловідвідної поверхні на основі розрахунку площі абсорбера для сонячного колектору. У роботі [40] представлено практичне використання гібридних фотоелектричних модулів/колекторів, які дозволяють виробляти електроенергію, а також нагрівати теплоносії за рахунок відведення від фотоелементів тепла, виступаючи, таким чином, ще й в якості сонячного колектору.

Можливості фотоелектричних перетворювачів значно збільшуються при реалізації певних конструкційних схем [19]. Так, наприклад, в роботі [41] наведені результати реалізації ФМ на основі лінзових концентраторів і каскадних фотоелектричних перетворювачів; висновки по цій роботі показують дворазове збільшення ККД, в порівнянні зі звичайними

фотоелектричними модулями. У роботі [42] для підвищення ефективності фотоелектричних перетворювачів запропоновано використовувати акриловий концентратор, що значно знизить обсяг необхідних фотоелементів зі збереженням вихідної потужності.

Ефективною технологією підвищення ККД фотоелектричних установок є сонячна трекер-система наведення фотоелектричних модулів на Сонце [43]. Таке рішення збільшує енергетичну ефективність фотоелектричних систем не менше ніж на 25-30 % [44]. Існує безліч технічних рішень по реалізації стеження і наведення фотоелектричних модулів на Сонце. Так, наприклад, в роботі [11] представлений двовісний трекер на крокових двигунах з датчиком положення, а в роботі [45] – модель інфрачервоного сонячного трекера.

Сонячні трекери, що використовують різні електродвигуни (крокові, лінійні, сервоприводи, ротатори), включають в свій елементний склад контролери, що виробляють керуючий вплив в залежності від показань системи стеження за Сонцем. Здешевити систему стеження за Сонцем можна відмовившись від контролерного управління. Так, в роботі [46] наведено розробку сонячного трекера на керуючій платі з колекторним двигуном постійного струму.

Ще одним способом підвищення енергетичної ефективності автономних систем енергопостачання є реалізація методу екстремального регулювання потужності, також званого методом пошуку точки максимальної потужності (MPPT-Maximum Power Point Tracking) [28].

Завдання екстремального регулювання потужності впливає з виду ВВХ фотоелектричного модуля. На рис. 1.3 представлена типова ВВХ фотоелектричного модуля.

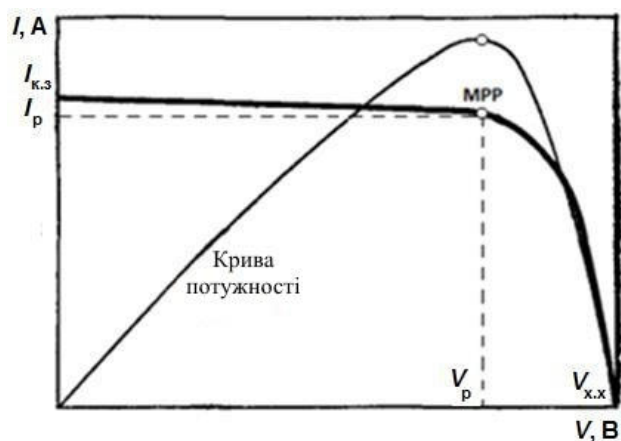


Рис. 1.3. Вольт-ватна характеристика фотоелектричного модуля
 $I_{к.з}$ - струм короткого замикання; $V_{х.х}$ - напруга холостого ходу; I_p , V_p – оптимальні струм і напруга; MPP – точка максимальної потужності.

На рис. 1.3 видна наявність у ВВХ фотоелектричного модуля екстремуму потужності, при якому забезпечується максимальне отримання енергії. Завдання екстремального регулювання потужності зводиться до знаходження пари значень «струм–напруга» на фотоелектричному модулі, що забезпечує максимум потужності. Однак, це завдання ускладнено залежністю ВВХ фотоелектричного модуля від зовнішніх і внутрішніх умов (температури, освітленості, кута падіння сонячних променів, часткового затінення, деградації фотоелементів). На рис. 1.4 наведені сімейства ВВХ фотоелектричного модуля в залежності від зміни таких зовнішніх умов, як температура і освітленість.

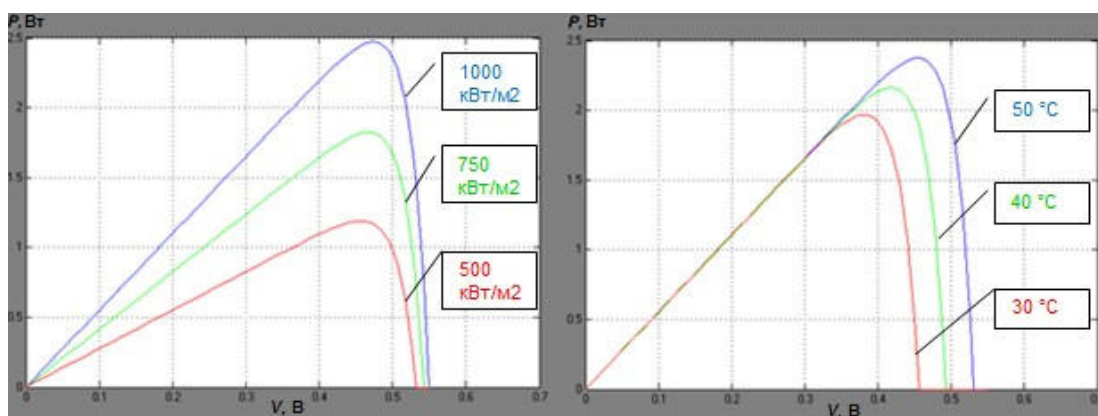


Рис. 1.4. Залежність ВВХ фотоелектричного модуля від зовнішніх умов

Як видно з рис. 1.4, при зміні зовнішніх умов вид ВВХ змінюється, при цьому спостерігається дрейф точки максимальної потужності. При цьому швидкість дрейфу ВВХ може становити $\approx 0,03$ В/с [47], що ставить перед розробниками завдання стеження за цією точкою з метою максимізації енергії, яка отримується від фотоелектричного модуля.

Згідно результатам роботи [48], енергетична ефективність реалізації режиму екстремального регулювання потужності може досягати 30 %. Існує декілька методів пошуку точки максимальної потужності. Так, в роботі [37] наведено метод струмової розгортки, що використовує сигнал розгортки для струму фотоелектричних модулів з метою оновлення вольт-амперної характеристики (ВАХ) через фіксовані відрізки часу. Напруга в точці максимальної потужності обчислюється по ВАХ з встановленою періодичністю. У роботі [28] розглядається застосування методу зростаючої провідності. Суть методу полягає в зчитуванні контролером зміни струму і напруги сонячної установки з метою попередньої оцінки ефекту від зміни напруги. Найбільшого поширення набув метод «збурення і спостереження» (ZiC) [7]. У цьому методі пристрій МРРТ ітераційно змінює напругу на масиві фотоелектричних модулів, що призводить до зміни потужності. Шляхом оцінки прирощення потужності контролер вирішує, в якому напрямку продовжувати пошук: якщо потужність перестала збільшуватися, то точка екстремуму ВВХ знайдена. Недоліками цього методу є наявність коливань потужності і порівняно довгий час регулювання. Вирішення цих проблем можливо при застосуванні апарату нечіткої логіки [44]. Застосування нечіткого МРРТ-контролера розглянуто в роботі [45]. Ідея використання нечіткої логіки в МРРТ-алгоритмі «збурення-спостереження» полягає в завданні нефіксованого кроку зміни напруги сонячної установки шляхом формування на виході нечіткого контролера коефіцієнта підсилення, що збільшує крок пошуку до точки максимальної потужності і зменшує його при знаходженні цієї точки.

При розробці систем альтернативного енергопостачання, зокрема ФЕС,

особливу актуальність має моделювання, що дозволяє на етапі проектування формувати і досліджувати системи з необхідною топологією, проводити оцінку ефективності, порівнювати варіанти побудови системи [10]. Так, в роботі [6] наведені приклади моделювання елементів автономних систем електроживлення в середовищі MATLAB/Simulink. У роботі [16] розглянуто безпосередньо основні елементи фотоелектричної системи, наведено їх моделі та проведено перевірку їх адекватності. У роботі [23] наведено результати дослідження моделі фотоелемента, розробленої за допомогою програмного пакету COMSOL Multiphysics. У роботі [35] розглянуто модель МРРТ-контролера на нечіткій логіці, що використовує дві вхідні змінні: помилку і зміну помилки в ході ітерацій, залежно від яких, за заданим набором правил, формується коефіцієнт підсилення. Схожий контролер з нечіткою логікою представлений в роботі [36]; на відміну від роботи [26], тут нечіткий контролер має тільки один вхід – аналог похідної потужності по напрузі. Це дещо спрощує алгоритм і скорочує кількість правил нечіткого контролера.

Різні підходи до реалізації моделі фотоелектричного модуля розглянуті в [7,8]. Так, наприклад, в роботі [9] створена модель фотоелектричного модуля за допомогою засобів Simulink, що враховує вплив рівня сонячної інсоляції (введені коефіцієнти сонячної інсоляції) і температури навколишнього середовища (введені температурні коефіцієнти). В роботі [30] наведена модель сонячної установки з використанням фотоелектричного модуля, зібраного з фотоелементів стандартної бібліотеки Simulink/Simscape. Стандартна модель фотоелемента не враховує багато зовнішніх факторів впливу (часткове затінення, нагрівання та охолодження в процесі роботи), однак, підходить для моделювання та оцінки адекватності інших елементів ФЕС, наприклад МРРТ-контролера. У роботі [8] проведено побудову моделі фотоелектричного модуля з розроблених моделей фотоелементів за допомогою засобів бібліотеки Simulink/SimPowerSystems. Незважаючи на деякі спрощення (не враховується деградація фотоелементів і часткове затінення), модель фотоелектричного модуля на базі елементів Simulink/SimPowerSystems може

бути використана в моделюванні силових ланцюгів автономних систем енергопостачання, що показано в роботах [3, 7].

При побудові моделей елементів фотоелектричних установок часто вдаються до спрощень, нехтуючи деякими властивостями елементів: так, наприклад, більшість моделей фотоелектричних модулів не враховує кут падіння сонячних променів, обмежуючись лише рівнем випромінювання. Також при моделюванні нехтують деградацією елементів. Певні складнощі при моделюванні фотоелектричних модулів викликають умови часткового затінення (затінення окремих фотоелементів), і зазвичай ними нехтують.

1.3. Адаптивне керування в фотоелектричних системах

Системи автономного електропостачання, до складу яких входять акумуляторні батареї, забезпечуються засобом контролю і управління процесами заряду і розряду акумуляторів [19]. Наявність контролюючих пристроїв дозволяє продовжити термін служби акумуляторів, запобігти аварійним ситуаціям і оптимізувати енергоспоживання в системі [43]. Відомо, що глибокий розряд різко скорочує термін служби акумуляторної батареї, а перезаряд може призвести до аварійних ситуацій [42]:

- закипання електроліту і небезпечного газовиділення;
- спучування і вибуху герметичних акумуляторних батарей.

Контролери заряду-розряду забезпечують відключення навантаження від акумуляторної батареї при її глибокій розрядці, а також відключають джерело енергії (фотоелектричний модуль, вітрогенератор і т. і.), якщо акумулятори заряджені, щоб уникнути перезарядження.

Існують різні види контролерів заряду. Головною відмінною особливістю таких контролерів є алгоритм управління.

Звичайні контролери відключають джерело енергії (фотоелектричний модуль) при досягненні напруги на акумуляторній батареї приблизно 14,4 В (для АБ з номінальною напругою 12 В). При зниженні напруги на АБ до 12,5 -

13 В знову підключається фотоелектричний модуль і заряд відновлюється. При цьому максимальний рівень зарядженості АБ становить 60-70 %.

Контролери з функцією широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) забезпечують чотири стадії заряду від фотоелектричного модуля: заряд максимальним струмом, ШІМ-заряд, вирівнювання, підтримуючий заряд.

Контролери з режимом ЕРП найбільш ефективні при роботі з ФМ тому, що забезпечують відбір енергії в оптимальній робочій точці ВВХ. Їх також називають МРРТ-контролери (Maximum Power Point Tracking – стеження за точкою максимальної потужності). Слід зазначити, що МРРТ-контролери також використовують ШІМ для регулювання струму заряду акумуляторів. Існує кілька алгоритмів пошуку максимальної потужності:

1. Збурення і спостереження (ЗіС). Згідно з алгоритмом цього методу, МРРТ контролер на невелику величину (крок) змінює напругу фотоелектричної установки, після чого пристрій вимірює потужність і порівнює з попереднім значенням. Збільшення потужності говорить про правильному напрямку пошуку, і контролер продовжує змінювати напругу в цю сторону, поки потужність не перестане збільшуватися. Цей метод є найбільш поширеним. Недоліком методу є генерація коливань потужності внаслідок характерного для пошукових алгоритмів «рискання» близько шуканої точки [30].

2. Метод зростаючої провідності. Відповідно до цього методу, контролер обчислює точку максимальної потужності, розраховуючи зростаючу провідність ($\Delta I/\Delta U$) і порівнюючи її з провідністю фотоелектричних модулів (I/U). Умовою екстремуму ВВХ, тобто максимуму потужності, є рівність цих величин ($I/U = \Delta I/\Delta U$). Визначивши оптимальну напругу за цим методом, контролер підтримує дане значення до тих пір, поки не зміниться рівень освітленості, після чого процес повторюється. Графічна інтерпретація методу наведена на рис. 1.5.

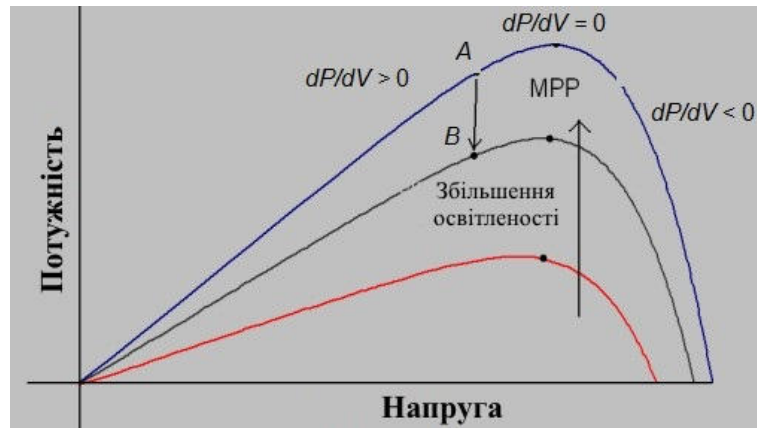


Рис. 1.5 Робота алгоритму зростаючої провідності

Для наведеного на малюнку позначення (dP/dV) можна записати

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(I \cdot V)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}. \quad (1.1)$$

З урахуванням такого перетворення можна навести наступний аналітичний опис для методу зростаючої провідності:

- якщо робоча точка знаходиться зліва від точки максимальної потужності, то

$$\frac{-I}{V} < \frac{dI}{dV}, \frac{dP}{dV} < 0;$$

- якщо робоча точка знаходиться праворуч від точки максимальної потужності, то

$$\frac{-I}{V} < \frac{dI}{dV}, \frac{dP}{dV} < 0;$$

- якщо робоча точка знаходиться в точці максимальної потужності, то

$$\frac{-I}{V} = \frac{dI}{dV}, \frac{dP}{dV} = 0.$$

Згідно з алгоритмом методу, керуючий пристрій проводить вимірювання збільшення струму і напруги фотоелектричної системи, щоб зумовити ефект від зміни напруги. Цей метод вимагає більше обчислювальних можливостей від контролера, але він здатний відстежувати зміни умов швидше методу збурення і спостереження (ЗіС).

Недоліком методу зростаючої провідності, як і методу ЗіС, є зникнення

коливань потужності [28].

3. Метод струмової розгортки. У цьому методі керуючий пристрій отримує сигнал розгортки струму від фотоелектричних модулів, на основі якого буде ВАХ з певною періодичністю. Напруга, що забезпечує максимальну потужність, обчислюється за ВАХ з тим же фіксованим проміжком часу [27]. Функція для форми струмової розгортки пропорційна її похідної:

$$f(t) = k_4 \frac{df(t)}{dt}, \quad (1.2)$$

де k_4 - пропорційна константа.

Потужність фотоелектричного модуля, таким чином, можна записати як:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = v(t) \cdot f(t). \quad (1.3)$$

Для точки максимальної потужності можна записати

$$\frac{dp(t)}{dt} = v(t) \frac{df(t)}{dt} + f(t) \frac{dv(t)}{t} = 0. \quad (1.4)$$

З виразів (1.2) і (1.4) можна отримати:

$$\frac{dp(t)}{dt} = \left[v(t) + k_4 \cdot \frac{dv(t)}{t} \right] \frac{df(t)}{dt} = 0. \quad (1.5)$$

Рішенням цього диференціального рівняння буде

$$f(t) = C \cdot \exp\left[\frac{t}{k_4}\right]. \quad (1.6)$$

Коефіцієнт C вибирається рівним максимальному струму фотоелектричного модуля I_{\max} і коефіцієнт k_4 буде негативним, що призведе до зменшення експоненти, функція з постійною часу $\tau = -k_4$ в рівнянні (1.6) дасть вираз

$$f(t) = I_{\max} \cdot \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]. \quad (1.7)$$

Струм у виразі (1.7) можна отримати через використання рівняння розряду конденсатора. Оскільки похідна (1.7) відмінна від нуля, (1.5) можна розділити на $df(t)/dt$ і, з підстановкою $f(t)=i(t)$, спростити до:

$$\frac{dp(t)}{di(t)} = v(t) + k_4 \frac{dv(t)}{t} = 0. \quad (1.8)$$

Після обчислення напруги, що забезпечує максимум потужності, можна

використовувати знайдене напруга як опорне для наступних ітерацій.

5. Метод постійної напруги. У цьому методі робоча напруга регулюється постійною величиною. Керуючий пристрій на мить відключає фотоелектричні модулі від системи і вимірює напругу холостого ходу, після чого знову комутує фотоелектричні модулі і продовжує роботу, задаючись робочою напругою, що визначається напругою холостого ходу і постійним коефіцієнтом, визначеним емпірично, або на основі моделювання для конкретних умов експлуатації:

$$V_{MPP} \approx k_1 \cdot V_{x,x}. \quad (1.9)$$

На теперішній час метод постійної напруги практично не використовується як самостійний, а застосовується в якості додаткового режиму в парі з іншим методом [29].

При проведенні досліджень в якості порівняльного алгоритму виступає алгоритм «збурення і спостереження» (ЗіС), як найбільш поширений в теперішній час на практиці.

В алгоритмі ЗіС, наведеному на рис. 1.6, пошук точки максимальної потужності ведеться наступним чином:

- на першому кроці обчислюються показники струму і напруги фотоелектричної системи;
- на другому кроці за отриманими даними проводиться розрахунок потужності;
- на третьому кроці відбувається операція порівняння поточного значення потужності з попереднім, з метою встановити напрямок руху до точки максимуму по ВВХ, наведеної на рис. 1.7;
- на четвертому кроці відбувається зміна напруги фотоелектричної установки на певну величину з метою визначення потужності в системі;
- на п'ятому кроці відбувається запам'ятовування поточної інформації для використання в подальшій ітерації.

Головною перевагою методу ЗіС є простота його технічної і програмної реалізації, що, в свою чергу, зменшує вимоги до обчислювального та

елементного оснащенні ФЕС [12].

Недоліками алгоритму ЗіС є виникаючі при його роботі коливання напруги, що призводить до зниження потужності, а також фіксований час виходу на робочу точку. При цьому ці недоліки взаємопов'язані: зменшення часу пошуку робочої точки призводить до збільшення амплітуди коливань, що веде до зниження потужності. Зменшення амплітуди коливань потужності призводить до збільшення часу пошуку точки максимальної потужності [8]. Хід роботи алгоритму і його недоліки проілюстровані на рис. 1.8.

Для максимізації ефективності методу ЗіС необхідно забезпечити його точним прогнозуючим алгоритмом, якій адаптується [12].

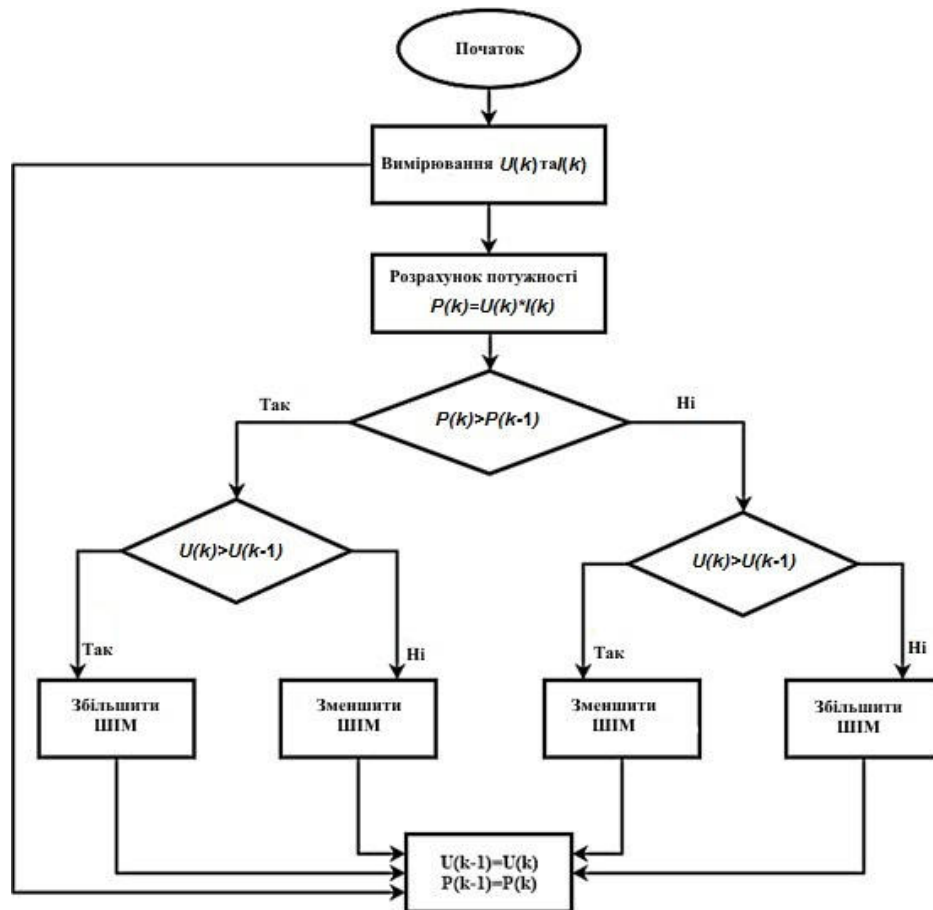


Рис. 1.6. Алгоритм «збурення і спостереження»

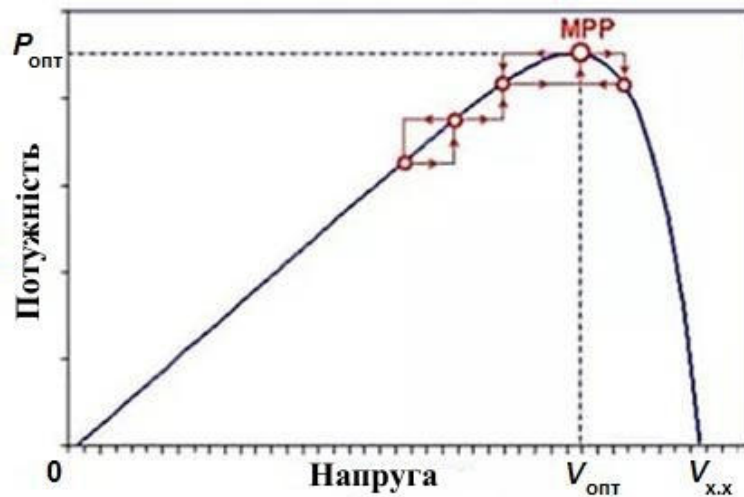


Рис. 1.7. Вольт-ватна характеристика з ілюстрацією пошуку екстремуму потужності за алгоритмом «збурення і спостереження»

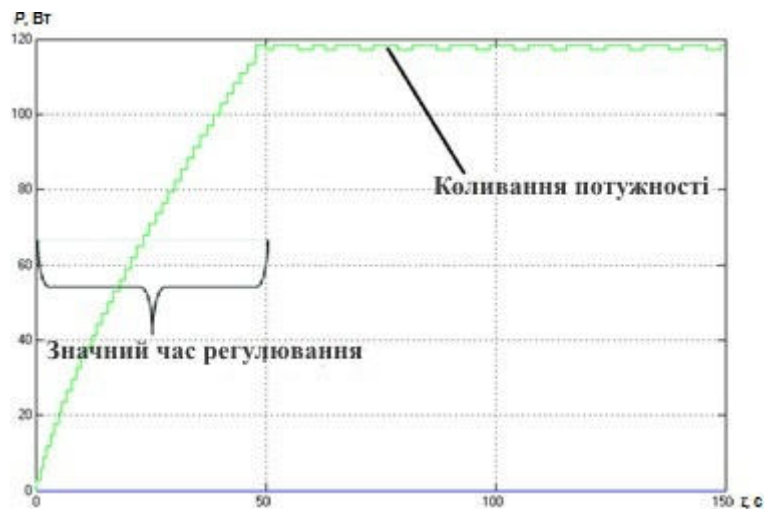


Рис. 1.8. Ілюстрація роботи алгоритму ZiC

Варіант класифікації адаптивних систем представлений на рис. 1.9. Адаптивні системи можна розділити на дві основні групи за характером змін в керуючому пристрої:

- які самоналагоджуються (системи, в яких змінюються тільки параметри регулятора);
- які самоорганізуються (системи, в яких зміни стосуються і структури регулятора).

Самоналагоджувальні адаптивні системи можна також розділити за методом вивчення об'єкта управління:

- пошукові;
- безпошукові.

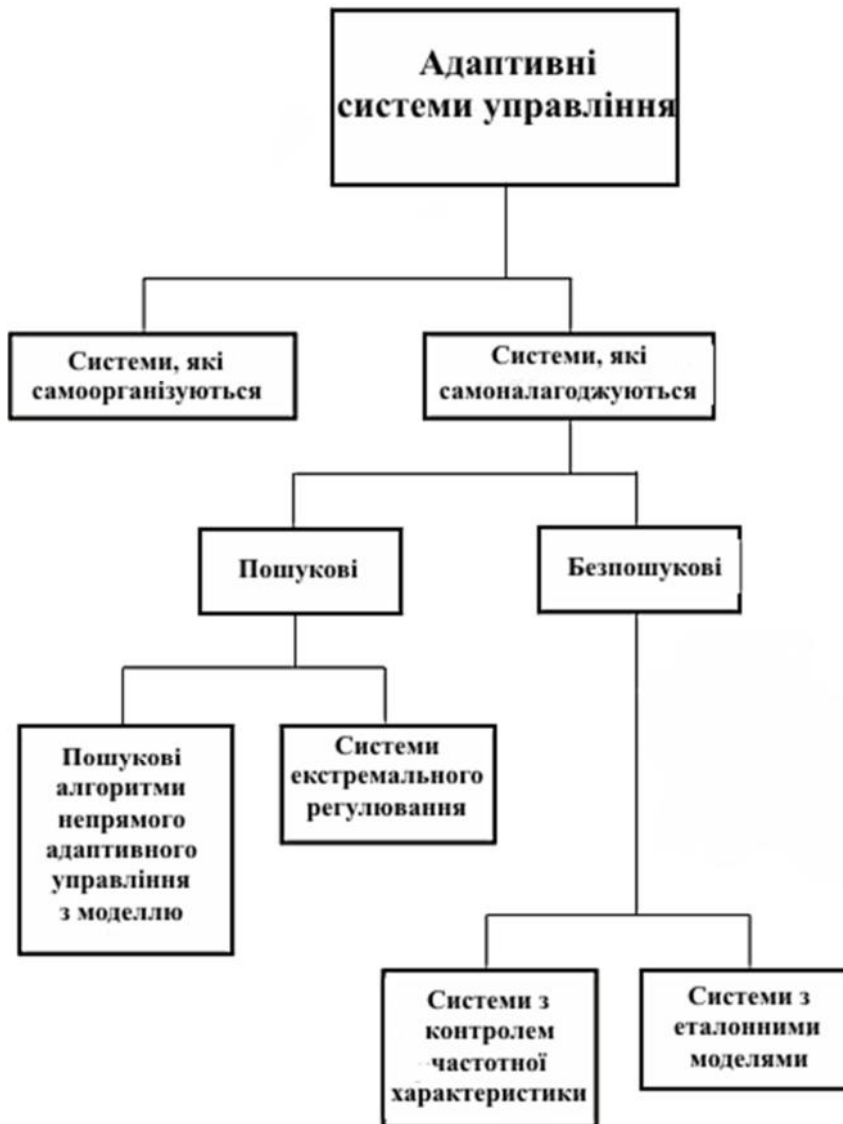


Рис. 1.9. Класифікація адаптивних систем

Пошукові адаптивні системи класифікуються на:

- екстремальні системи, метою управління яких є підтримка системи в точці екстремуму необхідних характеристик. Щоб забезпечити рух до екстремуму, визначення керуючих впливів здійснюється за допомогою доповнення керуючого сигналу пошуковим сигналом;

- системи непрямого адаптивного управління з налаштуванням моделі. При непрямому адаптивному управлінні спочатку робиться оцінка параметрів об'єкта, після чого на підставі отриманих оцінок визначаються необхідні

значення параметрів регулятора і проводиться їх підстроювання.

Безпошукові адаптивні системи управління можна розділити на дві групи за способом отримання інформації для налаштування регулятора:

- системи з еталонною моделлю (ЕМ);
- системи з ідентифікатором, в літературі їх іноді називають системами з налаштуванням моделі (НМ).

Адаптивні системи з ЕМ містять динамічну модель системи, що має необхідну якість.

Існують різні підходи до оптимізації методу ЗіС. Серед них можна виділити:

- *Алгоритм ЗіС з налаштуванням пошукового кроку.* У цьому методі використовується додатковий розрахунок для формування коригуючого коефіцієнта пошукового кроку по напрузі. Таке рішення дозволяє зменшувати або збільшувати крок пошукового алгоритму, в залежності від логіки коригування, за рахунок чого скорочується час виходу на робочу точку і відбувається зниження амплітуди коливань напруги в процесі підтримки максимальної потужності.

Коригуючий коефіцієнт визначається різними способами, як функція деяких параметрів, що впливають на вид ВВХ і на положення робочої точки, що в загальному вигляді можна записати як

$$k_{\pi} = f(I, V, W, T, \alpha), \quad (1.10)$$

де I - струм фотоелектричного модуля; V - напруга фотоелектричного модуля, W - рівень освітленості; T - температура фотоелектричного модуля, α - кут падіння сонячних променів.

Тоді крок по напрузі буде змінюватися в залежності від зміни коефіцієнта k_{π} :

$$\Delta V_n = k_{\pi} \cdot \Delta V_{n-1}. \quad (1.11)$$

До недоліків методу можна віднести залежність від попередньо заданого кроку, необхідність додаткового коригування по окремих випадках

функціонування фотоелектричних систем (умови часткової затінення, температурні скачки).

- *Алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією.* Цей підхід використовує в якості досліджуваної характеристики струм на сонячному модулі. Ідея полягає в тому, що фотострум безпосередньо залежить від рівня освітленості, температури фотоелемента і кута падіння сонячних променів, отже, знаючи ці показники (впливи), можна заздалегідь розрахувати відповідний їм фотострум, передбачити вид ВВХ і на основі відомих залежностей отримати координати точки максимальної потужності на ВАХ. В залежності від поточної позиції робочої точки щодо розрахункової точки максимальної потужності на ВАХ, коригується крок пошуку за алгоритмом ЗіС: чим ближче робоча точка до розрахункової, тим менше крок.

Виходячи з вищевикладеного, даний метод можна математично представити наступним чином:

- розрахунок ВАХ моделі:

$$\begin{cases} I_{ph} = f(I_{к.з}, V_{х.х}, W, T, \alpha); \\ V_{ph} = f(I_{ph}). \end{cases} \quad (1.12)$$

- визначення точки максимальної потужності на ВАХ моделі:

$$\frac{dP}{dV} = 0; \quad (1.13)$$

- завдання робочої напруги рівним розрахованому на моделі напрузі максимальної потужності:

$$V_{раб} = V_{модМРР}. \quad (1.14)$$

До переваг цього методу можна віднести наступне: підстроювання системи до поточних збурень; можливість мінімізації часу пошуку робочої точки за рахунок визначення наближеної точки максимальної потужності на моделі; мінімізація коливань напруги близько робочої точки.

До недоліків можна віднести високу залежність реалізації від якості моделі і досвіду розробника, а також вимога до наявності додаткових датчиків.

- *Алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором.* У цьому

методі використовуються можливості апарату нечіткої логіки і теорії нечітких множин, що дозволяють коригувати крок по напрузі, в залежності від оцінки вхідних параметрів і їх відповідності тим чи іншим правилам нечіткого контролера.

Математична теорія нечітких множин дозволяє формалізувати нечіткі поняття і знання, оперувати цими знаннями і здійснювати нечіткі висновки. Експериментально показано, що використання нечіткої логіки в управлінні (нечітке управління) дає кращі результати, порівняно з отримуваними при традиційних алгоритмах управління [25, 32, 45].

В узагальненому вигляді нечіткий контролер представлений на рис. 1.10.



Рис. 1.10. Структура нечіткого контролера

Основні визначення, якими оперує теорія нечітких множин:

- **Нечіткою множиною A** на універсальній множині U називається сукупність пар $(\mu_A(u), u)$, де $\mu_A(u)$ – ступінь приналежності елемента $u \in U$ до нечіткої множини A . Ступінь приналежності – це число з діапазону $[0, 1]$.

Чим вище ступінь приналежності, тим більшою мірою елемент універсальної множини відповідає властивостям нечіткої множини.

- **Функцією належності** називається функція, яка дозволяє обчислити ступінь приналежності довільного елемента універсальної множини до нечіткої множини. Якщо універсальна множина складається з скінченної кількості елементів $U = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$, тоді нечітка множина A записується у вигляді:

$$A = \sum_{i=1}^k \mu_A(u_i)/u_i.$$

У разі неперервної множини U використовують наступне позначення:

$$A = \int_u \mu_A(u)/u \cdot du.$$

- **Лінгвістичної змінною** називається змінна, значеннями якої можуть бути слова або словосполучення деякого природного або штучного мови.

- **Терм-множиною** називається множина всіх можливих значень лінгвістичної змінної.

- **Термом** називається будь-який елемент терм-множини. У теорії нечітких множин терм формалізується нечіткою множиною за допомогою функції приналежності.

- **Дефазіфікацією** називається процедура перетворення нечіткої множини в чітке число.

Для нечіткої множини, що описується виразом

$$A = \int_{[\underline{u}, \bar{u}]} \mu_A(u)/u \cdot du, \quad 1.15$$

дефазіфікація здійснюється за методом центру ваги за формулою

$$a = \frac{\int_{\underline{u}}^{\bar{u}} u \cdot \mu_A(u) \cdot du}{\int_{\underline{u}}^{\bar{u}} \mu_A(u) \cdot du}. \quad 1.16$$

Фізичним аналогом цієї формули є знаходження центру ваги плоскої фігури, обмеженою осями координат і графіком функції приналежності нечіткої множини. У випадку дискретної універсальної множини дефазіфікація нечіткої множини виду:

$$A = \sum_{i=1}^k \mu_A(u_i)/u_i \quad 1.17$$

за методом центру ваги здійснюється за формулою:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^k u_i \cdot \mu_A(u_i)/u_i}{\sum_{i=1}^k \mu_A(u_i)/u_i}. \quad 1.18$$

Нечітким логічним висновком називається апроксимація залежності $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за допомогою нечіткої бази знань і операцій над нечіткими множинами.

При цьому в якості вхідних змінних можуть розглядатися різні характеристики, що визначають вид вольт-ватної характеристики фотоелектричного модуля: струм і напруга, приріст потужності від прирощення напруги, температура і освітленість. Як і в методі з налаштуванням пошукового кроку, вихідною змінною нечіткого контролера буде коригуючий коефіцієнт, що змінює розмір кроку пошукового алгоритму ЗіС. За рахунок лінгвістичного опису залежності вхідних і вихідних змінних досягається значна гнучкість в налаштуванні системи, що дозволяє проводити досить точну адаптацію алгоритму в необхідних умовах.

Перевагами побудови системи керування фотоелектричною системою на основі нечіткої логіки є висока ефективність пошуку робочої точки при різних умовах.

Висновки до розділу 1

1. Фотоелектричні системи мають великий потенціал для енергетичної галузі. Підвищений інтерес до такого роду систем призвів до створення різних засобів підвищення їх енергетичної ефективності.

2. З точки зору автоматизації та управління найбільший інтерес представляє підвищення енергетичної ефективності ФЕС за допомогою технології стеження за точкою максимальної потужності. Ця технологія має широкі можливості для поліпшення якості роботи фотоелектричних систем за рахунок забезпечення оптимальних режимів функціонування обладнання (управління процесом заряду акумуляторів), виключення зниження потужності (перетворення енергії здійснюється при оптимальних параметрах системи, які налаштовуються), збільшення отриманої енергії при розсіяному випромінюванні (в умовах підвищеної хмарності, туману).

3. Серед наведених в даному розділі методів пошуку точки максимальної потужності слід віддати перевагу алгоритму «збурення і спостереження» як найбільш застосованому і простому в реалізації. При цьому забезпечується висока якість роботи. Однак застосування алгоритму ЗіС має і ряд недоліків, що вимагають проведення додаткових досліджень.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З АВТОМАТИЗОВАНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ АЛГОРИТМІВ

2.1 Моделювання фотоелектричної системи

При розробці фотоелектричних систем велике значення має попереднє моделювання, яке дозволяє на основі проектування проводити дослідження таких систем. За допомогою математичного моделювання можливо провести дослідження таких систем. За допомогою комп'ютерного моделювання, яке засновано на математичних моделях, можливо визначити ефективність фотоелектричної системи для конкретних умов, щоб дати попередню оцінку доцільності її застосування.

При цьому є можливість дослідити роботу фотоелектричної системи при різних конфігураціях обладнання та промоделювати технічні рішення для підвищення енергетичної ефективності. До переваг комп'ютерного моделювання відносно експериментальних досліджень необхідно віднести швидкість обробки отриманої інформації (масштабування часу), економічність та гнучкість.

В магістерській дипломній роботі отримані наступні моделі елементів фотоелектричної системи: фотоелектричний модуль, контролер заряду-розряду, навантаження, яке підключається, а також акумуляторна батарея. Оскільки вказані елементи є типовими для фотоелектричних установок, то вони можуть бути застосовані для побудови фотоелектричних систем різної конфігурації.

За відомою математичною моделлю [10], в середовищі MATLAB Simulink побудована комп'ютерна модель фотоелемента, наведена на рис. 2.1. Блоки "I_{dn} calc" і "K_{dT} calc" являють собою підсистеми для розрахунку номінального діодного струму і температурного коефіцієнта відповідно. Наповнення блоків "I_{dn} calc" і "K_{dT} calc" наведено на рис. 2.2.

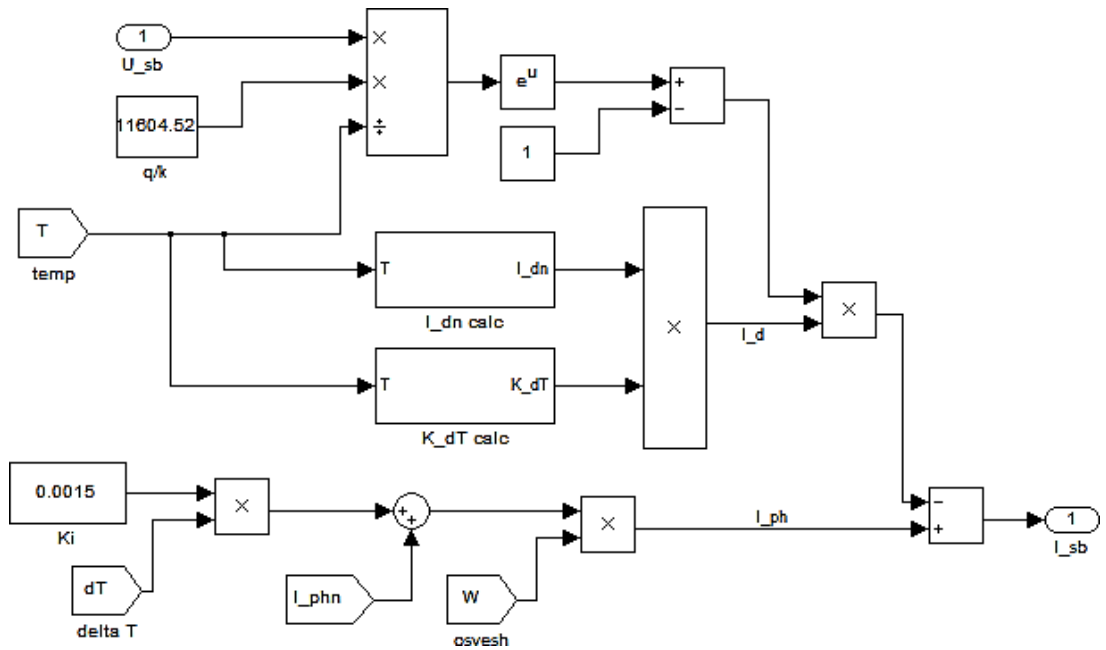
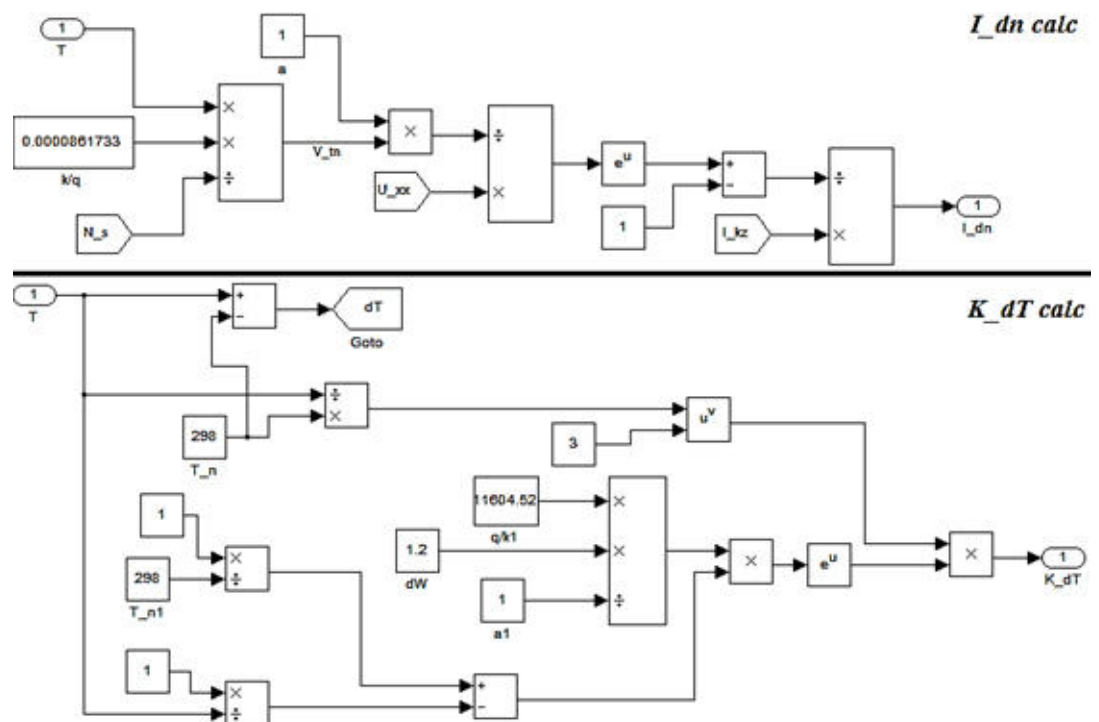


Рис. 2.1. Модель фотоелемента

Рис. 2.2 Моделі блоків « $I_{dn} \text{ calc}$ » і « $K_{dT} \text{ calc}$ »

Запропонована модель дозволяє досліджувати вплив різних факторів (температури, освітленості, кута падіння променів, деградації фотоелементів) на характеристики фотоелемента і отримувати наочне уявлення про роботу фотоелемента при побудові графіків ВАХ і ВВХ.

Представлена модель дозволяє:

- налаштовувати внутрішні характеристики фотоелементів: струм короткого замикання, напруга холостого ходу, температурний коефіцієнт по струму;

- моделювати умови навколишнього середовища, задаючи їх статичними або такими, що динамічно змінюються: кут падіння сонячних променів, рівень освітленості, температура;

- отримувати графіки ВАХ і ВВХ.

На рис. 2.3. наведені ВАХ і ВВХ фотоелемента при наступних параметрах моделі: напруга холостого ходу $U_{x,x} = 0,55$ В, струм короткого замикання $I_{к.з} = 5,5$ А, рівень освітленості $Q = 1000$ кВт/м², температура фотоелемента $T = 298$ К, кут падіння сонячних променів $\alpha = 1,5708$ рад.

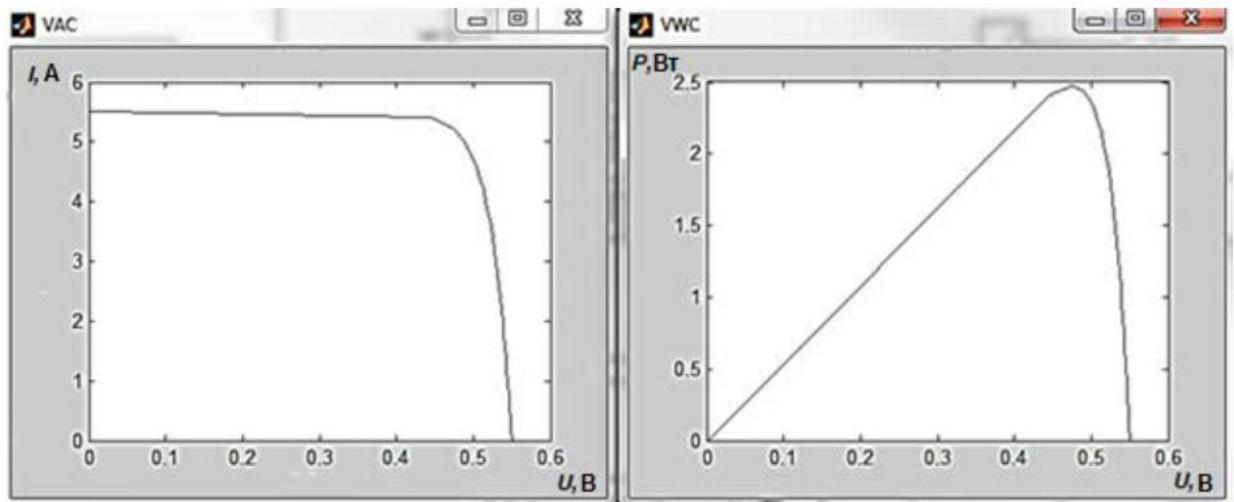


Рис. 2.3. ВАХ і ВВХ фотоелемента

На рис 2.4. наведені ВАХ і ВАХ фотоелемента при різному рівні освітленості (синя лінія – $W=1$, зелена – $W=0.75$, червона – $W=0.5$). При

зменшенні освітленості падає потужність, а, відповідно, кількість виробленої енергії, що свідчить про якісну адекватність створеної моделі.

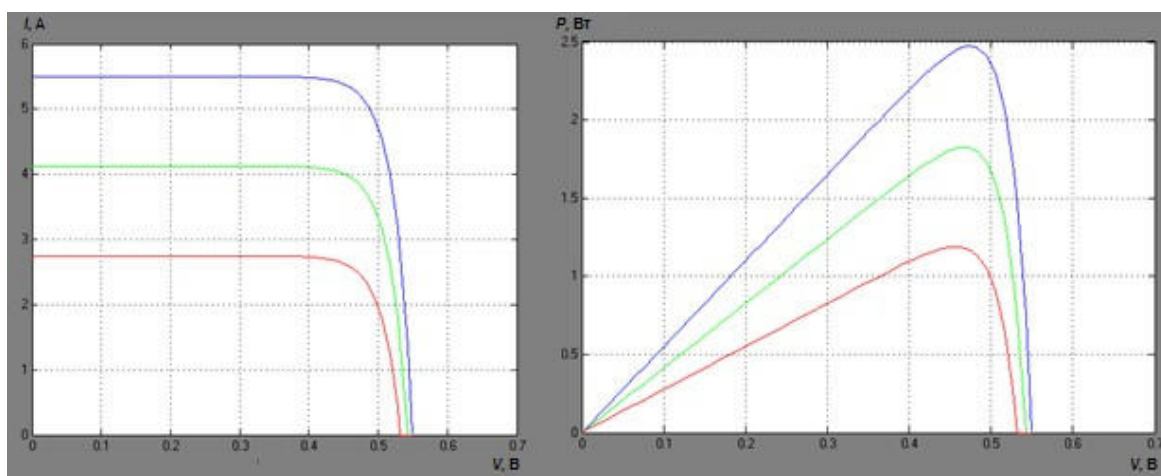


Рис. 2.4. ВАХ і ВВХ фотоелемента при різному рівні освітленості

На рис. 2.5. наведені ВАХ і ВВХ фотоелемента при різних температурах (синя лінія – при 30 °С, зелена – при 40 °С, червона – при 50 °С). З отриманого графіка видно, що чим менше температура фотоелемента, тим вище потужність, а, відповідно, кількість виробленої енергії – це відповідає властивостям фізики фотоелементів, що говорить про якісну адекватність моделі.

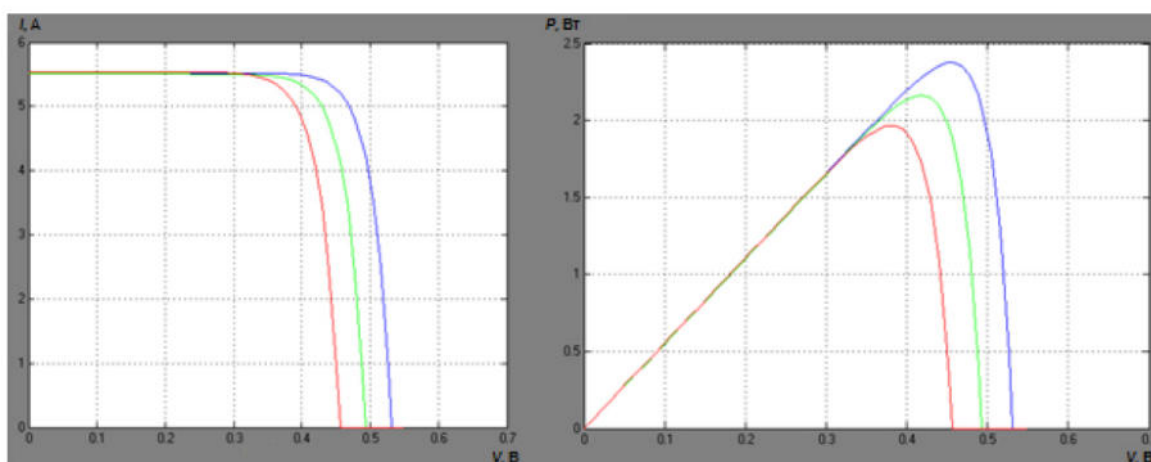


Рис. 2.5. ВАХ і ВВХ фотоелемента при різних температурах

Фотоелектричний модуль являє собою послідовно-паралельне з'єднання фотоелементів, в результаті такого з'єднання змінюються вихідні характеристики модуля. Послідовне з'єднання збільшує вихідну напругу пропорційно кількості включених послідовно елементів, а паралельне включення пропорційно збільшує вихідний струм.

На рис. 2.6 наведена модель фотоелектричного модуля, що складається з шести фотоелементів, включених послідовно-паралельно. ВАХ модуля наведена на рис 2.7.

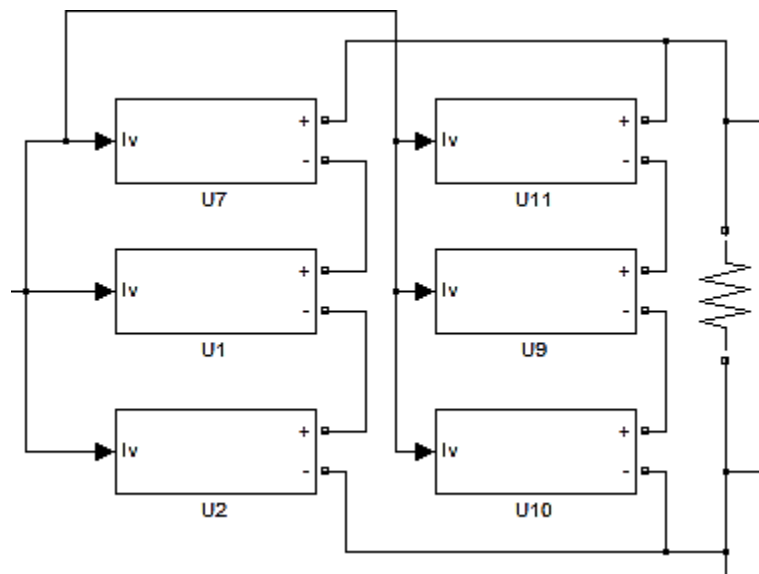


Рис. 2.6. Модель фотоелектричного модуля, що складається з шести фотоелементів

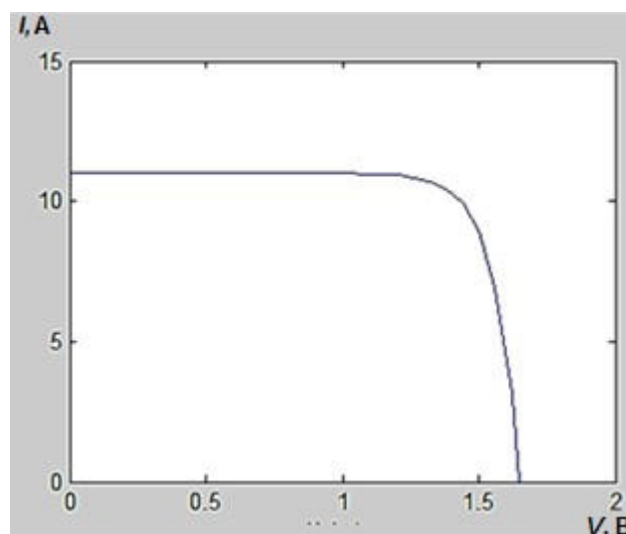


Рис. 2.7. ВАХ фотоелектричного модуля

За ВАХ фотоелектричного модуля (рис. 2.7) видно, що вихідна напруга збільшилася в 3 рази (три послідовно підключених фотоелемента), а вихідний струм збільшився в 2 рази (два послідовно включених з'єднання фотоелементів), в порівнянні з одиночним фотоелементом (рис. 2.3). Для зручності моделювання можна замінити трудомістке включення додаткових фотоелементів введенням множників, відповідних послідовно-паралельному підключенню фотоелементів модуля, але при цьому втрачається можливість промоделювати умову часткової затінення.

Для моделювання динамічних характеристик фотоелектричного модуля комп'ютерна модель, наведена на рис. 2.1, модернізується за допомогою елементів бібліотеки SimPowerSystems.

Модель фотоелектричного модуля, що містить силові елементи електричного кола представлена на рис. 2.8.

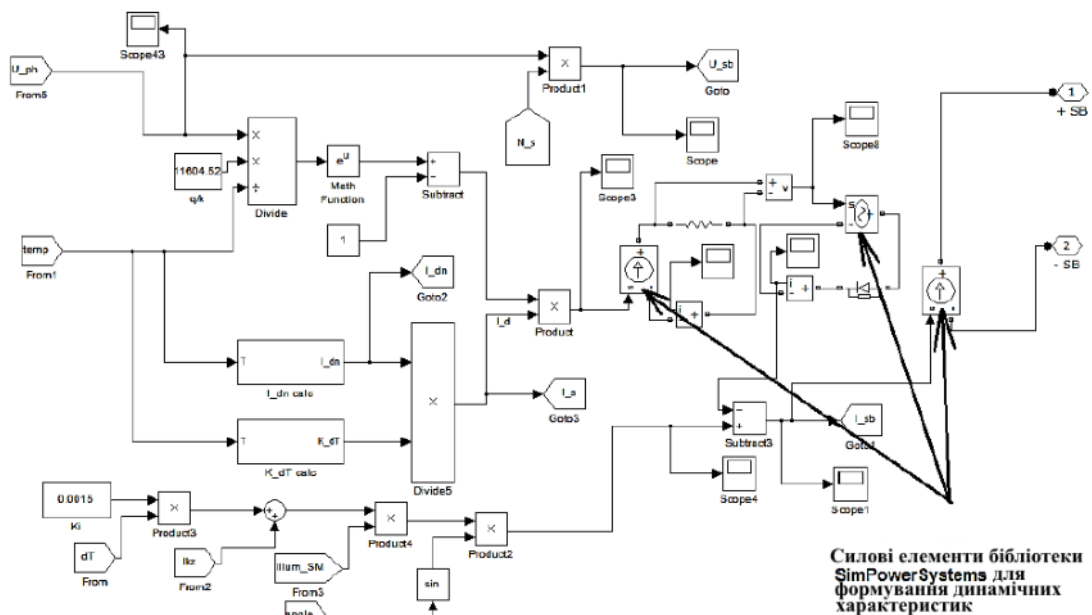


Рис. 2.8. Динамічна модель фотоелектричного модуля

На основі наведеної динамічної моделі отримана реакція системи на ступінчасту зміну напруги у вигляді зміни діодного струму і вихідного струму фотоелемента. Отримані графіки наведені на рис. 2.9.

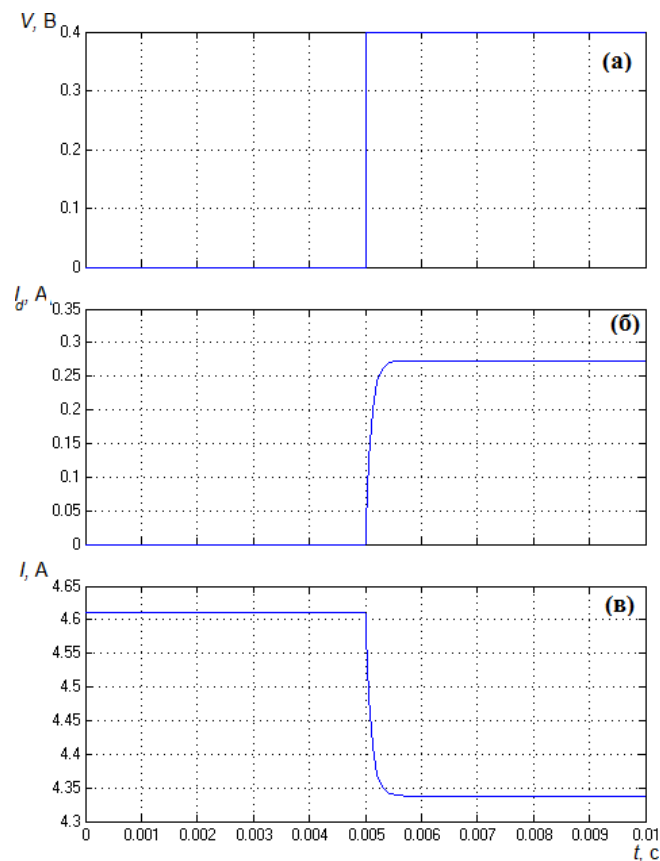


Рис. 2.9. Перехідні процеси при ступінчастій зміні напруги:
 (а) - зміна напруги; – б) - реакція діодного струму; – в) - реакція вихідного струму

Комп'ютерна модель контролера заряду-розряду з функцією MPPT, розроблена в середовищі Matlab/Simulink, представлена на рис. 2.10.

Представлена модель схематично розділена на основні блоки: імпульсний перетворювач енергії і керуючий пристрій. Керуючий пристрій відповідає за формування необхідних впливів, що забезпечують правильну і ефективну роботу контролера.

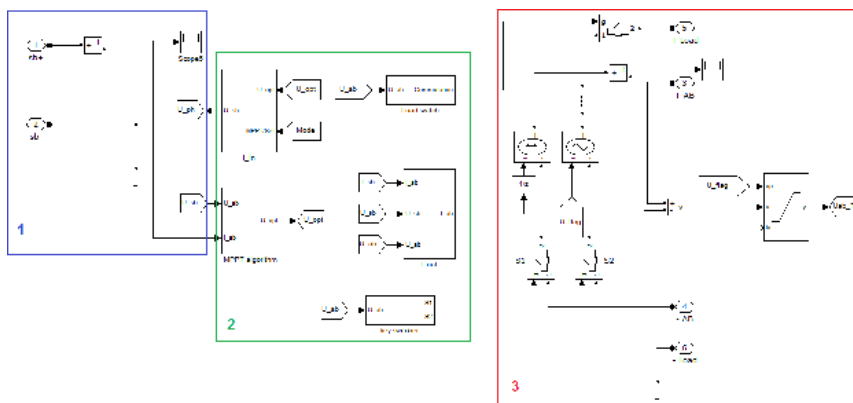


Рис. 2.10. Модель контролера заряду-розряду

Модель контролера містить шість клем (на рис 2.10 – це шестикутники, пронумеровані від 1 до 6), що забезпечують зв'язок із зовнішніми пристроями. Так, за допомогою клем 1 і 2 до контролера підключаються фотоелектричні модулі. За допомогою клем 3 і 4 до системи підключаються акумуляторні батареї. Клеми 5 і 6 є комутуючими клемми навантаження.

На представленій на рис. 2.10 моделі імпульсний перетворювач енергії включає в себе вхідний і вихідний ланцюги. За допомогою вхідного ланцюга (на рис. 2.10 позначений «1» і виділений синьою рамкою) формується вихідний струм від масиву фотоелектричних модулів. За допомогою вихідного ланцюга (на рис. 2.10 позначений «3» і виділений червоною рамкою) формується зарядний струм акумулятора і струм живлення навантаження.

Імпульсний перетворювач має керуючим пристрій (на рис. 2.10 позначений «2» і виділений зеленою рамкою). Модель керуючого пристрою складається з п'яти функціональних блоків (підсистем), що виконують необхідні процедури управління.

За допомогою блоку «I_in» здійснюється ручний вибір режиму роботи контролера. Контролер підтримує два режими: режим постійної напруги, із заданим положенням робочої точки на ВВХ, і режим екстремального регулювання, з пошуком положення робочої точки, яка відповідає максимальній потужності.

Модель блоку "I_in" наведена на рис. 2.11.

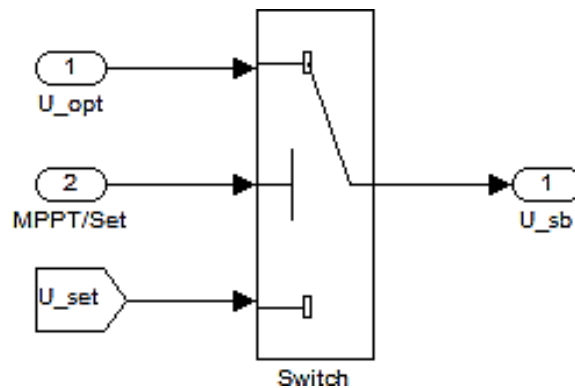


Рис. 2.11. Блок «I_in»

Блок "I_in" фактично є перемикачем, що спрацьовує від команди

оператора (вхідний сигнал MPPT/Set), при цьому команда «MPPT» починає роботу системи в режимі екстремального регулювання потужності, що дозволяє отримувати максимум енергії від фотоелектричних модулів. Команда «Set» починає режим роботи системи із заданою, не змінною робочою точкою ВВХ, що підвищує надійність системи при роботі в умовах різкого перепаду температур і освітленості.

У разі ініціалізації режиму екстремального регулювання в роботу вступає блок «MPPT algorithm», який безпосередньо здійснює пошук точки максимальної потужності за алгоритмом ЗіС.

Модель блоку «MPPT algorithm» наведена на рис 2.12.

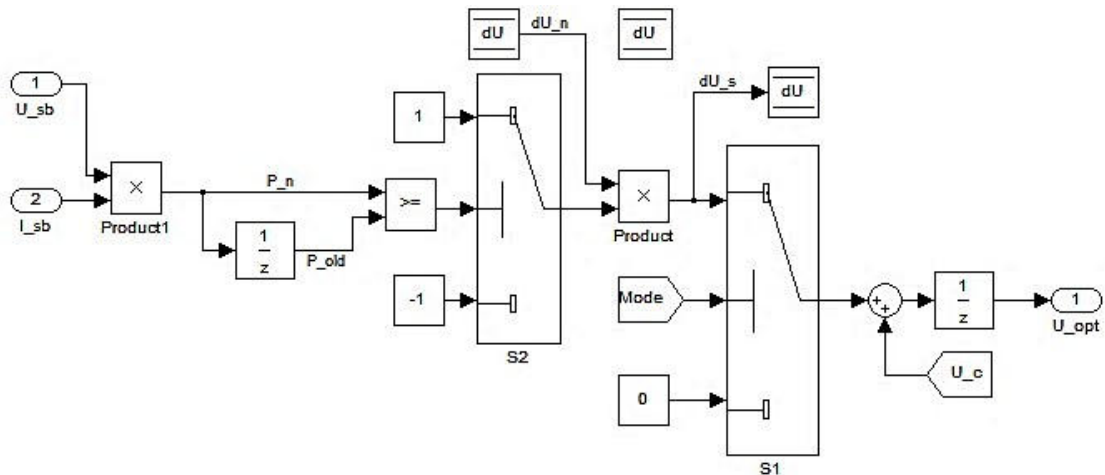


Рис. 2.12. Блок «MPPT algorithm»

Як тільки на вхід «Mode» даного блоку приходить сигнал від блоку «I_in», починається режим екстремального регулювання шляхом переведення ключа перемикача S1 у верхнє положення. Вхідні сигнали блоку «MPPT algorithm» - струм і напруга фотоелектричних модулів. Блок розраховує поточну потужність і зберігає в пам'яті. Порівнюючи значення потужності P_n і P_{old} , блок визначає знак прирощення по напрузі фотоелектричного модуля і, в разі якщо $P_{old} > P_n$, перемикач S2 змінює знак прирощення dU . На вихід блоку подається нове значення для напруги масиву фотоелектричних модулів, наближене до оптимального (забезпечує максимум потужності).

Блок "I_out" служить для формування струму у вихідному ланцюзі імпульсного перетворювача. Модель блоку наведена на рис. 2.13.

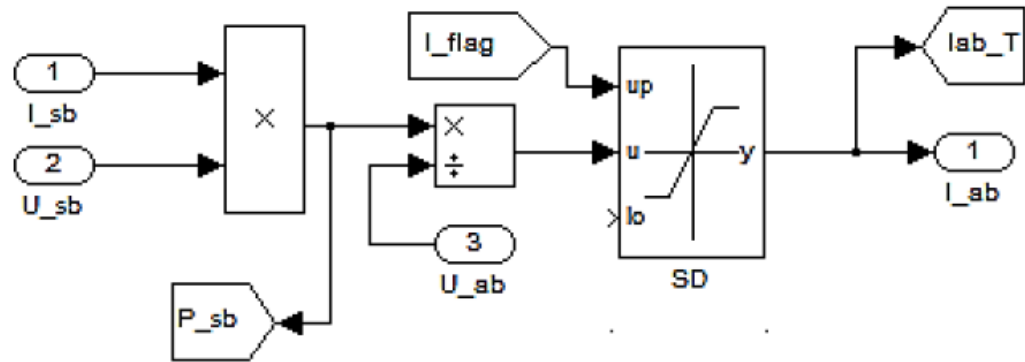


Рис. 2.13. Блок «I_out»

При цьому вихідний струм контролера заряду-розряду визначається, як $I_{\text{ВЫХ}} = P_{\text{ВХ}} / U_{\text{ВЫХ}}$, де $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{аб}}$, $P_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}} \cdot U_{\text{ВХ}}$.

Струм заряду акумуляторної батареї обмежений установчим значенням $I_{\text{flag}} = 0,1 \cdot C_{\text{аб}}$ за допомогою елемента SD.

Керуючий пристрій підтримує заряд акумуляторної батареї в двох режимах: заряд максимальним струмом і заряд падаючим струмом. Режим заряду АБ задається блоком "Key Switcher", представленим на рис. 2.14.

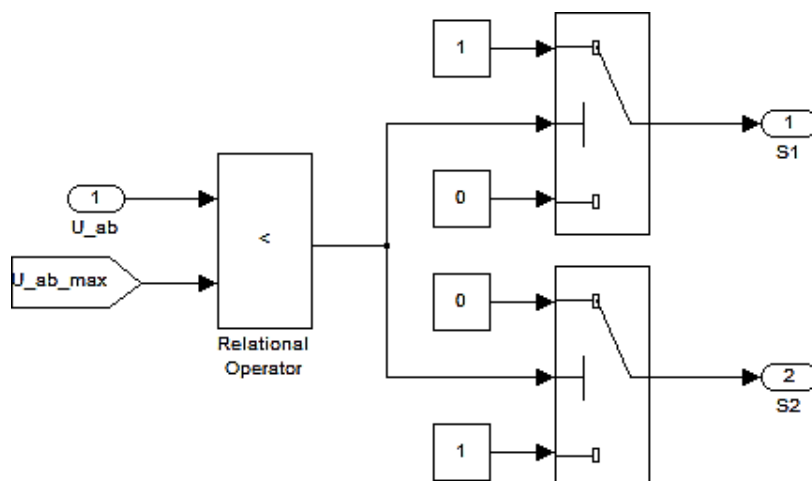


Рис. 2.14. Блок «Key Switcher»

Якщо напруга акумулятора нижче максимально допустимого рівня, то блок "Key Switcher" формує на виході S1 одиницю, а на виході S2 нуль.

Вихідні сигнали з блоку "Key Switcher" надходять на ключі «S1» і «S2» (рис. 2.10) відповідно. В результаті відбувається живлення акумулятора від джерела максимального струму.

Якщо напруга на акумуляторі досягла максимального рівня, сигнали на виході блоку "Key Switcher" змінюються, що, в свою чергу, призводить до включення джерела падаючого струму в вихідному ланцюгу.

На рис. 2.15 наведена модель блоку «Load Switch», що відповідає за комутацію навантаження.

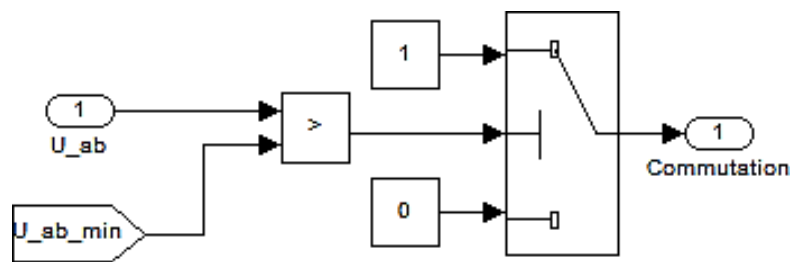


Рис. 2.15. Блок «Load Switch»

У випадку, якщо напруга АБ досягає позначки U_{ab_min} , для запобігання глибокого розряду, блок «Load Switch» формує на виході логічний нуль, що призводить до відключення навантаження. Коли напруга АБ повертається в робочий діапазон, блок виробляє комутацію навантаження.

Виходячи з вищевикладеного, розроблена модель контролера заряду фотоелектричної установки має наступні функції:

- підтримує режим роботи з постійною, заданою напругою на вхідному ланцюзі імпульсного перетворювача (режим постійної напруги);
- підтримує режим роботи зі змінною напругою на вхідному ланцюзі імпульсного перетворювача для пошуку точки максимальної потужності (MPPT-режим або режим екстремального регулювання);
- управляє зарядом акумуляторів: підтримує режими максимального і падаючого струму;
- включає і відключає навантаження з метою запобігання глибокого

розряду акумуляторів.

В якості моделі акумуляторної батареї можна використовувати елемент "Battery" зі стандартної бібліотеки Simulink/SimPowerSystems.

Зображення елемента і його параметри наведені на рис. 2.16.

Елемент «Battery» має широкі можливості налаштування і підходить для побудови моделей автономних систем.

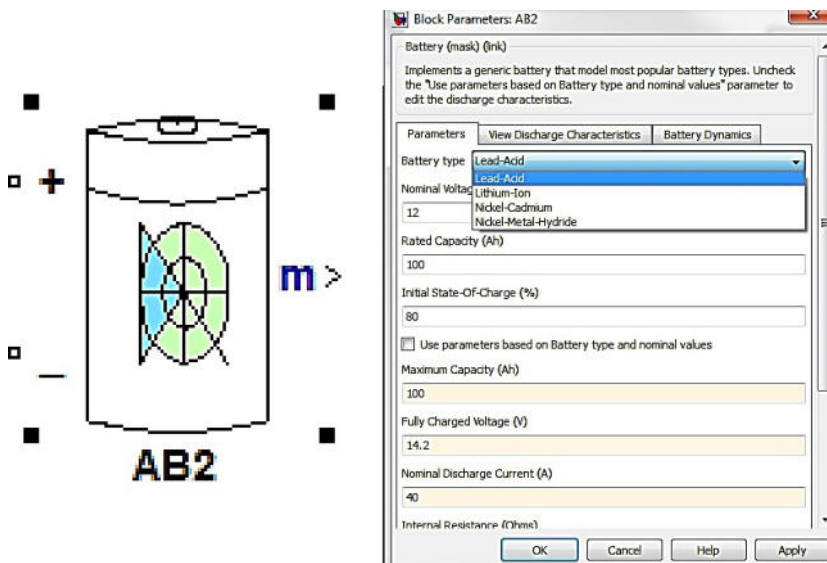


Рис. 2.16. Зображення елемента «Battery» та його параметри

2.2. Моделювання навантаження

Для розробки адекватної моделі навантаження необхідно визначитися з базою електротехнічних засобів, що входять в навантаження. Наприклад, фотоелектрична установка повинна забезпечувати потужність 3 кВт·год/добу електроенергії для приватного будинку. Переймаючись відомою потужністю побутових приладів і тривалістю їх експлуатації, можна отримати добовий графік навантаження. У таблиці 2.1 наведено список споживачів електроенергії, а також споживана ними енергія за тиждень.

Таблиця 2.1

Споживачі електроенергії приватного будинку

Навантаження	Потужність, Вт	Кількість	Усього	Час роботи, год/тиждень	Вт· ч/тиждень
Ноутбук	100	1	100	21	2100
Телевізор	100	1	100	28	2800
НВЧ-піч	400	1	400	1,05	420
Роутер+3D модем	5	1	5	168	840
Лампи	18	8	144	35	5040
Зарядний пристрій	10	6	60	14	840
Пилосос	700	1	700	2,8	1960
ПК	200	1	200	35	7000

Згідно таблиці 2.1, потреба в електричній енергії становить 21000 Вт· год/тиждень. або 3000 Вт ·год/добу.

На рис. 2.17 наведена модель навантаження, що включає в себе типове навантаження, наведене в таблиці 2.1.

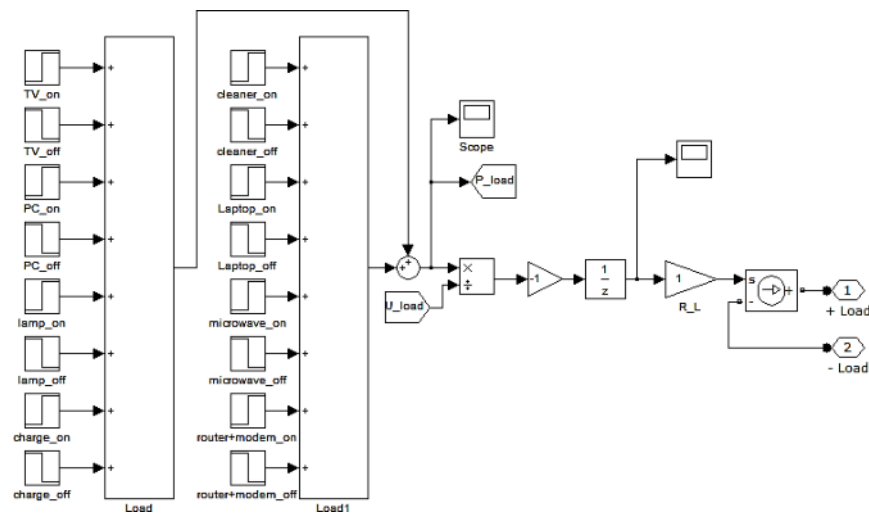


Рис. 2.17. Модель навантаження

Результати моделювання у вигляді діаграми добового споживання потужності подані на рис. 2.18.

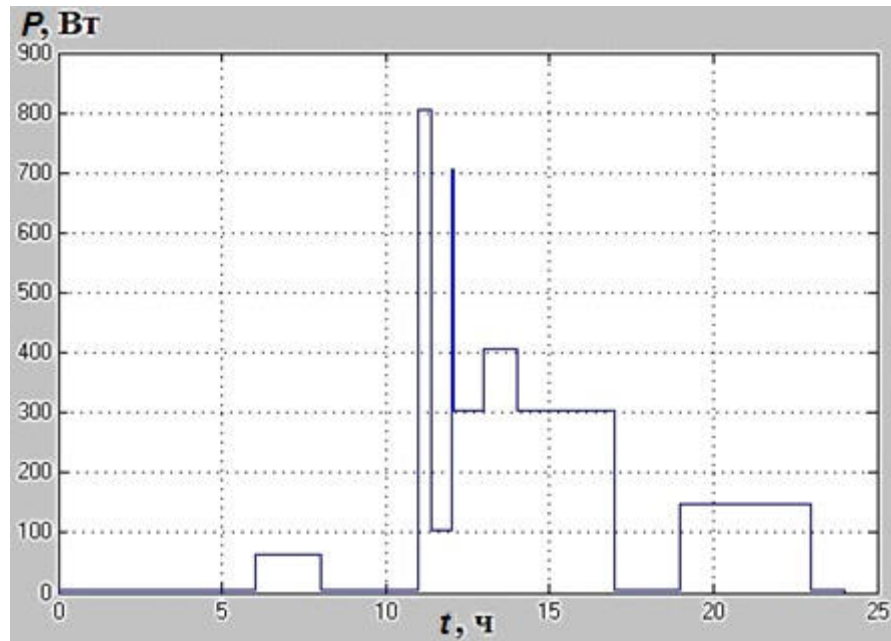


Рис. 2.18. Часова діаграма споживання потужності

Діаграма добового споживання потужності повністю відповідає змодельованим умовам, наведеним в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Добове споживання потужності

Навантаження	Потужність, Вт	Кількість, шт.	Усього, Вт	Час роботи, год/доба	Споживання, Вт· год/доба
Ноутбук	100	1	100	3	300
Телевізор	100	1	100	4	400
НВЧ-піч	400	1	400	0,15	60
Роутер + 3D - модем	5	1	5	24	120
Лампи	18	8	144	5	720
Зарядний пристрій	10	6	60	2	120
Пилосос	700	1	700	0,4	280
ПК	200	1	200	5	1000

2.3. Модель фотоелектричної системи

За допомогою розроблених моделей елементів фотоелектричної установки можна синтезувати цільну модель фотоелектричної системи.

На рис. 2.19 наведена комп'ютерна модель сонячної фотоелектричної системи, зібрана з розроблених раніше елементів.

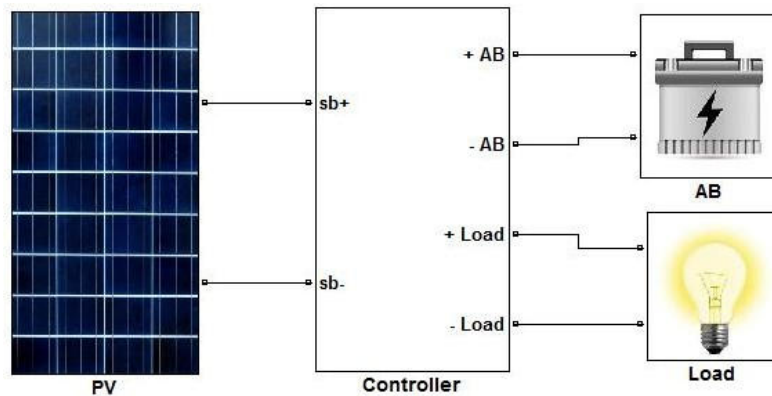


Рис. 2.19. Модель фотоелектричної системи

На основі розробленої моделі можна здійснювати комп'ютерне моделювання процесів у фотоелектричній системі за різних умов навколишнього середовища, різноманітних конфігураціях обладнання та отримувати необхідну інформацію про функціонування системи [38].

Тестування моделі проведено при наступних параметрах системи:

- фотоелектричний модуль: напруга холостого ходу $U_{x,x} = 36,8$ В, струм короткого замикання $I_{к.з} = 8,99$ А, максимальна потужність, яка генерується $P_{max} = 250$ Вт;

- акумуляторна батарея: ємність $C_{ab} = 200$ А·ч, номінальна напруга $U_{ab} = 12$ В; максимальна напруга $U_{ab_max} = 14,2$ В;

- потужність, споживана навантаженням, змінюється протягом доби за наведеним на рис. 2.16 графіком;

- освітленість фотоелектричних модулів змінюється протягом доби за наведеним на рис. 2.20 графіком.

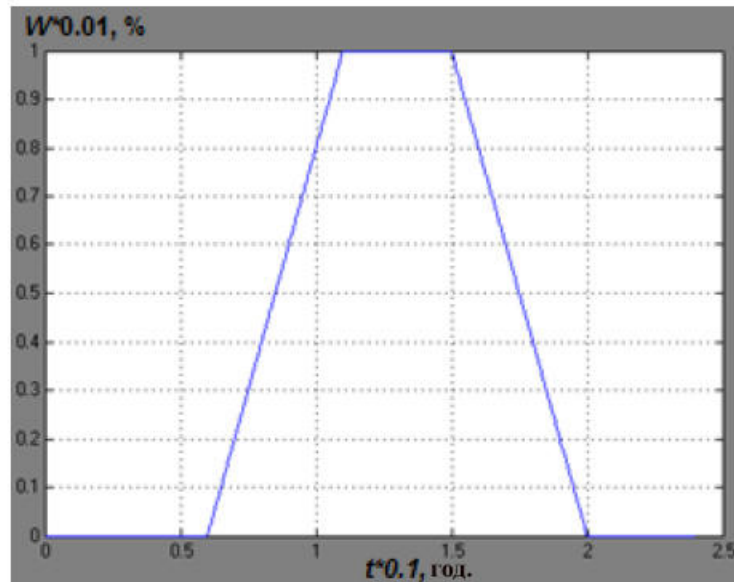
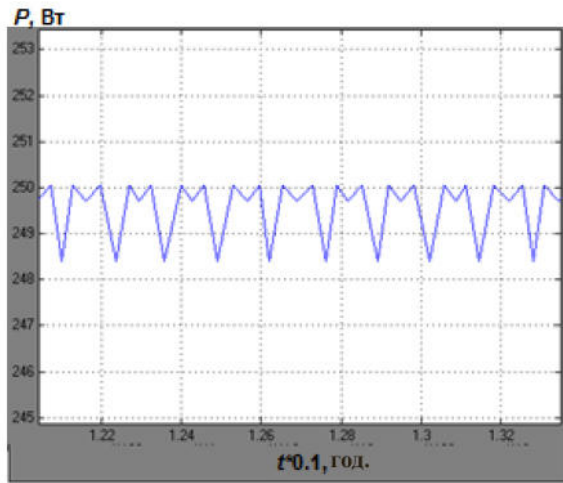


Рис. 2.20. Зміна рівня освітленості протягом доби

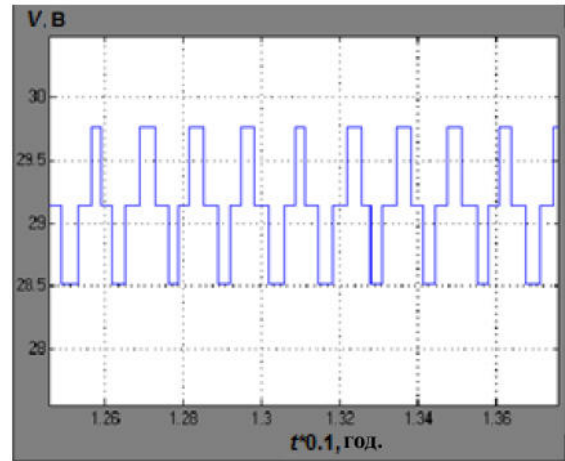
Результати тестування моделі представлені на рис. 2.21.

Як видно з рис. 2.21, модель повністю відповідає своїм заявленим можливостям: здійснює зарядку АБ, забезпечує пошук точки максимальної потужності, враховує зміни освітленості і навантаження.

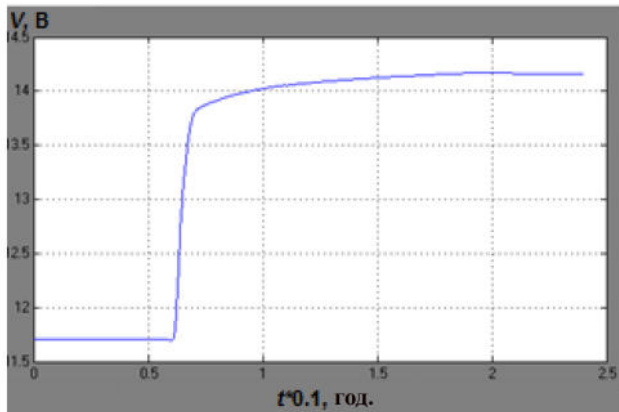
Для оцінки ефективності застосування МРРТ-алгоритму було розглянуто два режими роботи моделі контролера: режим екстремального регулювання потужності, режим постійної напруги. У першому випадку контролер виконує пошук точки максимальної потужності шляхом зміни напруги в контурі фотоелектричного модуля і отримання оптимальної пари струм + напруга. У другому випадку контролер підтримує задану напругу. Результати моделювання представлені на рис. 2.22. За рис. 2.22 видно, що має місце недоотримання потужності в разі регулювання по заданій напрузі (зелений графік). Застосування МРРТ-режиму (синій графік) збільшує енергетичну ефективність приблизно на 12 %, так як площа під синім графіком дорівнює 2250 Вт · год, тоді як площа під зеленим графіком дорівнює 1965 Вт · год.



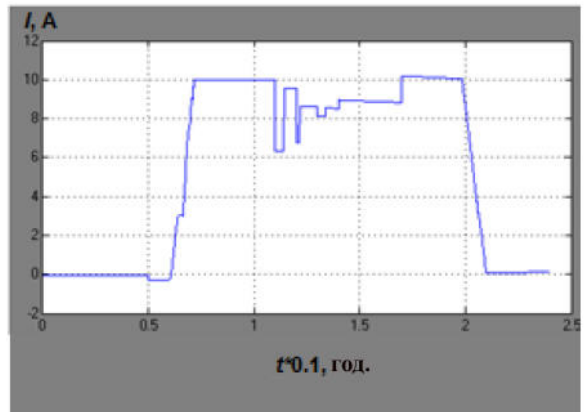
Коливання потужності



Робота МРРТ-алгоритма "збурення і спостереження" (ЗіС)



Напруга на акумуляторі



Струм на акумуляторі

Рис. 2.21. Результати моделювання

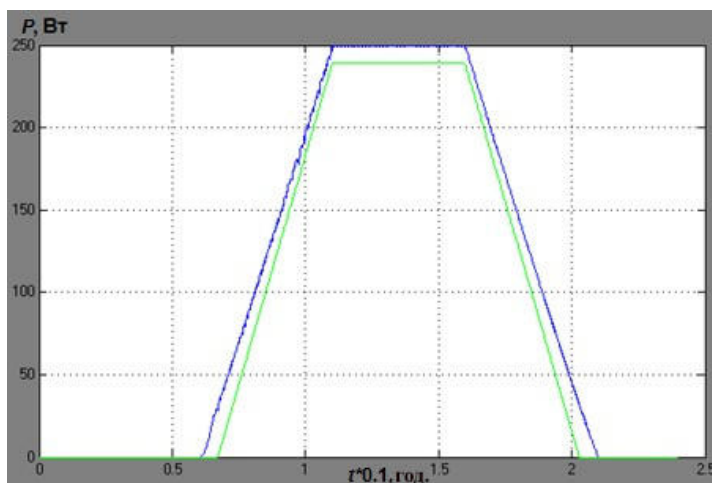


Рис. 2.22. До оцінки ефективності МРРТ-режиму

Висновки до розділу 2

1. У середовищі MATLAB / Simulink створена бібліотека елементів фотоелектричних систем, що включає моделі сонячної панелі, керуючого пристрою, навантаження.
2. Розроблена бібліотека дозволяє створювати моделі фотоелектричних систем різних конфігурацій і досліджувати їх роботу при різних зовнішніх умовах.
3. На базі розробленої бібліотеки створена модель фотоелектричної системи з різними адаптивними алгоритмами управління: алгоритм з налаштуванням пошукового кроку, алгоритм з еталонною моделлю, алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором, а також алгоритм поліпшення для нечіткого регулятора.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З РІЗНИМИ АДАПТИВНИМИ АЛГОРИТМАМИ

Додатково збільшити енергетичну ефективність від МРРТ-режиму регулювання можна шляхом поліпшення алгоритму ZiC за рахунок різних варіантів адаптації. Для дослідження та оцінки ефективності цих рішень також використовуються можливості комп'ютерного моделювання.

Для моделювання процесу екстремального регулювання потужності при різних алгоритмах управління пропонується використовувати наступні особливі настройки моделі: постійну освітленість, постійну температуру, скорочений час моделювання, відключене навантаження. Такі параметри моделі забезпечать зручне уявлення про роботу досліджуваних алгоритмів і наочність їх порівняльних характеристик.

Загальні налаштування моделі фотоелектричної системи для проведення досліджень ефективності адаптивних алгоритмів наступні:

- фотоелектричний модуль з напругою холостого ходу $U_{xx} = 24$ В, і струмом короткого замикання $I_{к.з} = 6,14$ А;
- нормальні умови: температура 25° С, рівень сонячної інсоляції $Q = 1000$ кВт/м², кут падіння променів $\alpha = 90^{\circ}$;
- крок пошукового алгоритму $0,35$ В;
- навантаження споживачів відключено;
- фотоелектричний модуль заряджає акумулятор з номінальною напругою $U_{ab} = 12$ В, розряджений до 80 %.

3.1. Модель системи з алгоритмом з налаштуванням пошукового кроку

На рис. 2.1 наведена структурна схема ФЕС, як системи управління з екстремальним регулюванням потужності.

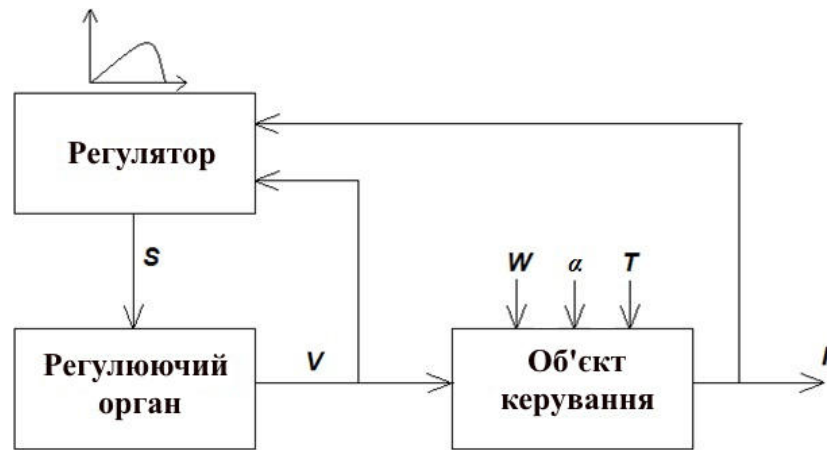


Рис. 3.1. Структурна схема екстремального регулювання потужності ФЕС: регулятор - контролер з сигналом завдання на пошук максимуму; регулюючий орган - імпульсний перетворювач; об'єкт управління - фотоелектричний модуль; S – ШІМ-сигнал; V – сигнал по напрузі; I – сигнал по струму; W , α , T – зовнішні збурення по освітленості, куту падіння променів і температурі відповідно.

На основі математичної моделі алгоритму ЗіС з налаштуванням пошукового кроку можна вдосконалити структуру керуючого пристрою – блок «MPPT-algorithm». Комп'ютерна модель поліпшеного пристрою з адаптивним алгоритмом наведена на рис 3.2.

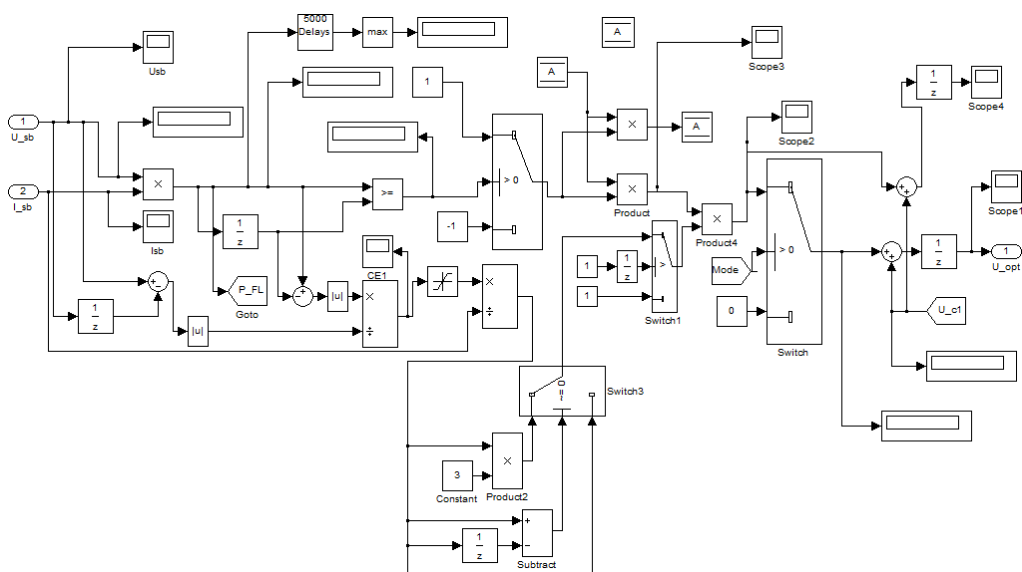


Рис. 3.2. Блок "MPPT-algorithm" з налаштуванням пошукового кроку

При цьому виконується розрахунок поправочного коефіцієнта, що враховує швидкість зміни потужності і позицію робочої точки на ВВХ.

Після проведення порівняльного моделювання двох систем: зі звичайним алгоритмом ЗіС і алгоритмом з налаштуванням кроку отримані наведені на рис. 3.3 результати.

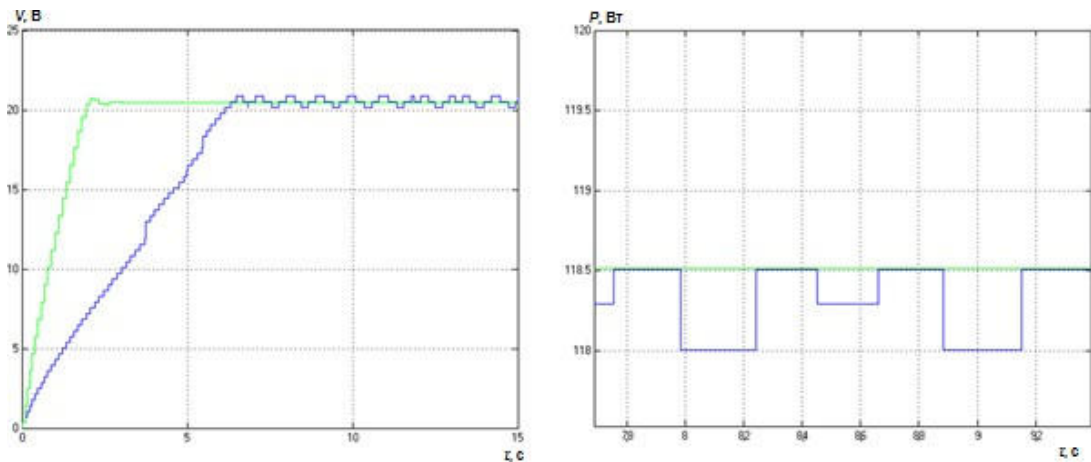


Рис. 3.3. Робота алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (синій-звичайний алгоритм ЗіС, зелений-алгоритм ЗіС з налаштуванням пошукового кроку)

Як видно з рис 3.3, використання адаптивного алгоритму дозволяє зменшити час пошуку точки максимальної потужності і практично усунути коливання потужності при роботі алгоритму в екстремумі ВВХ.

Робота алгоритму з налаштуванням пошукового кроку залежить від розміру вихідного кроку. На рис 3.4 наводиться порівняльний графік алгоритму з налаштуванням пошукового кроку при різних значеннях вихідного кроку. З представлених графіків видно, що взяття за основу великого кроку призводить до значних коливань близько робочої точки, в той же час занадто маленький крок призведе до збільшення часу пошуку робочої точки. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що для фотоелектричних систем певної конфігурації існує деякий оптимальний еталонний крок, що забезпечує кращі показники.

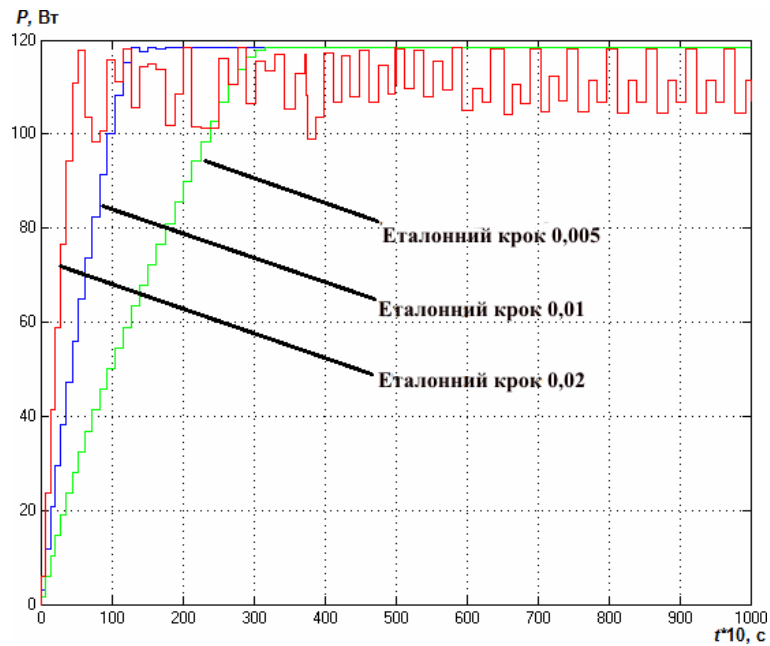


Рис. 3.4 Графіки роботи алгоритму ЗіС з налаштуванням пошукового кроку при різних значеннях вихідного кроку

3.2. Модель системи з алгоритмом з передбачуваною адаптацією

Для реалізації алгоритму з передбачуваною адаптацією використовується попередній розрахунок ВВХ на моделі, що дозволяє отримати робочу точку алгоритму в безпосередній близькості від точки максимальної потужності, з точністю до похибки моделювання. На рис.3.5 наведена структура блоку "MPPT-algorithm" з передбачуваною адаптацією.

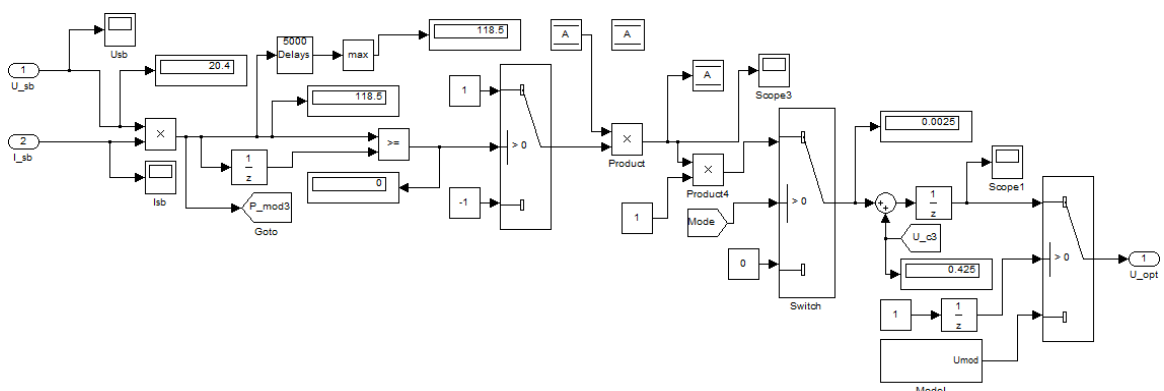


Рис. 3.5. Блок «MPPT-algorithm» з передбачуваною адаптацією

Додатковий елемент "Model" включає в себе математичну модель для

отримання стартової позиції робочої точки на ВВХ, відповідної точці максимальної потужності моделі.

Результати порівняльного моделювання алгоритму з передбачуваною адаптацією і звичайного алгоритму ЗіС наведені на рис. 3.6.

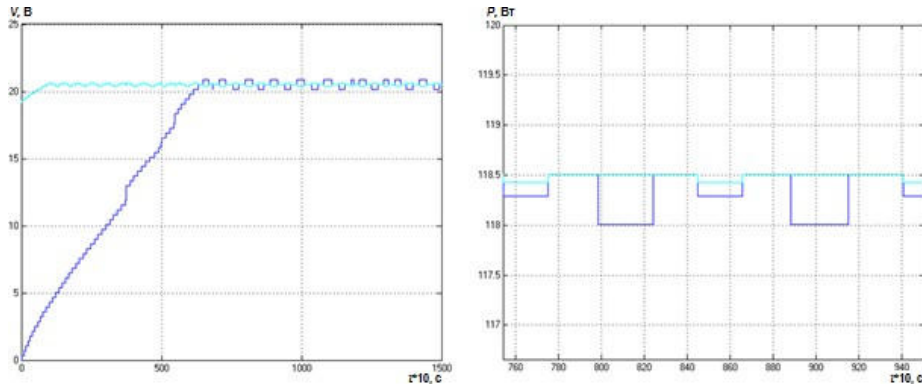


Рис. 3.6. Робота алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (синій-звичайний алгоритм ЗіС; бірюзовий - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією)

З наведених графіків видно, що визначення початкової позиції для робочої точки алгоритму з допомогою передбачуваної адаптації дозволяє мінімізувати час пошуку точки максимальної потужності, а також використовувати в алгоритмі ЗіС менший за розміром крок, що значно зменшує коливання потужності.

3.3. Модель системи з налаштуванням нечітким регулятором

Можливе створення комп'ютерної моделі керуючого пристрою фотоелектричної системи, що підтримує режим екстремального регулювання потужності з налаштуванням нечітким регулятором. Структурна схема такого блоку наведена на рис. 3.7. Блок Fuzzy Logic Controller виконує функції нечіткого регулювання зі структурою настройки, наведеної на малюнку 3.8. При цьому нечіткий регулятор має набір нечітких правил, наведених на рис.

3.9, і набором функцій приналежності, наведеним на рис. 3.10 – 3.11.

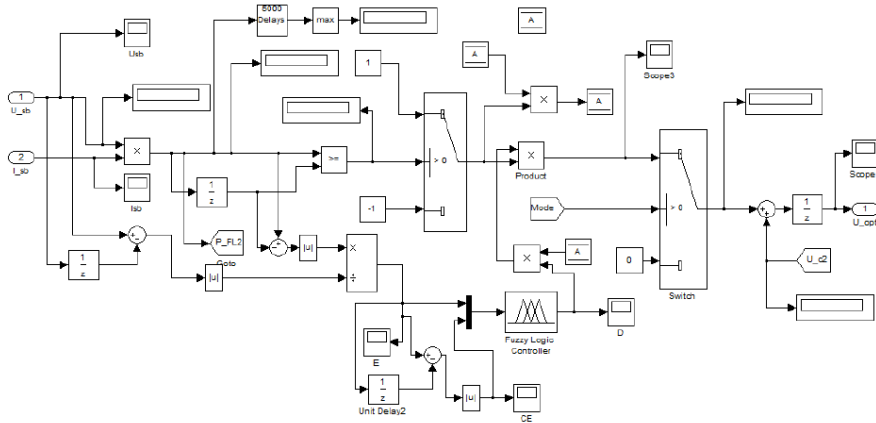


Рис. 3.7. Блок "MRPT-algorithm" з налаштуванням нечітким регулятором

У представленому блоці "MRPT-algorithm" з налаштуванням нечітким регулятором здійснюється налаштування кроку алгоритму ЗіС за допомогою блоку контролера з нечіткою логікою – Fuzzy Logic Controller (FLC). На вхід блоку FLC подаються вхідні змінні: швидкість зміни потужності при зміні напруги E і характер зміни цієї величини CE .

Вихідний сигнал блоку FLC-змінна D -визначає оптимальний при поточних умовах розмір кроку. Залежність вихідної величини від вхідних змінних визначається налаштуваннями блоку FLC: набором нечітких правил і функціями приналежності.

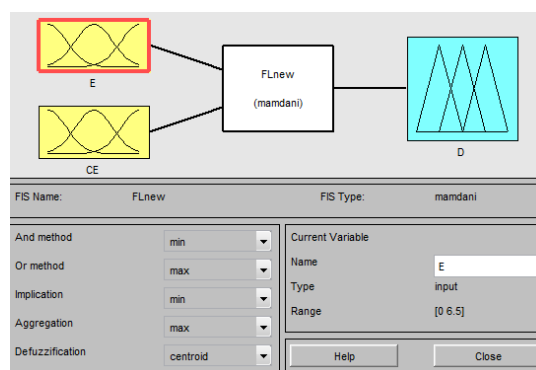


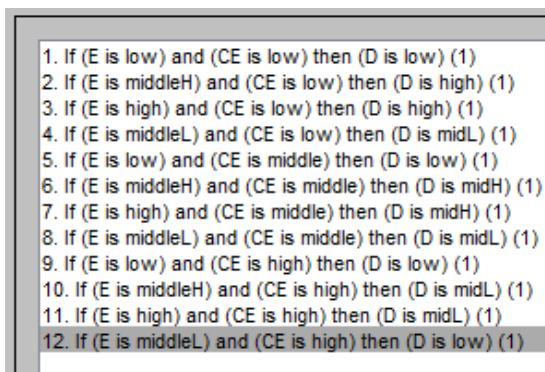
Рис. 3.8. Структура і характеристики моделі нечіткого регулятора

Нечіткий регулятор (блок FLC) має наступні характеристики:

- тип системи: мамдані;
- реалізація логічної операції «і»: мінімум;

- * реалізація логічної операції «або»: множення;
- * реалізація імплікації: мінімум;
- * реалізація агрегації: максимум;
- * метод дефаззифікації: центр ваги.

Структура блоку FLC включає дві вхідні змінні і одну вихідну змінну, які описуються відповідними функціями приналежності, а також набір нечітких правил, що регулює логіку роботи нечіткого контролера.



```

1. If (E is low) and (CE is low) then (D is low) (1)
2. If (E is middleH) and (CE is low) then (D is high) (1)
3. If (E is high) and (CE is low) then (D is high) (1)
4. If (E is middleL) and (CE is low) then (D is midL) (1)
5. If (E is low) and (CE is middle) then (D is low) (1)
6. If (E is middleH) and (CE is middle) then (D is midH) (1)
7. If (E is high) and (CE is middle) then (D is midH) (1)
8. If (E is middleL) and (CE is middle) then (D is midL) (1)
9. If (E is low) and (CE is high) then (D is low) (1)
10. If (E is middleH) and (CE is high) then (D is midL) (1)
11. If (E is high) and (CE is high) then (D is midL) (1)
12. If (E is middleL) and (CE is high) then (D is low) (1)

```

Рис. 3.9. Список правил нечіткого регулятора

Набір правил нечіткого регулятора необхідний для визначення взаємозв'язків і відповідності між приналежністю вихідної величини до одного з нечітких множин, в залежності від приналежності до власних множин вхідних величин. Наприклад, виділене на рис 3.9 правило 12 визначається так: якщо вхідна змінна E належить своїй нечіткій множині $middleL$ і вхідна змінна CE належить своїй нечіткій множині $high$, то вихідна змінна D належить своїй нечіткій множині low . На практиці це означає наступне: якщо приріст потужності при зміні напруги на поточне значення кроку (змінна E) нижче середнього і при цьому приріст потужності на поточному кроці значно вище, ніж на попередньому (змінна CE), то слід задавати маленький коефіцієнт масштабування кроку алгоритму.

Множини значень, що приймаються вхідними і вихідними змінними нечіткого регулятора, визначаються функціями належності.

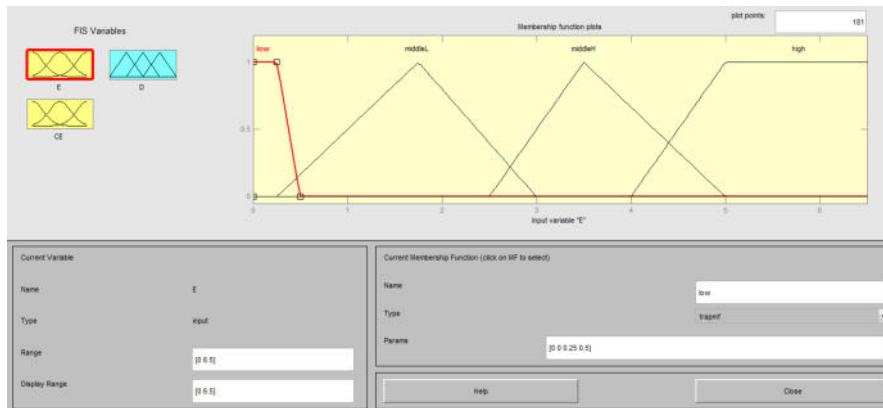


Рис. 3.10. Функції належності вхідної змінної E

Значення, прийняті вхідною змінною E, можуть належати одному з чотирьох нечітких множин:

- low-множина найменших можливих значень змінної E, описується трапецієподібною функцією, з перетином множини middleL;
- middleL-множина нижченаведених можливих значень змінної E, описується трикутною функцією належності, з перетином множин low і middleH;
- middleH-множина вищесередніх можливих значень змінної E, описується трикутною функцією, перетинається з множинами middleL і high;
- high-множина найбільших можливих значень змінної E, описується трапецієподібною функцією, має перетин з множиною middleH.

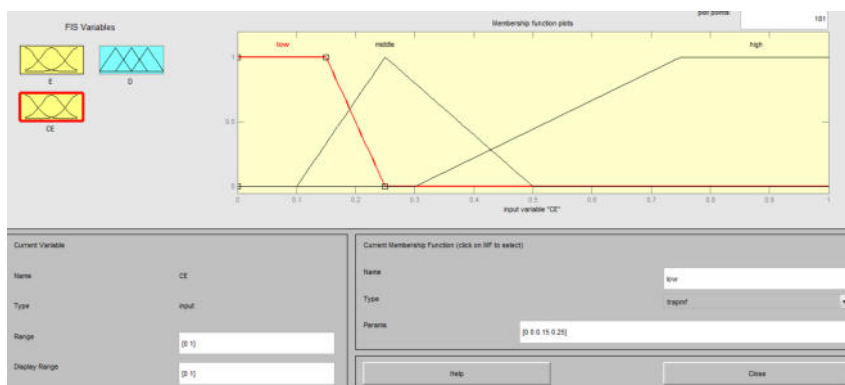


Рис. 3.11. Функції приналежності вхідної змінної CE

Значення, прийняті вхідною змінною CE, можуть належати одному з

трьох нечітких множин:

- low-множина найменших можливих значень змінної CE, описується трапецієподібною функцією, з перетином множини middle;
- middle-множина середніх можливих значень змінної CE, описується трикутною функцією належності, з перетином множин low і high;
- high-множина найбільших можливих значень змінної CE, описується трапецієподібною функцією, має перетин з множиною middle.

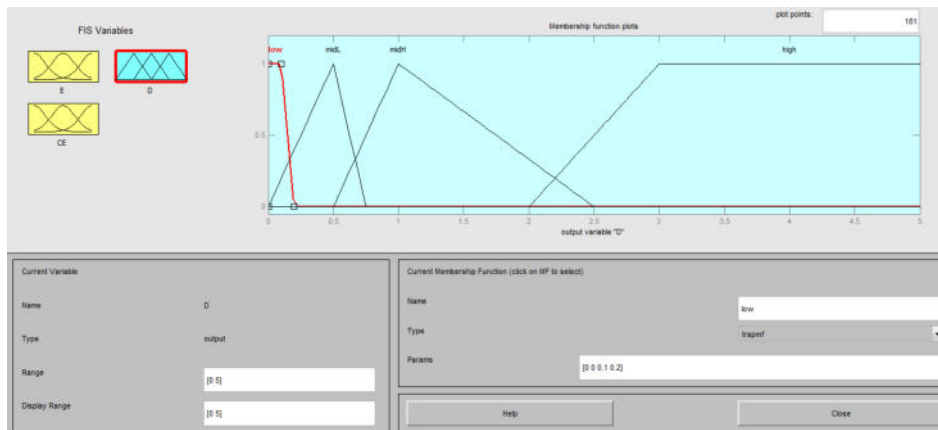


Рис. 3.12. Функція приналежності вихідної змінної D

Значення, прийняті вихідною змінною D, можуть належати одному з чотирьох нечітких множин:

- low-множина найменших можливих значень змінної D, описується трапецієподібною функцією, з перетином множини middleL;
- middleL-множина нижченаведених можливих значень змінної D, описується трикутною функцією належності, з перетином множин low і middleH;
- middleH-множина середніх можливих значень змінної D, описується трикутною функцією, перетинається з множинами middleL і high;
- high-множина найбільших можливих значень змінної D, описується трапецієподібною функцією, має перетин з множиною middleH.

Тривимірна поверхня, яка ілюструє розподіл нечітких правил і функцій приналежності, наведена на рис. 3.13.

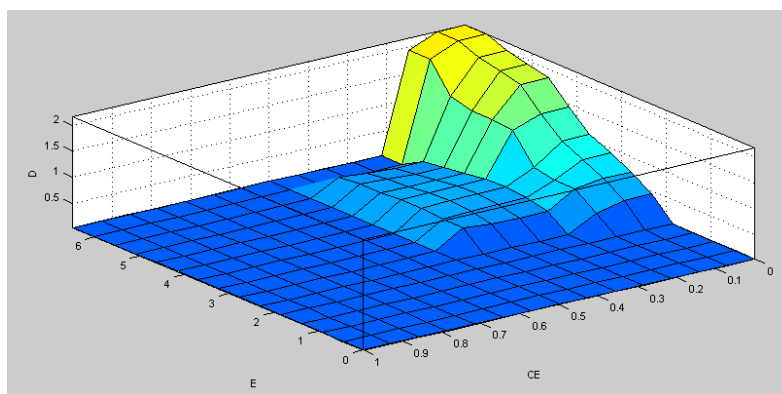


Рис. 3.13. Поверхня області рішень нечіткого контролера

З використанням вищенаведеної комп'ютерної моделі отримані порівняльні результати моделювання, подані на рис. 3.14.

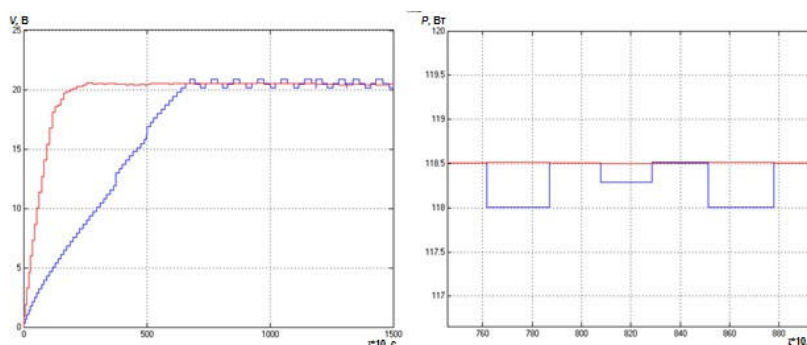


Рис. 3.14. Робота алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (синій-звичайний алгоритм ZiC, червоний-алгоритм ZiC з налаштуванням нечітким регулятором)

Як видно з графіків на рис. 3.14, адаптація алгоритму ZiC за допомогою нечіткого регулювання значно збільшує швидкість пошуку оптимальної робочої точки, а також нейтралізує коливання потужності при роботі в екстремумі ВВХ. Дослідження роботи алгоритму ZiC з налаштуванням нечітким регулятором показало залежність розміру кроку, що представлено на рис. 3.15.

На відміну від алгоритму з налаштуванням пошукового кроку, алгоритм ZiC з налаштуванням нечітким регулятором не втрачає стійкість до коливань потужності, що робить його більш надійним в плані настройки і дозволяє

підібрати більший за розміром крок, оптимізуючи швидкість виходу на робочу точку.

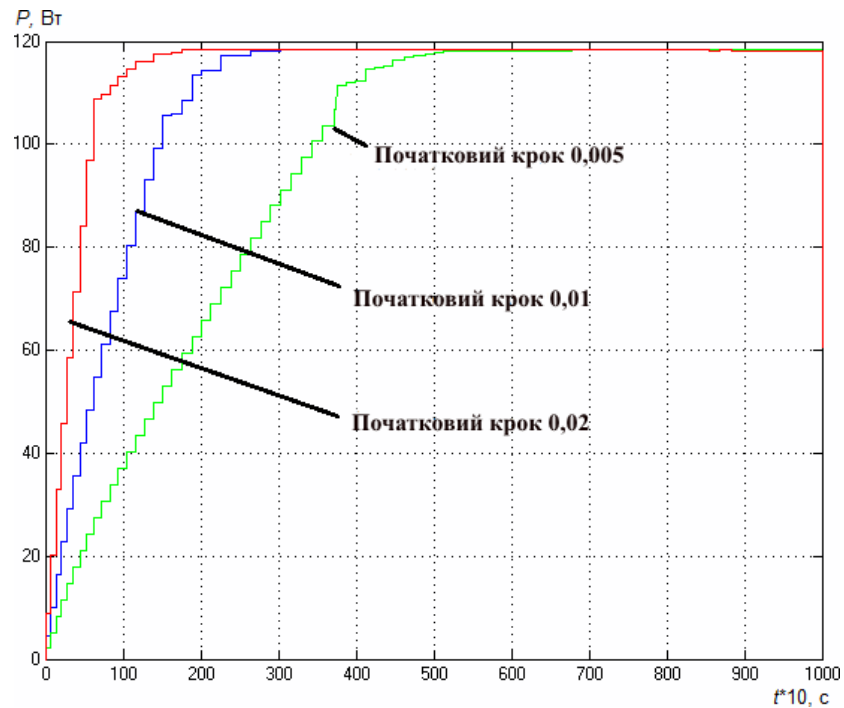


Рис. 3.15. Графіки роботи алгоритму ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором при різних значеннях коефіцієнта початкового кроку

За допомогою моделі ФМ (рис. 2.6), можна отримати сімейство ВВХ, що описують поведінку системи при параметрах температури і освітленості, які відповідають мінімальним і максимальним показникам ефективності. Таким чином визначається діапазон регулювання для заданих умов на моделі.

Для заданих умов моделювання: фотоелектричний модуль з напругою холостого ходу $U_{xx} = 24$ В, і струмом короткого замикання $I_{к.з} = 6,14$ А; нормальні умови: температура 25 °С, рівень сонячної інсоляції $Q = 900\text{--}1000$ кВт/м², кут падіння променів $\alpha = 90^\circ$; навантаження споживачів відключено; сонячна батарея заряджає акумулятор з номінальною напругою $U_{ab} = 12$ В, розряджений до 80 %; отримано наступні експертні оцінки: діапазон регулювання напруги 12–31,5 В, допустимі розміри кроку: 0,03–1 В.

На рис. 3.16 представлено сімейство графіків роботи пошукових алгоритмів, що включає роботу поліпшеного алгоритму з нечітким регулятором.

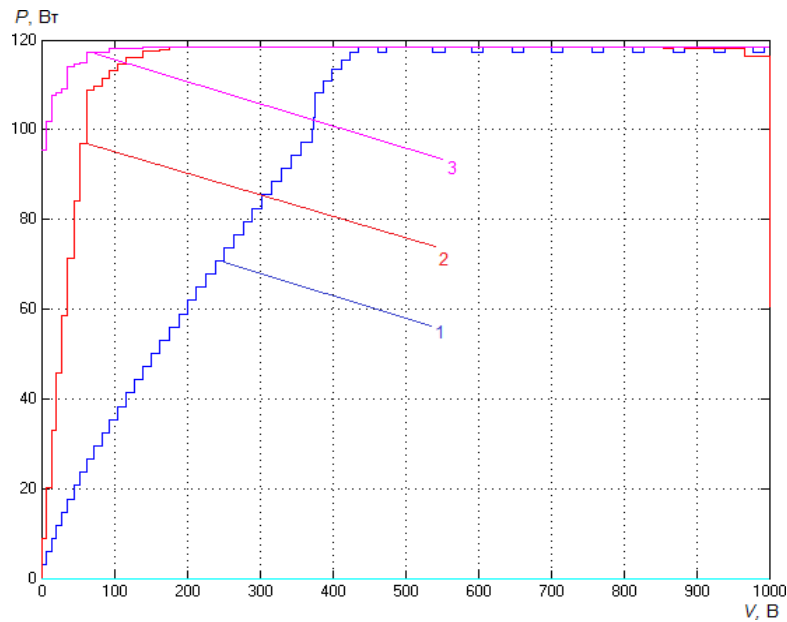


Рис. 3.16. Графік роботи алгоритму ЗіС (1-звичайний алгоритм ЗіС, 2-алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 3-покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором)

1. Виходячи з представлених на рис. 3.16 графіків, можна зробити висновок, що поліпшена настройка нечіткого регулятора підвищує ефективність роботи такого алгоритму: скорочується час пошуку, збільшується кількість вироблюваної енергії.

2. Для автоматизації роботи алгоритму поліпшеного налаштування регулятора пропонується його реалізація на основі математичного апарату теорії нечітких множин:

- задаються лінгвістичні змінні: вхідні по температурі $temp$ і освітленості $insol$, вихідна по прогнозованій напрузі V ;
- задаються функції належності змінних, наведені на рис. 3.17, при цьому кількість функцій приналежності можна збільшити для підвищення точності прогнозування;
- формулюють нечіткі правила, що зв'язують вхідні і вихідні лінгвістичні

змінні, набір яких наведено на рис. 3.17.

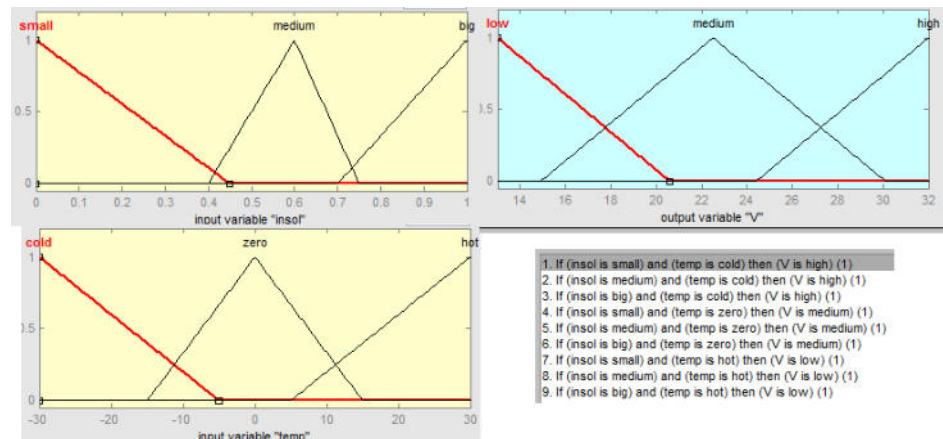


Рис. 3.17. Параметри нечіткого алгоритму поліпшеної настройки

Тривимірна поверхня нечітких висновків для алгоритму поліпшеного налаштування наведена на рис 3.18.

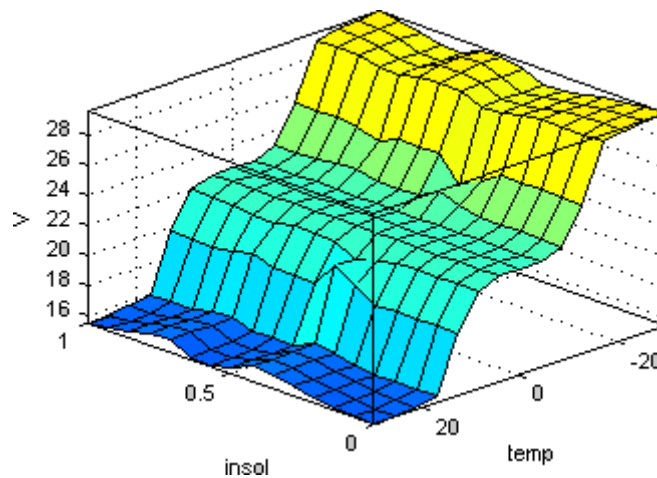


Рис. 3.18. Поверхня області рішень нечіткого виводу

3.4. Порівняльний аналіз адаптивних алгоритмів керування фотоелектричною системою

Для порівняльної оцінки адаптивних алгоритмів керування процесом енергоперетворення в фотоелектричній системі необхідно розглянути

ідентичні за своїми настройками і властивостями системи, які працюють в однакових умовах. Для більшої наочності можна прийняти наступні спрощення:

- ініціалізація алгоритмів відбувається з нульової напруги (точка короткого замикання);
- рівень освітленості не змінюється;
- температура залишається постійною;
- навантаження споживачів відключено.

Для зручності аналізу результати дослідження представляються у вигляді графіків роботи алгоритмів. На рис. 3.19 наведені зведені графіки струмів при роботі екстремальних регуляторів; на рис. 3.20 наведені графіки підстроювання напруги за запропонованими алгоритмами, на рис. 3.21 – графіки пошуку точки максимальної потужності за запропонованими алгоритмами, на рис. 3.22 – графіки по похибці регулювання.

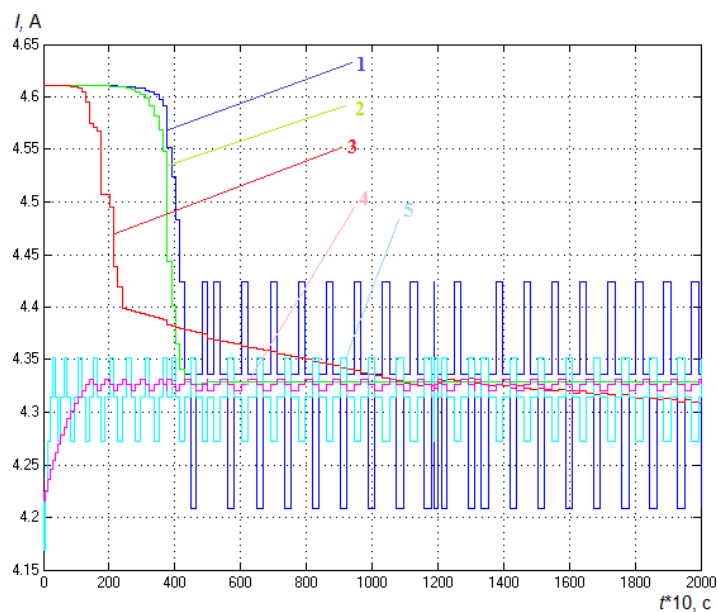


Рис. 3.19. Графіки струмів на ФМ при роботі екстремальних регуляторів: 1 – звичайний алгоритм ЗіС, 2 - алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

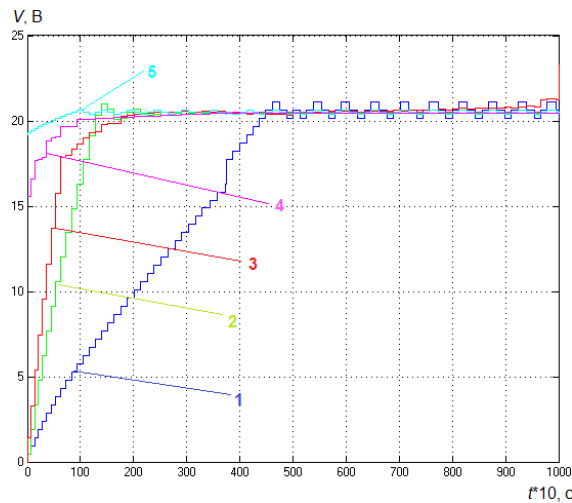


Рис. 3.20. Графіки пошуку оптимальної напруги: 1 - звичайний алгоритм ЗіС; 2 - алгоритм ЗіС з переналаштуванням кроку; 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором; 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

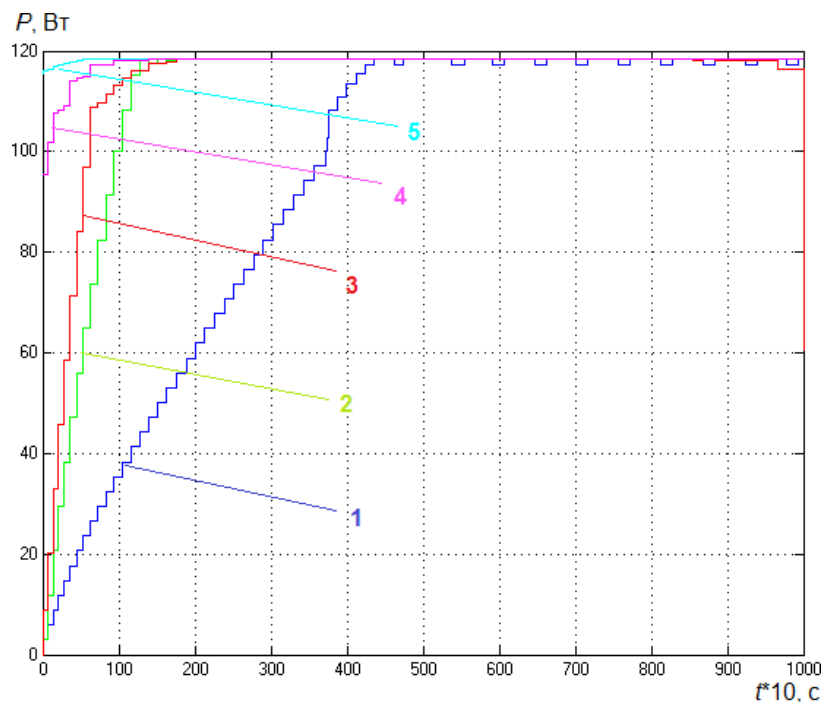


Рис. 3.21. Графіки пошуку точки максимальної потужності: 1-звичайний алгоритм ЗіС, 2 - алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

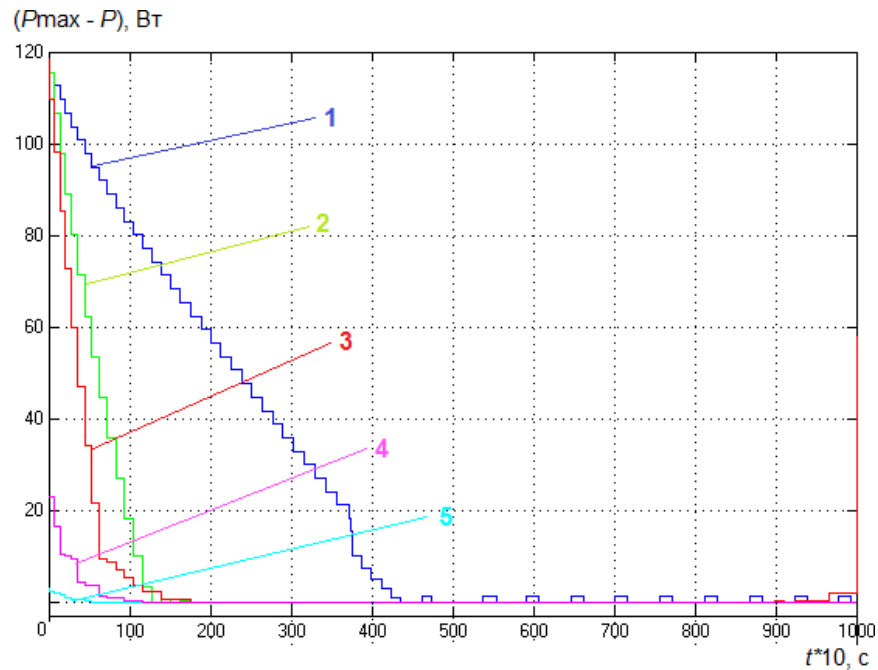


Рис. 3.22. Графіки процесів управління за похибкою пошуку: 1 - звичайний алгоритм ЗіС, 2 - алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

Проведемо оцінку отриманих результатів. Як видно з представлених графіків всі адаптивні алгоритми показують кращі результати, ніж звичайний алгоритм ЗіС: значно знижується час пошуку і зменшуються флуктуації напруги біля оптимального значення. За рис. 3.19 помітно скорочення коливань струму при застосуванні адаптивних алгоритмів. При цьому самі адаптивні алгоритми дають різні результати:

- алгоритм з налаштуванням пошукового кроку забезпечує час виходу на точку максимальної потужності ≈ 20 с часу моделювання і забезпечує виключення коливань потужності;

- алгоритм з передбачуваною адаптацією забезпечує час виходу на точку максимальної потужності ≈ 5 с часу моделювання і забезпечує зменшення амплітуди коливань потужності зі значення 0,2 -0,5 Вт до значення в 0,1 Вт;

- алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором забезпечує час

виходу на точку максимальної потужності ≈ 20 с часу моделювання, забезпечує виключення коливань потужності.

- покращений алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором забезпечує час виходу на точку максимальної потужності ≈ 10 с часу моделювання і забезпечує виключення коливань потужності.

Виходячи з вищевикладеного, можна помітити, що алгоритм з налаштуванням кроку і алгоритм з нечітким регулятором забезпечують схожу якість управління, однак, за зведеним графіком (рис. 3.21) видно, що алгоритм з нечітким регулятором забезпечує більше вироблення енергії (площа під червоним графіком більше площі під зеленим).

Алгоритм з передбачуваною адаптацією забезпечує найшвидший пошук точки максимальної потужності, однак, зберігає невеликі флуктуації потужності в цій точці. При цьому по рис. 3.21 можна помітити, що площа під бірюзовим графіком найбільша, тобто саме цей алгоритм дозволяє отримати максимум енергії.

Для повноти порівняльної оцінки зведемо отримані дані в таблицю 3.3 і доповнимо їх загальною інформацією про алгоритми.

Виходячи з викладеної в таблиці інформації, можна зробити висновок, що вибір адаптивного алгоритму може бути здійснений, виходячи з вимог до системи. У разі вимоги до найбільшої виробленні енергії слід вибирати алгоритм з еталонною моделлю. У разі, якщо система має економ-варіант: має невелику обчислювальну потужність, відсутні датчики температури, вологості, то кращим рішенням буде застосування адаптації з налаштуванням пошукового кроку. Алгоритм з нечітким регулюванням є оптимальним при виборі для системи з усередненими характеристиками.

Оцінка якості управління при застосуванні розроблених алгоритмів проводиться за першим і другим інтегральними критеріями:

$$I_1 = \int_0^{tm} (P^{\max} - P(t)) \cdot dt, \quad (3.1)$$

$$I_2 = \int_0^{tm} (P^{\max} - P(t))^2 \cdot dt. \quad (3.2)$$

Таблиця 3.3

Переваги і недоліки адаптивних алгоритмів

Назва алгоритма	Переваги	Недоліки
Алгоритм з налаштуванням пошукового кроку	<ol style="list-style-type: none"> 1. Виключення коливань потужності 2. Зменшення часу регулювання 3. Потребує мінімуму обчислювальної потужності 4. Простота реалізації 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Немає налаштування до різкої зміни зовнішніх умов. 2. Залежність від розміру пошукового кроку
Алгоритм з еталонною моделлю	<ol style="list-style-type: none"> 1. Налаштування еталонної моделі до зміни зовнішніх умов 2. Зменшення коливань потужності 3. Найменший час регулювання 4. Найбільша кількість отриманої енергії 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Потребує наявності додаткового обладнання (датчики температури, вологості і т. і.) 2. Потребує значних обчислювальної потужності 3. Складність реалізації
Алгоритм з нечітким регулюванням	<ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість налаштування при зміні зовнішніх умов 2. Виключення коливань потужності 3. Зменшення часу регулювання 	

Показники якості наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Оцінки якості керування

Назва алгоритму	I_1	I_2	$T_{п, с}$
-----------------	-------	-------	------------

ЗіС	12850	632000	45
З передбачуваною адаптацією	7,896	1,2	5
З налаштуванням пошукового кроку	80,8	852,8	20
З налаштуванням нечітким регулятором	19,58	12,93	20
Покращений з налаштуванням нечітким регулятором	11,24	3,8	10

Виходячи з отриманих результатів, можна зробити висновок, що застосування адаптивних алгоритмів значно покращує якість управління.

Далі розглядається робота алгоритмів при виникненні збурень по температурі, освітленості і комбінації цих впливів.

Задані наступні параметри моделі:

- фотоелектричний модуль з напругою холостого ходу $U_{x,x} = 24$ В, і струмом короткого замикання $I_{к.з} = 6,14$ А;
- зовнішні умови: температура 30 °С, рівень сонячної інсоляції $Q = 750$ кВт/м², кут падіння променів $\alpha = 90^\circ$;
- крок пошукового алгоритму 0.5 В;
- навантаження споживачів відключено;
- сонячна батарея заряджає акумулятор з номінальною напругою $U_{ab} = 12$ В, розряджений до 80 %;
- час моделювання $t = 400$ с.

При температурному збуренні від 30 до 20 °С в момент часу 120 с отримано сімейство графіків пошукових алгоритмів, наведене на рис. 3.23. При збільшеному масштабі біля точки збурення можна оцінити швидкість виходу алгоритму на екстремум потужності, що наведено на рис. 3.23.

На рис. 3.24 видно, що швидкість виходу на точку екстремуму після збурення різна для запропонованих алгоритмів, вона зведена в таблицю 3.5.

Збільшуючи масштаб в області усталених процесів пошуку екстремуму можна оцінити амплітуду коливань потужності, що наведено на рис.3.24.

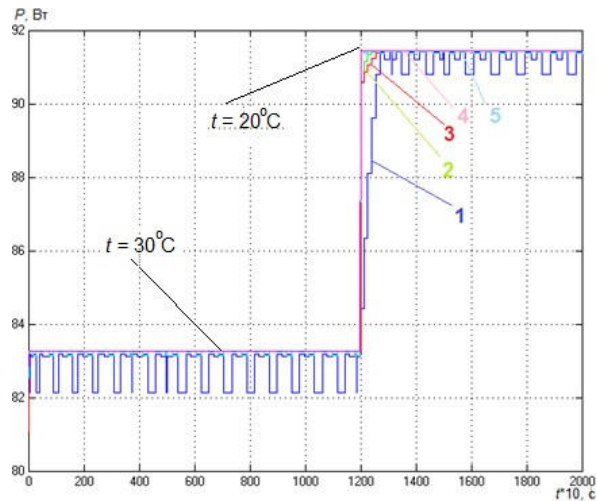


Рис. 3.23. Графіки пошуку точки максимальної потужності: 1-звичайний алгоритм ЗіС, 2 - алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

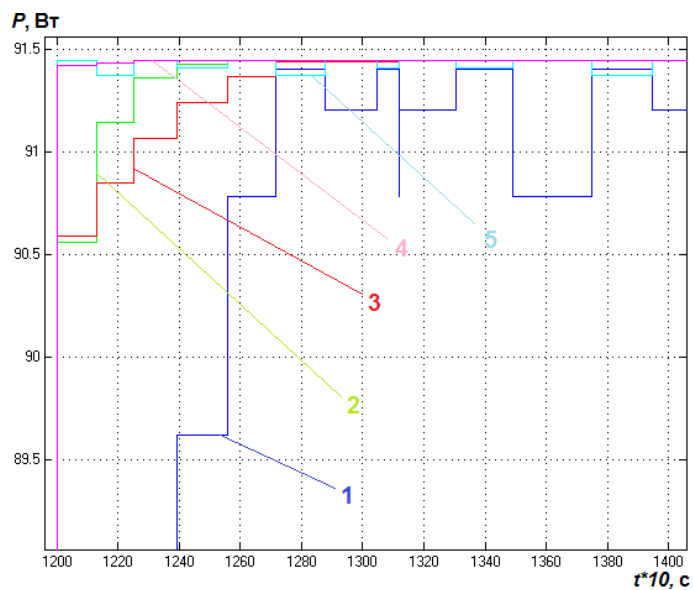


Рис. 3.24. Робота алгоритмів після збурення по температурі: 1 – звичайний алгоритм ЗіС, 2 – алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 – алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4-покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5-алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

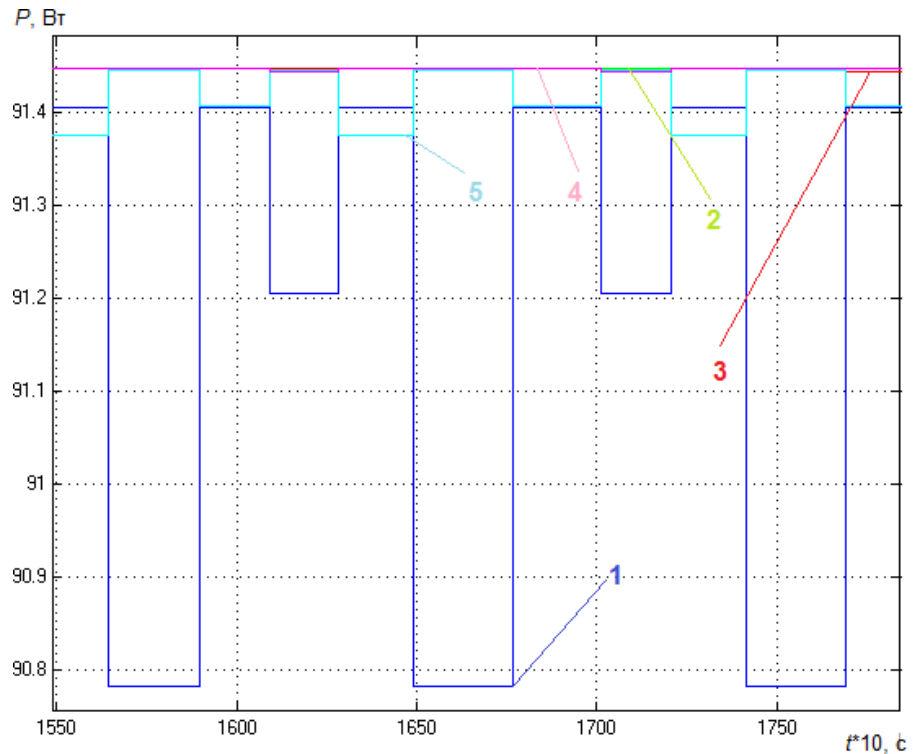


Рис. 3.25. Робота алгоритмів близько екстремуму ВВХ після збурення по температурі: 1 – звичайний алгоритм ЗіС, 2 - алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

За рис. 3.25 видно, що звичайний алгоритм ЗіС і алгоритм з передбачуваною адаптацією дають помітні коливання потужності - 0,5 і 0,1 Вт відповідно.

Ефективність застосування алгоритмів з урахуванням збурення можна оцінити за запропонованими раніше інтегральними оцінками (3.1) і (3.2), результати обчислень зводяться в таблицю 3.5.

При збуренні освітленості від 750 кВт/м² до 900 кВт/м² в момент часу 120 с отримано сімейство графіків роботи пошукових алгоритмів, наведене на рис. 3.26.

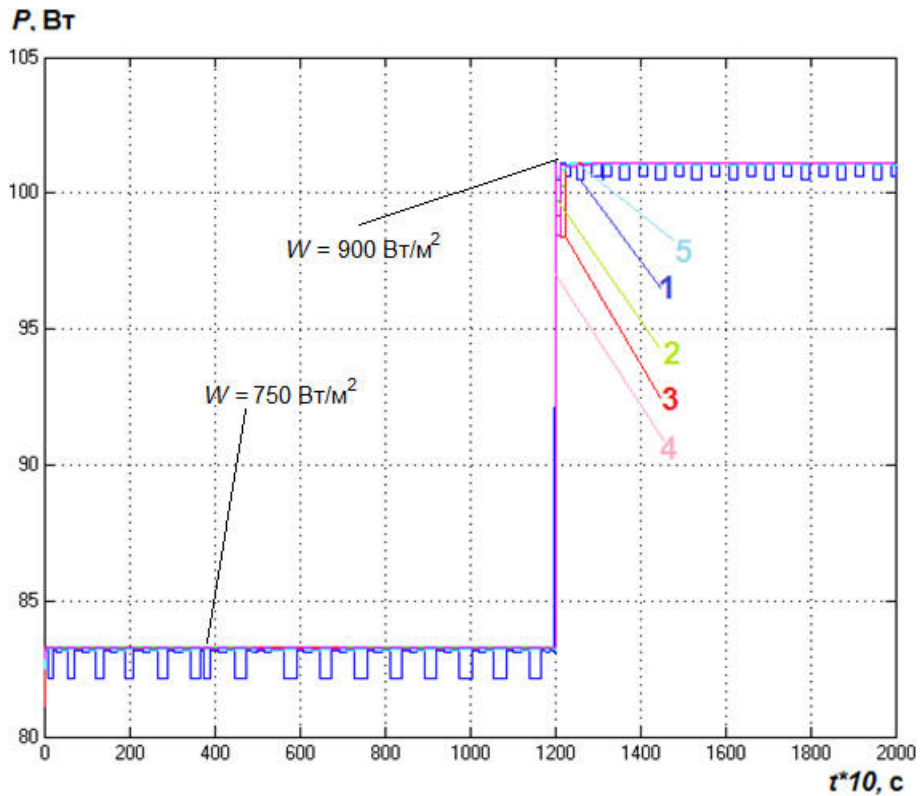


Рис. 3.26. Робота алгоритмів при збуренні освітлення: 1 - звичайний алгоритм ЗіС, 2 - алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

Збільшуючи масштаб, можна оцінити поведінку алгоритмів під час збурення, що відображено на рис. 3.27. При цьому можливо оцінити амплітуди коливань потужності у точки екстремуму і час пошуку екстремуму для кожного алгоритму.

Ефективність застосування алгоритмів з урахуванням збурення можна оцінити за запропонованими раніше інтегральними оцінками (3.1) і (3.2), результати обчислень зведені в таблицю 3.5.

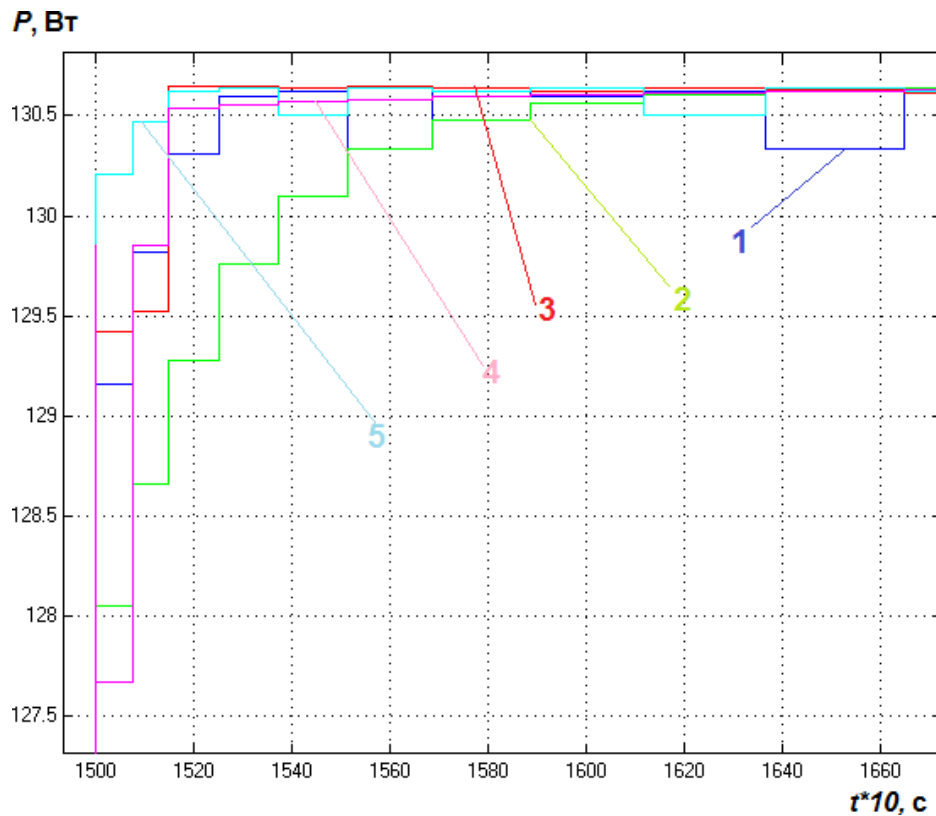


Рис. 3.27. Робота алгоритмів близько екстремуму ВВХ після збурення по освітленості: 1 - звичайний алгоритм ЗіС, 2 - алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

При комбінованому збуренні освітленості і температури з параметрами: освітленість 500 – 900 кВт/м², температура 30 – 0 °С, час збурення 100 с, отримані наступні графіки роботи алгоритмів, наведені на рис. 3.28.

При збільшенні масштабу близько екстремуму потужності в околицях точки збурення можна отримати сімейство графіків, що дозволяє оцінити якість роботи алгоритмів: швидкість пошуку і амплітуду коливань. Такі графіки наведені на рис 3.29.

Ефективність застосування алгоритмів з урахуванням збурення можна оцінити за запропонованими раніше інтегральними оцінками (3.1) і (3.2), результати обчислень зводяться в таблицю 3.5.

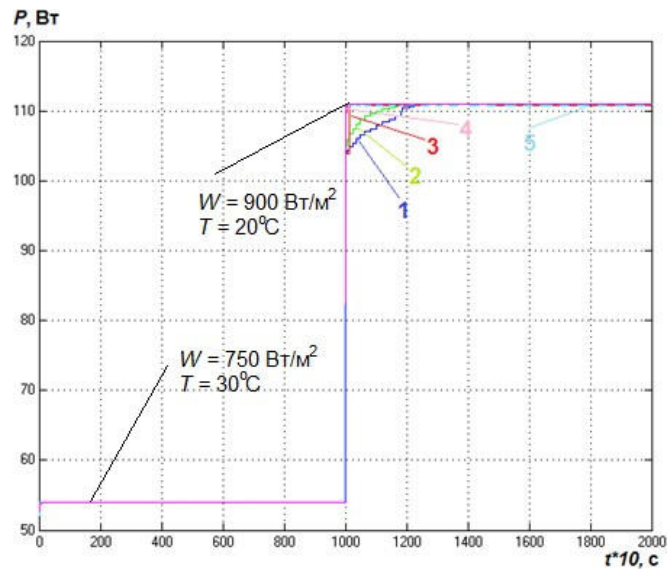


Рис. 3.28. Робота алгоритмів при комбінованому збуренні: 1 - звичайний алгоритм ЗіС, 2 - алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

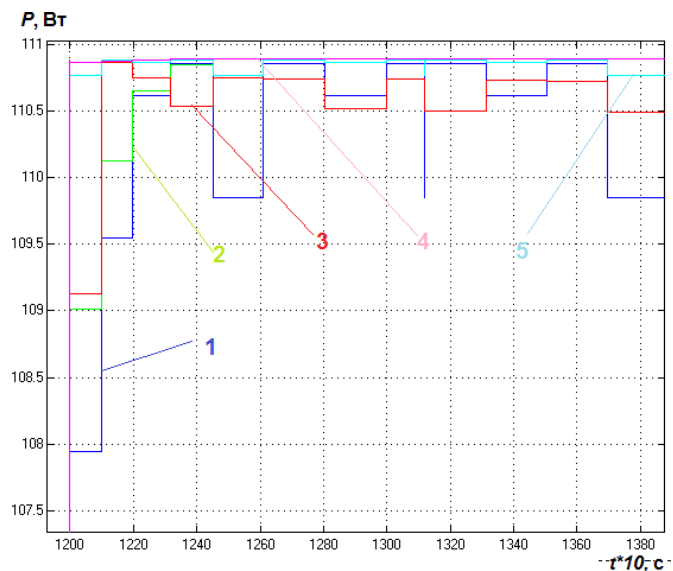


Рис. 3.29. Робота алгоритмів близько екстремуму ВВХ після комбінованого збурення: 1 - звичайний алгоритм ЗіС, 2-алгоритм ЗіС з налаштуванням кроку, 3 -алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗіС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗіС з передбачуваною адаптацією

Таблиця 3.5

Показники ефективності алгоритмів

Назва алгоритму	Збурення по температурі			Збурення по освітленості			Збурення по комбінації параметрів		
	I_1	I_2	$T_{п, с}$	I_1	I_2	$T_{п, с}$	I_1	I_2	$T_{п, с}$
ЗіС	921,9	1739	8	736	2838	6	946,7	920,2	8
З передбачуваною адаптацією	64,26	4,88	1	129,5	91,07	2	389,4	180,9	2
З налаштуванням пошукового кроку	17,24	11,57	6	500,5	1556	12	163,8	59,36	4
З налаштуванням нечітким регулятором	35,48	17,05	7	290,1	174,4	2	213,7	30,18	3
Покращений з налаштуванням нечітким регулятором	3,363	0,05	3	133,1	154	4	137,6	11,94	2

На підставі отриманих даних, можна зробити висновок, що всі адаптивні алгоритми показують кращі результати, ніж стандартний алгоритм ЗіС. Найбільшу ефективність має покращений алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором.

Висновки до розділу 3

1. Проведено порівняльне дослідження роботи системи з різними адаптивними алгоритмами, що показало їх перевагу перед класичним алгоритмом ЗіС.

2. Використання адаптивного алгоритму дозволяє зменшити час пошуку точки максимальної потужності і практично усунути коливання потужності при роботі алгоритму в екстремумі ВВХ.

3. Робота алгоритму з налаштуванням пошукового кроку залежить від розміру вихідного кроку. При цьому взяття за основу великого кроку призводить до значних коливань близько робочої точки, в той же час занадто маленький крок призведе до збільшення часу пошуку робочої точки. У зв'язку з цим можна зробити висновок, що для фотоелектричних систем певної конфігурації існує деякий оптимальний еталонний крок, що забезпечує кращі показники.

4. Визначення початкової позиції для робочої точки алгоритму з допомогою передбачуваної адаптації дозволяє мінімізувати час пошуку точки максимальної потужності, а також використовувати в алгоритмі ЗіС менший за розміром крок, що значно зменшує коливання потужності.

ГЛАВА 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗРАЗКА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З АДАПТИВНИМ КЕРУВАННЯМ

4.1 Постановка завдання

Для підвищення ступеня автономності, тобто збільшення часу автономного функціонування, можлива побудова автономної станції безпілотного летального апарату (БПЛА). Така станція буде використовуватися як сховище БПЛА, зарядний пристрій, центр зв'язку. Енергетичну автономність такої системи забезпечують фотоелектричні модулі. На малюнку 4.1 наведена тривимірна модель автономної станції БПЛА.

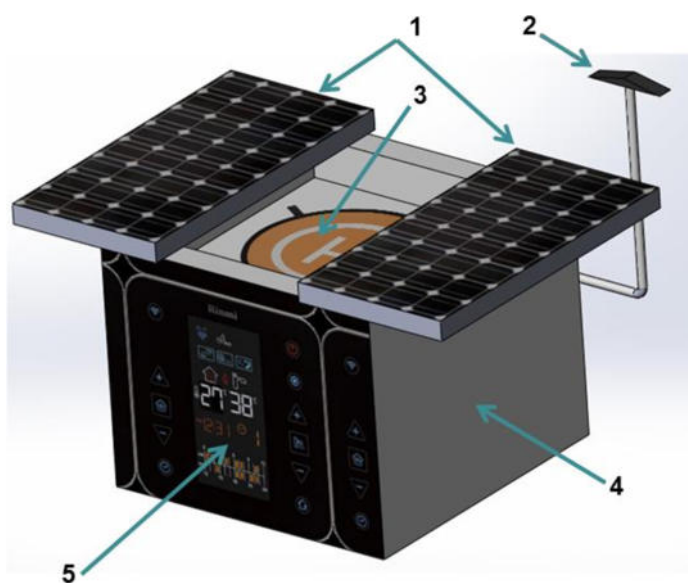


Рис. 4.1. 3 вимірна модель автономної станції БПЛА: 1-рухомі кришки з сонячними панелями; 2-метеостанція; 3-посадковий майданчик; 4-корпус; 5-панель управління

В автономній станції БПЛА реалізований режим екстремального регулювання потужності, а також система переорієнтування фотоелектричних модулів: обидва ці підходи дозволяють збільшити ККД системи і збільшити час автономної роботи

Отже, для вирішення задачі максимізації часу автономного функціонування БПЛА при мінімальному часі заряджання його акумулятора пропонується застосувати автоматизацію розробленої фотоелектричної системи енергетично ефективним інтелектуальним імпульсним перетворювачем з контролером, що забезпечує адаптивне управління.

У представленій системі реалізується алгоритм екстремального регулювання потужності ЗіС. В якості методу адаптації використовується налаштування пошукового кроку алгоритму, як найбільш простий в реалізації і найменш вимогливий до обчислень і додаткових пристроїв.

Енергетичні характеристики системи визначаються вибором пристроїв: сонячної панелі і акумулятора.

Умови функціонування: літо, середній сонячний полудень, $56^{\circ} 30' 40''$ ($56^{\circ} 30' 75''$) північної широти; $84^{\circ} 57' 16''$ ($84^{\circ} 57' 35''$) східної довготи, рівень освітленості 90-100% (ясний день), температура 20°C , вологість 75 %, кут падіння сонячних променів $\approx 90^{\circ}$.

4.2. Елементна база експериментального зразка ФЕС

Як вже було зазначено вище, фотоелектрична система складається з наступних основних вузлів: сонячної панелі, імпульсного перетворювача, навантаження/акумулятора, контролера.

Сонячна панель. Розроблений в рамках виконання магістерської дипломної роботи експериментальний зразок ФЕС з адаптивним керуванням забезпечений сонячною панеллю, яка має наступні характеристики:

- потужність - 1,5 Вт;
- напруга - 12 В;
- матеріал - полікристалічний кремній;
- розмір: 115 x 85 мм.

На рис. 4.2 наведена фотографія використовуваної сонячної панелі.

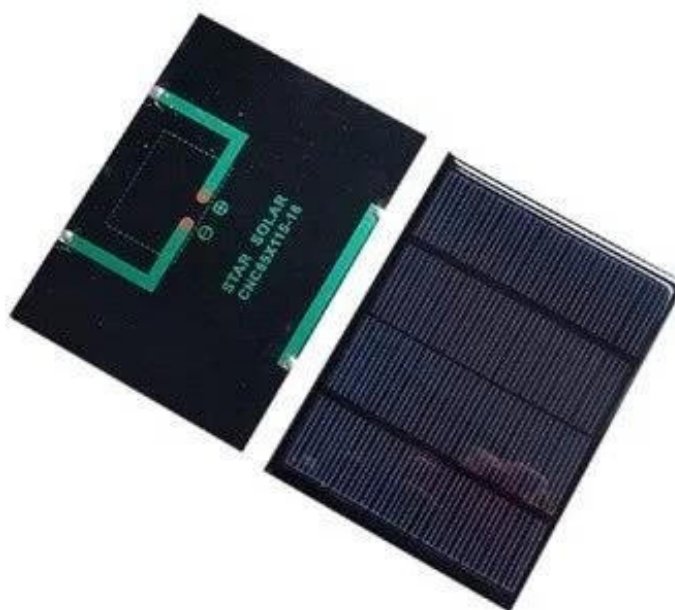


Рис. 4.2. Сонячна панель

Акумулятор. У експериментальному зразку фотоелектричної системи в якості акумулятора застосовується блок батарейок, які мають наступні характеристики:

- число гнізд-4;
- напруга – 6В (4 ААА елемента по 1,5 В).

Контролер. В якості керуючого пристрою використовується контролер myRIO фірми «National Instrument», що дозволяє поєднати систему адаптивного керування ФЕС зі SCADA-системою, реалізованої за допомогою середовища LabView, яка має низку переваг: інтуїтивним інтерфейсом, зручністю інтеграції та побудови зв'язку «контролер – АРМ – контролер», великою вбудованою бібліотекою програмних елементів для побудови систем адаптивного керування.

Контролер myRIO має вводи-виводи з двох сторін пристрою у вигляді роз'ємів MXP і MSP. Пристрій має: аналогові входи, аналогові виходи, лінії цифрового вводу-виводу, індикатори, кнопку керування, вбудований акселерометр, ПЛІС Xilinx і двоядерний процесор ARM Cortex-A9. Деякі моделі також підтримують Wi-Fi. Пристрій можна запрограмувати за

допомогою LabVIEW або C++.

На рис 4.3 наведена фотографія контролера myRIO фірми «National Instrument».



Рис. 4.3. Зовнішній вигляд контролера myRIO фірми «National Instrument».

Імпульсний перетворювач. Імпульсний перетворювач створений на макетній платі по схемі понижуючого перетворювача напруги. На рис 4.4 приведена електрична схема імпульсного перетворювача.

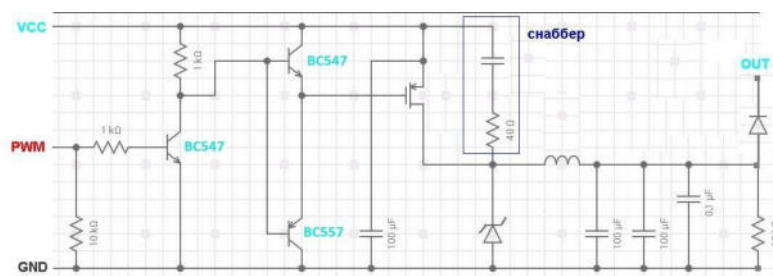


Рис. 4.4. Електрична схема імпульсного перетворювача

Для передачі необхідних параметрів на контролер використовуються: датчик струму ACS712, зовнішній вигляд і характеристики якого наведені на рис. 4.5, а також датчик напруги, побудований як звичайний подільник напруги.

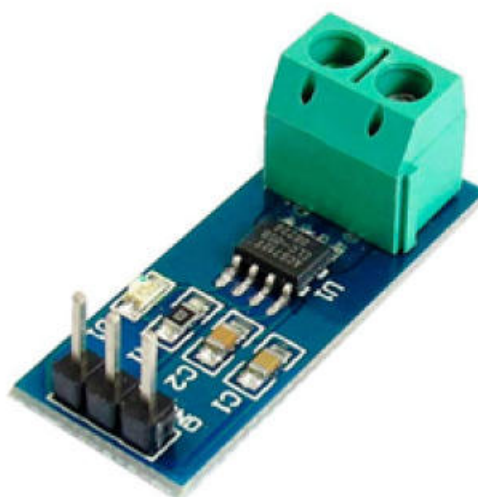


Рис. 4.5. Датчик струму ACS712

Датчик струму ACS712 працює з постійним та змінним струмом; вимірюваний струм (в залежності від типу) – від 5А до 30 А; чутливість – від 133 мВ до 185 мВ.

На рис. 4.6 представлений експериментальний зразок фотоелектричної системи з адаптивним керуванням в зборі. До його складу входять фотоелектричний модуль, контролер myRIO, блок акумуляторних батарейок, короб з імпульсним перетворювачем і ноутбук, що виконує функцію АРМ-оператора.

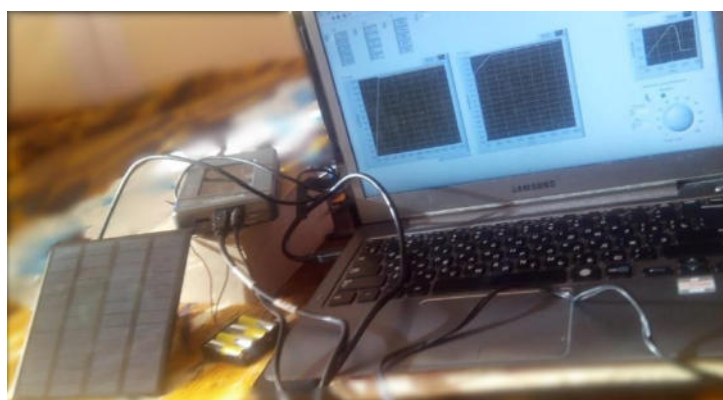


Рис. 4.6. Експериментальний зразок фотоелектричної системи з адаптивним керуванням

4.3. Програмне забезпечення прототипу фотоелектричної системи

Програмне забезпечення з адаптивним керуванням системи включає SCADA-систему і алгоритми роботи контролера. Середовище LabView об'єднує обидва ці рівні програмного забезпечення.

У середовищі LabView реалізується програма керування, що забезпечує режим екстремального регулювання потужності. Основою програми служить алгоритм ЗіС, доповнений адаптацією з налаштуванням пошукового кроку (рис. 2.17). На контролер надходять значення струму і напрузі на виході сонячної панелі, при цьому відбувається обчислення потужності і її запам'ятовування. Контролер порівнює поточне значення потужності з попереднім і приймає рішення збільшити або зменшити сигнал ШІМ на імпульсний перетворювач, керуючись логікою алгоритму ЗіС.

Для зручного уявлення даних про процес адаптивного керування в середовищі LabView реалізована SCADA-система представлена на рис. 4.7. SCADA-система дозволяє відстежувати роботу екстремального регулювання за графіком процесу, що будується в реальному часі. Також можна переключитися в режим ручного управління, а індикатори струму і напруги показують поточні значення цих параметрів. Дані про роботу системи записуються в логи (звіти), які можна переглянути в будь-який час.

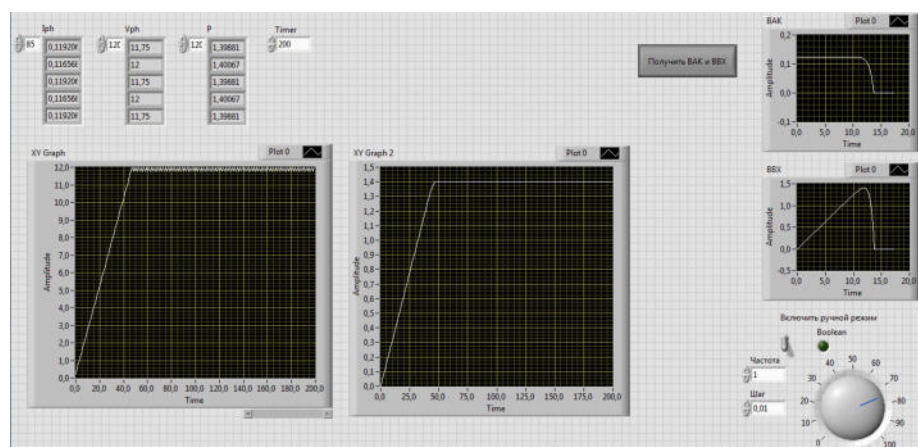


Рис. 4.7. SCADA-система експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням в LabView

На рис. 4.8 представлений код реалізації системи в LabView. Представлений код можна умовно поділити на три основні частини: верхня частина дозволяє отримати ВАХ і ВВХ по команді оператора, нижня частина являє собою систему ручного (друга частина) і автоматичного (третя частина) управління ШІМ-сигналом, які можуть перемикатись

В якості вхідних параметрів алгоритми, закладені в представлений код, використовують сигнали з датчиків струму і напруги. Всередині алгоритмів реалізується логіка методу ЗіС, модифікованого за допомогою переналаштування пошукового кроку. Вихідний величиною є ШІМ сигнал на імпульсний перетворювач.

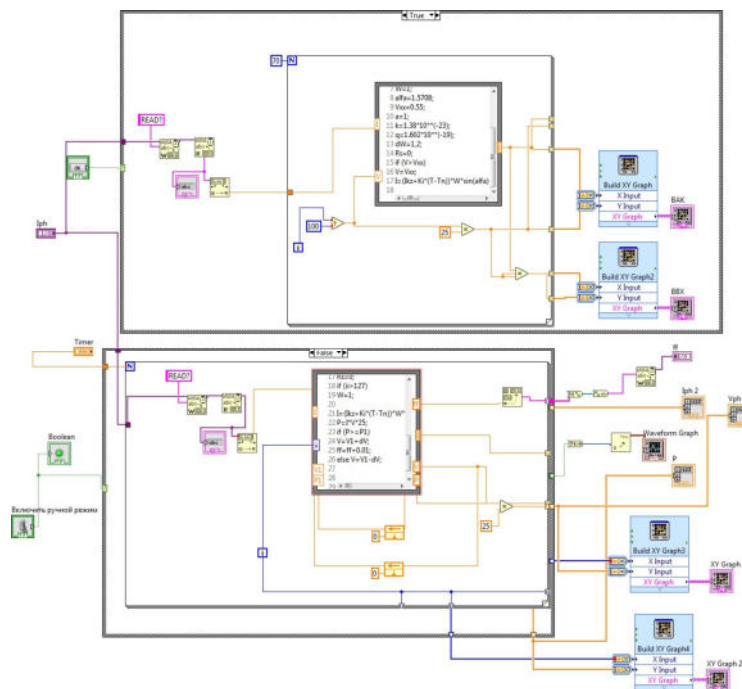


Рис. 4.8. Реалізація алгоритмів роботи фотоелектричної системи з адаптивним керуванням в середовищі LabView

4.4 Аналіз роботи експериментального зразка фотоелектричної системи

Розроблений прототип фотоелектричної системи з адаптивним керуванням пройшов перевірку працездатності при наступних умовах: літо, середній сонячний полудень, рівень освітленості 90-100% (ясний день),

температура 25° С, вологість 75 %, кут падіння сонячних променів $\approx 90^\circ$.

Оцінка результатів здійснювалася за допомогою контролю за еталонним контролером МРРТ-7210А з ручним налаштуванням точки максимальної потужності, зовнішній вигляд цього пристрою представлений на рис. 4.9.



Рис. 4.9. Контролер МРРТ-7210А

Отримані результати вимірювань наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Результати вимірювань

№ досліду	Покази експериментального зразка системи, В	Покази еталону, В	№ досліду	Покази експериментального зразка системи, В	Покази еталону, В
1	1,42	1,4	26	1,416	1,4
2	1,418	1,4	27	1,415	1,4
3	1,412	1,4	28	1,427	1,4
4	1,416	1,4	29	1,383	1,4
5	1,385	1,4	30	1,39	1,4
6	1,407	1,4	31	1,439	1,4
7	1,374	1,4	32	1,358	1,4
8	1,36	1,4	33	1,358	1,4
9	1,359	1,4	34	1,362	1,4
10	1,409	1,4	35	1,424	1,4
11	1,416	1,4	36	1,401	1,4

Продовження таблиці 4.1

12	1,418	1,4	37	1,386	1,4
13	1,428	1,4	38	1,415	1,4
14	1,393	1,4	39	1,446	1,4
15	1,393	1,4	40	1,397	1,4
16	1,386	1,4	41	1,433	1,4
17	1,426	1,4	42	1,39	1,4
18	1,428	1,4	43	1,418	1,4
19	1,358	1,4	44	1,354	1,4
20	1,375	1,4	45	1,42	1,4
21	1,397	1,4	46	1,355	1,4
22	1,368	1,4	47	1,447	1,4
23	1,412	1,4	48	1,37	1,4
24	1,415	1,4	49	1,354	1,4
25	1,424	1,4	50	1,378	1,4

Математичне очікування за показами експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням:

$$V_{\text{cp}} = \frac{\sum V_n}{n} = 1,3986 \text{ В.}$$

Дисперсія за показами експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням:

$$D_V = \frac{\sum (V - V_{\text{cp}})^2}{n} = 0,000716 \text{ В}^2.$$

СКО за показами експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням:

$$\sigma_V = \sqrt{D_V} = 0,0267 \text{ В.}$$

Довірчі межі:

$$\begin{cases} \varepsilon_\beta = t_\beta \cdot \sigma_V = 1,96 \cdot 0,0267 = 0,0523 \text{ В,} \\ V_H = V_{\text{cp}} - \varepsilon_\beta = 1,3463 \text{ В,} \\ V_B = V_{\text{cp}} + \varepsilon_\beta = 1,4509 \text{ В.} \end{cases}$$

Відхилення математичного очікування експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням від еталонного значення:

$$|\Delta| = V_{cp} - V_{et} = 0,00134 \text{ В.}$$

Різниця показів експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням від показів еталона поданий на рис. 4.10.

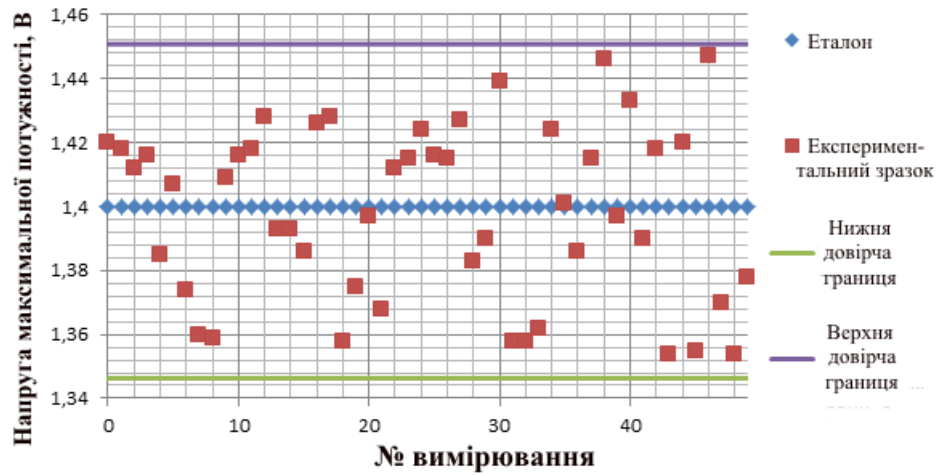


Рис. 4.13. Різниця показів експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням від показів еталону

Розраховані показники підтверджують працездатність і ефективність розробленого експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням.

Висновки до розділу 4

1. Вирішена задача розробки експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням
2. Розроблений експериментальний зразок фотоелектричної системи з адаптивним керуванням має повний елементний склад, якій відповідає реальній фотоелектричній системі.
3. Використання екстремального регулювання підвищує ККД фотоелектричної системи, що робить її енергоефективною.
4. Порівняльний аналіз показників розробленого експериментального зразка фотоелектричної системи з адаптивним керуванням з еталонним пристроєм підтверджує працездатність і ефективність його роботи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено моделі елементів фотоелектричних систем, що дозволяють конфігурувати системи різного призначення. Розроблені моделі мають низку параметрів налаштування і враховують широкий спектр збурюючих впливів, які відповідають реальним умовам експлуатації, що дозволяє отримувати результати, близькі до реальних.

2. Розроблено і детально описані адаптивні алгоритми екстремального регулювання потужності для адаптивних систем керування фотоелектричними установками. Запропоновані алгоритми охоплюють різні вимоги до таких систем, що дає широкий вибір рішень при проектуванні фотоелектричних систем.

3. Покращено екстремальне регулювання потужності в системі управління ФЕУ, а саме:

- усунуті коливання потужності, що викликаються кроковим характером стандартного алгоритму керування фотоелектричними системами;
- зменшено час пошуку екстремуму за рахунок адаптації системи керування до змінних експлуатаційних умов.

4. Вирішено завдання підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем за рахунок впровадження адаптивних алгоритмів екстремального регулювання потужності. Доведено доцільність і показана ефективність таких науково-технічних рішень.

5. Створено прототип ФЕУ, на базі якого проведена серія дослідів, що підтверджують отримані в результаті моделювання результати.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кудря С.О., Головки В.М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії. – Київ: КПІ, 2009. – 201с.
2. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії: підручник. Київ, НТУУ «КПІ», 2012.- 492 с.
3. Шавьолкін О. О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії : навч. посібник / О. О. Шавьолкін ; Харків. нац. ун-т. міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. – 403 с.
4. Гарифулина М.Р., Власов А. И. Макачук В. В., Адамовик Н. Модель элемента солнечной батареи типа CIGS // Инженерный вестник. – 2012. – №8. – С. 1-21.
5. Martin F. Schumann, Carsten Rockstuhl, Martin Wegener. Cloaked contact grids on solar cells by coordinate transformations: designs and prototypes // Optica. – 2015. – No 10-2. – P. 850-853.
6. Андреев В.М., Давидюк Н.Ю., Ионова Е.А., Покровский П.В., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А. Оптимизация параметров солнечных модулей на основе линзовых концентраторов излучения и каскадных фотоэлектрических преобразователей // Журнал технической физики. – 2010. – № 80-2. – С. 118-125.
7. Иванчура В.И., Чубарь А.В., Пост С.С. Энергетические модели элементов автономных систем электропитания // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2012. – № 2. – С. 179-190.
8. Иванчура В.И., Краснобаев Ю.В., Пост С.С. Имитационная модель автономной системы электропитания // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2014. – № 7. – С. 791-796.
9. Пост С.С., Донцов О.А., Иванчура В.И., Краснобаев Ю.В. Имитационная модель контроллера солнечной батареи // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. – 2014. – № 4. – С. 111-120.

10. Шарифов Б. Н., Терегулов Т. Р. Моделирование солнечной панели в программе MATLAB/Simulink // Вестник УГАТУ. – 2015. – № 4. – С. 77-83.
11. Sridhar R., Jeevananathan Dr., Thamizh Selvan N., Saikat Banerjee. Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm // International Journal of Computer Applications. – 2010. – No 5-7. – P. 35-39.
12. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., и др. Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной энергетической эффективностью // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24). – С. 282-287.
13. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аркатова О.Е. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок // Доклады ТУСУРа. – 2010. – № 2 (22). – С. 102–107.
14. Волгин А.В., Юрченко А.В., Козлов А.В., Китаева М.В. Автоматизированные системы контроля и управления солнечными энергетическими системами // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 149-154.
15. Китаева М.В., Юрченко А.В., Скороходов А.В., Охорзина А.В. Системы слежения за Солнцем // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 3. – С. 61-67.
16. Ахмед Т.А. Джайлани, Сокольский А.К. Система электроснабжения автономных потребителей малой мощности на базе дизель-фотоэлектрической установки // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2009. – №4. – С. 43-45.
17. Benitez P., Minano J.C., Zamora P. High performance Fresnel-based photovoltaic concentrator // Optics Express. – 2010. – Vol. 18. – P. 25-40.
18. Sivagamasundari M.S., Melba Mary P., Velvizhi V.K. Maximum power point tracking for photovoltaic system by perturb and observe method using buck boost converter // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2. – P. 2433-2439.

19. Chi Hwan Lee, Dong Rip Kim, In Sun Cho, et al. Peel-and-Stick: Fabricating thin film solar cell on universal substrates // *Science*. – 2013. – Vol. 340. – P. 334-337.
20. Грицута А.Н., Щербаков А.П., Воронин Б.А. Разработка модели инфракрасного солнечного трекера // *Вестник науки Сибири*. – 2013. – №1(7). – С. 106-110.
21. Петрусев А.С., Сарсикеев Е.Ж., Ляпунов Д.Ю. Разработка технических средств повышения эффективности солнечных установок // *Вестник науки Сибири*. – 2015. – Спецвыпуск (15). – С. 77-82.
22. Pulkit Singh, D.K. Palwalia, Amit Gupta, Prakash Kumar. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques // *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. – 2015. – Vol.2. – P. 401-404.
23. Mohamed A. El-Sayed, Steven Leeb. Evaluation of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Electricity Generation in Kuwait // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. – 2014. – Vol. 1. – No 12. – P. 44–49.
24. Roberto Faranda, Sonia Leva. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems // *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*. – 2008. – Vol. 3. – P. 446-455.
25. Gunjan Varshney, Chauhan D.S., Dave M.P. Simscape Based Modelling & Simulation of MPPT Controller for PV Systems // *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. – 2014. – Vol. 9. – P. 41-46.
26. Highly Efficient Maximum Power Point Tracking Using a Quasi-Double- Boost DC/DC Converter for Photovoltaic Systems: Theses and Dissertations / Christopher J. Lohmeier. – University of Nebraska – Lincoln, 2011. – 92 p.
27. Dhananjay Choudhary, Anmol Ratna Saxena. DC-DC Buck-Converter for MPPT of PV System // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2014. – Vol. 4. – P. 813-821.

28. Sunil Kumar Mahapatro. Maximum Power Point Tracking (MPPT) Of Solar Cell Using Buck-Boost Converter // International Journal of Engineering Research & Technology. – 2013. – Vol. 2. – P. 1810-1821.
29. Aït Cheikh M.S., Larbes C., Tchoketch Kebir G.F., Zerguerras A.. Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme // Revue des Energies Renouvelables. – 2007. – Vol. 10. – P. 387-395.
30. Донцов О.А., Иванчура В.И., Краснобаев Ю.В. Контроллер солнечной батареи с экстремальным регулированием на основе нечеткой логики // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2015. – № 8. – С. 786-794.
31. ЗиСников А. В., Денисенко Е. А., Долбенко Д. В. К вопросу выбора солнечной фотоэлектрической станции // Научный журнал КубГАУ. – 2015. – № 108. – С. 1-11.
32. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. – Томск: Изд- во Томского политехнического университета, 2015. – 128 с.
33. Шидловский С.В. Автоматическое управление. Перестраиваемые структуры. – Томск: Томский государственный университет, 2006. – 288 с.
34. Шидловский С.В. Математическое моделирование сложных объектов с распределенными параметрами в задачах автоматического управления структурно-перестраиваемых систем // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – № 8. – С. 19-23.
35. Волгин А.В., Юрченко А.В., Козлов А.В., Китаева М.В. Автоматизированные системы контроля и управления солнечными энергетическими системами // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 149-154.
36. Аносов, В.Л. Учебное пособие по курсу «Имитационное моделирование» для студентов специальностей 7.050102 «Экономическая кибернетика» и 7.080404 «Интеллектуальные системы принятия решений» / В.Л. Аносов, В.Н. Черномаз. – Краматорск: ДГМА, 2007. – 156 с.

37. Петухов, О.А. Моделирование: системное, имитационное, аналитическое: учеб. пособие / О.А. Петухов, А.В. Морозов, Е.О. Петухова. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. – 288 с.
38. J. Rizk, and Y. Chaiko. Solar Tracking System: More Efficient Use of Solar Panels // International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. – 2008. – P. 784-786.
39. Gökhan Oral, Osman N. Uçan. Solar Tracking Systems and A Two-Axis Active Prototype With Stepwise Movement // International journal of electronics, mechanical and mechatronics engineering. – 2015. – P. 755-764.
40. Clifford M.J., Eastwood D. Design of a novel passive solar tracker // Solar Energy. – 2004. – P. 269–280.
41. Mamlook R., Nijmeh S., Abdallah S.M. A programmable logic controller to control two axis suntracking system // Information Technology Journal. – 2006. – P. 1083-1090.
42. A.F. Boehinger. Self-Adaptive DC Converter for Solar Spacecraft Power Supply // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems. – 1968. - P. 102- 111.
43. M. Veerachary, T. Senjyu, and K. Uezato. Voltage-Based Maximum Power Point Tracking Control of PV Systems // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2002. – P. 262 - 270.
44. E. Stathatos. Dye Sensitized Solar Cells: A New Prospective to the Solar to Electrical Energy Conversion. Issues to be Solved for Efficient Energy Harvesting // Journal of Engineering Science and Technology Review. – 2012. – P. 9-13.
45. R.Sridhar, N.Thamizh Selvan, Saikat Banerjee. Modeling of PV Array and Performance Enhancement by MPPT Algorithm // International Journal of Computer Applications. – 2010 – P. 35-39.
46. Автономная энергетическая установка с экстремальным шаговым регулятором мощности солнечных батарей / Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, А.В. Осипов, М.М. Черная // Альтернативная энергетика и экология – 2015. – № 8-9 – С. 12-18.

47. Шиняков Ю. А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2007. – № 1.

48. Шидловский С.В. Система автоматического регулирования, инвариантная к параметрическим возмущениям, на базе нечеткой логики // Вестник Томского государственного университета. – 2006. – № 290. – С. 247-250.