

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

**бакалавр**

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Розробка автономної енергетичної установки з регулюванням  
потужності фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії**

Виконала: студентка \_\_\_\_\_ курсу  
\_\_\_\_\_ 4 \_\_\_\_\_ групи ЕТс-41  
спеціальнос  
ті \_\_\_\_\_ 141

електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_ Капінос О.В.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_ Філюк Я.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

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

Рецензент \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

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

« 08 » лютого 2022 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Капіносу Олександр Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка автономної енергетичної установки з регулюванням потужності фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії

Керівник роботи ... Філюк Ярослав Олександрович, к.т.н.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 1 » лютого 2022 року № 4/7-76

2. Термін подання студентом завершеної роботи 18 червня 2022 року

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	Гурик О. Я., к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Вакуленко О. О., ст. викладач кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 08 лютого 2022 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	26.02.2021	
2	Аналітичний розділ	31.03.2021	
3	Проектно-конструкторський розділ	16.04.2021	
4	Розрахунковий розділ	30.04.2021	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	14.05.2021	
6	Висновки	31.05.2021	
7	Оформлення пояснювальної записки	03.06.2021	
8	Оформлення графічної частини	14.06.2021	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Капінос О.В.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Філюк Я.О.

\_\_\_\_\_

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2022.

Стор 64; рис. 48; табл. 5; креслень 16; джерел 15; додатків -.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Розробка автономної енергетичної установки з регулюванням потужності фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії».

Метою роботи є покращення якості процесу перетворення енергії у фотоелектричній системі, шляхом розробки та дослідження алгоритмів екстремального регулювання потужності, здатних функціонувати при нестачі апріорної інформації про об'єкт керування.

Розроблено математичні моделі основних елементів фотоелектричних систем: модель фотоелектричного модуля, модель контролера заряду, що мають високий рівень достовірності та універсальності.

В середовищі MATLAB/Simulink створена бібліотека елементів фотоелектричних систем, що включає моделі сонячної панелі, керуючого пристрою, навантаження. Розроблена бібліотека дозволяє створювати моделі фотоелектричних систем різних конфігурацій та досліджувати їхню роботу за різних зовнішніх умов.

На базі розробленої бібліотеки створено модель фотоелектричної системи з різними адаптивними алгоритмами керування: алгоритм з перенастроюванням пошукового кроку, алгоритм з еталонною моделлю, алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором, а також алгоритм покращення для нечіткого регулятора.

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

*Ключові слова:* автономна фотоелектрична установка, сонячна панель, керуючий пристрій.

## ЗМІСТ

Реферат	3
Вступ	6
1 Аналітичний розділ	8
1.1 Концепція побудови моделі фотоелектричної системи	8
1.2 Модель керуючого пристрою	12
1.3 Адаптивний алгоритм керування процесом заряду у фотоелектричній системі	16
1.3.1 Алгоритм із перенастроюванням пошукового кроку	16
1.4 Висновки до розділу	18
2 Проектно–конструкторський розділ	19
2.1 Моделювання фотоелектричної системи	19
2.1.1 Модель фотоелектричного модуля	19
2.1.2 Моделювання МРРТ-контролера	25
2.2 Модель акумуляторної батареї	30
2.3 Моделювання навантаження	31
2.4 Модель фотоелектричної установки	33
2.5 Висновки до розділу	36
3 Розрахунковий розділ	37
3.1 Моделювання фотоелектричної системи з різними адаптивними алгоритмами екстремального регулювання	37
3.1.1 Модель системи з алгоритмом із перенастроюванням пошукового кроку	37
3.1.2 Модель системи з алгоритмом з передбачуваною адаптацією	39
3.1.3 Модель системи з алгоритмом з налаштуванням нечітким регулятором	41
3.2 Порівняльний аналіз розроблених адаптивних алгоритмів	44
3.3 Висновки до розділу	56
4 Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	57
4.1 Організація охорони праці на підприємстві	57

4.2. Інфрачервоне випромінювання та особливості його дії на організм людини	59
4.3. Штучне освітлення виробничих приміщень, його нормування та види	61
Загальні висновки	62
Перелік посилань	63

## ВСТУП

У разі зменшення запасів природного палива дедалі більше уваги приділяється використанню сонячної енергії як основного енергоресурсу. В даний час сонячні електростанції будуються не тільки в країнах із високою сонячною активністю, але практично у всіх регіонах світу з різними кліматичними умовами. У зв'язку з тим, що вартість традиційних джерел енергії зберігає тенденцію зростання, нині у регіонах без стаціонарних мереж електроживлення збільшується рівень впровадження фотоелектричних установок (ФЕУ). Не лише дозволяє знизити екологічну навантаження, а й економічно вигідно.

Сучасні ФЕУ мають невеликий коефіцієнт перетворення падаючої сонячної енергії. У ясний сонячний день кожен квадратний метр площі фотоелектричних модулів (ФМ), перпендикулярної вектору сонячних променів, надходить приблизно 1 кВт енергії, але споживачу надходить лише частина цієї енергії. Невисокі показники реального ККД кремнієвих фотоелементів масового виробництва (в середньому 20%), а також недовикористання можливостей фотоелектричного модуля є факторами, що негативно відбиваються на кількості енергії, що генерується. Як наслідок - сумарний ККД звичайної ФЕУ дорівнює приблизно 10%. У зв'язку з невисокими показниками ККД ФЕУ виникає питання про підвищення їх ефективності.

Існують різні підходи та методи підвищення енергетичної ефективності ФЕУ. До найефективніших методів підвищення енергетичної ефективності ФЕУ належать:

- метод удосконалення конструкції елементів ФЕУ, цьому присвячені роботи вчених, як: В.М. Андрєєв, Н.Ю. Давидюк, О.О. Іонова, П.В. Покровський, В.Д. Рум'янцев, Н.А. Садчиков, Martin F. Schumann, Carsten Rockstuhl, Martin Wegener;

- метод застосування технології наведення сонячних панелей на сонці (сонячний трекер), описаний у роботах: Ю.О. Шиняков, А.В. Осіпов, О.А. Теушаков, К.В. Аржанов, А.В. Юрченко, О.В. Скороходів.

- метод використання режиму екстремального регулювання потужності (ЕРМ), також відомий як технологія МРРТ (Maximum Power Point Tracking -

відстеження точки максимальної потужності) та представлено в роботах: О. А. Донцов, Ю. В. Краснобаєв, Mohamed A. El-Sayed , Steven Leeb, Roberto Faranda, Sonia Leva.

Проаналізувавши ступінь вивченості проблеми алгоритмів пошуку ТМП, можна дійти висновку, що питання реалізації ефективних рішень залишається відкритим через відсутність порівняльної бази методів адаптивного пошуку ТМП, так і появи нових рішень. У зв'язку з вищевикладеним виникає суперечність між необхідністю вибору та реалізації адаптивного алгоритму з необхідними характеристиками та недостатньою оцінною базою тих чи інших адаптивних алгоритмів пошуку ТМП.

Мета роботи. Метою роботи є покращення якості процесу перетворення енергії у фотоелектричній системі, шляхом розробки та дослідження алгоритмів екстремального регулювання потужності, здатних функціонувати при нестачі апріорної інформації про об'єкт керування.

Досягнення поставленої мети вирішуються такі основні завдання дослідження:

1. Розробка моделей елементів фотоелектричної системи.
2. Розробка адаптивних алгоритмів екстремального регулювання потужності для керування процесом енергоперетворення у фотоелектричній системі



# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Концепція побудови моделі фотоелектричної системи

В автономних системах фотоелектричні модулі генерують енергію для потреб споживача. ФЕУ складається з фотоелектричного модуля, керуючого пристрою, акумулятора та навантаження.

На рис. 1.1 наведено структурну схему ФЭУ, як системи керування з екстремальним регулюванням потужності.

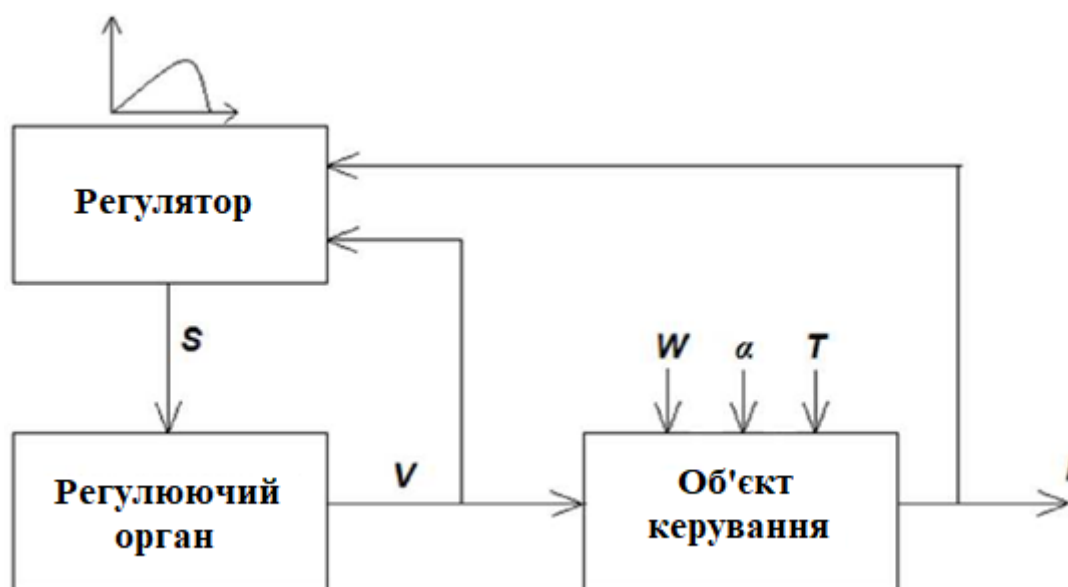


Рисунок 1.1 – Структурна схема екстремального регулювання потужності ФЕУ: Регулятор – контролер із сигналом завдання на пошук максимуму; Регулюючий орган – імпульсний перетворювач; Об'єкт керування – фотоелектричний модуль;  $S$  – ШІМ-сигнал;  $V$  - сигнал напруги;  $I$  - сигнал струму;  $W$ ,  $\alpha$ ,  $T$ - зовнішні збудження за освітленістю, кутом падіння променів і температурою відповідно

Електрофізичні характеристики фотоелектричного модуля є найважливішим параметрами фотоелектричної установки, так як від них безпосередньо залежить ефективність застосування такої системи і, як наслідок, перспективність і доцільність всього інженерного рішення [1-10].

Фотоелектричний модуль являє собою паралельно послідовне з'єднання окремих фотоелементів, що забезпечують необхідні вихідні струм і напруга, залежно від зовнішніх (температура, рівень освітленості, кут падіння променів) та внутрішніх (струм короткого замикання, напруга холостого ходу, деградація фотоелемента) факторів. Виходячи з цього, фотоелемент можна подати у вигляді параметричної схеми, зображеної на рис. 1.2.

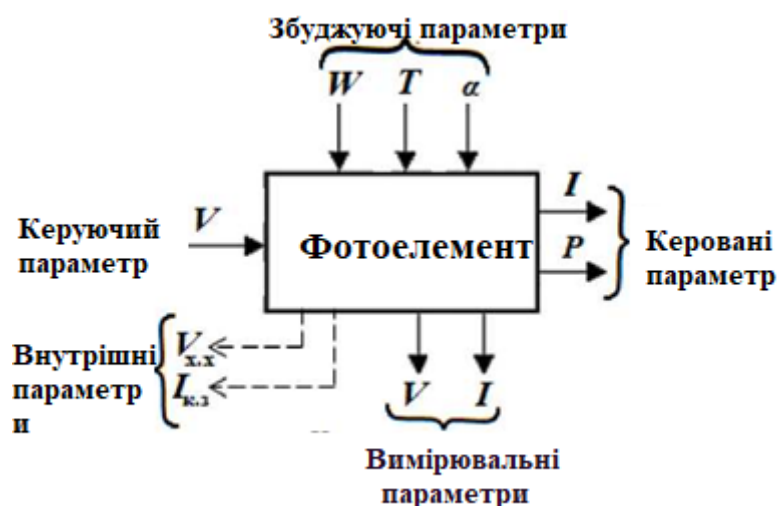


Рисунок 1.2 – Параметрична схема фотоелемента

Керуючим параметром є напруга  $V$  на фотоелементі. З допомогою зміни напруги  $V$  змінюються керовані параметри: струм  $I$  і, отже, вихідна потужність ( $P=I \cdot V$ ). Вимірюваними параметрами є струм  $I$  і напруга фотоелемента  $V$ . Також на керовані параметри впливають зовнішні збуджуючі параметри: освітленість  $W$ , температура  $T$ , кут падіння сонячних променів  $\alpha$ . Внутрішні параметри фотоелемента напруга холостого ходу  $V_{x,x}$  та струм короткого замикання  $I_{к.з}$  залежать від виду фотоелемента, матеріалу та конструкційних особливостей.

Загалом модель фотоелектричного модуля можна представити наступною функцією:

$$I_{\text{ФМ}} = f(V_{x,x}, I_{к.з}, T, W, \alpha), \quad (1.1)$$

де  $I_{\text{ФМ}}$  – струм фотоелектричного модуля;  $V_{x,x}$  – напруга холостого ходу;  $I_{к.з}$  – струм короткого замикання;  $T$  – температура фотоелектричного модуля;  $W$  – освітленість фотоелектричного модуля;  $\alpha$  – кут падіння променів.

Математична модель фотоелемента реалізується як еквівалентної електричної схеми, наведеної рис. 1.3, так званої «моделлю одного діода».

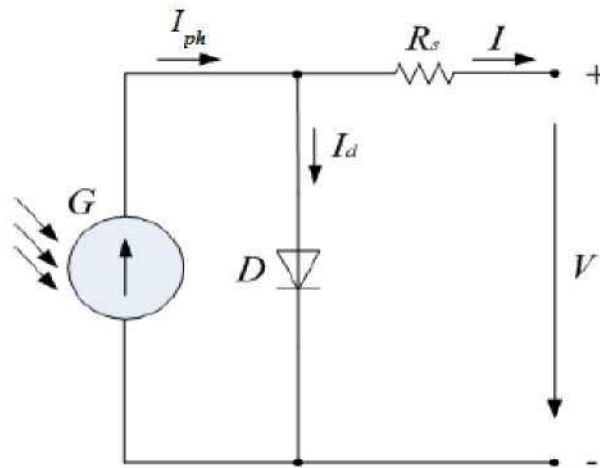


Рисунок 1.3 – Модель одного діода

Виходячи з представленої еквівалентної схеми, згідно з першим законом Кірхгофа, можна записати наступний вираз, що описує вихідний струм фотоелемента:

$$I = I_{ph} - I_d, \quad (1.2)$$

де  $I$  - вихідний струм фотоелемента,  $I_{ph}$  - фотострум,  $I_d$  - струм діода.

Величина струму, що протікає через р-п-перехід, залежить від прикладеної до нього напруги, згідно з наступним виразом:

$$I_d = I_s \cdot \left( \exp \left[ \frac{q(V + R_s \cdot I)}{a \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right), \quad (1.3)$$

де  $I_s$  - Струм насичення, А;  $V$  - прикладена напруга, В;  $R_s$  – опір діода, Ом;  $I$  – струм на фотоелементі, А;  $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд одного електрона;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К, - постійна Больцмана;  $a$  -фактор ідеалізації, що забезпечує узгодження із реальними характеристиками;  $T$  - абсолютна температура, К.

Струм насичення розраховується в залежності від температури по наступному виразі:

$$I_s = I_{dn} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 \cdot \exp \left[ \frac{q \cdot \Delta W}{a \cdot k} \cdot \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (1.)$$

де  $I_{dn}$  – номінальний діодний струм;  $\Delta W=1,2$  еВ - енергія, відповідна ширині забороненої зони;  $T$  – поточна температура фотоелемента;  $T_n$  – номінальна температура 298 К.

Номінальний діодний струм залежить від номінальних значень напруги холостого ходу та струму короткого замикання, тобто від типу фотоелемента, та описується наступним виразом:

$$I_{dn} = \frac{I_{к.з}}{\exp\left[\frac{V_{х.х}}{a \cdot V_{tn}}\right] - 1}. \quad (1.5)$$

Тут  $I_{к.з}$  – номінальний струм короткого замикання;  $V_{х.х}$  – номінальна напруга холостого ходу;  $V_{tn}$  - температурний потенціал, який визначається як:  $V_{tn} = \frac{k \cdot T}{q}$ , параметри,  $k, T, q$  позначені вище.

Фотострум  $I_{ph}$  залежить від температури, освітленості та кута падіння сонячних променів. Цю залежність можна представити нижченаведеною формулою.

$$I_{ph} = (I_{к.з} + K_i \cdot \Delta T)W \cdot \sin(\alpha), \quad (1.6)$$

де  $K_i$ - температурний коефіцієнт струму;  $W$  – відносна освітленість, що є безрозмірною величиною, що приймає значення  $[0; 1]$ , де 1 відповідає максимальна освітленість 1000 кВт/м<sup>2</sup>;  $I_{ph}$  – номінальний фотострум;  $\alpha$  – кут падіння сонячних променів.

З урахуванням вищенаведених формул, можна записати вихідний струм фотоелемента:

$$I = (I_{к.з} + K_i(T - T_n))W \cdot \sin(\alpha) - \left( \frac{I_{к.з}}{\exp\left[\frac{V_{х.х}}{a \cdot \frac{k \cdot T}{q}}\right] - 1} \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q \cdot \Delta W}{a \cdot k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right] \left(\exp\left[\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{a \cdot k \cdot T}\right] - 1\right) \right). \quad (1.7)$$

Температура  $T$  фотоелемента залежить від рівня освітленості. Для підвищення адекватності моделі ця залежність визначається температурною моделлю Серванта:

$$T = T_0 + \alpha \cdot W(1 + \beta \cdot T_0)(1 - \gamma \cdot v_w), \quad (1.8)$$

де  $T_0$  - температура навколишнього середовища, К;  $\alpha = 0,0138$ ,  $\beta = 0,031$ ,  $\gamma = 0,042$  – коефіцієнти;  $v_w$  – швидкість вітру, м/с.

Фотоелектричний модуль, як уже було сказано вище, є послідовно-паралельним з'єднанням 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.

Великий вплив на роботу фотоелектричних модулів має умова затінювання, коли частина фотоелементів з якоїсь причини перестає надходити світло. Щоб промодельовати даний фактор, слід забезпечити індивідуальний облік освітленості (параметр  $W$  у формулі (1.7)) кожної підсистеми-фотоелемента загальної моделі фотоелектричного модуля. Підсумком такого моделювання буде модель з розподіленими параметрами (рівень освітленості/затінення окремих фотоелементів), що забезпечує високий рівень відповідності техніко-експлуатаційним характеристикам реальної системи.

## **1.2 Модель керуючого пристрою**

Важливою складовою функціонування фотоелектричної установки є забезпечення оптимального режиму відбору та розподілу енергії. Це завдання лежить на контролері заряду, що управляє розподілом енергії: накопиченням в акумуляторах, передачею споживачам. Також контролер заряду забезпечує контроль над відбором енергії фотоелектричними модулями за допомогою спеціальних алгоритмів.

Існують різні контролери заряду фотоелектричних систем, найбільшу ефективність мають так звані МРРТ-контролери або контролери з режимом екстремального регулювання потужності.

Найбільшого поширення набув МРРТ-метод ЗТС. Для реалізації МРРТ-контролера застосовується топологія імпульсного перетворювача, що підвищує або знижувального типу [1-8, 11, 12].

У цьому роботі реалізації зарядного пристрою з функцією екстремального регулювання потужності використовується топологія знижуючого імпульсного

перетворювача (Buck-конвертер), важлива схема Buck- конвертера представлена рис. 1.4.

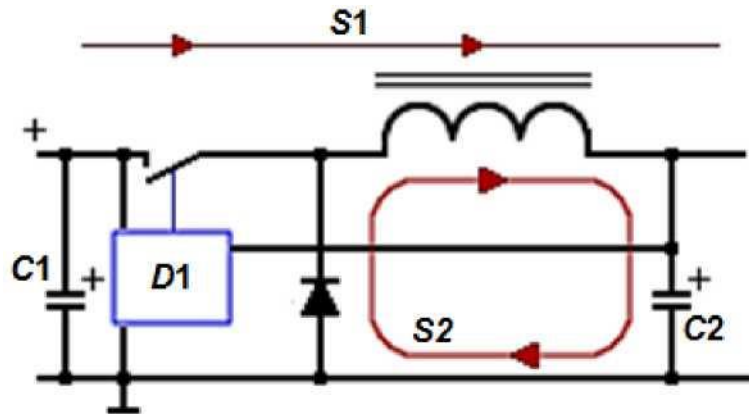


Рисунок 1.4 – Принципова схема Buck-конвертера

На рис 1.4 видно, що блок D1, залежно від напруги на вихідному конденсаторі C2, замикає та розмикає силовий ключ. При цьому чим вище напруга на вихідному конденсаторі C2, тим менший час замикання ключа, тобто менше коефіцієнт заповнення (більше шпаруватість). Якщо напруга на вихідному конденсаторі C2 перевищує деяку, ключ взагалі перестає замикатися, поки напруга не знизиться. Коли ключ замкнутий, струм йде шляхом S1. При цьому напруга на котушці індуктивності дорівнює різниці між вхідною та вихідною напругою. Струм через котушку збільшується пропорційно напруги, прикладеному до котушки, та часу замикання ключа. Котушка накопичує енергію. Текучий струм заряджає вихідний конденсатор C2.

Коли ключ у розімкнутому стані, струм йде шляхом S2 через діод. До котушки додана вихідна напруга зі зворотним знаком. Струм через котушку зменшується пропорційно напруги, прикладеному до котушки, і часу, протягом якого ключ розімкнуто. Текучий струм, як і раніше, заряджає вихідний конденсатор C2.

Коли вихідний конденсатор C2 повністю заряджений, ключ перестає замикатися та зарядження припиняється. Ключ знову почне замикатись, коли вихідний конденсатор C2 трохи розрядиться через навантаження.

Для зменшення пульсації струму вхідного ланцюга у схемі присутній вхідний конденсатор C1.

Регульовальна характеристика понижуючого перетворювача, за умови безперервності струму дроселя, описується співвідношенням:

$$\frac{V_{\text{ВЫХ}}}{V_{\text{ВХ}}} = \frac{\gamma}{1 + R_{L1}/R_H}, \quad (1.9)$$

де  $\gamma$  – відносна тривалість відкритого стану транзистора;  $R_{L1}$  – опір дроселя;  $R_H$  – опір навантаження.

Така регульовальна характеристика відповідає роботі імпульсного перетворювача джерела ЕРС. У разі живлення від ФМ, що має нелінійну ВВХ, і роботи на акумулятор, що являє собою навантаження зі змінним опором, характеристика (1.9) набуде вигляду:

$$V_{\text{ФМ}}^* = \frac{V_{\text{ФМ}}}{V_{\text{АБ}}} = \frac{1 + R_{L1}/R_H}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{V_{\text{АБ}}} \cdot I_{\text{ВЫХ}}}{\gamma} = \frac{1 + \frac{R_{L1}}{V_{\text{АБ}}} \cdot \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{\gamma}}{\gamma} = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}}{V_{\text{АБ}}} \cdot \frac{I_{\text{ФМ}}}{\gamma^2}, \quad (1.10)$$

де  $V_{\text{ФМ}}^*$  - відношення напруги на ФМ до напруги на АБ;  $V_{\text{ФМ}}$  - напруга на ФМ, В;  $V_{\text{АБ}}$  - напруга на акумуляторній батареї;  $I_{\text{ВЫХ}}$  - вихідний струм імпульсного перетворювача, А;  $I_{\text{ФМ}}$  – струм на ФМ, А.

Щоб пов'язати регульований параметр  $V_{\text{ФМ}}$  з відносною тривалістю імпульсу керування через характерні точки ВВХ ФЕУ можна використовувати математичну модель, запропоновану в [13]:

$$I_{\text{ФМ}} = I_{\text{к.з}} \cdot \left( 1 - \left( 1 - \frac{I_0}{I_{\text{к.з}}} \right)^{\frac{V_{\text{х.х}} - V_{\text{ФМ}}}{V_{\text{х.х}} - V_0}} \right), \quad (1.11)$$

де  $I_{\text{к.з}}$  – струм короткого замикання, А;  $V_{\text{х.х}}$  - напруга холостого ходу, В;  $I_0$  – оптимальне значення струму, А;  $V_0$  – оптимальне значення напруги.

Використовуючи запропоновані формули, отримуємо вираз, що зв'язує регульований параметр, відносну тривалість імпульсу, що управляє, і характерні параметри системи:

$$V_{\text{ФМ}}^* = \frac{1}{\gamma} + \frac{R_{L1}^*}{\gamma^2} \left( 1 - \left( 1 - \frac{I_0}{I_{\text{к.з}}} \right)^{\frac{V_{\text{х.х}} - V_{\text{ФМ}}}{V_{\text{х.х}} - V_0}} \right), \quad (1.12)$$

де  $R_{L1}^* = R_{L1} \cdot I_{\text{к.з}} / V_{\text{АБ}}$  - втрати в дроселі на опір.

Логіка роботи керуючого пристрою у фотоелектричній системі побудована на алгоритмі пошуку екстремуму: в ході ітераційних процесів керуючий пристрій змінює напругу на фотоелектричному модулі ( $V_{\text{ФМ}}$ ) на деяке значення  $dV_{\text{ФМ}}$  (крок пошуку), розраховуючи при цьому зміну потужності та визначаючи напрямок пошуку екстремуму.

З урахуванням швидкості дрейфу ВВХ фотоелектричного модуля:  $V_{v\_ФМ} \approx 0,03$  В/с [14] можна записати вираз для необхідної швидкодії керуючого пристрою в залежності від значення кроку за напругою  $dV_{\text{ФМ}}$ :

$$\Delta t = \frac{1}{f_{\text{зр}}} \leq \frac{dV_{\text{ФМ}}}{V_{V_{\text{ФМ}}}}, \quad (1.13)$$

де  $V_{v\_ФМ}$  – швидкість зміни напруги фотоелектричного модуля в оптимальній точці.

Така умова є недостатньою для реальної системи, т.к. враховує лише горизонтальний дрейф ВВХ фотоелектричного модуля ( $P_{\text{ФМ\_max}}(t) = \text{const}$ ), таке можливе лише теоретично – при пропорційному впливі освітленості та температури. У реальній системі дрейф ВВХ при нагріванні супроводжується зменшенням максимуму потужності, що у разі неправильно підібраної частоти кроку (критичне значення при  $dV_{\text{ФМ}} / V_{\text{ФМ}}$ ) може призвести до реверсу системи через зменшення фактичної потужності на фотоелектричному модулі, навіть у разі руху робочої точки у бік екстремуму ВВХ. У зв'язку з цим для забезпечення стійкості керування необхідно виконання додаткової умови:  $\Delta P_{\text{ФМ}} \geq 0$  – збільшення потужності від крокової зміни напруги  $dV_{\text{ФМ}}$  має компенсувати втрати потужності за дрейфу ВВХ [15].

Можна записати рівняння дрейфуючої ВВХ, апроксимованої квадратичною параболою:

$$\begin{aligned} P_{\text{ФМ}}(V_{\text{ФМ}}; t) &= a(t) [V_{\text{ФМ}} - V_{\text{ФМ\_опт}}(t)]^2 + P_{\text{ФМ\_max}}(t), \\ P_{\text{ФМ\_max}}(t) &= P_{\text{ФМ\_max}}(t - \Delta t) + \Delta P_{\text{ФМ\_max}}(\Delta t); \\ V_{\text{ФМ\_опт}}(t) &= V_{\text{ФМ\_опт}}(t - \Delta t) + \Delta V_{\text{ФМ\_опт}}(\Delta t); \\ a(t) &= a(t - \Delta t) + a(\Delta t). \end{aligned} \quad (1.14)$$



На підставі цього рівняння можна визначити вираз для збільшення вихідного сигналу. З припущенням, що дрейф ВВХ супроводжується мінімальним спотворенням форми, тобто.  $a(t) \gg \Delta a(t)$ :

$$\Delta P_{\text{ФМ}} = P_{\text{ФМ}}(V_{\text{ФМ}}; t) - P_{\text{ФМ}}(V_{\text{ФМ}} - \Delta V_{\text{ФМ}}; t - \Delta t), \quad (1.15)$$

### 1.3 Адаптивний алгоритм керування процесом заряду у фотоелектричній системі

Недоліками МРРТ-алгоритму ЗТС є коливання потужності, що викликаються «пошуком», характерним для пошукових алгоритмів, а також фіксований час «сходження». Зменшення часу "сходження" призводить до збільшення амплітуди коливань, що веде до недовироблення потужності. Зменшення амплітуди коливань потужності призводить до збільшення часу пошуку точки максимальної потужності. Також слід враховувати, що під час роботи системи спостерігається дрейф ВВХ .

Для вирішення зазначених проблем можливе використання адаптивних алгоритмів, що підлаштовуються до характеру виходу робочу точку максимальної потужності.

#### 1.3.1 Алгоритм із перенастроюванням пошукового кроку

Недоліки алгоритму ЗТС впливають із сталості кроку за напругою. Якщо забезпечити адаптацію розміру кроку, можна зменшити час пошуку точки максимальної потужності та мінімізації амплітуди коливань напруги біля робочої точки.

Переналаштування заздалегідь заданого пошукового кроку можна здійснити за допомогою введення поправочного коефіцієнта, що характеризує швидкість зміни потужності при зміні робочої напруги, при поточному значенні струму:

$$E = \frac{P_n - P_{n-1}}{V_n - V_{n-1}};$$

$$k = \frac{E}{I_n}, \quad (1.16)$$

де  $P_n$  – поточне розрахункове значення потужності;  $P_{n-1}$  – розрахункове значення потужності на попередньому кроці;  $V_n$  – поточне значення напруги;  $V_{n-1}$  – значення напруги на попередньому кроці;  $E$  - швидкість збільшення потужності від збільшення напруги;  $I_n$  – поточне значення сили струму.

ВВХ фотоелектричного модуля можна умовно розділити на три ділянки, як показано на рисунку 1.5.

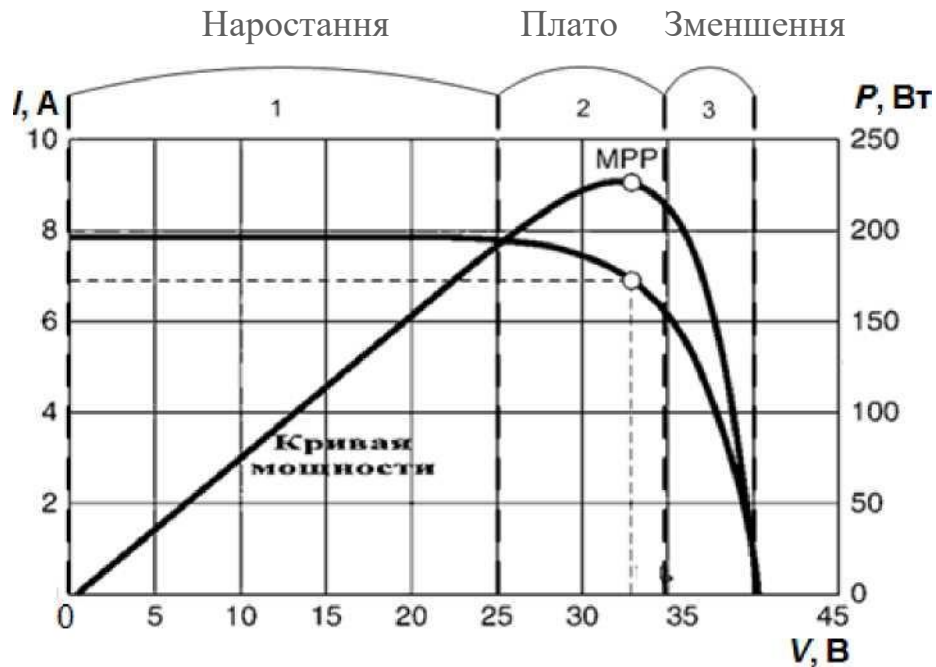


Рисунок 2.5 - ВАХ та ВВХ фотоелектричного модуля з поділом на три характерні ділянки: 1 - наростання, 2 - плато, 3 - спадання

Перша частина графіка характеризується поступовим, близьким до лінійного, наростанням потужності при відповідному підвищенні напруги. Друга ділянка - плато - характеризується уповільненням зростання потужності щодо зростання напруги, а після екстремуму переходить до зменшення потужності при зростанні напруги. Третя ділянка характеризується швидким (щодо швидкості наростання) зменшенням потужності. Завдяки такому розбиттю стає очевидним вплив поправочного коефіцієнта - в області плато еталонний крок зменшується за рахунок зменшення показника  $E$ , що мінімізує коливання біля робочої точки; в області наростання лінійність показника  $E$  та відповідне слабке зміна струму (видно на ВВХ) залишають крок незмінним.

Лінійність у сфері наростання, яка змінює величину кроку, зберігає для представленого алгоритму проблему часу регулювання. Для вирішення цієї проблеми можна організувати додаткову оцінку поправочного коефіцієнта: якщо коефіцієнт не змінюється, а потужність продовжує зростати (відповідає області наростання), вводиться додаткове виправлення, що збільшує крок.

#### **1.4 Висновки до розділу**

Фотоелектричні установки мають великий потенціал для енергетичної галузі. Підвищений інтерес до таких систем призвів до створення різних засобів підвищення їх енергетичної ефективності. З точки зору автоматизації та керування найбільший інтерес становить підвищення енергетичної ефективності ФЕУ 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 (керування процесом заряду акумуляторів), усунення недовироблення потужності (перетворення енергії здійснюється при оптимальних параметрах системи, що підлаштовуються), поліпшення відбору енергії при розсіяному випромінюванні (в умовах підвищеної хмарності, туману).

## **2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ**

### **2.1 Моделювання фотоелектричної системи**

Під час створення фотоелектричних систем велику ефективність показує попереднє моделювання, що дозволяє на етапі проектування проводити дослідження таких систем. За допомогою моделювання можна вивчити ефективність фотоелектричної системи для конкретних умов, щоб надати попередню оцінку доцільності застосування цієї технології. Також з'являється можливість розглянути роботу фотоелектричної системи за різних конфігурацій обладнання, промодельовати технологічні рішення для підвищення енергетичної ефективності. До переваг комп'ютерного моделювання перед експериментом можна віднести швидкість відпрацювання (масштабування часу), економічність та гнучкість (можливість легко реконфігурувати досліджувану систему).

У цій роботі запропоновані наступні моделі елементів фотоелектричної системи: фотоелектричний модуль, контролер заряду, навантаження, що підключається, акумуляторна батарея. Оскільки зазначені елементи є типовими для фотоелектричних установок, можуть бути використані для побудови систем різних топологій.

#### **2.1.1 Модель фотоелектричного модуля**

За допомогою MATLAB Simulink будується комп'ютерна модель фотоелемента, наведена рис. 2.1.

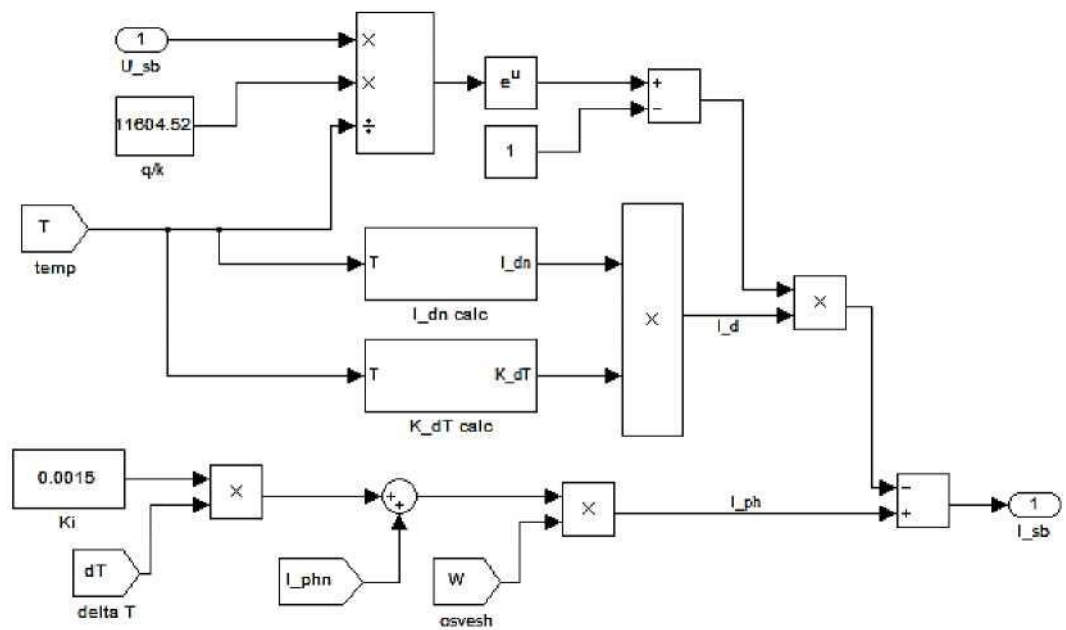


Рисунок 2.1 – Модель фотоелемента

Блоки «I\_dn calc» і «K\_dT calc» є підсистемами для розрахунку номінального діодного струму та температурного коефіцієнта відповідно. Наповнення блоків «I\_dn calc» та «K\_dT calc» представлено рис. 2.2.

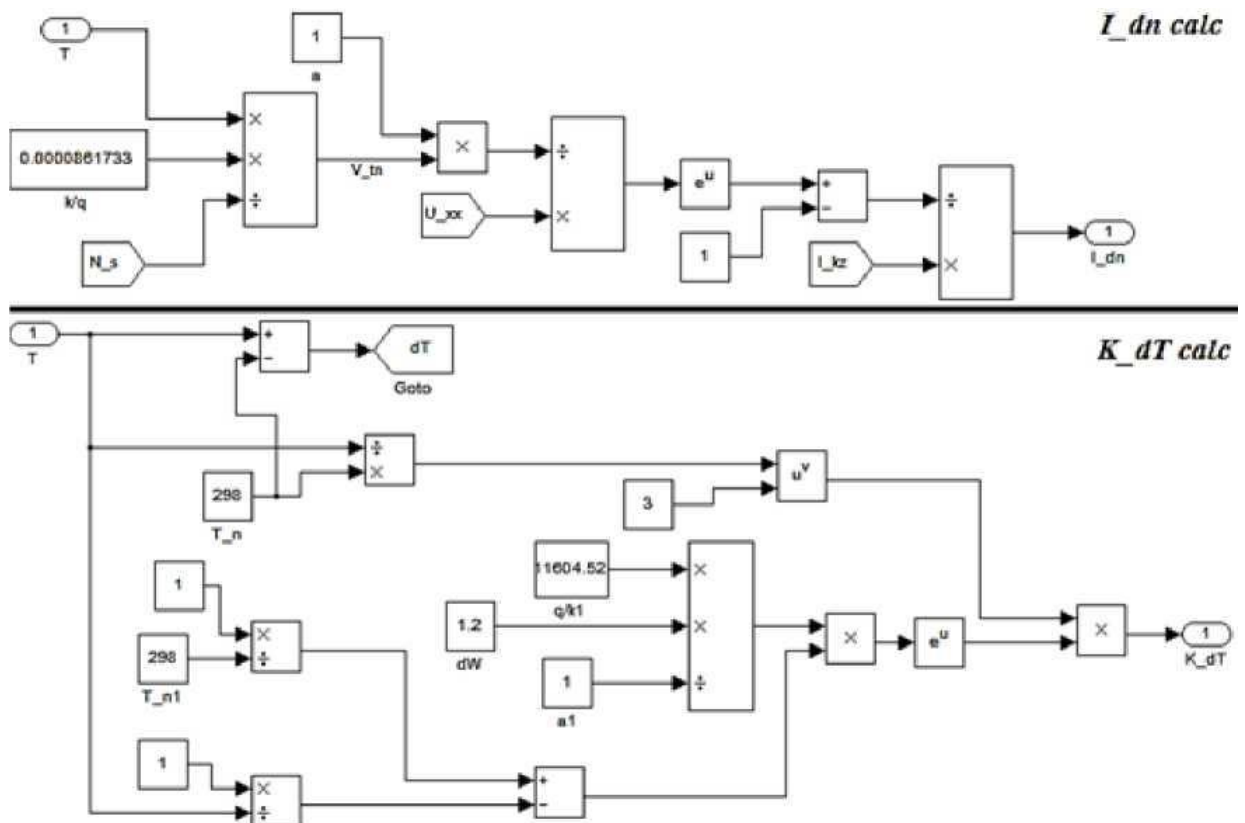


Рисунок 2.2 - Моделі блоків "I\_dn calc" та "K\_dT calc"

Розроблена модель дозволяє досліджувати вплив різних факторів (температури, освітленості, кута падіння променів, деградації фотоелементів) на характеристики фотоелементу та отримувати наочне уявлення про роботу фотоелемента за рахунок побудови графіків ВАХ та ВВХ.

Представлена модель дозволяє:

- налаштовувати внутрішні характеристики фотоелементів: струм короткого замикання, напруга холостого ходу, температурний коефіцієнт струму;
- моделювати умови навколишнього середовища, задаючи їх статичними або такими, що динамічно змінюються: кут падіння сонячних променів, рівень освітленості, температура;
- отримувати графіки ВАХ та ВВХ.

На рис. 2.3. наведені ВАХ і ВВХ фотоелементи за наступних параметрів моделі: напруга холостого ходу  $U_{xx} = 0,55$  В, струм короткого замикання  $I_{к.з} = 5,5$  А, рівень освітленості  $Q = 1000$  кВт/м<sup>2</sup>, температура фотоелемента  $T = 298$  К, кут падіння сонячних променів  $\alpha = 1,5708$  рад.

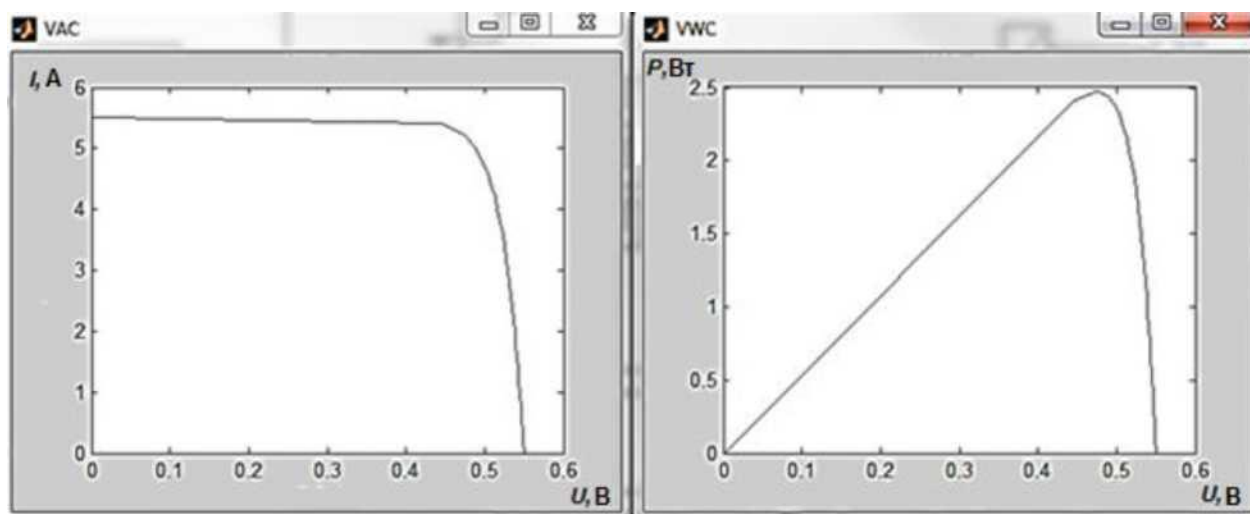


Рисунок 2.3 – ВАХ і ВВХ фотоелемента

На рис. 2.4. наведені ВАХ та ВВХ фотоелемента при різному рівні освітленості (синя лінія –  $Q=1$ , зелена –  $Q=0.75$ , червона –  $Q=0.5$ ). При зменшенні освітленості падає кількість генерованої потужності, що говорить про адекватність створеної моделі.

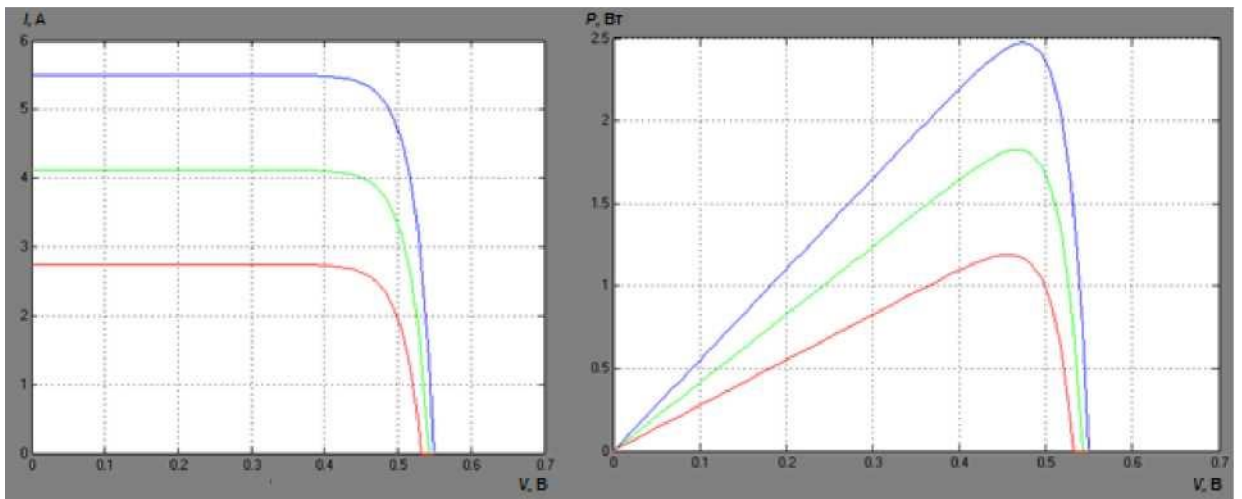


Рисунок 2.4. - ВАХ та ВВХ фотоелемента при різному рівні освітленості

На рис. 2.5. представлені ВАХ та ВВХ фотоелемента при різних температурах (синя лінія – при 30 С, зелена – при 40 С, червона – при 50 С). З отриманого графіка видно, що менше температура фотоелемента, тим вища потужність - це відповідає властивостям фізики фотоелементів, що говорить про адекватність моделі.

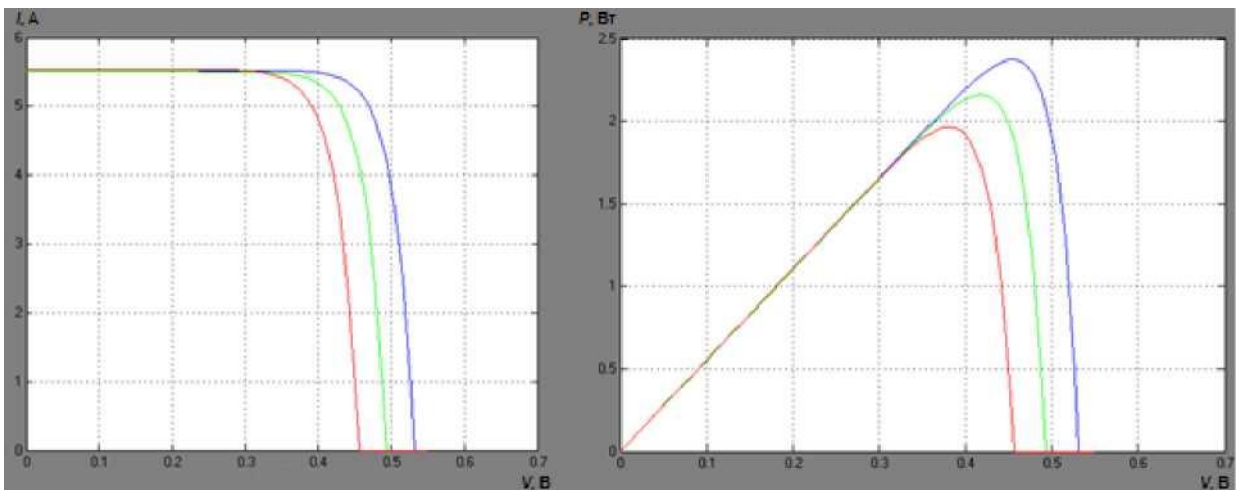


Рисунок 2.5 - ВАХ та ВВХ фотоелементу за різних температур

Фотоелектричний модуль є послідовно паралельним з'єднанням 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 наведено модель фотоелектричного модуля, що складається із шести фотоелементів, включених послідовно-паралельно. ВАХ модуля наведено рис. 2.7.

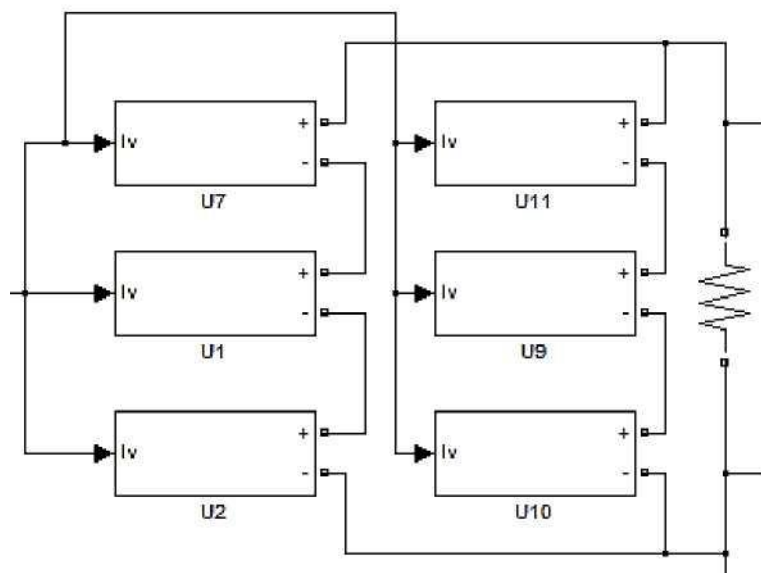


Рисунок 2.6 - Модель фотоелектричного модуля, що складається із шести фотоелементів

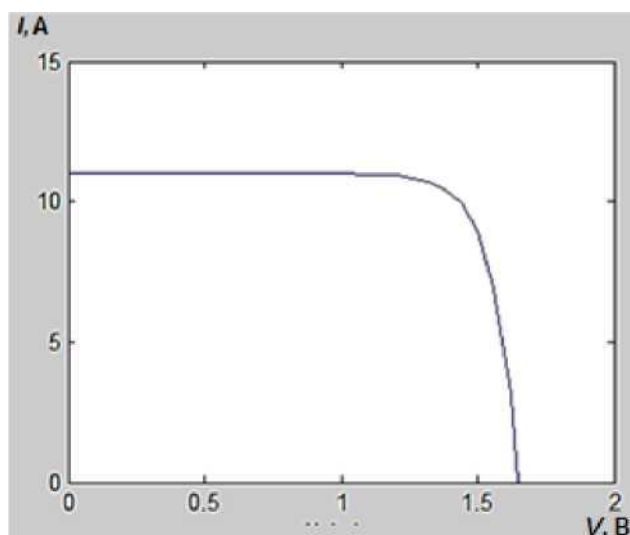


Рисунок 2.7 – ВАХ фотоелектричного модуля

По ВАХ фотоелектричного модуля (рисунок 2.7) видно, що вихідна напруга збільшилася в 3 рази (три послідовно підключені фотоелементи), а вихідний струм збільшився в 2 рази (два послідовно включені з'єднання фотоелементів), порівняно з одиночним фотоелементом (рис. 2.3).



Для зручності моделювання можна помітити трудомістке включення додаткових фотоелементів введенням множників, що відповідають послідовно-паралельному підключенню елементів модуля, але при цьому втрачається можливість промоделювати умову часткової затінення.

Для моделювання динамічних характеристик комп'ютерна модель, наведена рис. 2.1, модернізується з допомогою елементів бібліотеки SimPowerSystems. Модель фотоелектричного модуля, що містить силові елементи електричної схеми, представлена на рис. 2.8.

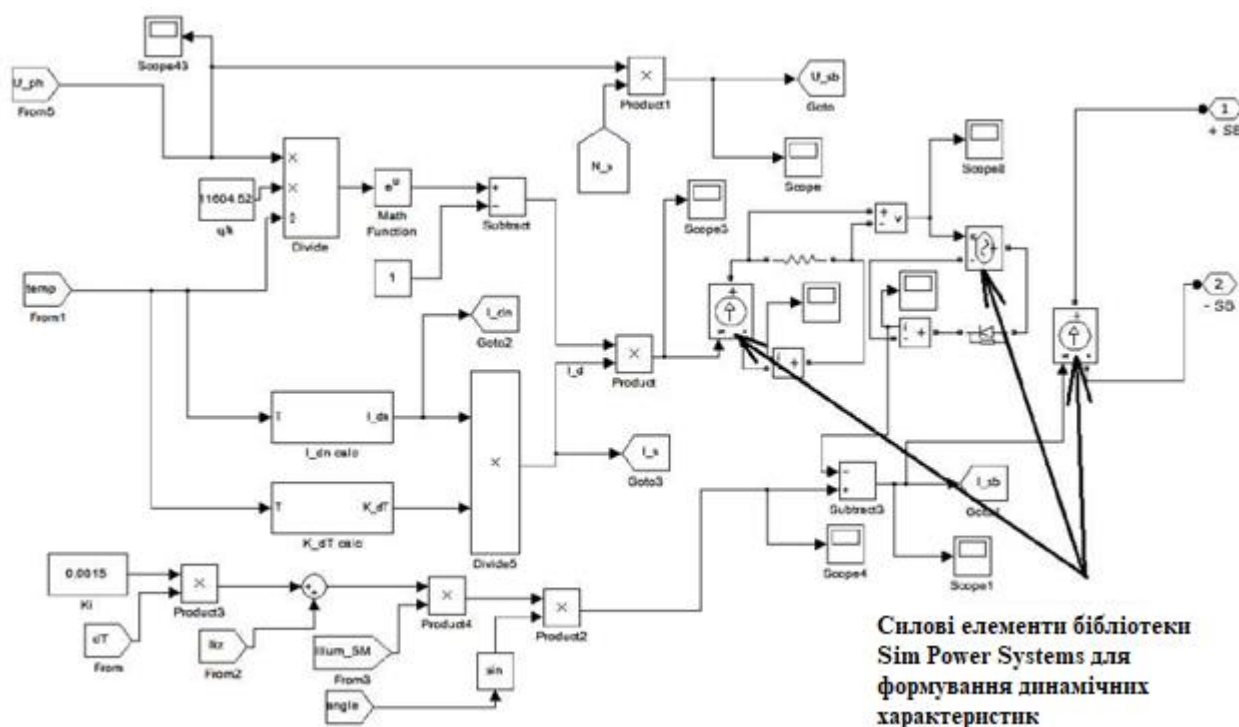


Рисунок 2.8 – Динамічна модель фотоелектричного модуля

На основі наведеної динамічної моделі отримана реакція системи на зміну ступінчастої напруги у вигляді зміни діодного струму і вихідного струму фотоелемента (див. формулу (1.2)). Отримані графіки наведено рис. 2.9.

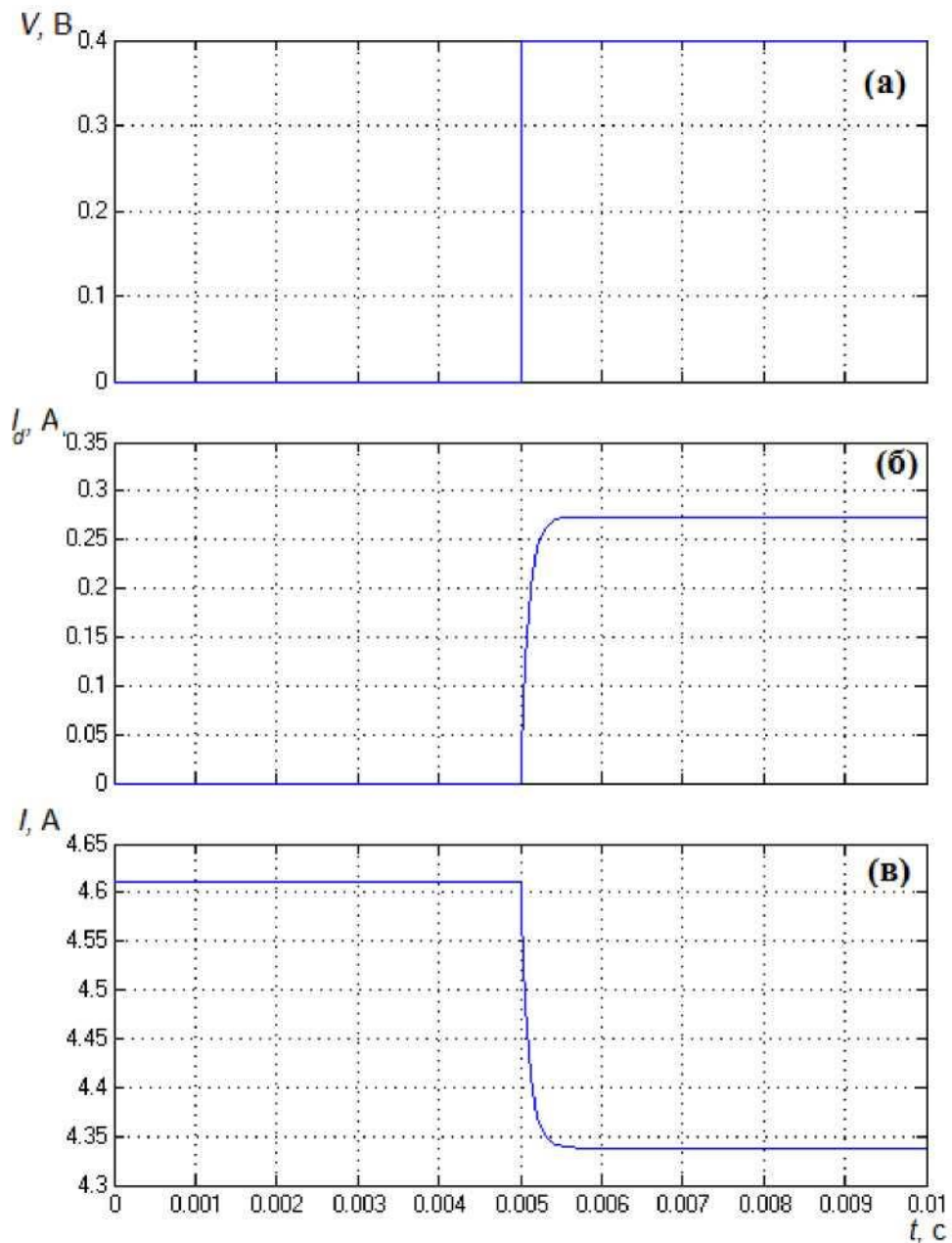


Рисунок 2.9 - Перехідні процеси при ступінчастій зміні напруги: (а) – зміна напруги; (б) – реакція діодного струму; (В) - реакція вихідного струму

### 2.1.2 Моделювання МРРТ-контролера

Комп'ютерна модель контролера заряду з функцією МРРТ, розроблена в середовищі Matlab/Simulink, представлена рис. 2.10.

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

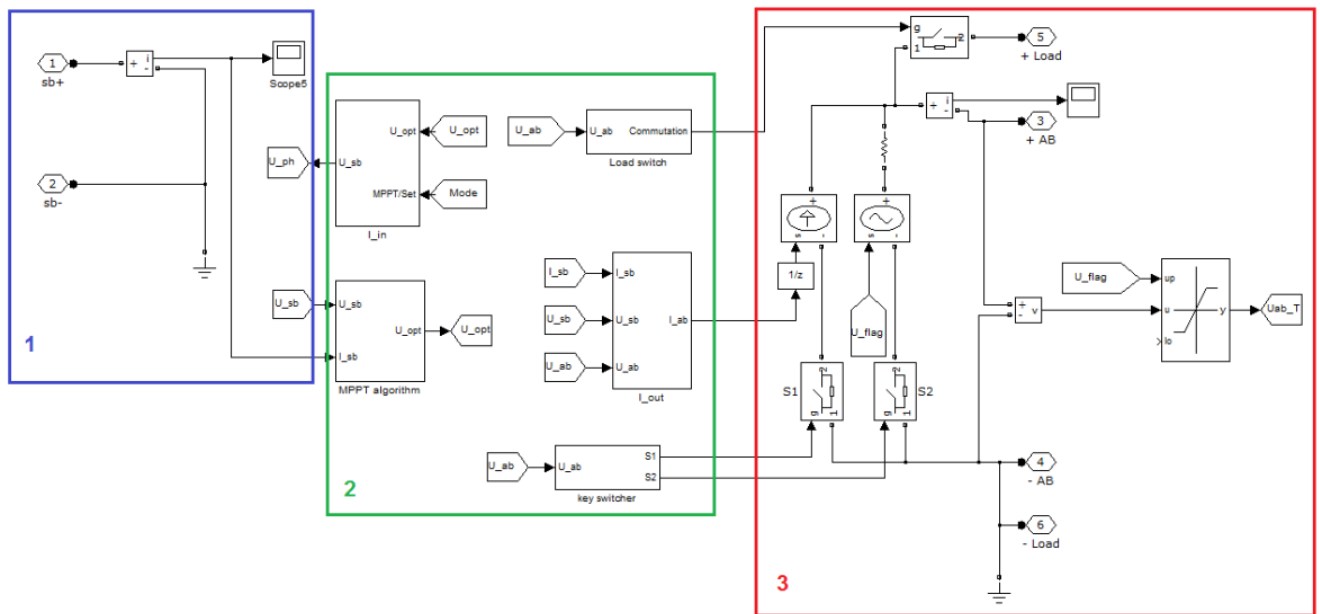


Рисунок 2.10 – Модель контролера заряду

Модель контролера містить шість клем (на рис. 2.10 – шестикутники, пронумеровані від 1 до 6), що забезпечують зв'язок із зовнішніми пристроями. Так, за допомогою клем 1 та 2 до контролера підключаються фотоелектричні модулі. За допомогою клем 3 та 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 вхідну і вихідну схеми. За допомогою вхідної схеми (на рис. 2.10 позначено «1» і виділено синьою рамкою) формується вихідний струм від масиву фотоелектричних модулів. За допомогою вихідної схеми (на рис. 2.10 позначено «3» і виділено червоною рамкою) формується зарядний струм акумулятора та струм живлення навантаження.

Перетворювач має керуючий 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 керування.

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, та режим екстремального

регулювання, з пошуком положення робочої точки, відповідного максимальній потужності.

Модель блоку «I\_in» представлена рис. 2.11.

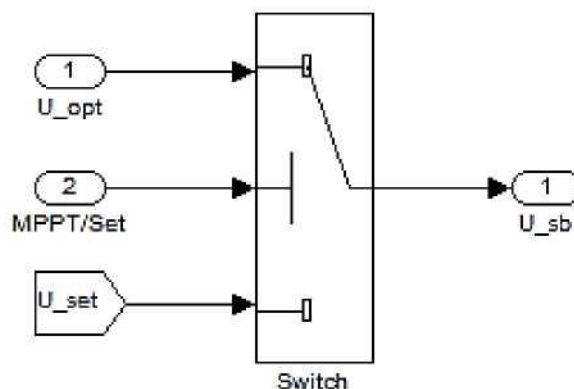


Рисунок 2.11 – Блок «I\_in»

Блок I\_in є перемикачем, що спрацьовує від команди оператора (вхідний сигнал MPPT/Set), при цьому команда MPPT ініціалізує роботу системи в режимі екстремального регулювання потужності, що дозволяє отримувати максимум енергії від масиву фотоелектричних модулів. Команда «Set» ініціалізує режим роботи системи із заданою робочою точкою ВВХ, що не змінюється, 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, що безпосередньо здійснює пошук точки максимальної потужності за алгоритмом ЗТС.

Модель блоку MPPT algorithm наведена на рис. 2.12.

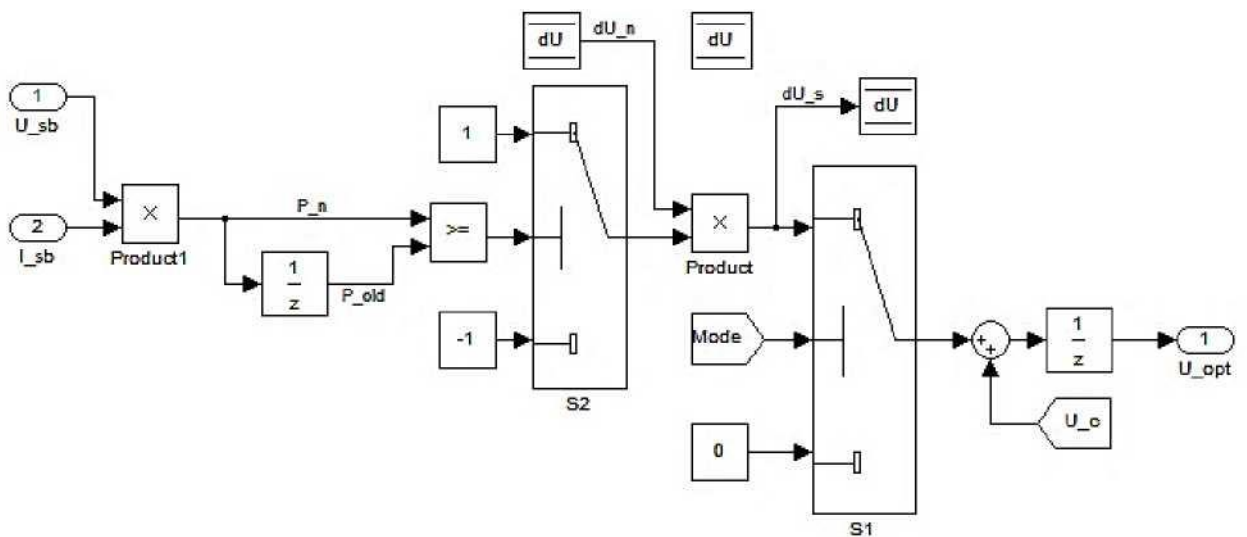


Рисунок 2.12 - Блок "MPPT algorithm"

Як тільки на вхід "Mode" даного блоку приходять сигнал від блоку "I\_in", ініціалізується 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 та зберігає в пам'яті. Порівнюючи значення потужностей  $P_n$  і  $P_{old}$ , блок визначає знак збільшення за напругою фотоелектричного модуля  $i$ , якщо  $P_{old} > P_n$ , перемикач S2 змінює знак збільшення  $dU$ . На вихід блоку подається нове значення для напруги масиву фотоелектричних модулів, наближене до оптимального (що забезпечує максимум потужності).

Блок «I\_out» служить формування струму у вихідний ланцюга імпульсного перетворювача. Модель блоку наведено рис. 2.13.

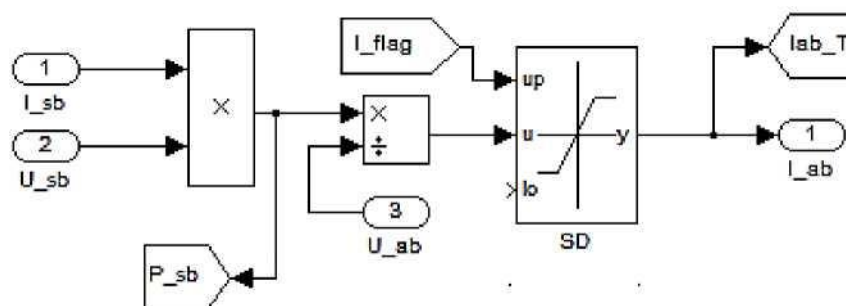


Рисунок 2.13 – Блок «I\_out»

Тут вихідний струм контролера заряду визначається як  $I_{вих} = P_{вих} / U_{вих}$ , де  $U_{вих} = U_{ab}$ ,  $P_{вих} = I_{вх} \cdot U_{вх}$

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

Керуючий пристрій підтримує заряд акумуляторної батареї у двох режимах: заряд максимальним струмом і заряд падаючим струмом. Режим заряду АБ визначається блоком «Key Switcher», представленим на рис. 2.14.

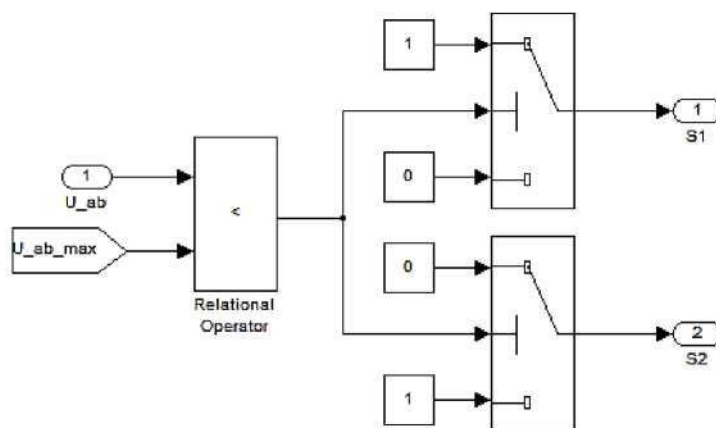


Рисунок 2.14 - Блок "Key Switcher"

Якщо напруга акумулятора нижче максимально допустимого рівня, 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" (див. Рисунок 2.10) відповідно. Внаслідок цього живлення акумулятора від джерела максимального струму.

Якщо напруга на акумуляторі досягла максимального рівня, сигнали на виході блоку «Key Switcher» змінюються, що, у свою чергу, призводить до включення джерела струму у вихідний ланцюга.

На рис. 2.15 наведено модель блоку "Load Switch", що відповідає за комутацію навантаження.

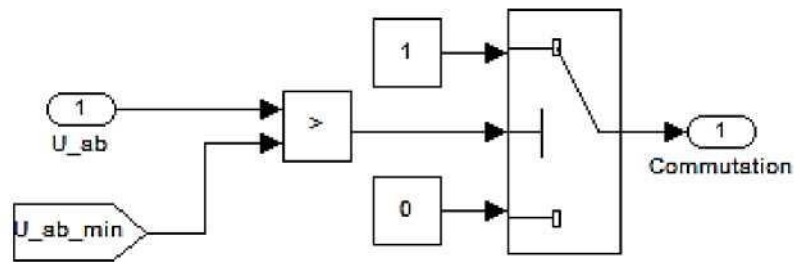


Рисунок 2.15 - Блок "Load Switch"

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 до робочого діапазону, блок проводить 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 з напругою, що змінюється, на вхідному ланцюзі імпульсного перетворювача для пошуку точки максимальної потужності (MPPT-режим або режим екстремального регулювання).
- Керує зарядом акумуляторів: підтримує режими максимального та падаючого струму.

Включає та вимикає навантаження з метою запобігання глибокому розряду акумуляторів.

## 2.2 Модель акумуляторної батареї

Як модель акумулятора, можна використовувати елемент «Battery» зі стандартної бібліотеки Simulink/SimPowerSystems.

Зображення елемента та його параметри наведено на рис. 2.16.

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

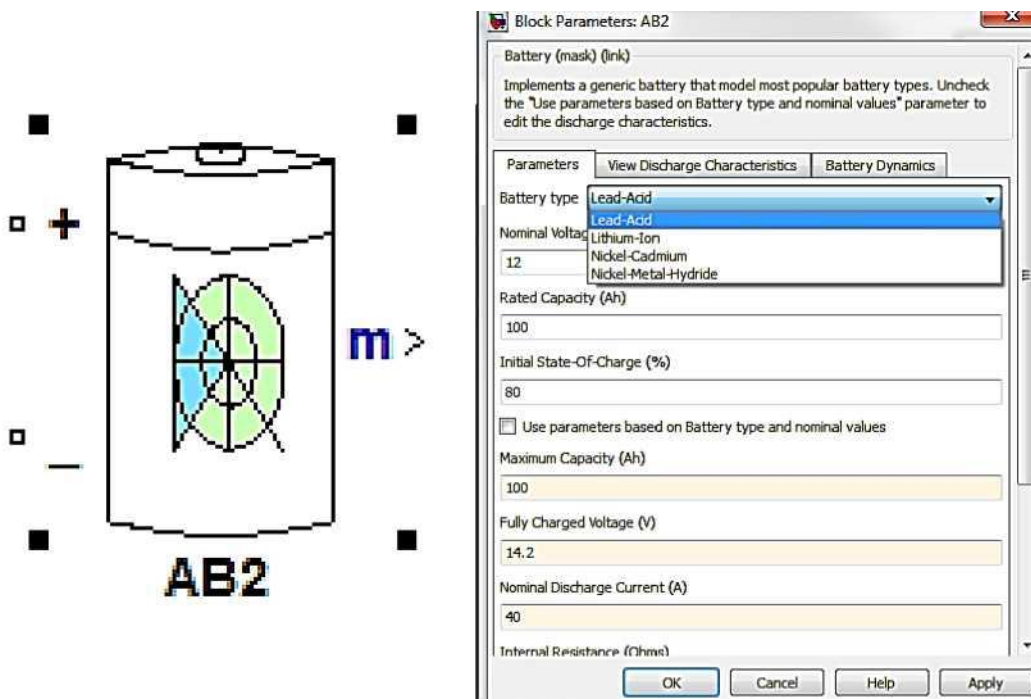


Рисунок 2.16 - Зображення елемента «Battery» та його параметри

### 2.3 Моделювання навантаження

Для розробки адекватної моделі навантаження необхідно визначитись із базою електротехнічних засобів, що входять у навантаження. Наприклад, фотоелектрична установка має забезпечувати 3 кВт·год/добу електроенергії для приватного будинку. Задаючись відомою потужністю побутових приладів та 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	Кількість	Усього	Час роботи, год/тиж.	Вт·год/тиж.
Ноутбук	100	1	100	21	2100
Телевізор	100	1	100	28	2800
мікрохвильва піч	400	1	400	1,05	420
Роутер	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



Відповідно до таблиці 2.1, потреба у електриці становить 21000 Вт·год/тиж. або 3000 Вт·год/доб.

На рис. 2.17 наведено модель навантаження, що включає типові навантаження, представлену в таблиці 2.1.

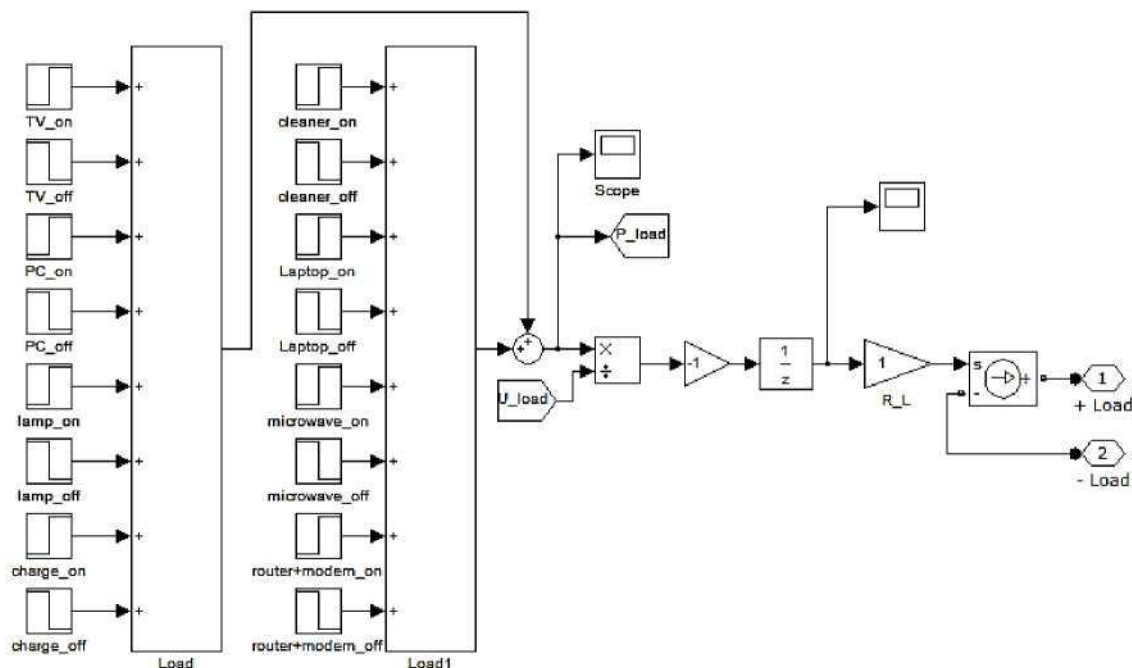


Рисунок 2.17 - Модель навантаження

Результати моделювання як діаграми добового споживання потужності представлені рис. 2.18.

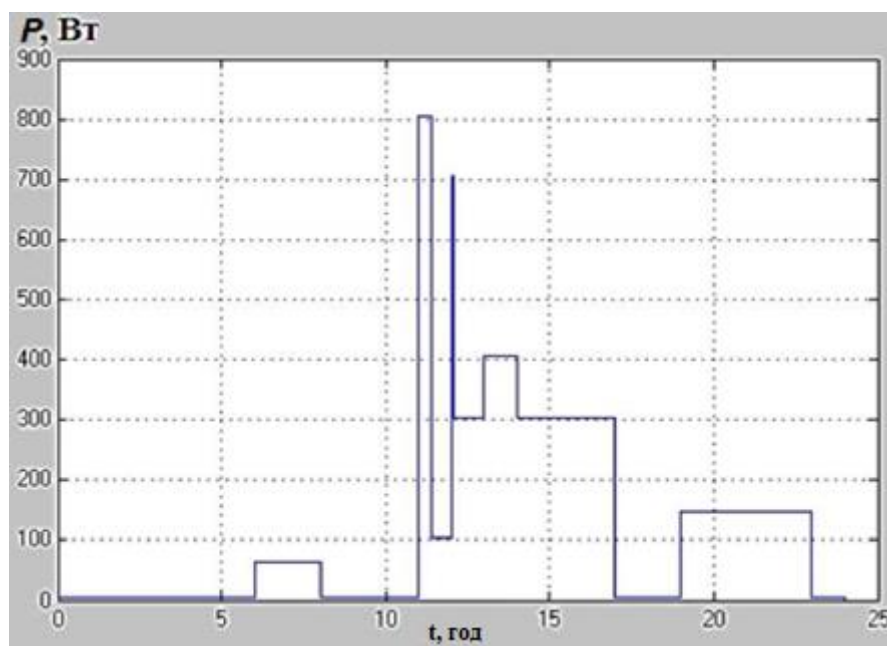


Рисунок 2.18 – Часова діаграма споживання потужності

Діаграма добового споживання потужності повністю відповідає модельованим умовам, наведеним у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Добове споживання потужності

Навантаження	Потужність, Вт	Кількість, шт.	Усього, Вт	Час роботи, год/сут.	Споживання, Вт^год/сут.
Ноутбук	100	1	100	3	300
Телевізор	100	1	100	4	400
СВЧ 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
Порохотяг	700	1	700	0,4	280
ПК	200	1	200	5	1000

## 2.4 Модель фотоелектричної установки

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

На рис. 2.19 наведено комп'ютерну модель сонячної фотоелектричної устави, складеної з розроблених моделей.

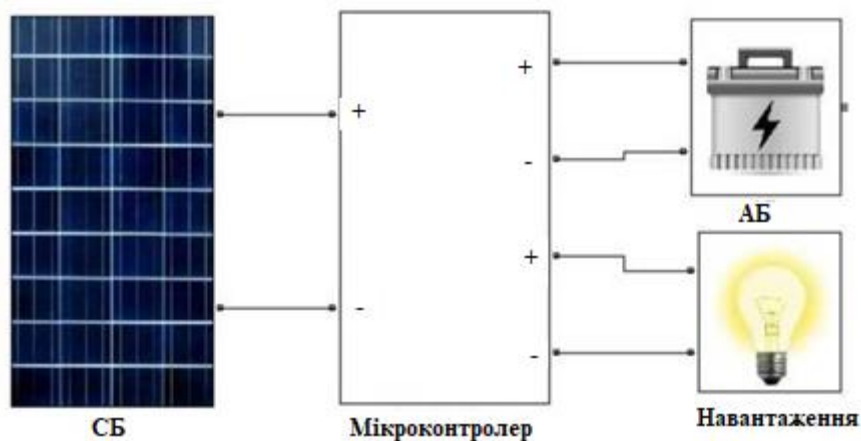


Рисунок 2.19 - Модель фотоелектричної установки

На основі розробленої моделі можна здійснювати комп'ютерне моделювання процесів у фотоелектричній установці за різних умов навколишнього середовища, різноманітних конфігураціях обладнання та отримувати необхідну інформацію про функціонування системи [16].

Тестування моделі проведено за наступними параметрами системи:

- фотоелектричний модуль: напруга холостого ходу  $U_{xx} = 36,8$  В, струм короткого замикання  $I_{К.З.} = 8,99$  А, максимальна потужність, що генерується  $P_{max} = 250$  Вт;
- акумуляторна батарея: ємність  $C_{ab} = 200$  А·год; номінальна напруга  $U_{ab} = 12$  В; максимальна напруга  $U_{ab\_max} = 14,2$  В;
- потужність, споживана навантаженням, змінюється протягом доби за наведеним графіком рис. 2.16;
- освітленість фотоелектричних модулів змінюється протягом доби за наведеним графіком на рис. 2.20.

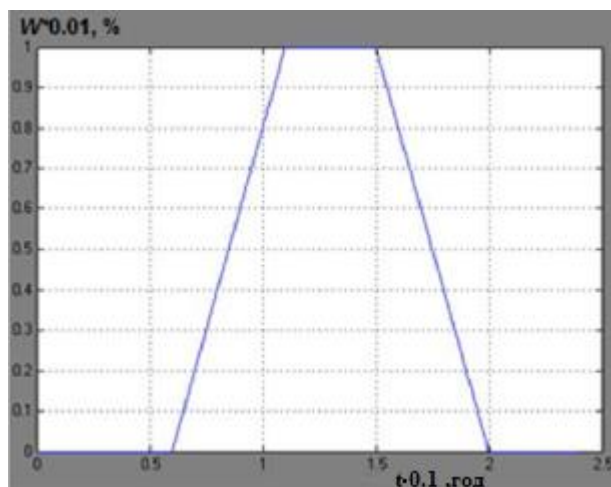


Рисунок 2.20 – Зміна рівня освітленості протягом доби

Результати тестування моделі представлені 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 та 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 та отримання оптимальної пари струм + напруга. У другому випадку контролер підтримує задану напругу. Результати моделювання представлені рис. 2.22. На рис. 2.22 очевидна недовироблення потужності у разі регулювання за заданою напругою (зелений графік). Застосування МРРТ-режиму (синій графік) збільшує енергетичну ефективність приблизно на 12 %, тому що площа під синім графіком дорівнює 2250 Вт·год, площа під зеленим графіком дорівнює 1965 Вт · год.

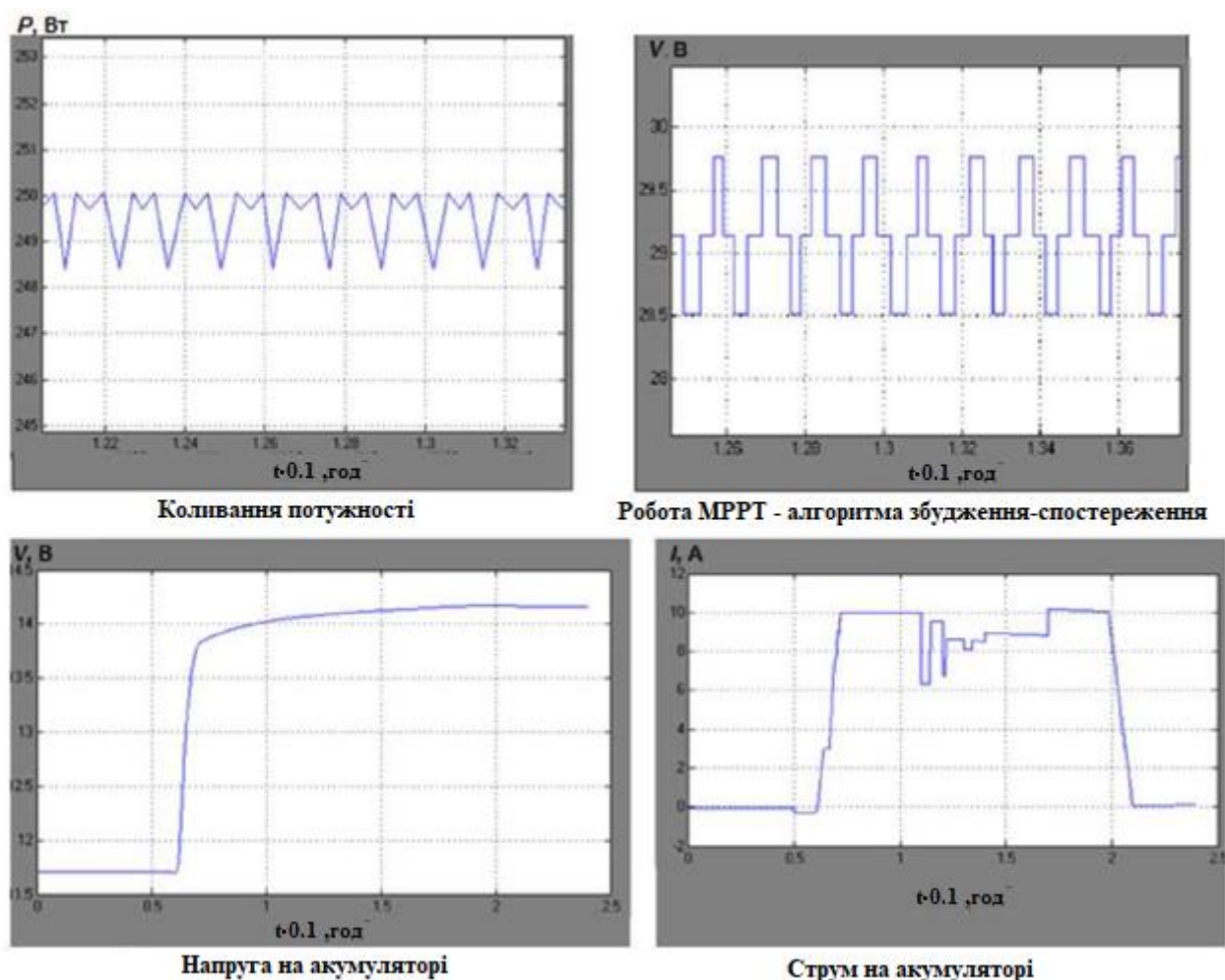


Рисунок 2.21 – Результати моделювання

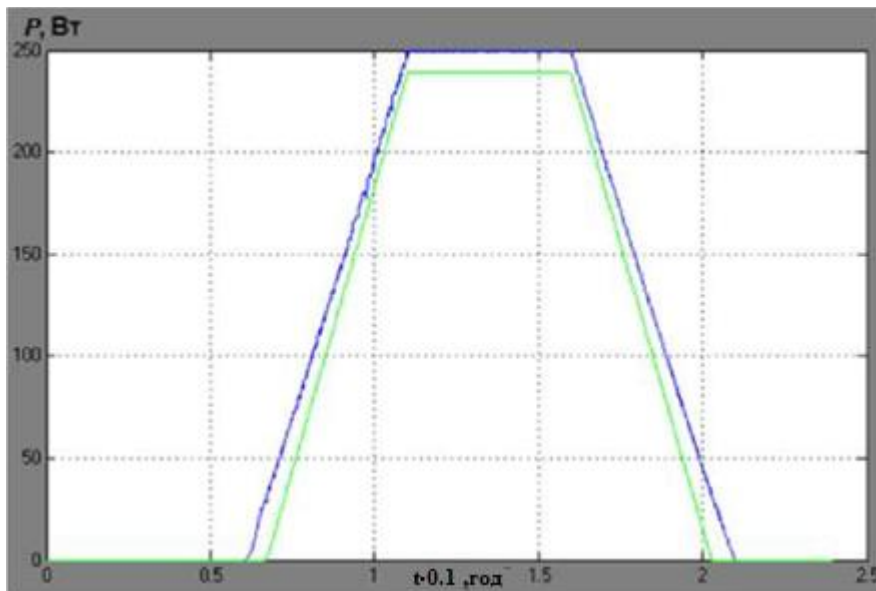


Рисунок 2.22 – До оцінки ефективності МРРТ-режиму

## 2.5 Висновки до розділу

Розроблено математичні моделі основних елементів фотоелектричних систем: модель фотоелектричного модуля, модель контролера заряду, що мають високий рівень достовірності та універсальності.

В середовищі MATLAB/Simulink створена бібліотека елементів фотоелектричних систем, що включає моделі сонячної панелі, керуючого пристрою, навантаження. Розроблена бібліотека дозволяє створювати моделі фотоелектричних систем різних конфігурацій та досліджувати їхню роботу за різних зовнішніх умов.

### 3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Моделювання фотоелектричної системи з різними адаптивними алгоритмами екстремального регулювання

Додатково збільшити енергетичну ефективність від МРРТ-режиму регулювання можна шляхом покращення алгоритму ЗТС 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 керування пропонується використовувати такі спеціальні установки моделі: постійну освітленість, постійну температуру, скорочений час моделювання, відключене навантаження. Такі параметри моделі забезпечать зручне уявлення про роботу досліджуваних алгоритмів та наочність їх порівняльних характеристик.

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

- 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/м<sup>2</sup>, кут падіння променів  $\alpha = 90^0$ ;
- крок пошукового алгоритму  $0,35$ ;
- навантаження споживачів відключено;
- фотоелектричний модуль заряджає акумулятор із номінальною напругою  $U_{ab} = 12$  В, розряджений до  $80$  %.
- 

##### 3.1.1 Модель системи з алгоритмом із перенастроюванням пошукового кроку

На основі математичної моделі алгоритму ЗТС з перенастроюванням пошукового кроку можна вдосконалити розроблену в розд. 2.1.2 структуру керуючого пристрою - блок МРРТ-algorithm (див. Рисунок 2.12). Комп'ютерну модель покращеного пристрою з адаптивним алгоритмом наведено на рис. 3.1.

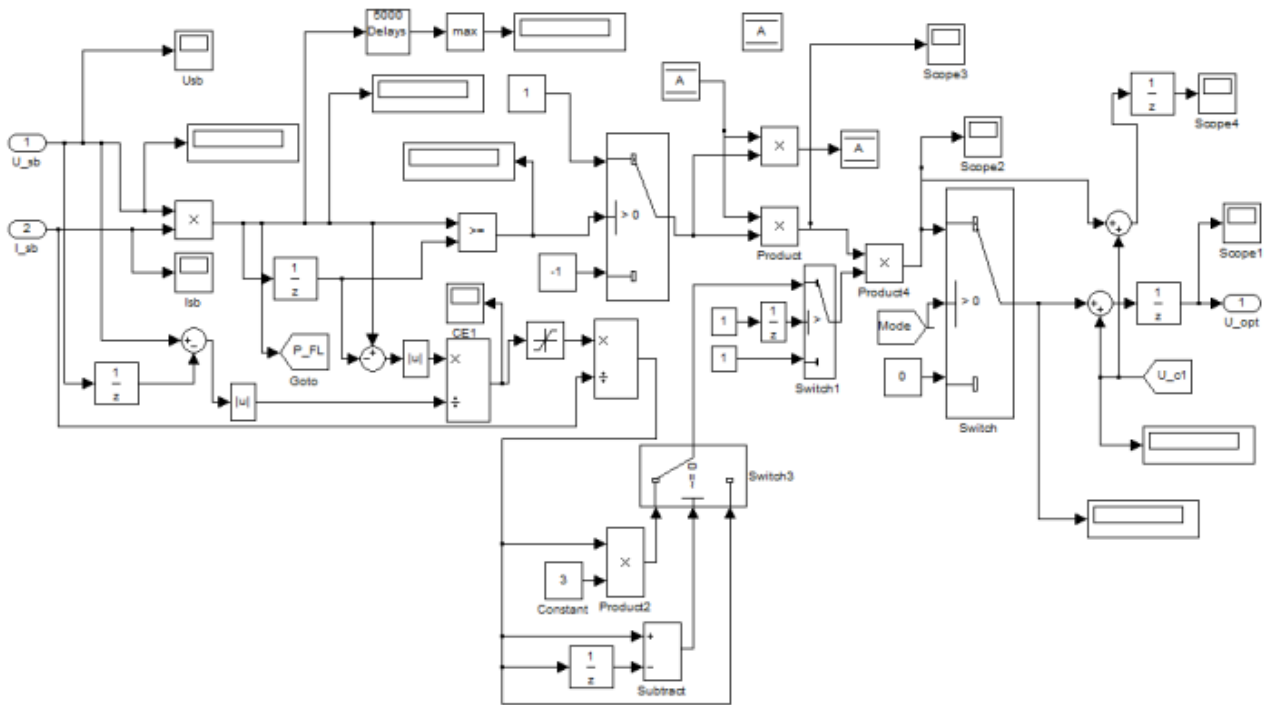


Рисунок 3.1 – Блок «MPPT-algorithm» з перенастроюванням пошукового кроку

Тут виконується розрахунок поправочного коефіцієнта, що враховує швидкість зміни потужності та позицію робочої точки на ВВХ.

Після проведення порівняльного моделювання двох систем: зі звичайним алгоритмом ЗТС та алгоритмом з переналаштуванням кроку - отримано наведені на рис. 3.2 результати.

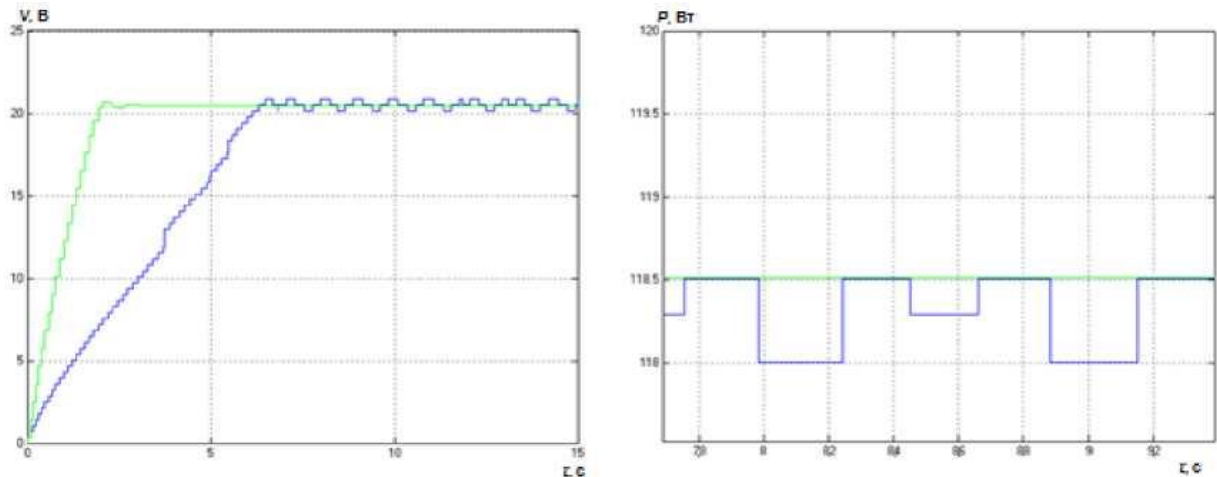


Рисунок 3.2 – Робота алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (синій – звичайний алгоритм ЗТС, зелений – алгоритм ЗТС з перенастроюванням пошукового кроку)

Як видно з рисунку 3.2, використання адаптивного алгоритму дозволяє зменшити час пошуку точки максимальної потужності та нейтралізувати коливання потужності під час роботи алгоритму в екстремумі ВВХ.

Робота алгоритму з перенастроюванням пошукового кроку залежить від розміру вихідного кроку. На рис. 3.3 наводиться порівняльний графік алгоритму з перенастроюванням пошукового кроку при різних значеннях вихідного кроку.

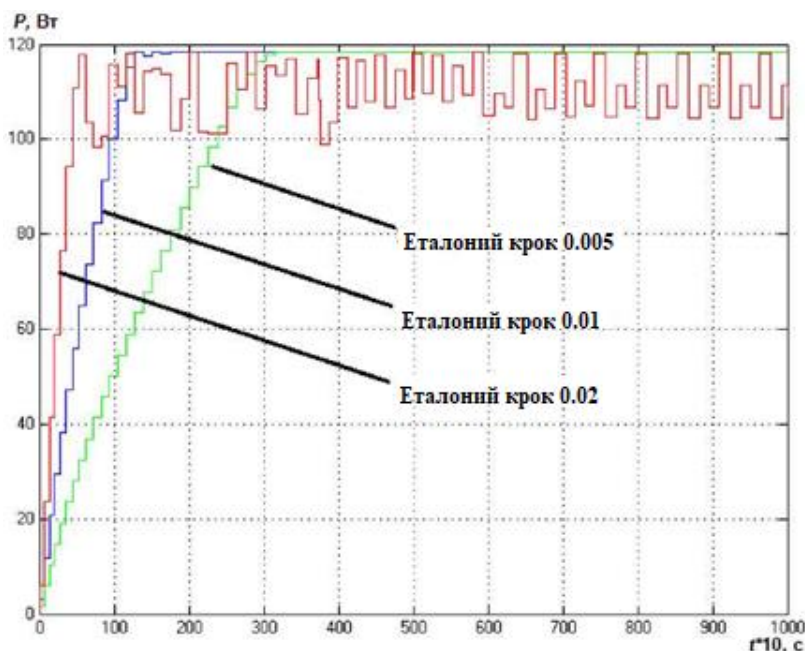


Рисунок 3.3 - Графіки роботи алгоритму ЗТС з перенастроюванням пошукового кроку при різних значеннях вихідного кроку

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 дійти невтішного висновку, що з фотоелектричних систем певної конфігурації існує певний оптимальний еталонний крок, який би кращі показники.

### 3.1.2 Модель системи з алгоритмом з передбачуваною адаптацією

Для реалізації алгоритму з передбачуваною адаптацією використовуються: попередній розрахунок ВВХ на моделі, що дозволяє ініціалізувати робочу точку алгоритму в безпосередній близькості від максимальної потужності, з точністю до похибки моделювання.



На рис. 3.5 наведена структура блоку MPPT-algorithm з передбачуваною адаптацією.

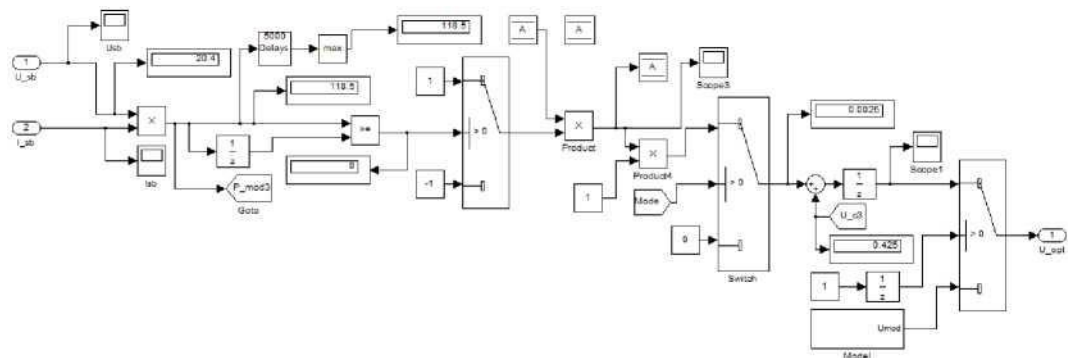


Рисунок 3.5 - Блок "MPPT-algorithm" з передбачуваною адаптацією

Додатковий елемент «Model» включає математичну модель для отримання стартової позиції робочої точки на ВВХ, що відповідає точці максимальної потужності прогностичної моделі.

Результати порівняльного моделювання алгоритму з передбачуваною адаптацією та звичайного алгоритму ЗТС наведено на рис. 3.6.

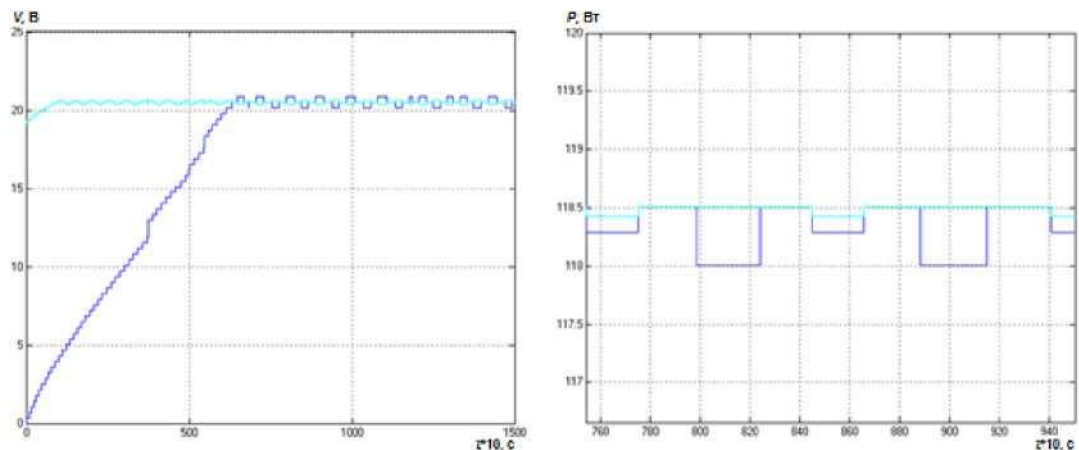


Рисунок 3.6 - Робота алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (синій - звичайний алгоритм ЗТС, бірюзовий - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією)

З представлених графіків видно, що визначення стартової позиції для робочої точки алгоритму за допомогою прогнозованої адаптації дозволяє мінімізувати час пошуку точки максимальної потужності, а також використовувати в алгоритмі ЗТС менший за розміром крок, що значно зменшує коливання потужності.

### 3.1.3 Модель системи з алгоритмом з налаштуванням нечітким регулятором

На основі інформації про нечітке регулювання можливе створення комп'ютерної моделі керуючого пристрою фотоелектричної системи, що підтримує режим екстремального регулювання потужності з налаштуванням нечітким регулятором. Структурна схема такого блоку наведена рис. 3.7.

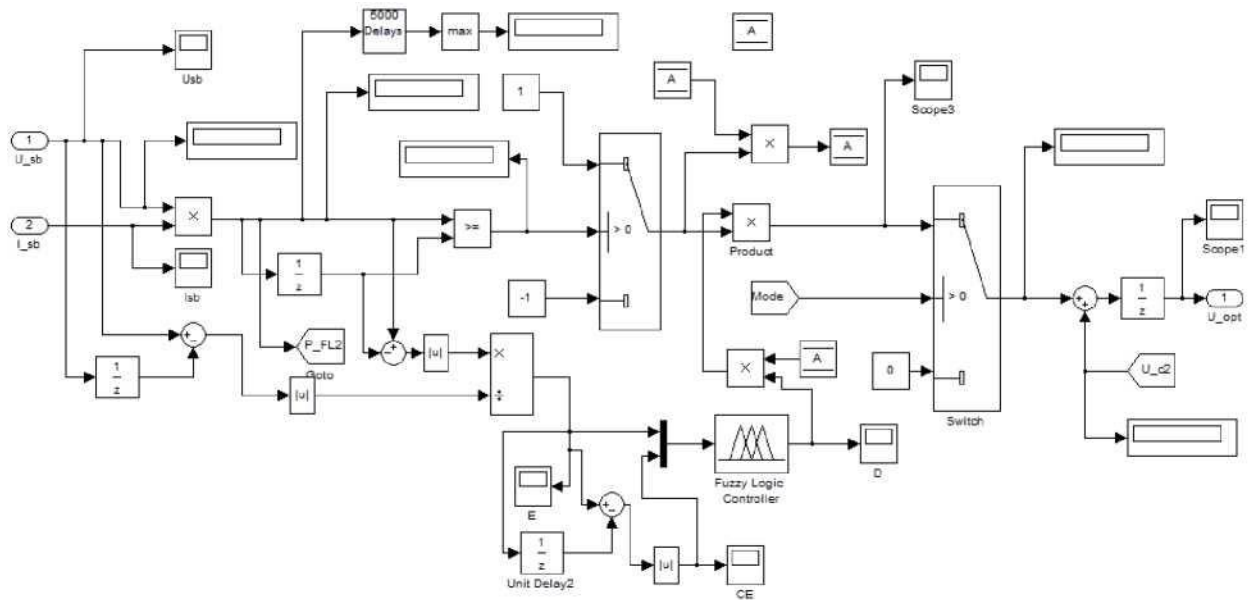


Рисунок 3.7 - Блок "MPPT-algorithm" з налаштуванням нечітким регулятором

У представленому блоці MPPT-algorithm з налаштуванням нечітким регулятором здійснюється переналаштування кроку алгоритму ЗТС 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  $CE$ , відповідно визначені за формулами:

$$E(k) = \frac{P_{SB}(k) - P_{SB}(k-1)}{U_{sb}(k) - U_{sb}(k-1)}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1). \quad (3.1)$$

Вихідний сигнал блоку FLC - змінна  $D$  - визначає оптимальний за поточних умов розмір кроку. Залежність вихідної величини від вхідних змінних визначається налаштуваннями блоку FLC: набором нечітких правил та функціями приладдя.

Структура блоку FLC включає дві вхідні перемінні і одну вихідну

перменную, що описуються відповідними функціями приналежності, і навіть набір нечітких правил, регулюючий логіку нечіткого контролера.

З використанням наведеної вище комп'ютерної моделі отримано порівняльні результати моделювання, наведені на рис. 3.8.

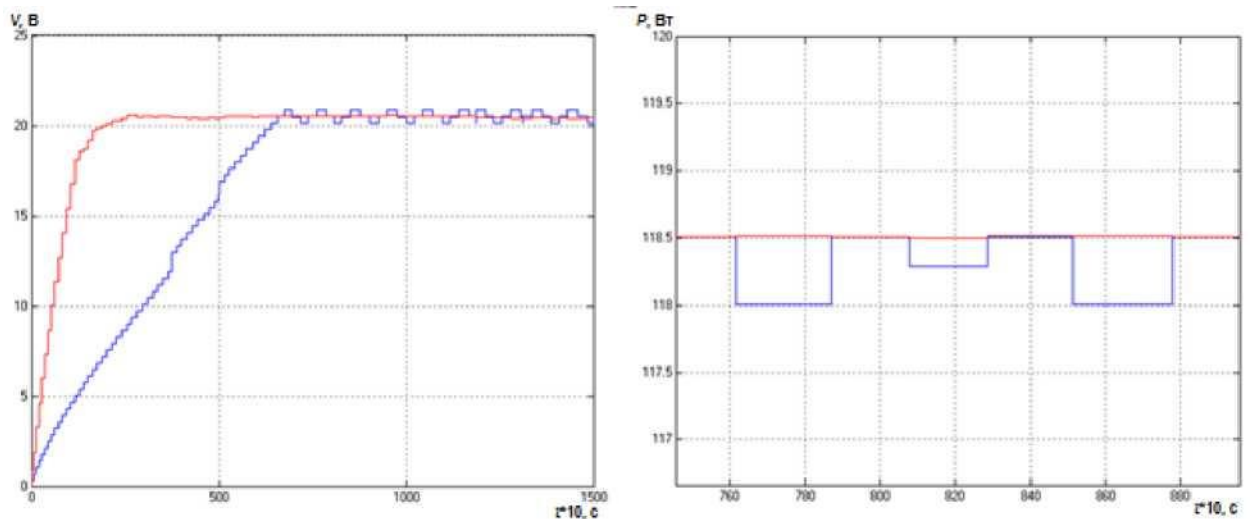


Рисунок 3.8 – Робота алгоритмів пошуку точки максимальної потужності (синій – звичайний алгоритм ЗТС, червоний – алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором)

Як видно з графіків, адаптація алгоритму ЗТС за допомогою нечіткого регулювання значно збільшує швидкість пошуку оптимальної робочої точки, а також нейтралізує коливання потужності під час роботи в екстремумі ВВХ.

Дослідження роботи алгоритму ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором показало залежність швидкості пошуку точки максимальної потужності від початкового розміру кроку, що представлено рис. 3.9.

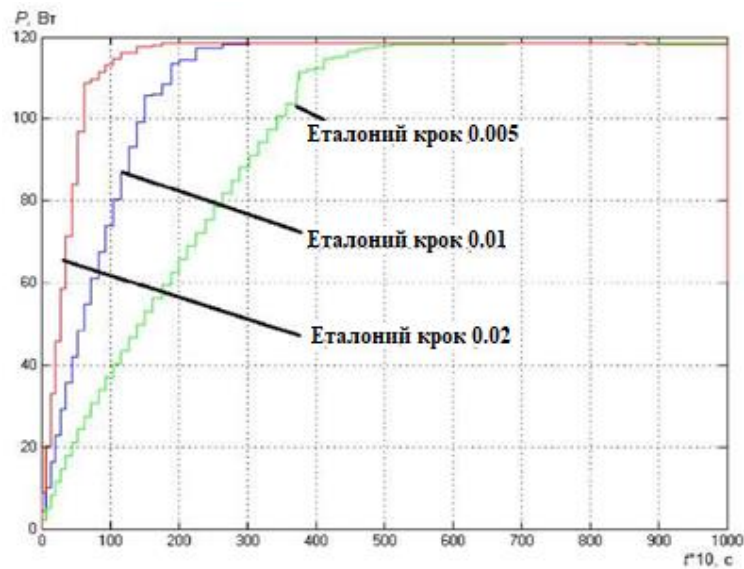


Рисунок 3.9 - Графіки роботи алгоритму ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором за різних значень коефіцієнта початкового кроку

На відміну від алгоритму з перенастроюванням пошукового кроку, алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором не втрачає стійкість до коливань потужності, що робить його більш надійним у плані налаштування та дозволяє підібрати більший за розміром крок, оптимізуючи швидкість виходу на робочу точку.

Для заданих умов моделювання: фотоелектричний модуль з напругою холостого ходу  $U_{xx} = 24$  В та струмом короткого замикання  $I_{к.з} = 6,14$  А; нормальні умови: температура  $25$  °С, рівень сонячної інсоляції  $Q = 900-1000$  кВт/м<sup>2</sup>, кут падіння променів  $\alpha = 90$ ; навантаження споживачів відключено; сонячна батарея заряджає акумулятор із номінальною напругою  $U_{ab} = 12$  В, розряджений до 80%; отримані наступні експертні оцінки: діапазон регулювання напруги 12-31,5 В, допустимі розміри кроку: 0,03-1 В.

На рис. 3.10 представлено сімейство графіків роботи пошукових алгоритмів, що включає роботу покращеного алгоритму з нечітким регулятором.

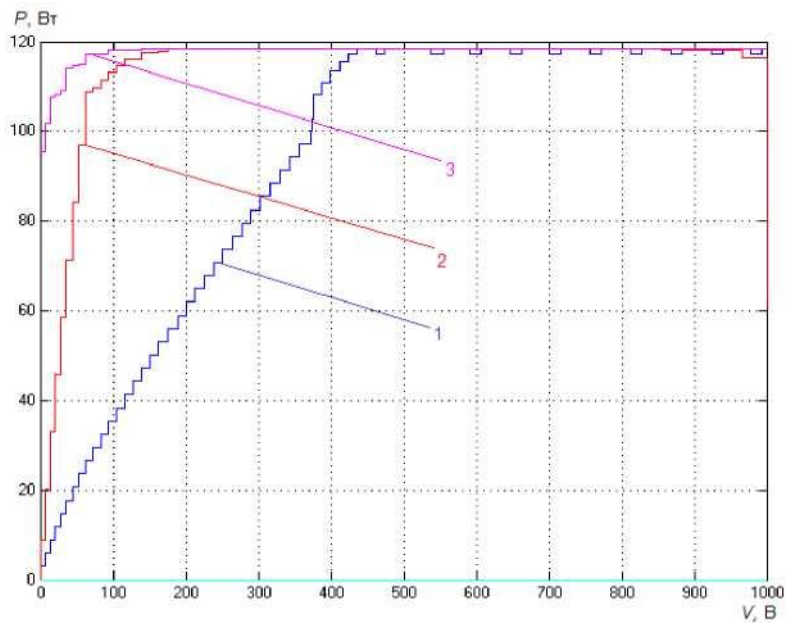


Рисунок 3.10 - Графік роботи алгоритму ЗТС (1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 3 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором)

Виходячи з представлених на рис. 3.10 графіків, можна зробити висновок, що покращене налаштування нечіткого регулятора підвищує ефективність роботи такого алгоритму: скорочується час пошуку, збільшується кількість енергії, що виробляється.

### 3.2 Порівняльний аналіз розроблених адаптивних алгоритмів

Для порівняльної оцінки розроблених алгоритмів керування процесом енергоперетворення у фотоелектричній системі слід розглянути ідентичні за своїми налаштуваннями та властивостями системи, поміщені в однакові умови. Для більшої наочності можна прийняти такі 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 як графіків роботи алгоритмів. На рис. 3.11 наведено зведені графіки струмів під час роботи екстремальних регуляторів; на рис. 3.12 наведено графіки підстроювання напруги за запропонованими алгоритмами, на рис. 3.13 - графіки пошуку точки максимальної потужності за запропонованими алгоритмами, на рис. 3.14

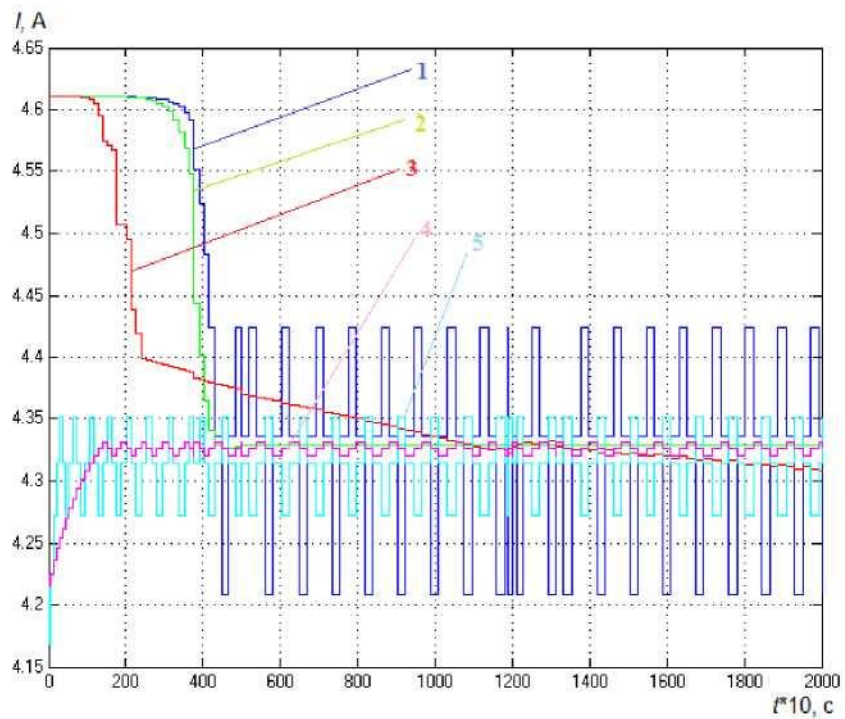


Рисунок 3.11 - Графіки струмів на ФМ при роботі екстремальних регуляторів: 1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з перенастроюванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

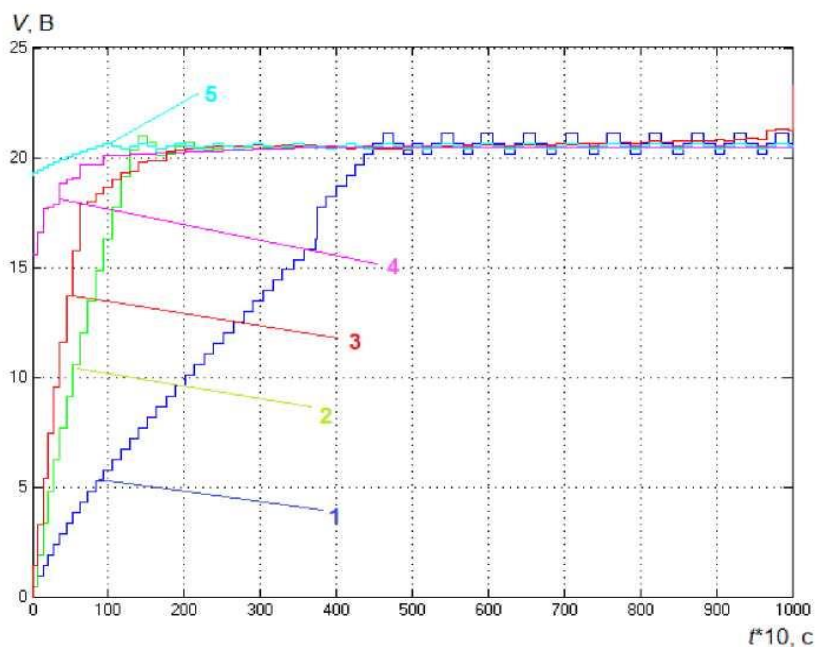


Рисунок 3.12 - Графіки пошуку оптимальної напруги: 1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з переналаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

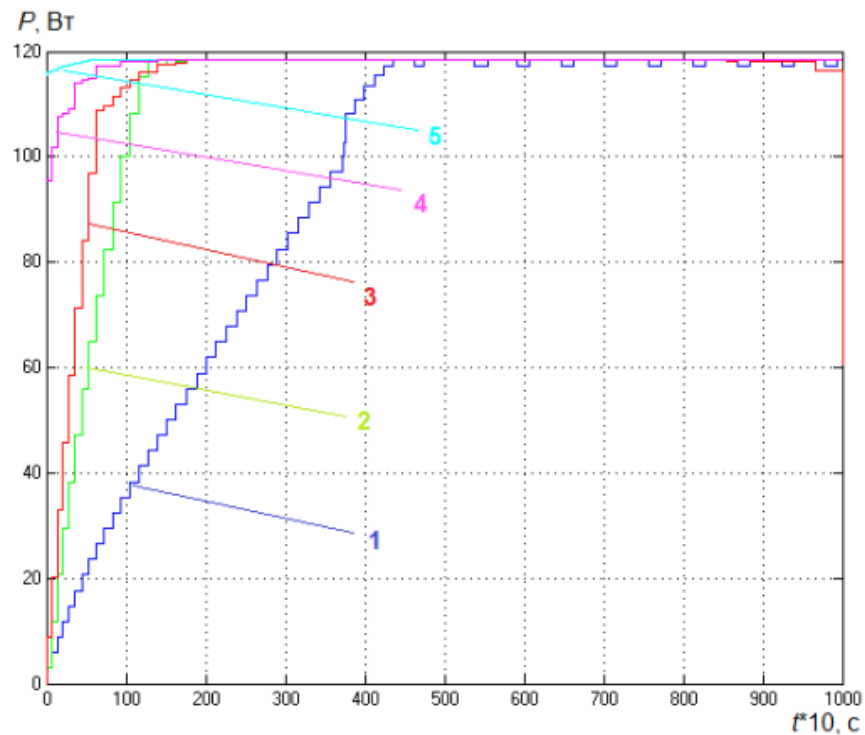


Рисунок 3.13 – Графіки пошуку точки максимальної потужності: 1 – звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з переналаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечіткимрегулятором,4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритмЗТС з передбачуваною адаптацією

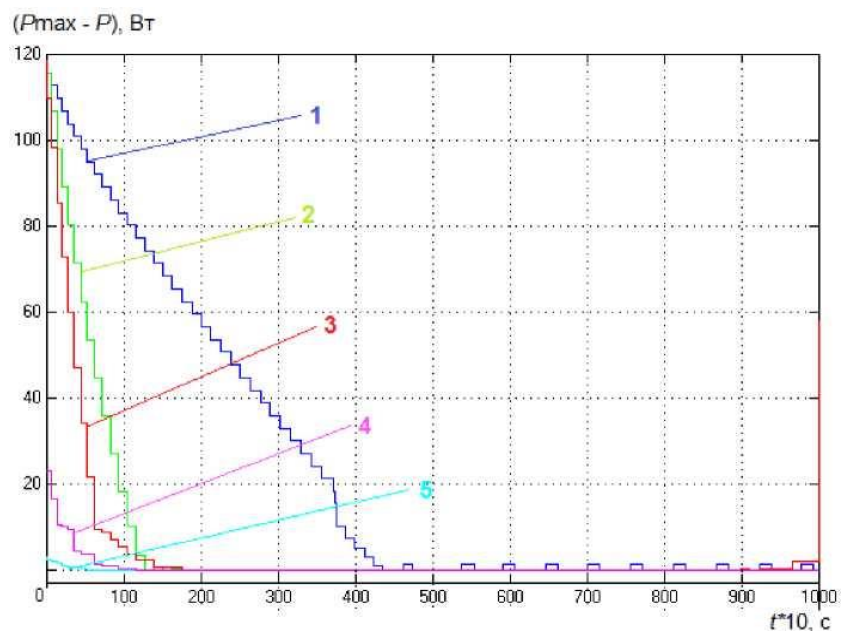


Рисунок 3.14 - Графіки процесів керування помилкою пошуку: 1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з переналаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором,4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

Як видно з представлених графіків, всі адаптивні алгоритми показують кращі результати, ніж звичайний алгоритм ЗТС: значно знижується час пошуку і зменшуються флуктуації напруги близько оптимального значення. На рис. 3.11 помітно скорочення коливань струму при застосуванні адаптивних алгоритмів. Самі адаптивні алгоритми дають різні результати:

- алгоритм з перенастроюванням пошукового кроку забезпечує час виходу на точку максимальної потужності  $\sim 20$  с. модельного часу та забезпечує нейтралізацію коливань потужності;
- алгоритм з прогнозованою адаптацією забезпечує час виходу на точку максимальної потужності  $\sim 5$  с. модельного часу і забезпечує зменшення амплітуди коливань потужності значення 0,2 -0,5 до значення 0,1 Вт;
- алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором забезпечує час виходу на точку максимальної потужності  $\sim 20$  с. модельного часу та забезпечує нейтралізацію коливань потужності.
- покращений алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором забезпечує час виходу на точку максимальної потужності  $\sim 10$  с. модельного часу та забезпечує нейтралізацію коливань потужності.

Виходячи з вищевикладеного, можна помітити, що алгоритм з переналаштуванням кроку та алгоритм з нечітким регулятором забезпечують схожу якість керування, проте за зведеним графіком (рисунок 3.13) видно, що алгоритм з нечітким регулятором забезпечує велике вироблення енергії (площа під червоним графіком більша за площу під зеленим) ).

Алгоритм із прогнозованою адаптацією забезпечує найшвидший пошук точки максимальної потужності, проте зберігає невеликі флуктуації потужності у цій точці. У цьому рис. 3.13 можна побачити, що площа під бірюзовим графіком найбільша, тобто. саме цей алгоритм дає змогу відібрати максимум енергії.

Для повноти порівняльної оцінки зведемо отримані дані до таблиці та доповнимо їх загальною інформацією про алгоритми.

Виходячи з викладеної в таблиці інформації, можна дійти невтішного висновку, що вибір адаптивного алгоритму може бути здійснено виходячи з вимог до системи. У разі вимоги до найбільшого вироблення енергії слід вибирати



алгоритм із еталонною моделлю. У випадку, якщо система економічна: має невелику обчислювальну потужність, відсутні датчики температури, вологості, - найкращим рішенням буде застосування адаптації з перенастроюванням пошукового кроку. Алгоритм з нечітким регулюванням є оптимальним при виборі системи з усередненими характеристиками.

Таблиця 3.1 - Переваги та недоліки адаптивних алгоритмів

Назва алгоритму	Переваги	Недоліки
Алгоритм із перенастроюванням пошукового кроку	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Нейтралізація коливань потужності</li> <li>2. Зменшення часу регулювання</li> <li>3. Потребує мінімум обчислювальних потужностей</li> <li>4. Простота реалізації</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Немає підстроювання до різкої зміни зовнішніх умов</li> <li>2. Залежність від розміру пошукового кроку</li> </ol>
Алгоритм із еталонною моделлю	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Підстроювання еталонної моделі до зміни зовнішніх умов</li> <li>2. Зменшення коливань потужності</li> <li>3. Найменший час регулювання</li> <li>4. Найбільше вироблення енергії</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вимагає наявності додаткового обладнання (датчики температури, вологості та ін.)</li> <li>2. Вимагає більше обчислювальних потужностей</li> <li>3. Складність реалізації</li> </ol>
Алгоритм з нечітким регулюванням	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Можливість підстроювання під зміни зовнішніх умов</li> <li>2. Нейтралізація коливань потужності</li> <li>3. Зменшення часу регулювання</li> </ol>	

Оцінка якості керування при застосуванні розроблених алгоритмів проводиться за першим та другим інтегральними критеріями:

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

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

Показники якості наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Оцінки якості керування

Назва алгоритму	$I_1$	$I_2$	$T_n, c$
ЗТС	12850	632000	45
З передбачуваною адаптацією	7,896	1,2	5
З перенастроюванням 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 дійти невтішного висновку, що застосування адаптивних алгоритмів значно поліпшує якість керування.

Далі розглядається робота алгоритмів при виникненні збурень за температурою, освітленістю та комбінацією цих впливів.

Вказано такі 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  $30^\circ$  С, рівень сонячної інсоляції

$Q=750$  кВт/м<sup>2</sup>, кут падіння променів  $\alpha = 90$ ;

- крок пошукового алгоритму 0.5;
- навантаження споживачів відключено;
- сонячна батарея заряджає акумулятор з номінальною напругою

$U_{ab}=12$  В, розряджений до 80%;

- час моделювання  $t = 400$  с.

1. При температурному збудженні від 30 до 20 ° С на момент часу 120 с. отримано сімейство графіків пошукових алгоритмів, наведене на рис.3.15

При збільшеному масштабі біля точки збудження можна оцінити швидкість виходу алгоритму на екстремум потужності, що наведено рис. 3.16.

На рис. 3.16 видно, що швидкість виходу на точку екстремуму після збудження є різною для запропонованих алгоритмів, ця оцінка зведена в таблиці 3.3.

Збільшуючи масштаб в області процесів пошуку екстремуму, що встановилися, можна оцінити амплітуду коливань потужності, що наведено на рис. 3.17.

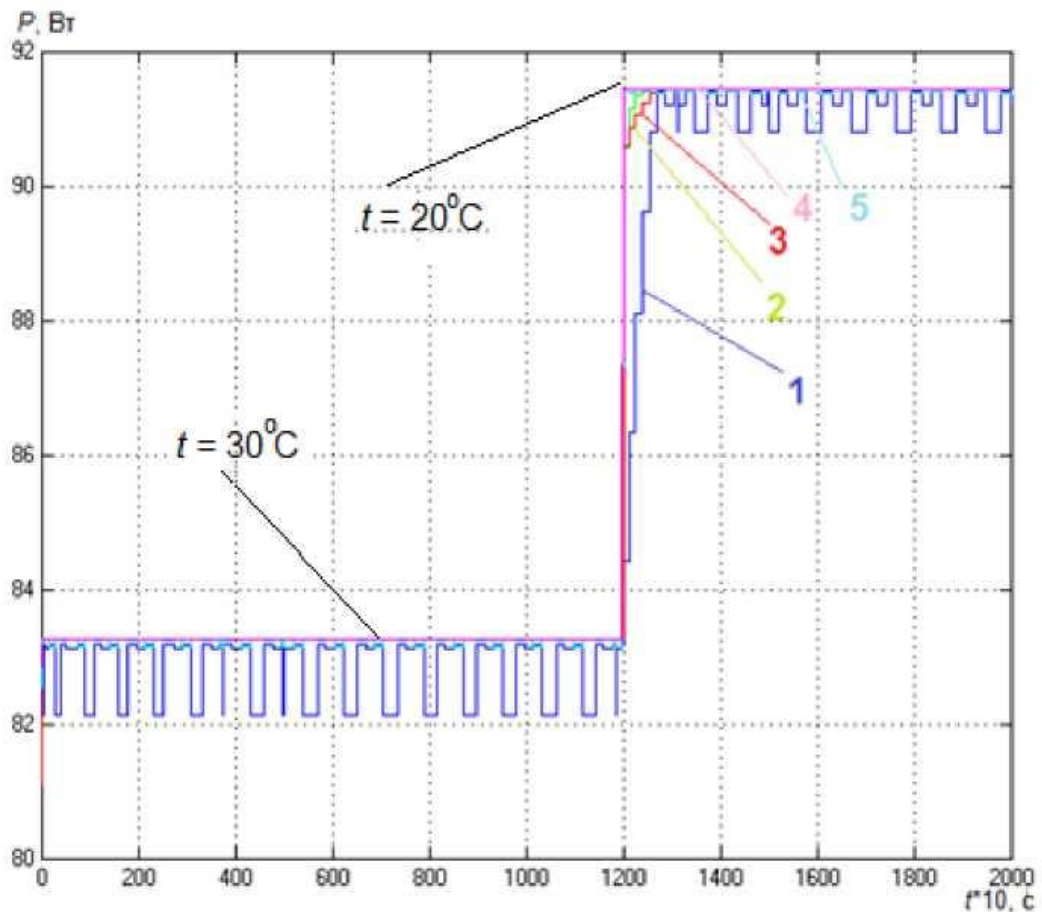


Рисунок 3.15 - Графіки пошуку точки максимальної потужності: 1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з переналаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

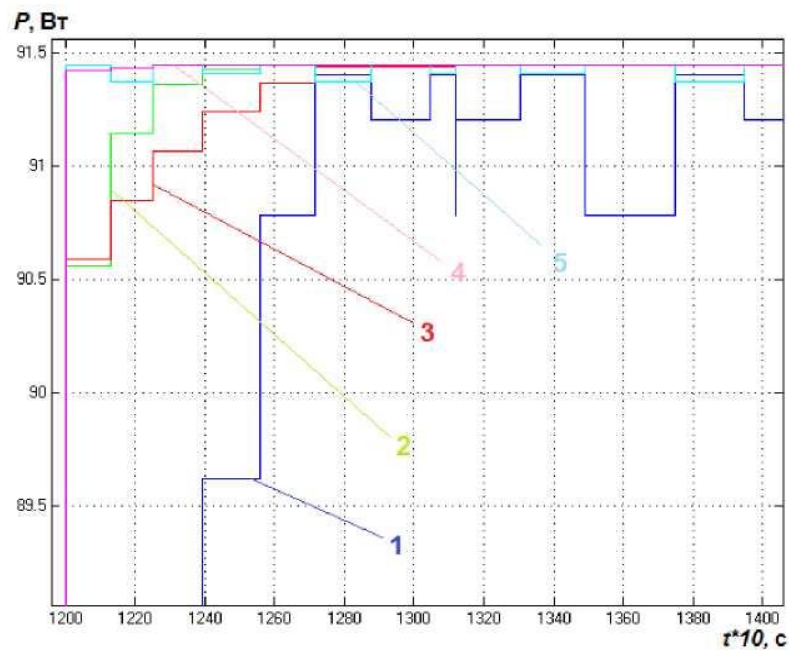


Рисунок 3.16 – Робота алгоритмів після збудження за температурою: 1 – звичайний алгоритм

ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з переналаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

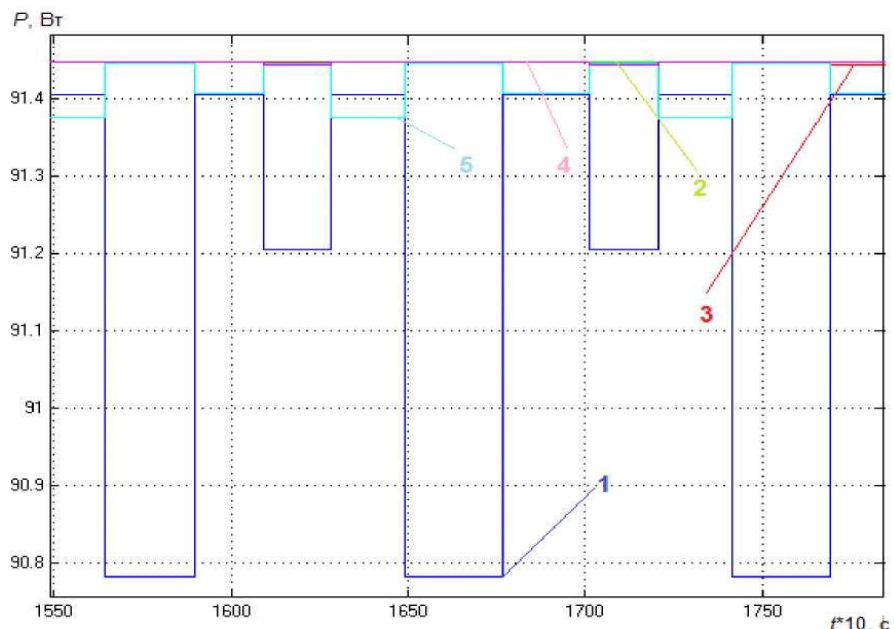


Рисунок 3.17 - Робота алгоритмів біля екстремуму ВВХ після збудження за температурою: 1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з переналаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

На рис. 3.17 видно, що звичайний алгоритм ЗТС і алгоритм із прогнозованою адаптацією дають помітні коливання потужності по 0,5 і 0,1 Вт відповідно.

Ефективність застосування алгоритмів з урахуванням збудження можна оцінити за запропонованими раніше інтегральними оцінками (формула 3.2), результати обчислень зводяться до таблиці 3.3.

2. При збудженні освітленості від  $750 \text{ кВт/м}^2$  до  $900 \text{ кВт/м}^2$  у час 120 с. Отримано сімейство графіків роботи пошукових алгоритмів, наведене рис. 3.18.

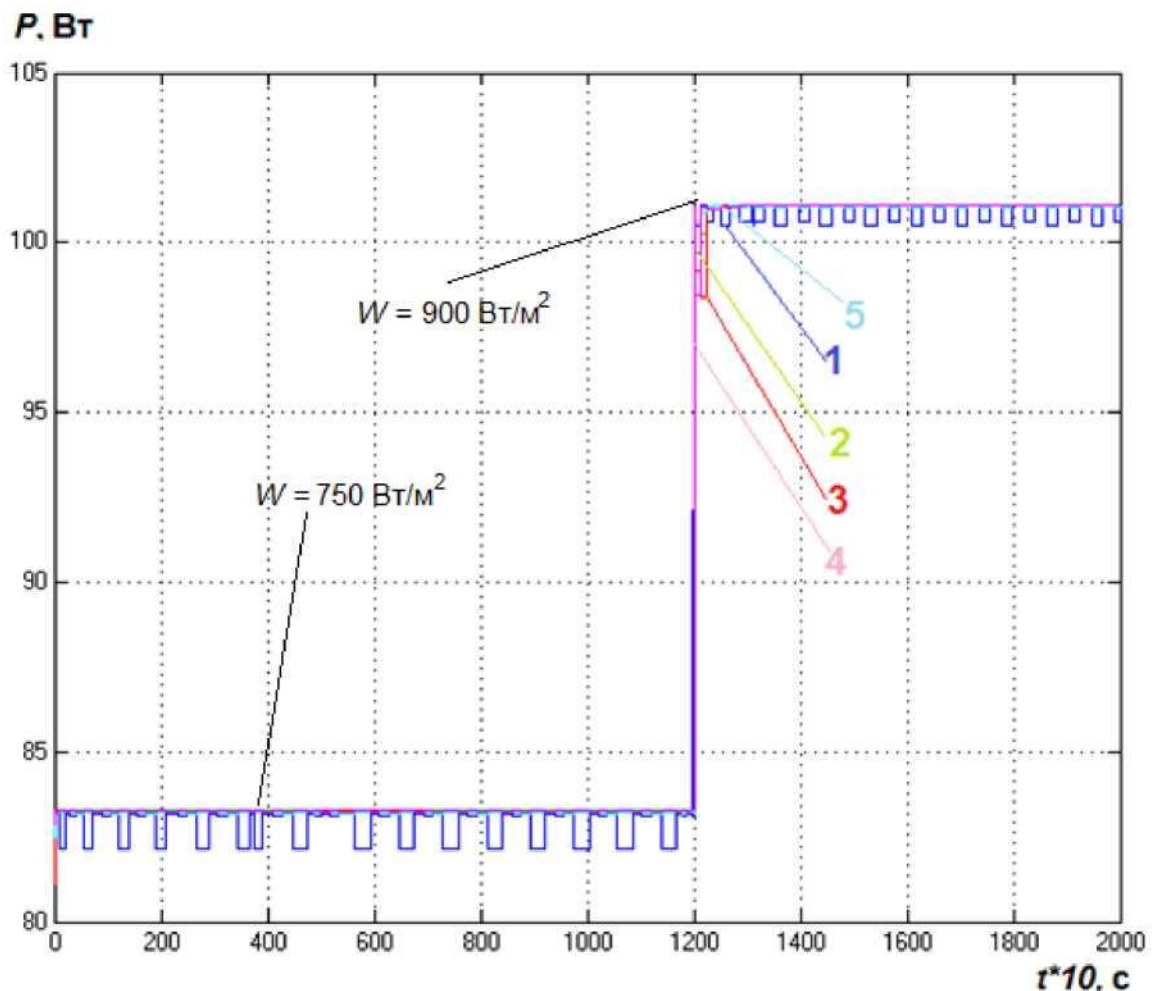


Рисунок 3.18 - Робота алгоритмів при збудженні освітлення: 1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з перенастроюванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

Збільшуючи масштаб, можна оцінити поведінку алгоритмів під час збудження, що відображено рис. 3.19. На рисунку можна оцінити амплітуди коливань потужності біля точки екстремуму та час пошуку екстремуму для кожного алгоритму.

Ефективність застосування алгоритмів з урахуванням збудження можна оцінити за запропонованими раніше інтегральними оцінками (формула 3.2), результати обчислень зводяться до таблиці 3.3.

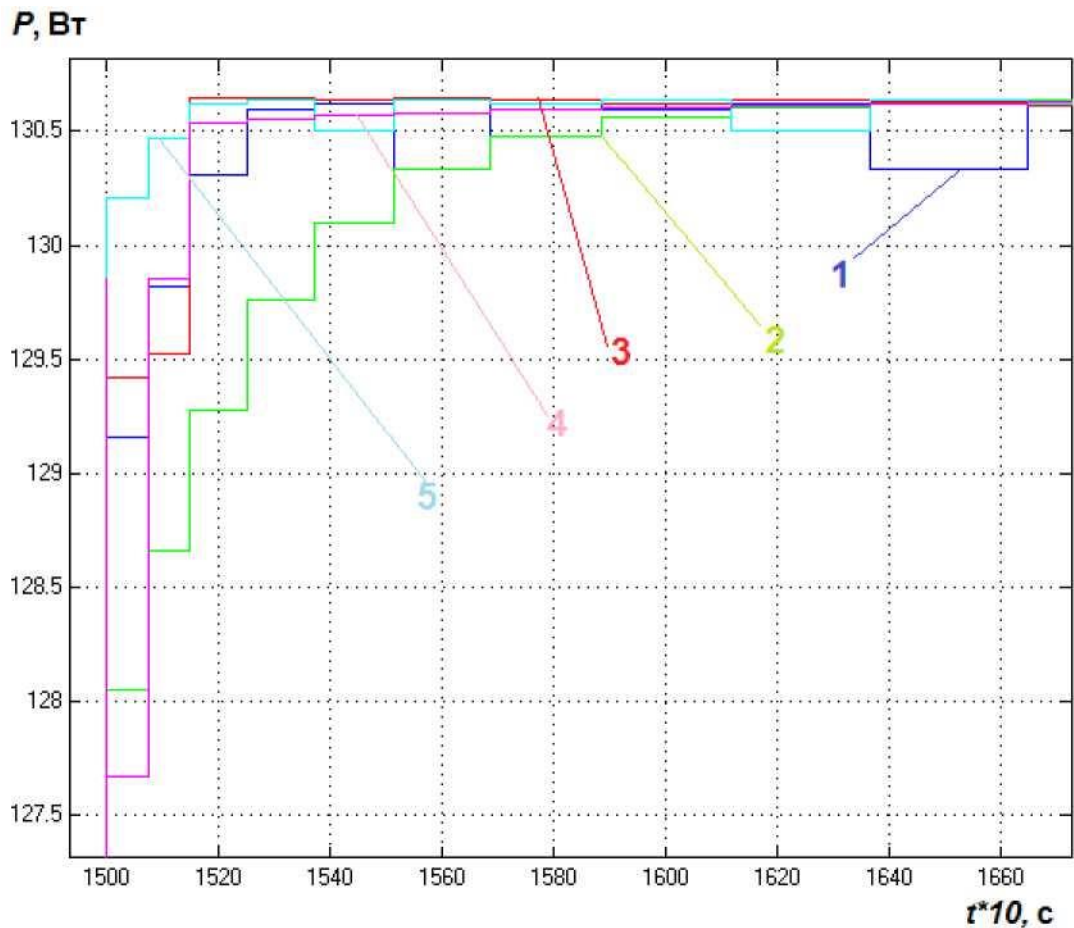


Рисунок 3.19 - Робота алгоритмів біля екстремуму ВВХ після збудження по освітленості: 1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з перенастроюванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

3. При комбінованому збудженні освітленості та температури з параметрами: освітленість 500 - 900 кВт/м<sup>2</sup>, температура 30 - 0 °С, час збудження 100 с., Отримані наступні графіки роботи алгоритмів, наведені на рис. 3.20.

При збільшенні масштабу біля екстремуму потужності на околицях точки

збудження можна отримати сімейство графіків, що дозволяє оцінити якість роботи алгоритмів: швидкість пошуку та амплітуду коливань. Такі графіки наведено рис. 3.21.

Ефективність застосування алгоритмів з врахуванням збудження можна оцінити за запропонованими раніше інтегральними оцінками (формула 3.2), результати обчислень зводяться до таблиці 3.3.

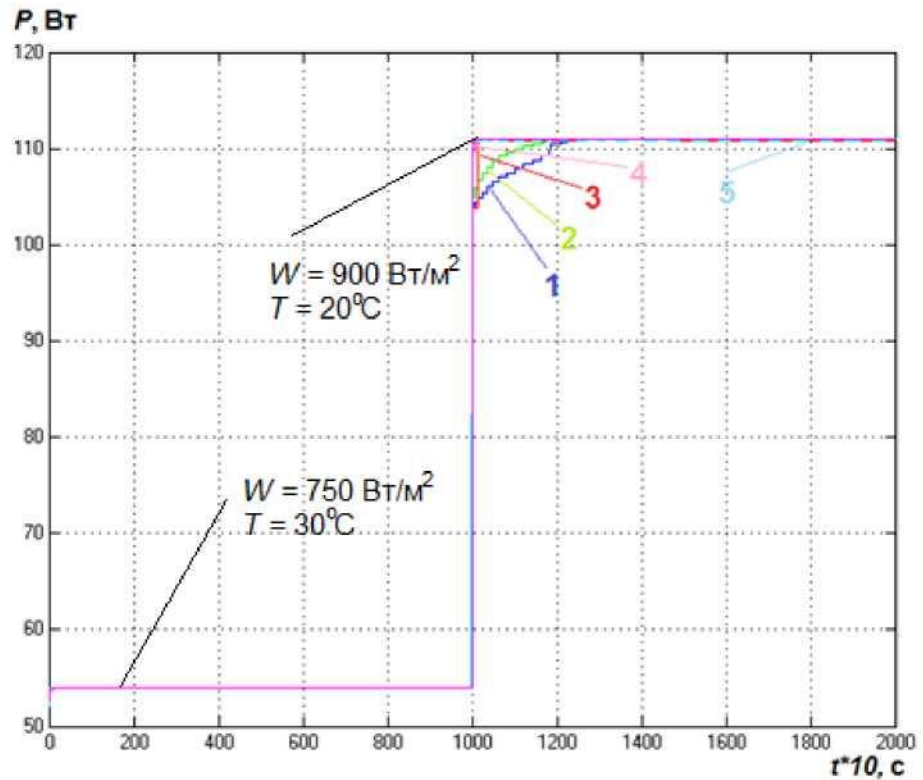


Рисунок 3.20 – Робота алгоритмів при комбінованому збудженні: 1 – звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з переналаштуванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

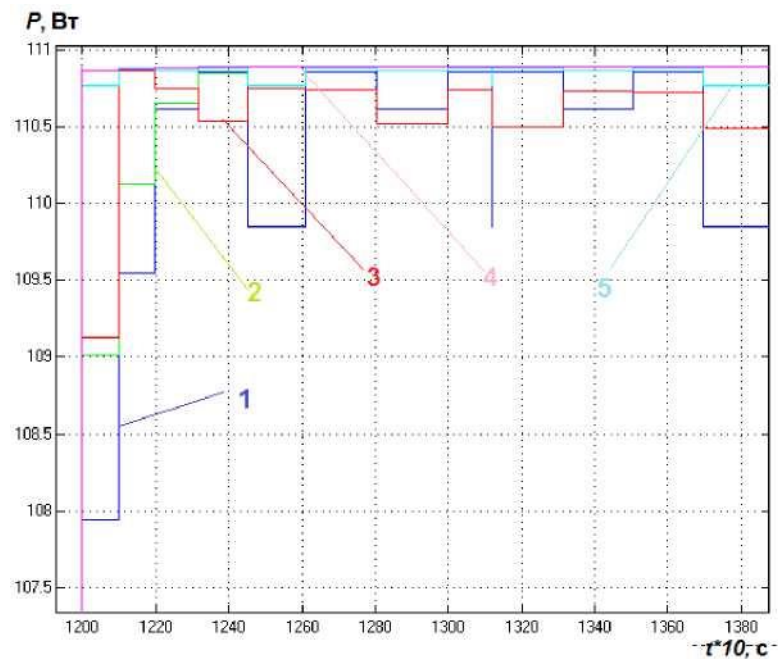


Рисунок 3.21 - Робота алгоритмів біля екстремуму ВВХ після комбінованого збудження: 1 - звичайний алгоритм ЗТС, 2 - алгоритм ЗТС з перенастроюванням кроку, 3 - алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 4 - покращений алгоритм ЗТС з налаштуванням нечітким регулятором, 5 - алгоритм ЗТС з передбачуваною адаптацією

Таблиця 3.3 – Показники ефективності алгоритмів

Назва алгоритму	Збудження за температурою			Збудження за освітленістю			Збудження щодо комбінації параметрів		
	$I_1$	$I_2$	$Tn, c$	$I_1$	$I_2$	$Tn, c$	$I_1$	$I_2$	$Tn, c$
ЗТС	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 перенастроюванням 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 помітити, що всі адаптивні алгоритми показують кращі результати, ніж стандартний алгоритм ЗТС. Найбільшу ефективність має покращений алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором.

### **3.3 Висновки за розділом**

На базі розробленої бібліотеки створено модель фотоелектричної системи з різними адаптивними алгоритмами керування: алгоритм з перенастроюванням пошукового кроку, алгоритм з еталонною моделлю, алгоритм з налаштуванням нечітким регулятором, а також алгоритм покращення для нечіткого регулятора.

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

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Організація охорони праці на підприємстві

Охорона праці – це система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Організацією охорони праці на підприємстві займається власник (керівник). Для цього він забезпечує функціонування систем керування охороною праці:

- 1) створює відповідні служби і призначає посадових осіб, відповідальних за вирішення питань з охорони праці;
- 2) забезпечує усунення причин, що призводять до нещасних випадків і профзахворювань;
- 3) здійснює постійний контроль за дотриманням працівниками правил експлуатації машин, механізмів, обладнання;
- 4) здійснює контроль за користуванням та індивідуальними засобами захисту;
- 5) при виникненні надзвичайних ситуацій і нещасних випадків, власник зобов'язаний вжити термінових засобів для допомоги потерпілим.

Служба охорони праці підпорядковується безпосередньо директору підприємства і виконує наступні функції:

- проводить керівництво роботою з охорони праці;
- забезпечує інструкціями, стандартами та інШІМи нормативними документами;
- веде облік і аналіз нещасних випадків і профзахворювань;
- бере участь у розслідуванні нещасних випадків;
- забезпечує колективними та індивідуальними засобами захисту працюючих;

- забезпечує проведення навчання та інструктажів з охорони праці, своєчасне проведення атестацій і переатестацій робітників, які виконують роботи підвищеної небезпеки.

Навчання та інструктаж працівників з питань охорони праці проводиться з працівниками, які поступають на роботу, та в процесі їх трудової діяльності.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на: вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий.

Вступний інструктаж проводиться з усіма щойно прийнятими на роботу працівниками, з учнями та студентами, які проходять практику.

Первинний інструктаж проводиться на робочому місці з новоприйнятими працівниками, або з групою осіб однієї спеціальності.

Повторний інструктаж проводиться з усіма працівниками на робочому місці через певні проміжки часу.

Позаплановий інструктаж проводиться у випадках введення в дію нових актів про охорону праці, заміні або модернізації устаткування, при порушенні працівником вимог охорони праці.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками при виконанні разових робіт, які пов'язані з обов'язками за фахом.. Цільовий інструктаж фіксується наряд-допуском, що дозволяє проведення робіт.

Усі інструктажі проводяться керівником робіт (начальником дільниці, майстром).

Про проведення інструктажів, стажуванню та допуск до роботи особа, яка проводила інструктаж, робить запис у журнал. При цьому обов'язкові підписи того, хто проводить інструктаж, і того, хто інструктував. Журнали інструктажів повинні бути пронумерованими, прошнурованими і скріплені печаткою.

Керівник підприємства зобов'язаний видати працівникові примірник інструкції з охорони праці за його професією, або вивісити її на робочому місці.

Робоче місце – це зона обслуговування окремим робітником відповідно визначеного місця технологічного процесу. Розмір зони залежить від особливостей технологічного процесу.

З метою економії сил і часу робітника, підвищення його працездатності необхідно раціонально облаштувати робоче місце: раціонально розмістити засоби

керування контролю виробничим процесом, забезпечити механізацією та автоматизацією праці.

#### **4.2. Інфрачервоне випромінювання та особливості його дії на організм людини**

До інфрачервоних випромінювань належать електромагнітні випромінювання (ЕМВ) невидимої частини спектра, що знаходяться в діапазоні довжини хвилі  $\lambda=0,78-1000$  мкм.

Джерелом інфрачервоного випромінювання є будь-яке тіло, температура поверхні якого перевищує температуру абсолютного нуля ( $-273^{\circ}\text{C}$ ). Спектральний склад випромінювань інфрачервоного діапазону залежить від температури поверхні тіла. Чим вища температура тіла, тим коротша довжина випромінюваної електромагнітної хвилі. Вплив інфрачервоного випромінювання на людину залежить від довжини хвилі, що випромінюється, й від глибини проникнення променів. В залежності від цього інфрачервоне випромінювання поділяють на три ділянки: А,В,С.

А – ближня (короткохвильова) – характеризується високою проникністю крізь шкіру  $\lambda=0,78-1,4$  мкм;

В – середня (середньохвильова) – поглинається шарами дерми та підшкірною жировою тканиною  $\lambda=1,4-3,0$  мкм;

С – далека (довгохвильова) – поглинається епідермісом  $\lambda=3,0-1000$  мкм.

Інфрачервоне випромінювання, що потрапляє на тіло людини, впливає, перш за все, на незахищені його ділянки (обличчя, руки, шию, груди, очі). Основним його проявом є тепло, яке проникає на деяку глибину в тканини. Тіло людини може витримувати інфрачервоне випромінювання певної густини потоку енергії, яка вимірюється в  $\text{Вт}/\text{м}^2$ . Так, при густині потоку випромінювання величиною  $280-260 \text{ Вт}/\text{м}^2$  відчувається ледь помітне тепло. Його людський організм може витримувати тривалий час без будь-яких змін у його функціональному стані. При густині потоку випромінювання величиною  $560-1050 \text{ Вт}/\text{м}^2$  настає межа, коли людина не витримує дію інфрачервоного випромінювання. Знаходження людини протягом тривалого періоду часу в зоні

інфрачервоного випромінювання значної потужності, як і при дії високих температур, впливає на центральну нервову систему, серцево-судинну систему (збільшується частота серцебиття, змінюється артеріальний тиск, прискорюється дихання), порушує тепловий баланс в організмі, що призводить до посиленого потовиділення, втрати необхідних для організму людини солей. Діючи на очі, інфрачервоне випромінювання викликає помутніння кришталика, опік сітківки, кон'юнктивіти.

Нормована допустима густина потоку енергії інфрачервоного випромінювання на робочому місці залежить від ділянки випромінювання.

Для ділянки А нормована густина потоку енергії не повинна перевищувати  $100 \text{ Вт/м}^2$  при опроміненні 50% тіла і більше.

Для ділянки В -  $120 \text{ Вт/м}^2$  при опроміненні поверхні тіла в межах 25-50%.

Для ділянки С -  $150 \text{ Вт/м}^2$ , якщо опромінюється не більше 25% поверхні тіла.

Для захисту людини від інфрачервоного випромінювання при перебуванні в приміщеннях з установками для імпульсного опромінення рослин використовують декілька способів.

Захист відстанню. Цей спосіб полягає в тому, що при віддаленні від джерела випромінювання густина потоку енергії зменшується пропорційно відстані до нього.

Захист часом передбачає обмеження перебування людини в зоні інфрачервоного випромінювання.

Теплоізоляція джерела випромінювання передбачає застосування конструкторських та технологічних рішень, направлених на теплоізоляцію випромінювальної поверхні матеріалами (скловата, цегла), що знижують температуру поверхні випромінювання.

Екранування джерела випромінювання полягає у використанні непрозорих або напівпрозорих екранів, які можуть бути відбиваючими або теплопоглинаючими. Для охолодження використовують водяні завіси з водяної плівки.

Індивідуальні засоби захисту: спецвзуття, спецодяг, який витримує високі температури і захищає від інфрачервоних випромінювань, який водночас є м'яким

і повітронепропускним (брезент, сукно). Для захисту очей використовують спеціальні окуляри зі скельцями жовто-зеленого або синього кольору.

#### **4.3. Штучне освітлення виробничих приміщень, його нормування та види**

Штучне освітлення може бути загальним та комбінованим. Загальним називають освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення (не нижче 2,5 м над підлогою) рівномірно (загальне рівномірне освітлення) або з врахуванням розташування робочих місць (загальне локалізоване освітлення). Комбіноване освітлення складається із загального та місцевого. Його доцільно застосовувати при роботах високої точності, а також, якщо необхідно створити певний або змінний, в процесі роботи, напрямок світла. Місцеве освітлення створюється світильниками, що концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях. Застосування лише місцевого освітлення не допускається з огляду на небезпеку виробничого травматизму та професійних захворювань.

За функціональним призначенням штучне освітлення поділяється на робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове.

Штучне освітлення передбачається у всіх виробничих та побутових приміщеннях, де недостатньо природного світла, а також для освітлення приміщень в темний період доби. При організації штучного освітлення необхідно забезпечити сприятливі гігієнічні умови для зорової роботи і одночасно враховувати економічні показники.

Найменша освітленість робочих поверхонь у виробничих приміщеннях регламентується СНиП II-4-79 і визначається, в основному, характеристикою зорової роботи. Норми носять міжгалузевий характер. На їх основі, як правило, розробляють норми для окремих галузей промисловості.

В СНиП II-4-79 вісім розрядів зорової роботи, із яких перших шість характеризуються розмірами об'єкта розпізнавання. Найбільша нормована освітленість складає 5000 лк (розряд Ia), а найменша — 30 лк (розряд УШв).

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У представленій кваліфікаційній роботі можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено моделі елементів фотоелектричних систем, що дозволяють конфігурувати системи різних властивостей. Розроблені моделі мають безліч параметрів налаштування та враховують широкий спектр впливів, що відповідають реальним умовам експлуатації, що дозволяє отримувати результати, близькі до натурних.

2. Розроблено та описано адаптивні алгоритми екстремального регулювання потужності для систем керування фотоелектричних установок. Запропоновані алгоритми охоплюють різні вимоги до таких систем, що дає широкий вибір рішень під час проектування фотоелектричних систем.

3. Покращено екстремальне регулювання потужності у системі керування ФЕУ, а саме:

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

4. Розв'язано задачу підвищення енергетичної ефективності фотоелектричних систем за рахунок впровадження адаптивних алгоритмів екстремального регулювання потужності.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мурашева В. А. Альтернативная энергетика берет новые рубежи [Электронный ресурс] / Информационно-аналитический сервис строительного сообщества. – 2019. – Режим доступа: <http://estp-blog.ru>.
2. Гарифулина М.Р., Власов А. И. Макарчук В. В., Адамовик Н. Модель элемента солнечной батареи типа CIGS // Инженерный вестник. – 2012. – №8. – С. 1-21.
3. 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.
4. Solimpeks. Volther Hybrid PV-T Panels [Electronic resource] / Solimpeks. – 2019. – Режим доступа: [http://solenergo.lv/wpcontent/uploads/pvt\\_presentation\\_en1.pdf](http://solenergo.lv/wpcontent/uploads/pvt_presentation_en1.pdf).
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Шарифов Б. Н., Терегулов Т. Р. Моделирование солнечной панели в программе MATLAB/Simulink // Вестник УГАТУ. – 2015. – № 4. – С. 77-83. 121
10. 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.



11. Аржанов К.В. Фотоэлектрическая энергетическая установка с наведением на Солнце // Сборник материалов Всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление». Иркутск, 01-03 сентября 2015 г. – Иркутск: Изд-во ИСЭМ СО РАН, 2015. – С. 579–581.

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.