

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

з спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(назва освітнього ступеня)

на тему: Імітаційна модель автоматизованої системи керування пристроєм
відслідковування положення сонця

Виконав(ла): студент 2 курсу, групи КАД-
спеціальності 151 - Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Федула М.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Медвідь В.Р.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Козбур І.Р.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Савків В.Б.

(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 автоматизації технологічних процесів та виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Савків В.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2021 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Федулі Миколі Васильовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Імітаційна модель автоматизованої системи керування пристроєм
відслідковування положення сонця

Керівник роботи Медвідь Володимир Романович, кандидат техн. наук, доцент
кафедри АВ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «1» жовтня 2021 року № 4/7-824

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ.

1. Аналітична частина.

2. Технологічна частина.

3. Конструкторська частина.

4. Науково-дослідна частина.

5. Спеціальна частина.

6. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Висновки.

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

РЕФЕРАТ

Федула Микола Васильович, ст. гр. КАд-2.

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Науковий керівник: Медвідь Володимир Романович

Тема роботи: **Імітаційна модель автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця.**

кільк. стор. 65.

Анотація:

У кваліфікаційній роботі проведено розробку і дослідження імітаційної моделі автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця, що призначений для підтримки кута падіння сонячного світла на фотоелектричні модулі, максимально близького до 90 градусів. До складу пристрою відслідковування положення сонця входить пристрій позиціонування, фотоелектричний модуль та контролер. Імітаційна модель виконана у програмному середовищі Simulink.

Summary

In the qualification work the development and research of a simulation model of an automated control system for the sun tracking device, designed to maintain the angle of incidence of sunlight on photovoltaic modules, as close as possible to 90 degrees. The sun position tracking device includes a positioning device, a photovoltaic module and a controller. The simulation model is made in the Simulink software environment.

Ключові слова: автоматизована система керування, пристрій відслідковування положення сонця, фотоелектричний модуль, імітаційна модель.

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	5
ВСТУП.....	6
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	7
1.1 Аналіз стану питання за літературними та іншими джерелами.....	7
1.2 Актуальність виконання роботи.....	14
1.3 Методи вирішення поставленої задачі.....	14
1.4 Висновки та постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра.....	15
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	16
2.1 Характеристика виробу та його призначення.....	16
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	20
3.1 Аналіз вихідних даних на розробку базового варіанту імітаційної моделі САУ пристроєм відслідковування положення сонця.....	20
3.2 Підбір елементів та уточнення компоновки імітаційної моделі САУ пристроєм відслідковування положення сонця на основі паспортних даних серійного обладнання.....	23
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	28
4.1 Характеристика об'єкту та предмету дослідження.....	28
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	47
5.1 Перехідні процеси імпульсного перетворювача.....	47
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	51
6.1 Вимоги до охорони праці при імітаційному моделюванні та виготовленні автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця.....	51
6.2 Екологічні вимоги при виготовленні та експлуатації автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця.....	52
6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця.....	53
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	60

ВСТУП

Сонячна енергетика займає важливе місце серед відновлюваних джерел електроенергії завдяки екологічності, доступності та широким можливостям інтеграції в сучасні розумні мережі (Smart Grid). Сонячні фотоелектричні модулі є достатньо ефективними джерелами енергії при виконанні ряду умов. Зокрема, необхідно підтримувати кут падіння сонячних променів на фотоелектричний модуль максимально близьким до 90° , а також підтримувати режим його роботи у точці максимальної потужності за вольт-ватною характеристикою. При виконанні вказаних умов фотоелектричний модуль при достатній освітленості може передавати до навантаження максимальну енергію.

На даний час відомі багато пристроїв, призначених для підвищення енергоефективності фотоелектричних модулів. Серед них важливе місце займають пристрої відслідковування положення сонця. Як вхідні дані для відслідковування використовуються рівень освітленості, струм та напруга фотоелектричного модуля, інформація щодо географічної широти та календар.

У даній роботі запропоновано імітаційну модель автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця на основі інформації про рівень відбору енергії від фотоелектричного модуля та календарних даних з корекцією орієнтації фотоелектричного модуля з використанням оцінки рівня втрат енергії на роботу поворотного механізму та у зовнішніх електричних колах. Імітаційна модель реалізована у програмному середовищі Simulink з використанням мультифізичних бібліотек Simscape. Досліджено основні характеристики вузлів пристрою. Розроблено рекомендації щодо подільшого підвищення енергоефективності процесу автоматизованого відслідковування положення сонця.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз стану питання за літературними та іншими джерелами

Сонце випромінює на землю приблизно $1,8 \cdot 10^{11}$ МВт енергії, що у багато тисяч разів більше за нинішній рівень споживання на землі від усіх інших використовуваних комерційних джерел енергії [2-3].

Основні проблеми з використання сонячної енергії - її різноманітна природа, різні пояси та кут між сонячними променями та поверхнею землі. Навіть у найспекотніших регіонах на Землі потік сонячної радіації рідко перевищує 1 кВт/м, що недостатньо для технологічного використання. Ці проблеми можуть бути усунені за допомогою сонячного трекера, який забезпечує максимальну інтенсивність сонячних променів, що падають на поверхню панелі від сходу до заходу сонця [3-5].

149,6 млн км. Вісь обертання Землі нахилена на кут $= 23,441$ градусів по відношенню до нормалі та площини орбіти Землі. Площина орбіти Землі називається площиною екліптики. Площина, що проходить через екватор Землі, нахилена перпендикулярно до площини екліптики, під кутом ε (кут нахилу). На підставі закону збереження моменту імпульсу можна стверджувати, що кутова висота над горизонтом змінюватиметься протягом року.

Для того, щоб розрахувати кути падіння сонця, необхідно визначити відповідні системи відліку. Можна використовувати три основні системи відліку: системи відліку екліптики, екватора та горизонту.

Ці системи відліку центровані чи прив'язані до центру. Сонце та інші небесні тіла передбачається розмістити на небесну сферу .

Передбачається, що небесна сфера обертається довкола нерухомої. Вісь Землі нахилена на $23,34^\circ$ від площини земної орбіти навколо Сонця, і період обертання Землі навколо Сонця становить один земний рік.

21 грудня (зимове сонцестояння) до $23,45^\circ$ південної широти 21 червня (літнє сонцестояння).

Сонцестояння показує максимальну висоту підйому Сонця над Землею. Кут вимірюється між уявною лінією між спостерігачем, сонцем та горизонтальною площиною, на якій стоїть спостерігач.

Кут висоти негативний, коли сонце опускається нижче за горизонт. Це кутова відстань між півднем і проекцією прямої

видимості сонця на землі. Позитивний кут сонячного азимуту вказує на схід від півдня, а негативний кут азимуту вказує на захід з півдня (рис.2).

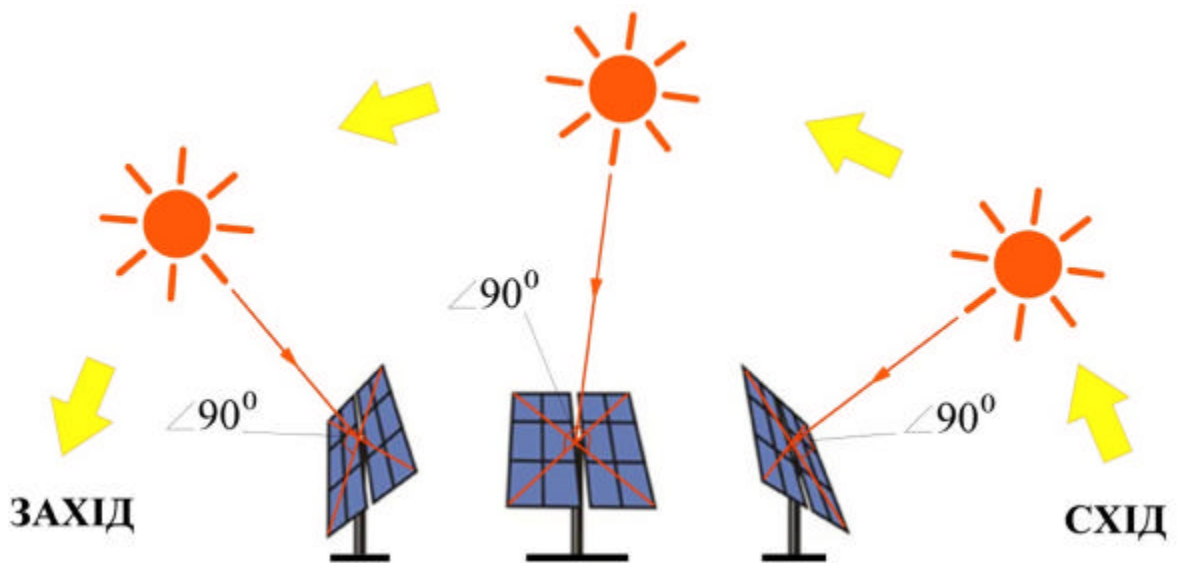


Рисунок 1.1 – Процес відстежування положення сонця

Широта - це кут, утворений радіальною лінією, що з'єднує розташування з центром землі та проекцією лінії на екваторіальну площину. Земна вісь

обертання перетинає поверхню землі на 90° широти (північний полюс) і -90° широти (південний полюс).

Будь-яке розташування на поверхні землі можна визначити перетином кута довготи та кута широти.

Основний механізм сонячної системи стеження складається з пристрою стеження, алгоритму стеження, блок керування, система позиціонування, приводного механізму та датчиків. Алгоритм відстеження визначає кути, що використовуються для визначення положення сонячного трекера. Є два типи алгоритмів - астрономічні алгоритми та алгоритми інтенсивності світлового потоку. Астрономічний алгоритм – суто математичний алгоритм на основі астрономічних показників. Алгоритм інтенсивності світла у час заснований на інтенсивності світла. Блок управління виконує алгоритм відстеження та керує системою позиціонування та механізмом повороту [1-7]. Система позиціонування відповідає за відповідність розташування сонячної панелі до сонця під розрахунковим кутом. Вона може бути як одновісною, так і двовісною (рис.3).

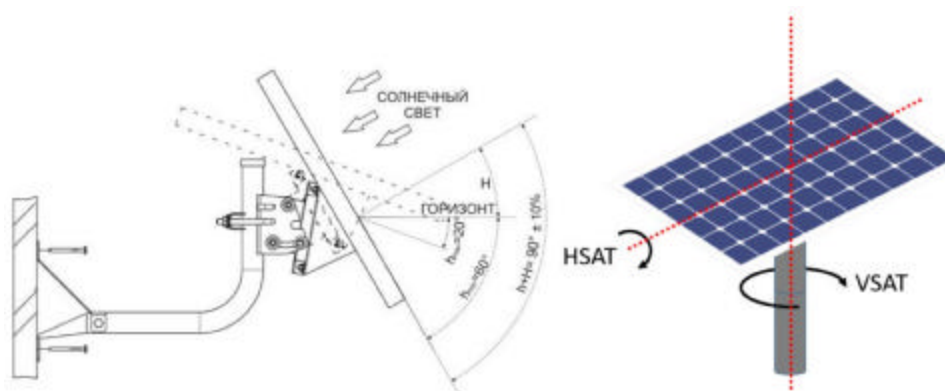


Рисунок 1.2 – Двохосна та одновісна система позиціонування

Система позиціонування може бути електричною або гідравлічною. Світлочутливі пристрої є групою датчиків, які вимірюють умови навколишнього середовища та інтенсивність світла рис.4.

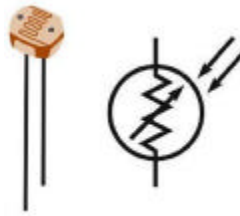


Рисунок 1.3 – Фоторезистор

Вони використовуються у разі спостереження за інтенсивністю світла.

Кількість вихідних даних в основному залежить від косинуса кута падіння, який відомий як кут між сонячним променем та горизонтальною поверхнею. Мінімальний кут падіння дає максимальну вихідну потужність. У разі нерухомої панелі максимальна потужність досягається тільки в полуденний час. Сонячний трекер може виправити цю проблему.

Перший сонячний трекер, представлений Фінстером у 1962 році, був повністю механічним. Через рік був представлений механізм з автоматичним електронним управлінням при використанні піргеліометра.

Tiberiu Tudorache та співавтори порівняли нерухому панель із системою стеження з погляду вироблення електричної енергії та ефективності. Пропонований пристрій автоматично виконує пошук оптимального положення фотоелектричної панелі щодо сонця за допомогою двигуна постійного струму, що керується приводним блоком, який отримує вхідні сигнали від спеціальних датчиків інтенсивності світла. Такий трекер виробляє більше енергії, ніж фіксована сонячна панель приблизно на 57,55%. Такі трекери використовуються для мінімізації кута нахилу між сонячним світлом і фотоелектричною панеллю. Масаказу Іто та співавтори запропонували порівняльне дослідження стаціонарних та трекінгових систем у великомасштабних PV (VLS-PV) системах у пустелі. Роботу було змодельовано.

У моделюванні використовувалися часові ряди сонячного випромінювання та температури, що становлять історичний рекорд за 18 років

(з 1994 по 2011). Результати показують, що одноосьовий трекер з вертикальною віссю з нахилом 30 градусів північної широти, як правило, отримує на 15–35% більше електроенергії, ніж зафіксований при оптимальному куті нахилу. Anyaka et al вивчали покращення фотоелектричних систем вихідної потужності з використанням методів сонячного стеження. У роботі представлено докладний опис схеми систем відстеження сонячного світла, що дає широкий спектр високопродуктивних систем генерації сонячної енергії.

Однією з великих компаній із виготовлення сонячних трекерів для сонячних панелей є компанія Energy Track. Сонячний трекер застосовувати для правильного орієнтування сонячної панелі на положення джерела світла, тобто Сонця. Дані сонячні трекери можуть бути як одне осьовими, так і двома осьовими. Такі трекери дозволяють стежити за становищем сонця цілий світловий день[12].

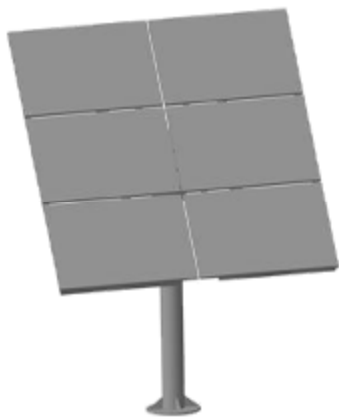


Рисунок 1.4 – Лицьова сторона сонячної панелі з одноосьовим сонячним трекером

Одноосьові сонячні трекери компанії Energy Track дозволяють стежити лише щодо «азимуту» від Сходу до Заходу. Такий вид трекера не може стежити за кутом підйому сонця. Цей недолік можна відрегулювати вручну в залежності від пори року або використовувати двоосьовий сонячний трекер для більш детального регулювання[12].

Сонячний трекер виготовлений з рами з поворотним механізмом, до якої за допомогою стандартних кріплень кріпиться сонячні панелі. Для керування сонячним трекером зібраний електронний блок керування на датчику світла та реле. Управління також можна вивести на пульт управління який перебуватиме на персональному комп'ютері з операційною системою Windows[12].



Рисунок 1.5 – Тильна сторона сонячної панелі з одноосьовим сонячним трекером

Органи управління сонячним трекером крім автоматики яка розташована безпосередньо на стійки сонячного трекера виводяться в операторську. Програма пишеться індивідуально для кожної місцевості, де буде встановлено даний механізм і пори року, щоб збігалися кути підйому сонця щодо горизонту та кут «азимуту». Відповідно до пори року програма дає команду трекеру на зміну кута положення сонячної панелі, а датчики встановлені на конструкції сонячної панелі свого часу порівнюють отримані дані та відправляють їх на персональний комп'ютер оператору [12].

При розбіжності кута датчик відправляє команду електронному блоку управління, який у свою чергу подає живлення на лінійний привід і кут вирівнюється. Як говорили раніше, якщо одноосьовий трекер, то лінійний привід у нього буде тільки один. Але це не заважає такому типу трекера працювати в автоматичному режимі без участі людини та відстежувати

похмурі дні та робити коригування відповідно до цих днів. У цих сонячних трекерів передбачено і ручний режим роботи з допомогою дистанційного управління з операторської[12].

За розрахунками компанії за умови встановлення сонячного трекера на стандартну сонячну панель її ефективність зростає в 40%. Вартість установки можна зменшити за рахунок модуля розширення, який встановлюватиметься на перший трекер і вже від нього через персональний комп'ютер, встановлений в операторській, будуть відправлятися команди на лінійні приводи для вирівнювання кута. Ще однією не маловажною економією електроенергії є надмале споживання електродвигуна та довгі періоди поворотів поворот механізму [12].

Основні характеристики сонячного трекера компанії Energy Track:

- Точність установки 0,1 градус;
- Час повороту 1с/град. або 0,16 оборотів за хвилину;
- Максимальна швидкість вітру 50 метрів за секунду;
- Пікова швидкість вітру для згорання установки у захисне положення становить 12 метрів за секунду;
- Дискретність установки складає 1-10 градусів;
- Кут підйому над горизонтом 0-80 градусів;
- Кут зміни положення за азимутом 0-220 градусів;
- Діапазон робочих температур -45+50 градусів;
- Клас захисту IP67.

1.2 Актуальність виконання роботи

Розвиток сонячної енергетики є одним із ключових напрямків впровадження відновлюваних джерел енергії, які дозволяють значно знизити негативний вплив електростанцій на довкілля. Проте методи та засоби підвищення ефективності сонячних фотоелектричних модулів на даний час розвинені недостатньо, у зв'язку з тим, що енергія, яку виробляють фотоелектричні модулі суттєво залежить від погодних умов та пори року. Розвиток пристроїв відслідковування положення сонця дозволить значно підвищити ефективність відбору сонячної енергії за рахунок підтримання кута падіння сонячних променів, близького до 90° .

При розробці автоматизованих систем керування пристроями відслідковування положення сонця слід враховувати велику кількість факторів різної природи. Тому імітаційне моделювання систем автоматизованого керування пристроями відслідковування положення сонця є важливою задачею сучасної науки та інженерії, від розв'язання якої значною мірою залежить енергоефективність сонячних електростанцій та розумних мереж.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю мінімізації втрат енергії в процесі відслідковування положення сонця із врахуванням характеристик фотоелектричного модуля, блоку живлення, електродвигунів та зовнішнього навантаження.

1.3 Методи вирішення поставленої задачі

З метою розв'язання поставленої задачі мінімізації втрат енергії в процесі відслідковування положення сонця використовується метод відстеження максимуму сонячної енергії, а також метод відстеження максимальної ефективності передачі енергії від фотоелектричного модуля до навантаження.

В процесі виконання роботи використано методи теорії лінійних та нелінійних електричних кіл, фізики фотоелектричних процесів, теорії автоматичного керування, системного аналізу та імітаційного моделювання.

1.4 Висновки та постановка задач на кваліфікаційну роботу магістра

За результатами проведеного аналізу, для забезпечення високої енергоефективності автоматизована система керування пристроєм відслідковування положення сонця повинна виконувати два основні завдання:

- 1) підтримувати кути орієнтації фотоелектричного модуля відповідно до положення максимуму сонячного випромінювання;
- 2) керувати двигунами поворотного механізму та іншими електричними колами таким чином, щоб отримати мінімальні втрати енергії.

Вказані завдання у певній мірі є протилежними, тому що чим з більшою точністю відбувається відслідковування положення сонця тим більші втрати енергії на роботу електродвигунів та контроллера. Тому розв'язання

Згідно із сформульованими висновками, у кваліфікаційній роботі слід розв'язати такі задачі:

- провести дослідження залежності характеристик фотоелектричного модуля від рівня освітленості у різних режимах експлуатації;
- дослідити залежність втрат енергії від характеристик поворотних механізмів пристроїв відслідковування положення сонця;
- провести моделювання перетворювачів енергії, що використовуються у пристроях відслідковування положення сонця.
- побудувати імітаційну модель автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця із врахуванням втрат енергії на живлення електродвигунів, контроллера та втрат, спричинених нелінійними характеристиками навантаження;

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Характеристика виробу та його призначення

Габарити установки мають бути підібрані з розрахунку раціонального використання площі сонячної панелі. Майданчик для сонячної панелі повинен бути досить легким, щоб сервоприводи впоралися з навантаженням.

Усі елементи системи мають бути розташовані на корпусі сонячного трекера для його портативності.

Нижче наведено приблизну конструкторську схему сонячного трекера.

Розроблений авторами лабораторний макет сонячного трекера зображений на рис.4.10.

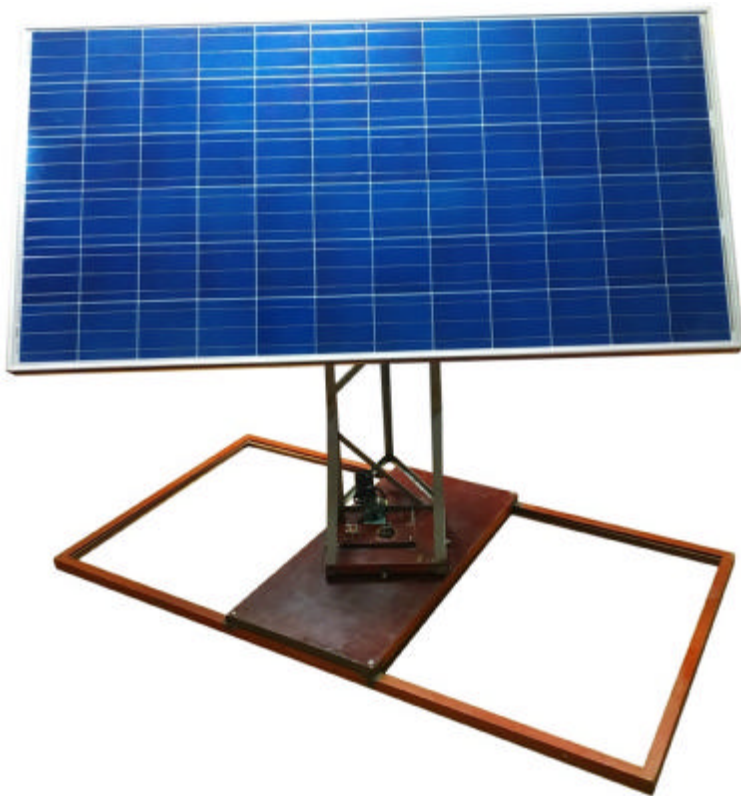


Рисунок 2.1 – Лабораторний макет сонячного трекера

Масштабований лабораторний макет сонячного трекера зображений на рис.4.11.

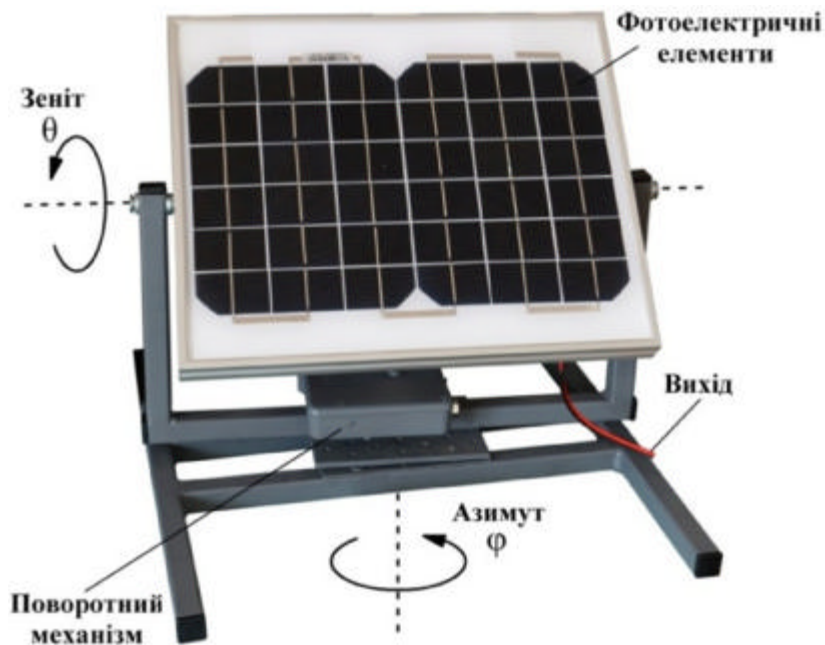


Рисунок 2.2 – Масштабований макет сонячного трекера

Конструктивно установка складається з підставки, рухомих кронштейнів та майданчика, на якій розташовуються сонячні панелі.

Габарити необхідно порівнювати з розмірами сонячної панелі. Для стійкості установки підставка повинна мати більшу вагу порівняно з рухомою частиною.

Корпус установки – це сукупність збірних деталей із щільного матеріалу. Було обрано склотекстоліт товщиною 4 мм для майданчика, на який кріпиться сонячна панель, та дерев'яна дошка для підставки. Габарити частин корпусу було перенесено за зразком креслення малюнку

Для скріплення частин корпусу використовуються болти та сталевий куточок. Ручки потенціометра виведені поверхню підставки. Також на поверхню виведено кнопку скидання.

Рухомий вузол установки складається із сервоприводів та спеціальних кронштейнів.

Двохосьовий сонячний трекер здатний обертатися на 180° , але з'єднувальні дроти залишаються цілими, оскільки поворот майданчика обмежується програмно. Нижче зображено, як кронштейн з'єднаний із сервоприводами.

Провід для фоторезисторів з'єднуються із платою через спайку. Для цілісності ізоляції жили проводів сформовано в єдиний джгут.4.2. Налагодження макета

Після формування корпусу макета, а також з'єднання всіх елементів схеми, установка була запущена у роботу. У процесі налагодження макета виникли складнощі з коректним обертанням платформи. Чутливість світлодіодів була надто висока, тому платформа смикалася.

Чутливість світлодіодів регулюється потенціометр R6 в електричній схемі, якому присвоєно значення 131, якщо подивитися в монітор послідовного порту.

Наступна проблема, що виникла при налагодженні системи - нестача напруги на сервоприводах. Ця проблема вирішилася сама собою після відключення та підключення джгутів живлення.

Після налагодження системи всі вузли та комутація була перевірена на міцність у роботі протягом години.

Сонячний трекер переміщував сонячну панель відповідно до траєкторії сонця. Нерухлива панель була розташована перпендикулярно до сонця, що видно за показанням у таблиці.

Розрахунок показав, що ефективність панелі із сонячним трекером вище за нерухому приблизно на 18%, проте цього достатньо, щоб переконатися в раціональності використання даної технології.

даному експерименті так само було проведено розрахунок ККД сонячної панелі, який представлений нижче.

Для того щоб розрахувати ККД сонячної панелі, потрібно порівняти потужність випромінювання, що падає на панель від джерела світла (витрачена потужність) і потужність сонячної панелі (корисна потужність), що видається, а також визначити площу сонячної панелі.

Для визначення величини сонячної інсоляції (кількість опромінення поверхні пучком сонячних променів) скористався даними по Самарській області, які наведені в таблиці 2.

3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз вихідних даних на розробку базового варіанту імітаційної моделі САУ пристроєм відслідковування положення сонця

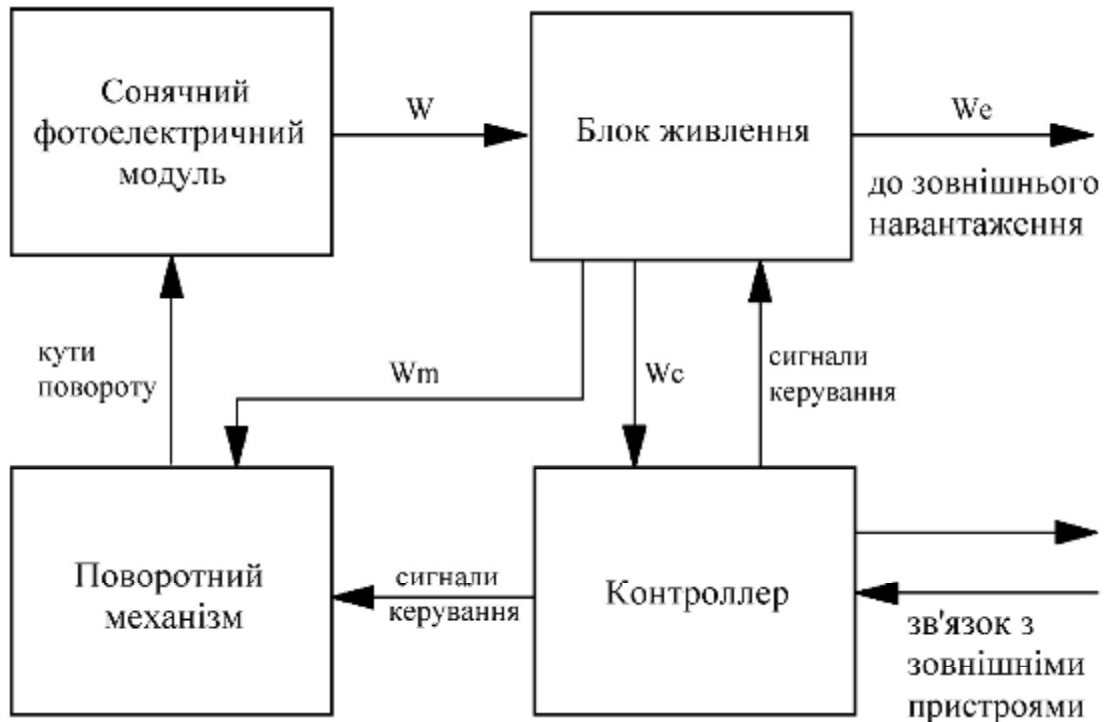


Рисунок 3.1 – Структурна схема автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця

Для покращення ефективності виробництва електроенергії сонячною панеллю було розроблено установку з використанням сонячного трекера. Трекер дозволяє сонячній панелі плавно протягом дня стежити за ефективним кутом нахилу по відношенню до сонця [7].

Метою експерименту була розробка інноваційної установки для отримання максимального ефекту у виробництві електроенергії за допомогою двосторонніх сонячних панелей із сонячним трекером. Для експерименту була використана як стандартна сонячна панель, так і двостороння сонячна панель ФСД-170Д. Були проведені експлуатаційні випробування виходячи з яких отримані точні технічні параметри сонячної установки з трекером[7].

Сонячний трекер призначений для стеження за переміщенням сонця, для отримання максимального ККД від сонячної батареї.

Концепція трекера гранична проста - за двома датчиками контролер змушує серводвигун повертати платформу із сонячною батареєю в той бік, де більше світла [7].

У проєкті використовується два датчики-фоторезистори, які спрямовані в різні боки від плоскої поверхні на 45° , тобто. щодо один одного фоторезистори зорієнтовані на 90° . На самі датчики надіті ковпачки, щоб потік світла, що падає на них, був вузькоспрямованим.

Контролер періодично зчитує значення обох датчиків і порівнює їх. Якщо значення з обох датчиків схожі, значить сонячна батарея дивиться на сонце. У разі якщо значення одного з датчиків відрізняється від іншого, контролер дає команду на серводвигун для повороту платформи. Команда на серводвигун працює до тих пір, поки значення датчиків не зрівнюються [7].

Для винятки максимального повороту платформи присутні програмні ліміти повороту, які у разі потреби можна вимкнути. Також, в коді програма передбачає константу мертвої зони, при різниці з датчиками менше значення цієї константи, контролер не даватиме команду на поворот серводвигуна, таким чином запобігає смиканню платформи.

Також, контролер доопрацьований що дозволяє згладити значення від датчиків та відфільтрувати "викиди" та шум.

Така конструкція дозволяє відстежувати "дорогу" сонця на небосхилі і тим самим збільшити продуктивність сонячних батарей на 30-50% [7].

Лінійний привід має достатню потужність, щоб переміщати кілька таких сонячних панелей. Монтаж лінійного приводу необхідно робити таким чином, щоб за мінімальної величини ходу штока панель була зорієнтована на схід, а за максимальної на захід, тобто для забезпечення ефективного стеження за сонцем протягом усього світлового дня.

У лінійному приводі передбачені кінцеві вимикачі. Вони спрацьовують на максимальне стиснення і розтискання штока, що запобігає виведенню двигуна приводу. Низький рівень шуму всього 42дБ, дає добрі показники для використання. Тихий і плавний хід приводу дозволяє дуже точно виставити сонячну панель на потрібний кут. У той самий час, швидкість приводу, становить 5,7 мм/сек хороша потужність дозволяє результативно працювати установке[7].

Контролер дозволяє працювати сонячному трекеру як у сонячну погоду, так і у похмуру. При заході сонця положення «Захід» датчик світла відреагує і контролер дасть команду приводу повернути установку в положення «Схід».

Момент повороту з положення «Схід» у положення «Захід» створюється вітрило, яке буде вирівняне в середнє положення, при сильному пориві вітру зафіксований датчиком вітру. Регулюванням датчика світла можна настроїти чутливість спрацьовування установки. Для мінімального споживання потужності лінійним приводом був обраний оптимальний інтервал часу відстеження трекера за положенням сонця. Для помилкового підключення полярності установки в блок контролера існує захист від таких помилок. Так само в нашому контролері зібрано захист і від струмових стрибків [7].

Датчик освітленості виготовлений із двох кремнієвих пластин зафіксованих на металевій основі під кутом 45 градусів. Датчик підключений кабелем до контролера установки [7]. Кремнієві пластини настільки чутливі що працюють навіть у похмурі дні. Металеві частини виготовлені із нержавіючої сталі. Датчик освітленості монтується на верхній частині сонячної панелі де йому нічого не перешкоджає і датчик може дуже точно розрахувати необхідний кут нахилу [7].

Всі комплектуючі сонячного трекера зливаються в єдине ціле через контролер і він своєю чергою управляє усіма процесами[7].

3.2 Підбір елементів та уточнення компоновки імітаційної моделі САУ пристроєм відслідковування положення сонця на основі паспортних даних серійного обладнання

Запропоновано універсальну модель сонячної батареї, сумісну з розділом SimPowerSystems у програмі Matlab, що дозволяє моделювати систему електропостачання з урахуванням зміни сонячної радіації, температури навколишнього середовища. Особливістю моделі – вольт-амперна характеристика сонячної батареї (СБ) проходить за трьома точками: напруга холостого ходу, струм короткого замикання, точка максимальної потужності СБ [6, 5, 4].

Модель СБ складається з джерела струму PV1 (рисунок 27), рівного струму короткого замикання СБ, джерела напруги U , резистора r_1 і діода VD, значення яких розраховані нижче наведених рівнянь. Для моделі СБ із близькою до реальної вольт-амперної характеристикою розрахуємо значення її параметрів (рис. 27):

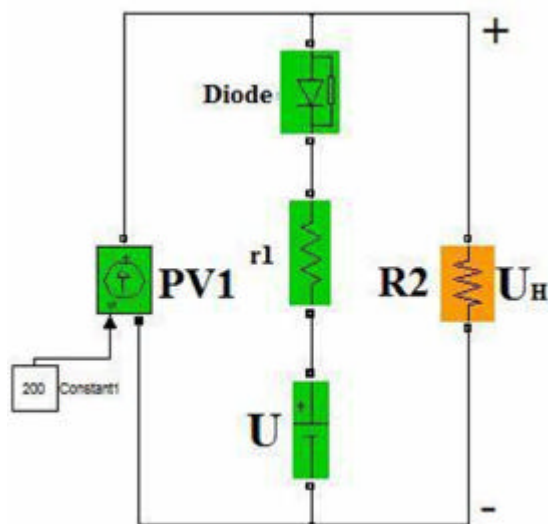


Рисунок 3.2 – Модель СБ

Використані раніше невідомі моделі СБ, адаптовані до розділу SimPowerSystem, що дозволяють досліджувати роботу паралельно з іншими джерелами енергії (рис. 27). При моделюванні СБ, напруга та струм у точці максимальної потужності відповідають реальній вольт-амперній

характеристиці. Напруга навантаження U_H - напруга на опір R_2 значення напруги джерела U менше U_H .

Спеціально розроблений показаний малюнку 28 блок (PV solar cell3), який при моделюванні дає точну ВАХ СБ (рисунок 32).

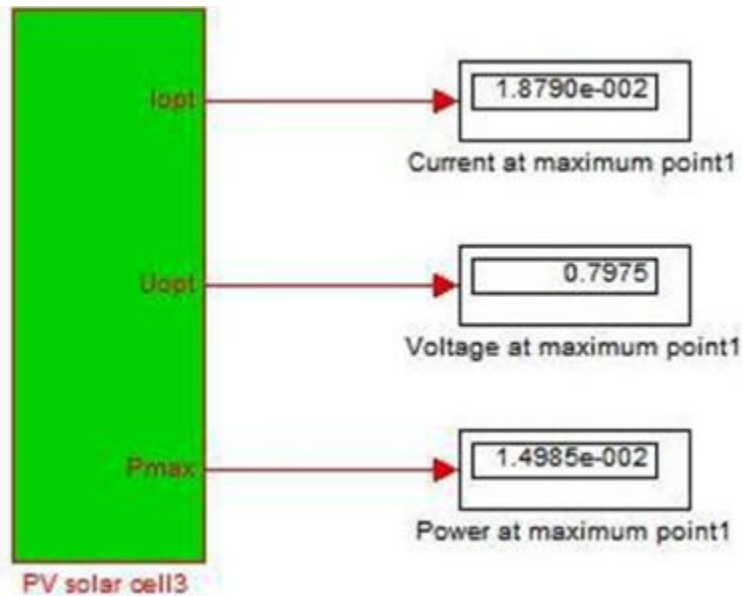


Рисунок 3.3 – Тривісочкова модель СБ

Особливість моделі – можна моделювати не лише сонячний елемент, але й сонячний модуль, знаючи струм короткого замикання та напругу холостого ходу. При моделюванні використовують ВАХ з відповідним значенням струму та напруги (рис. 29).

Щоб запрацював блок (PV solar cell 3) у розділі SimPowerSystem, його треба з'єднати з іншими керованими джерелами, як показано на малюнку

Моделювання сонячного модуля показано на малюнку 34. Результати моделювання СБ показані на малюнку 32. Інші параметри, наприклад коефіцієнт заповнення ζ (КЗ) (%), коефіцієнт корисної дії (ККД), температурний коефіцієнт напруги і струму можна побачити в робочому полі Matlab в такому вигляді:

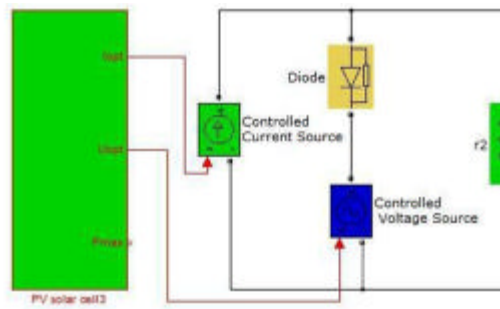


Рисунок 3.4 – Схема включення "PV Solar cell3" у SlimPowerSystem

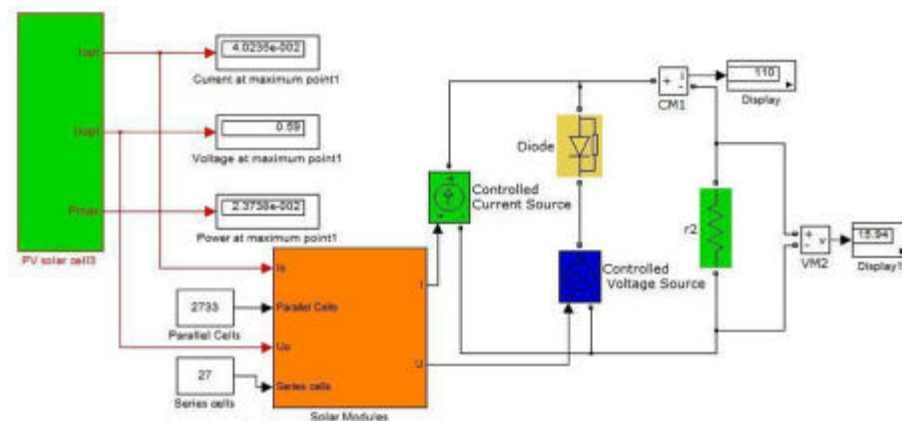


Рисунок 3.5 – Включення сонячного модуля "PV Solar cell3"

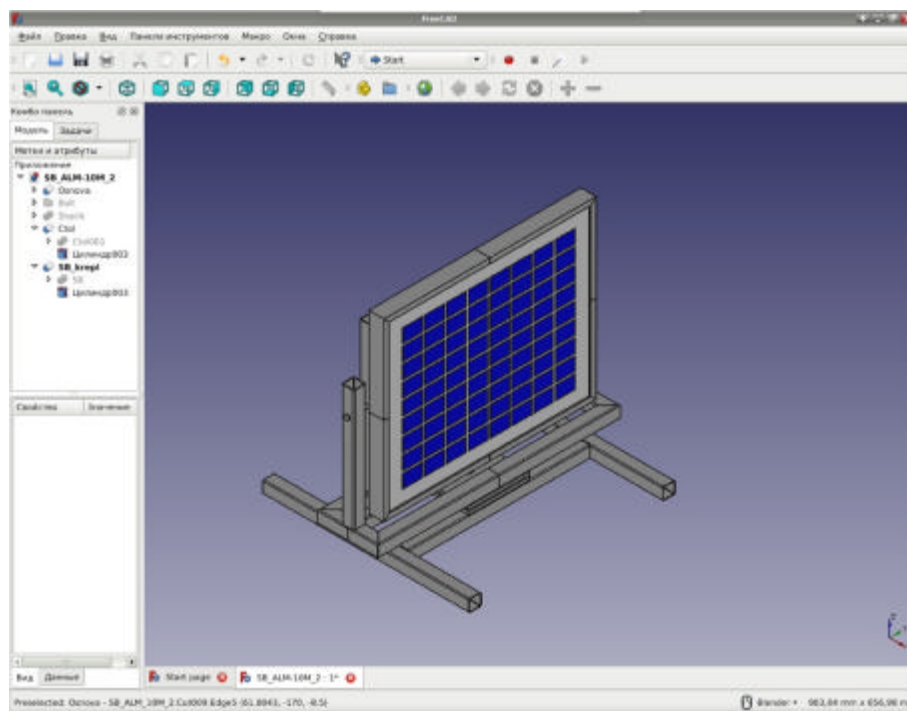


Рисунок 3.6 – тривимірна модель пристрою відслідковування положення
сонця

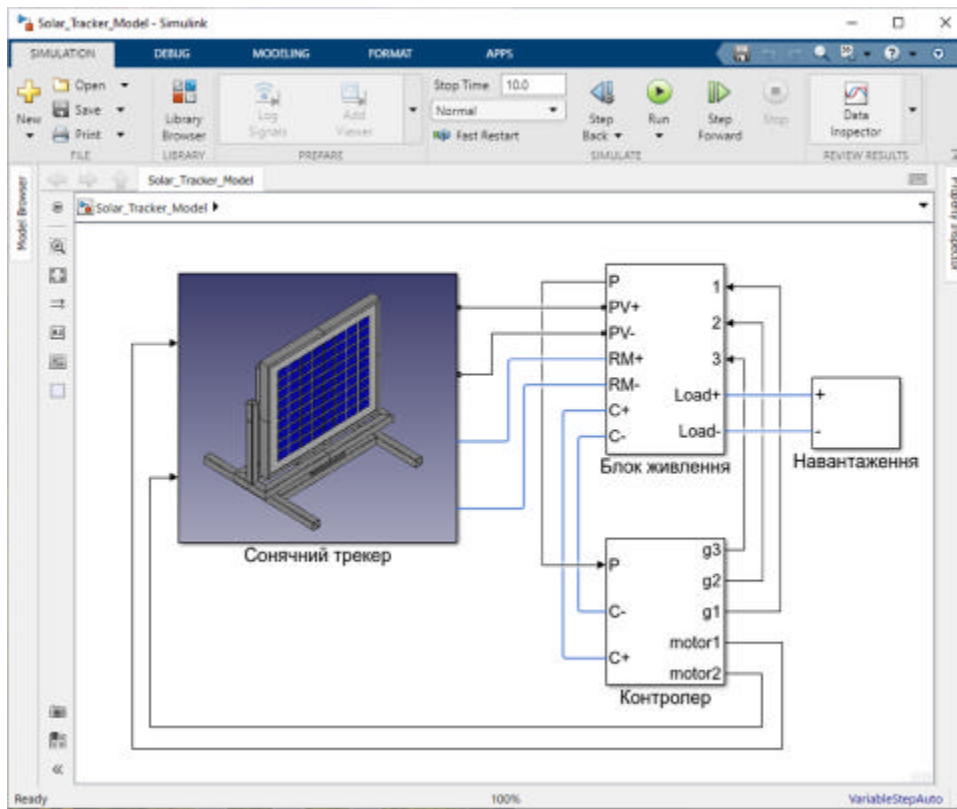


Рисунок 3.7 – Запропонована імітаційна модель автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця

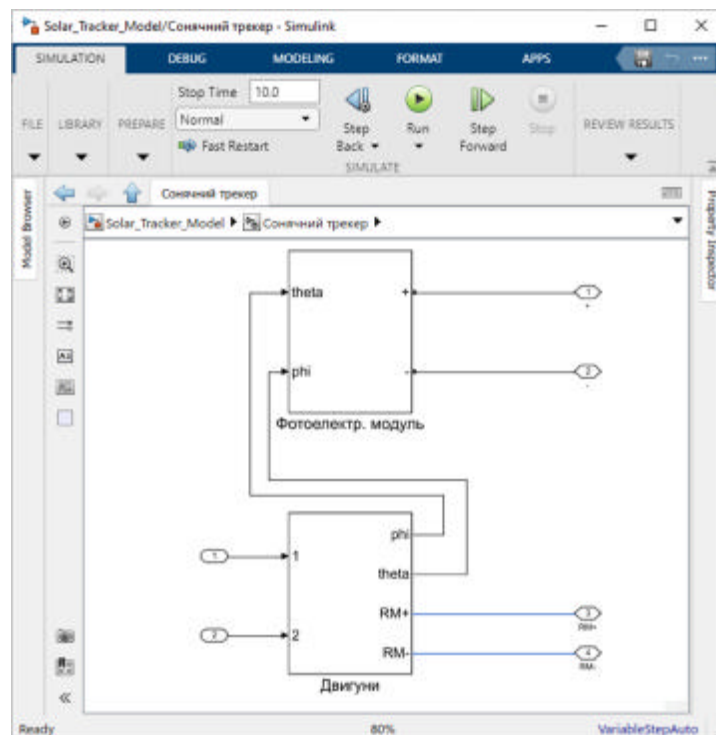


Рисунок 3.7 – Підсистема імітаційної моделі сонячного трекера

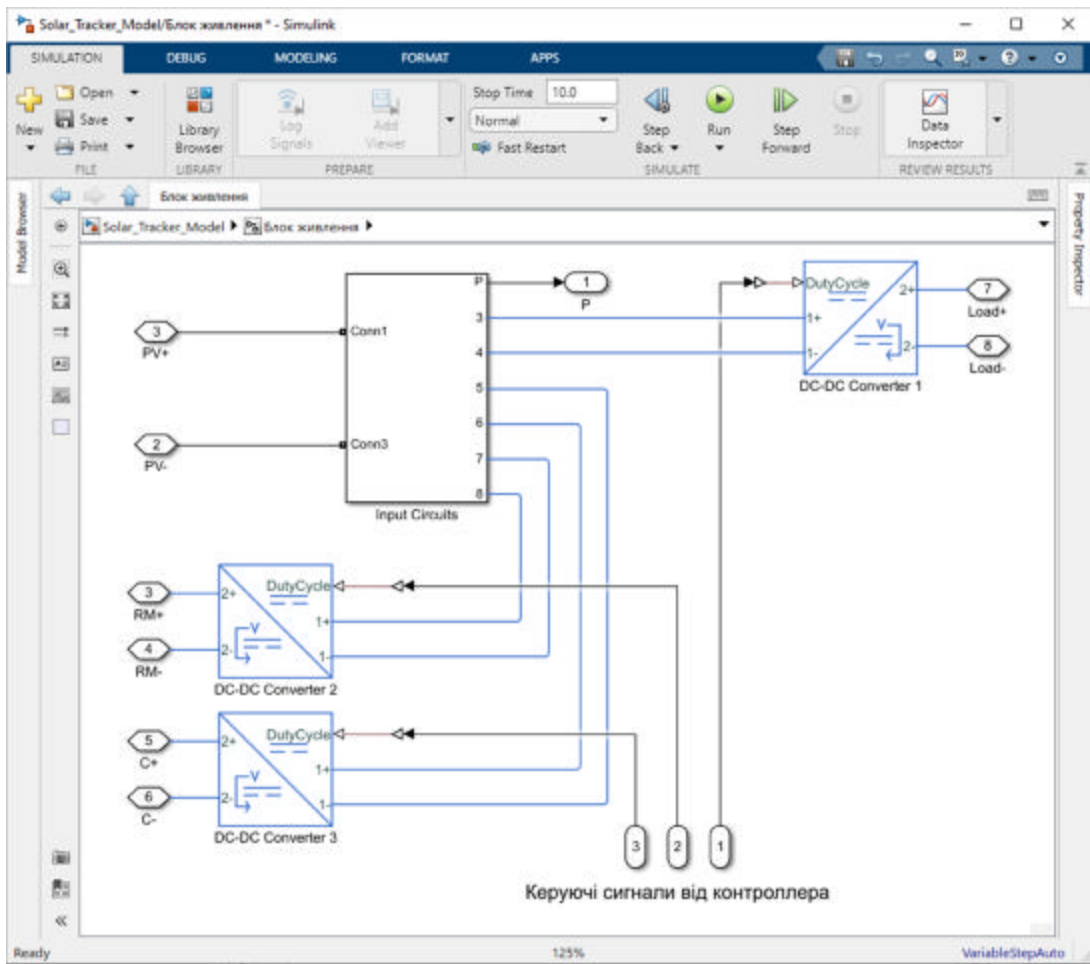


Рисунок 3.8 – Підсистема блоку живлення з імпульсними перетворювачами

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Характеристика об'єкту та предмету дослідження

Магістерська кваліфікаційна робота спрямована на розробку імітаційної моделі автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця. Така імітаційна модель дозволить із високою точністю спрогнозувати характеристики процесів автоматизованого керування пристроєм відслідковування положення сонця за різних типів навантаження та погодних умов. Використання імітаційної моделі дає значну економічну перевагу в порівнянні із натурними експериментами над обладнанням, особливо у нештатних режимах роботи.

Об'єкт дослідження – процеси автоматизованого керування пристроєм відслідковування положення сонця.

Предмет дослідження – імітаційна модель автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця.

4.2 Методика досліджень імітаційних моделей

На даний час на базі Хмельницького національного університету функціонує дахова сонячна електростанція (рис. 2.28).



Рисунок 4.1 – Сонячні панелі на даху корпусу №4 ХНУ

В лабораторних умовах проводяться дослідження фотоелектричних сонячних модулів при різних рівнях освітленості та температури (рис. 2.29, 2.30.).



Рисунок 4.2 – Установка для досліджень характеристик сонячних панелей

Установка побудована на основі матриці освітлювальних елементів з різними характеристиками спектру та потужності світлового потоку. Передбачена можливість моделювання нерівномірної освітленості сонячного модуля.



Рисунок 4.3 – Дослідження характеристик сонячної панелі у лабораторії сонячної енергетики ХНУ.

В процесі досліджень проведено вимірювання вольт-амперних характеристик ФМ при рівномірній та нерівномірній освітленості. Досліджено

ефективність різних типів імпульсних перетворювачів при нерівномірній освітленості сонячної батареї.

Отримані результати досліджень фотоелектричних модулів використані для побудови імітаційних моделей у програмному середовищі Simulink, з метою покращення характеристик імпульсних перетворювачів енергії.

На рис. 4.4 зображено імітаційну модель, побудовану за вимірними характеристиками сонячної батареї, яка зображена на рис. 2.29, 2.30.

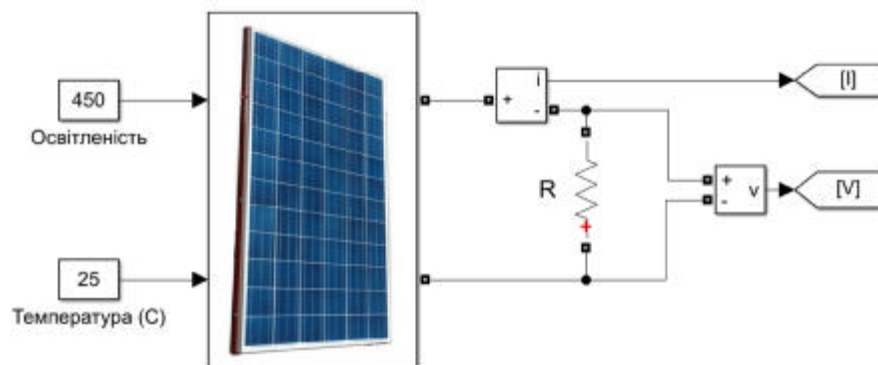


Рисунок 4.4 – Імітаційна модель досліджуваної сонячної панелі в Simulink

Характеристики отриманої моделі зображені на рис. 2.32.

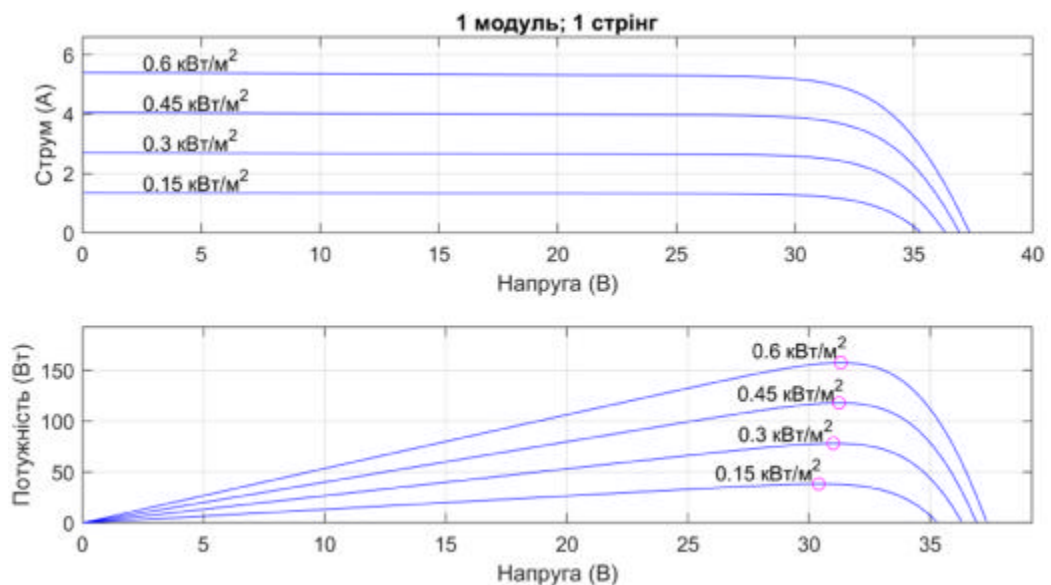


Рисунок 4.5 – Характеристики імітаційної моделі сонячної панелі

Імітаційне моделювання процесу відслідковування тмп фотоелектричного модуля в simulink

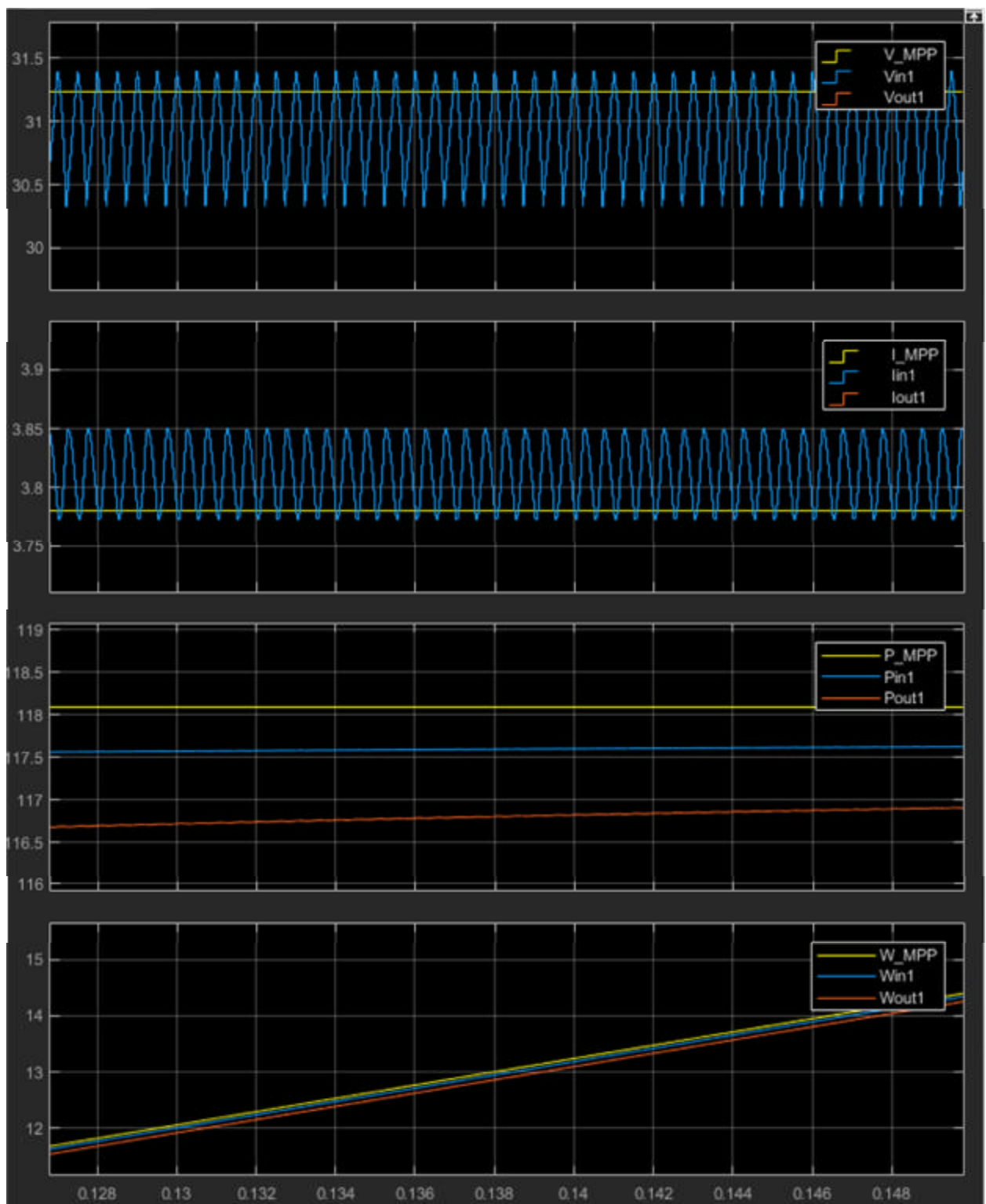


Рисунок 4.8 – Вікно результатів імітаційного моделювання (блок Score)

Запропонований підхід до обробки експериментальних даних універсальний як зокрема області застосування, і у випадках побудови моделі: моделі можуть мати вид суми, твори приватних залежностей, їх комбінації, з послідовною нейтралізацією впливу пріоритетних аргументів чи ні. Важливою перевагою методу є можливість з належним рівнем надійності оцінити вплив

тих аргументів, які у традиційних методах будуть виключені з аналізу як такі, що не впливають на цільову функцію суттєво (наприклад, за критерієм Фішера). Це забезпечується процедурою послідовною нейтралізацією впливу на функцію сильнодіючих аргументів, при якій і починає проявлятися вплив "слабших" аргументів [38]. Метод детерміновано, тобто. дозволяє обмежувати вибір моделі відомими даними з теорії процесу (тип рівнянь, межі тощо). На вихід програма, крім аналітичного характеру приватних зв'язків, дає їх графіки, оцінку надійності. Ранжує фактори по силі впливу на

результат, що дозволяє виділити суттєво впливають фактори. Графіки приватні зв'язки дозволяють проводити оптимізацію процесу без застосування спеціального математичного апарату [38].

Метод пройшов широку та успішну апробацію в ряді

дослідних (у тому числі академічних) інститутів та лабораторій. Він застосовувався для обробки хіміко-технологічних, енергетичних, геологічних, гірських, сільськогосподарських та медичних досліджень, у тому числі у низці дисертацій, включаючи докторські [38].

Розробка моделей зводиться до послідовного виконання наступних етапів:

- планування експерименту (при керованому експерименті);
- Проведення експерименту;
- Складання замовлення на моделі;
- Аналіз моделі.

Побудова математичної моделі за результатами проведених вимірювань 3 березня 2017 року в ясну (зміна потужності (P) від освітленості (Фл) та (Фт)):

$$\Phi_{\text{л}} = 577,198 - 14012,1 / t;$$

$$\Phi_{\text{т}} = -14714,5 t^2 + 0,367097 t^2 - 0,79078;$$

$$P(\text{заг}) = (577,198 - 14012,1/t^2) \cdot (-14012,1 t^2 + 0,367097 t^2 - 0,79078);$$

$$\text{СКО} = 14,4\%;$$

$$F = 27,121.$$

де СКО - похибка вимірів, %;

F – коефіцієнт Фішера.

Графік підвищення потужності зі зміною освітленості лицьової та тильної сторони у ясну погоду залежно від часу представлений у Додатку (рис. 6).

Побудова математичної моделі за результатами проведених вимірювань 6 березня 2017 року у похмуру погоду (зміна потужності (P) від освітленості (Фл) та (Фт)):

$$\Phi_{\text{Л}} = 560,898 - 13380,5 / t;$$

$$\Phi_{\text{Т}} = -10784,5 t^2 + 0,0267097 t^2 - 0,419078;$$

$$P(\text{заг}) = (560,898 - 13380,5/t^2) \cdot (-10784,5 t^2 + 0,0267097 t^2 - 0,419078);$$

$$\text{СКО} = 1,24\%;$$

$$F = 20,921.$$

Графік підвищення потужності зі зміною освітленості лицьової та тильної сторони у похмуру погоду залежно від часу представлений у Додатку (рис. 7).

Побудова математичної моделі за результатами проведених вимірювань 3 березня 2017 року у ясну погоду (зміна потужності (I) від освітленості (Фл) та (Фт)):

$$\Phi_{\text{л}} = 142,746 - 21973,1 / t;$$

$$\Phi_{\text{т}} = -0,9756,3 t^2 + 0,145987 t^2 - 0,34591;$$

$$I(\text{заг}) = (142,746 - 21973,1/t) \cdot (-0,9756,3 t^2 + 0,145987 t^2 - 0,34591);$$

$$\text{СКО} = 27,10\%;$$

$$F = 35,179.$$

Графік підвищення струму зі зміною освітленості лицьової та тильної сторони у ясну погоду залежно від часу представлений у Додатку (рис. 8).

Побудова математичної моделі за результатами проведених вимірювань 6 березня 2017 року у похмуру погоду (зміна потужності (I) від освітленості (Фл) та (Фт)): $\Phi_{\text{л}} = 115,113 - 18711,6 / t;$

$$\Phi_{\text{т}} = -0,7117,5 t^2 + 0,11789 t^2 - 0,23374;$$

$$I(\text{заг}) = (115,113 - 18711,6/t) \cdot (-0,7117,5 t^2 + 0,11789 t^2 - 0,23374);$$

$$\text{СКО} = 0,84\%;$$

$$F = 24,111.$$

Графік підвищення струму із зміною освітленості лицьової та тильної сторони у похмуру погоду залежно від часу представлений у Додатку (рис. 9).

У роботі [8] наведено велику кількість схем підвищення постійної напруги за допомогою елементів L , C та перемикачів. При цьому однією із найпростіших для практичної реалізації є схема, яка наведена на рис. 3.1 [74].

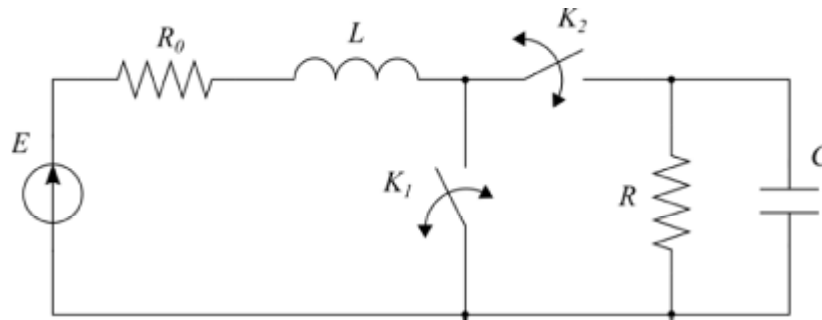


Рисунок 4.9 – Схема підвищуючого імпульсного перетворювача

Аналогічні результати дає і схема, яка наведена на рис. 3.2.

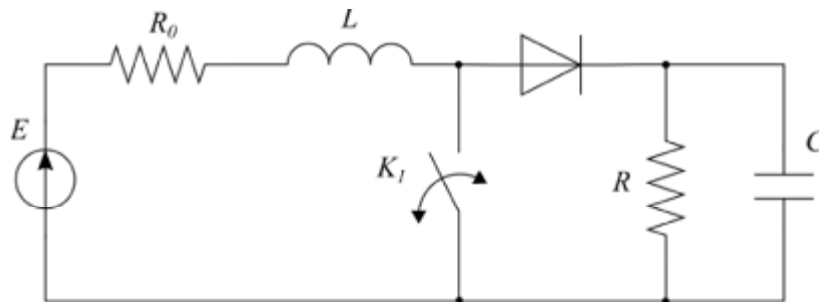


Рисунок 4.10 – Еквівалентна схема підвищуючого імпульсного перетворювача

Для аналізу та опису більш зручною є зручніше схема рис. 3.1, яка далі розглядається.

Фаза 1. K_2 - розімкнутий, а K_1 замкнутий.

Початкові умови: $i_L(0) = 0$; $U_C(0) = 0$.

Струм в котушці індуктивності описується виразом

$$i_L = \frac{E}{R_0} + (i_L(0) - \frac{E}{R_0})e^{-\frac{R_0}{L}t} \quad (1)$$

де R_0 - включає внутрішній опір джерела напруги, опір котушки індуктивності та опір ключа K_1 . Струм в опорі R_H відсутній ($U_C / 0 = 0$) [74].

У фазі 2 через час $t = t_1$ ключ K_2 замикається, а ключ K_1 розмикається.

Тепер розрахункова схема має вигляд рис. 3.3

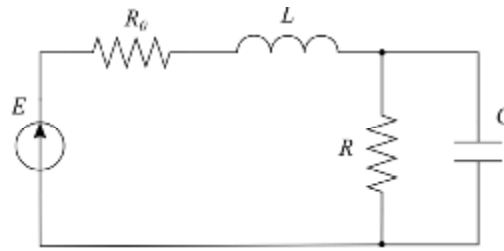


Рисунок 4.11 – Еквівалентна схема заміщення для фази 2

Диференційне рівняння кола для фази 2 має другий порядок, а відповідне йому характеристичне рівняння описується виразом:

$$R_H LC p^2 + (R_0 R_H C + L) p + R_0 + R_H = 0 \quad (2)$$

Корені характеристичного рівняння:

$$p_{1,2} = -\frac{R_0 R_H C + L}{2 R_H LC} \pm \sqrt{\left(\frac{R_0 R_H C + L}{2 R_H LC}\right)^2 - \frac{R_0 + R_H}{R_H LC}}. \quad (3)$$

Відомо, що в RLC -колі (рис. 3.3) напруга на конденсаторі може перевищувати напругу джерела, якщо перехідний процес має коливальний характер. В даному випадку такий перехідний процес має місце при умові

$$\frac{R_0 + R_H}{R_H LC} > \left(\frac{R_0 R_H C + L}{2 R_H LC}\right)^2. \quad (4)$$

Корені характеристичного рівняння визначаються виразом

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_B, \quad (5)$$

$$\text{де } \delta = \frac{R_0 R_H C + L}{2 R_H LC};$$

ω_B - частота вільних коливань кола

$$(\omega_B = \sqrt{\frac{R_0 + R_H}{R_H L C} - (\frac{R_0 R_H C + L}{2 R_H L C})^2}).$$

Тоді струм індуктивності:

$$i_L = \frac{E}{R_0 + R_H} + A e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_B t + \psi). \quad (6)$$

Напруга на конденсаторі (на навантаженні):

$$\begin{aligned} U_C = U_H &= E - i_L \cdot R_0 - L \frac{di_L}{dt} = \\ &= E - (\frac{E}{R_0 + R_H} + A e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_B t + \psi)) R_0 - \\ &- L(-\delta A e^{-\delta t} \sin(\omega_B t + \psi) + \omega_B A e^{-\delta t} \cos(\omega_B t + \psi)) - \quad (7) \\ &- E \frac{R_H}{R_0 + R_H} + A e^{-\delta t} (L \cdot \delta - R_0) \sin(\omega_B t + \psi) - \\ &- \omega_B L \cdot A e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega_B t + \psi) \end{aligned}$$

За початковими умовами з (6) та (7) можна визначити A та ψ для наступного циклу зміни фази 1 та фази 2, де вже $i_L(0) \neq 0$ та $U_C(0) \neq 0$.

З кожним новим циклом середні значення $I_{L.cp}$ та $U_{H.cp}$ будуть підвищуватися і в усталеному періодичному режимі залежності $i_L(t)$ та $U_H(t)$ будуть мати вигляд наведений на рис. 3.4 та рис. 3.5.

Для загального випадку математична модель boost-конвертера може бути представлена у вигляді ітеративного відображення виду:

$$i_L(t) = F_L(t, t_k, E, i_L(t_k), u_C(t_k)), \quad (8)$$

$$u_C(t) = F_C(t, t_k, E, i_L(t_k), u_C(t_k)), \quad (9)$$

де t_k - час останньої комутації до моменту t ,

F_L , F_C - функції, які визначаються рівняннями кіл для фази 1 і фази 2 та параметрами елементів.

Для фази 1 миттєві значення струму і напруги визначаються виразами:

$$i_L(t) = \frac{E}{R_0} - \frac{E}{R_0} \cdot e^{-\frac{R_0}{L}(t-t_k)} + i_L(t_k) \cdot e^{-\frac{R_0}{L}(t-t_k)} \quad (10)$$

$$u_C(t) = u_C(t_k) \cdot e^{-\frac{1}{R_H C}(t-t_k)} \quad (11)$$

Відповідно, для фази 2 отримаємо:

$$\begin{aligned} i_L(t) = & \left(A_0 + A_1 e^{p_1(t-t_k)} + A_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot E + \\ & + \left(B_1 e^{p_1(t-t_k)} + B_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot i_L(t_k) + \\ & + \left(C_1 e^{p_1(t-t_k)} + C_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot u_C(t_k) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} u_C(t) = & \left((1 - A_0 R_0) - (R_0 + L p_1) A_1 e^{p_1(t-t_k)} - (R_0 + L p_2) A_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot E + \\ & + \left((R_0 + L p_1) B_1 e^{p_1(t-t_k)} + (R_0 + L p_2) B_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot i_L(t_k) + \\ & + \left((R_0 + L p_1) C_1 e^{p_1(t-t_k)} + (R_0 + L p_2) C_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot u_C(t_k) \end{aligned} \quad (13)$$

де коефіцієнти А, В, С зручно виразити з використанням замінін:

$$b = \frac{R_H R_0 C + L}{R_H L C}, \quad c = \frac{R_H + R_0}{R_H L C}, \quad d = \frac{1}{R_H L C}, \quad (14)$$

$$D = \sqrt{b^2 - 4c}, \quad (15)$$

$$p_1 = (-b + D) / 2, \quad p_2 = (-b - D) / 2,$$

$$A_0 = \frac{d}{c}, \quad A_1 = \frac{d}{2c} \left(-1 - \frac{b}{D} \right) + \frac{1}{DL}, \quad A_2 = \frac{d}{2c} \left(-1 + \frac{b}{D} \right) - \frac{1}{DL}, \quad (16)$$

$$B_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{b}{D} \right) + \frac{R_0}{DL}, \quad B_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{D} \right) - \frac{R_0}{DL}, \quad (17)$$

$$C_1 = \frac{1}{DL}, \quad C_2 = -\frac{1}{DL}, \quad (18)$$

Таким чином, математична модель підвищуючого імпульсного перетворювача для k -го періоду комутації, який включає фазу 1 та фазу 2 може бути приведена до вигляду ітеративного відображення:

$$i_L(t) = F_L(t, t_k, E, i_L(t_k), u_C(t_k)) = \begin{cases} \frac{E}{R_0} - \frac{E}{R_0} \cdot e^{-\frac{R_0}{L}(t-t_k)} + i_L(t_k) \cdot e^{-\frac{R_0}{L}(t-t_k)}, & K \text{ замкнутий} \\ \left(A_0 + A_1 e^{p_1(t-t_k)} + A_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot E + \\ + \left(B_1 e^{p_1(t-t_k)} + B_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot i_L(t_k) + \\ + \left(C_1 e^{p_1(t-t_k)} + C_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot u_C(t_k), & K \text{ розімкнутий} \end{cases} \quad (19)$$

$$u_C(t) = F_C(t, t_k, E, i_L(t_k), u_C(t_k)) = \begin{cases} u_C(t_k) \cdot e^{-\frac{1}{R_{HC}}(t-t_k)}, & K \text{ замкнутий} \\ \left((1 - A_0 R_0) - (R_0 + L p_1) A_1 e^{p_1(t-t_k)} - (R_0 + L p_2) A_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot E + \\ + \left((R_0 + L p_1) B_1 e^{p_1(t-t_k)} + (R_0 + L p_2) B_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot i_L(t_k) + \\ + \left((R_0 + L p_1) C_1 e^{p_1(t-t_k)} + (R_0 + L p_2) C_2 e^{p_2(t-t_k)} \right) \cdot u_C(t_k), & K \text{ розімк., } i_L(t) \neq 0 \\ u_C(t_k) \cdot e^{-\frac{1}{R_{HC}}(t-t_k)}, & K \text{ розімк., } i_L(t) = 0 \quad (t_k - \text{час встановлення } i_L(t) = 0) \end{cases} \quad (20)$$

Виконуючи послідовні відображення (19) та (20) можна отримати значення струму i_L та напруги u_C для довільно заданого часу t .

3.2 Аналіз параметрів та режимів імпульсного перетворювача

Пульсації напруги та струму перетворювача зображені на рис. 3.4 та рис. 3.5

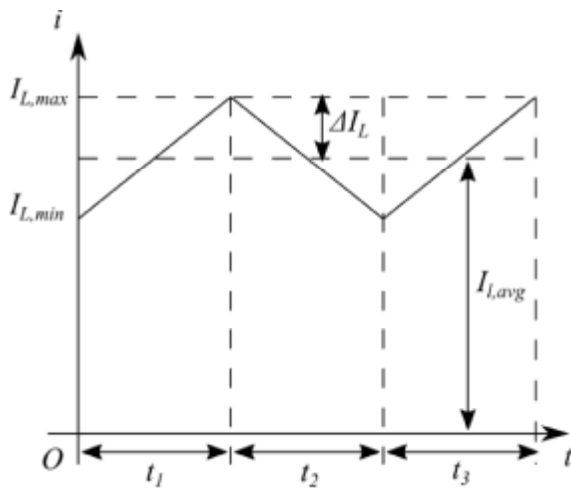


Рисунок 4.12

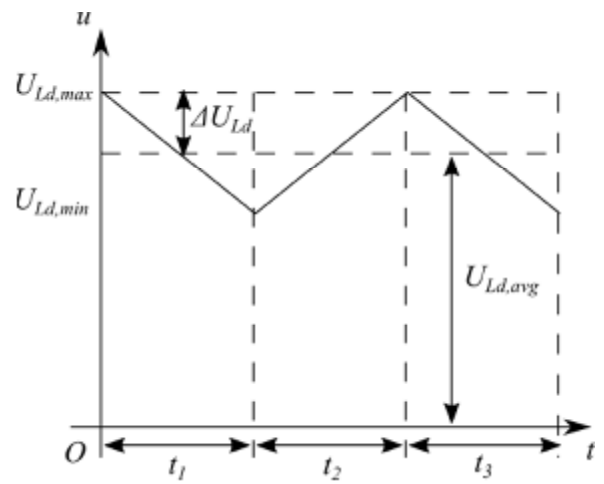


Рисунок 4.13

Криві $i_L(t)$ та $U_H(t)$ показані для випадків, коли t_1 та t_2 відповідають лінійної ділянці експоненти. З урахуванням графіків для фази

$$i_L(0) = I_{L \min} = I_{Lcp} - \Delta I_L \quad (21)$$

$$U_C(0) = U_{H \max} = U_{Hcp} - \Delta U_H \quad (22)$$

Струм i_L описується виразом (1), а напруга U_H виразом

$$U_H = U_C = U_{c \max} e^{-\frac{t}{R_H C}}. \quad (23)$$

Початкові умови для фази 2 визначаються виразами:

$$i_L(0) = I_{L \max} = \frac{E}{R_0} + (I_{L \min} - \frac{E}{R_0}) e^{-\frac{R_0}{L} t_1} \quad (24)$$

$$U_C(0) = U_{C \min} = U_{C \max} e^{-\frac{t_1}{R_H C}} \quad (25)$$

Для таких початкових умов визначимо A, ψ . Виникає питання визначення періодів комутацій t_1 та t_2 від яких залежить глибина коливань напруги ΔU_H та коливань струму ΔI_L [34].

Задамо $\Delta I_L = K_1 \cdot I_{Lcp}$. Тоді для моменту часу $t = t_1$:

$$i_L = I_{Lcp} + K_1 \cdot I_{Lcp} = \frac{E}{R_0} + (I_{Lmin} - \frac{E}{R_0})e^{-\frac{R_0}{L}t_1},$$

$$\text{звідки } e^{-\frac{R_0}{L}t_1} = \frac{I_{Lcp} + K_1 I_{Lcp} - E / R_0}{I_{Lcp} - K_1 \cdot I_{Lcp} - E / R_0}.$$

Таким чином,

$$t_1 = -\frac{L}{R_0} \ln \frac{(1 + K_1)I_{Lcp} - E / R_0}{(1 - K_1)I_{Lcp} - E / R_0}. \quad (26)$$

Для визначення $U_{H.cp}$ скористуємось даними [55], які наведені для $R_0 = 0$:

$$U_{H.cp} = \frac{t_1 + t_2}{t_1} E = K_\delta \cdot E. \quad (27)$$

Тоді середнє значення струму в R_H :

$$I_{H.cp} = \frac{U_{H.cp}}{R_H},$$

а потужність, відповідно

$$P_{H.cp} = \frac{U_{H.cp}^2}{R_H} \quad (28)$$

Можна скористатися більш точною формулою потужності

$$P_{H.cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_H^2}{R_H} dt,$$

але простий аналіз при $t_1 = t_2 = \frac{T}{2}$ показує незначну похибку. Так для фази 1

рис. 3.5 справедлива рівність:

$$U_H = U_{Hmax} - \frac{2\Delta U_H}{T/2} \cdot t.$$

Тоді за час $t = 0 \dots T / 2$:

$$P_{H.cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \frac{(U_{H.max} - \frac{4\Delta U_H}{T} t)^2}{R_H} dt = \frac{1}{R_H} (U_{H.cp}^2 + \frac{1}{3} \Delta U_H^2). \quad (29)$$

Якщо взяти, наприклад, $\Delta U_H = 0,1 U_{H.cp}$ (а це досить великі коливання напруги), то похибка буде порівняно з (28) всього 0,33%.

Враховуючи, що при $R_0 = 0$ в схемі немає додаткових втрат потужності, можна стверджувати [34]:

$$P_{дж} = P_H,$$

або

$$E \cdot I_{Lcp} = U_{H.cp} \cdot I_{H.cp},$$

$$I_{Lcp} = I_{H.cp} \cdot \frac{U_{H.cp}}{E} = I_{H.cp} \cdot \frac{K_\delta \cdot E}{E} = K_\delta \cdot I_{H.cp} \quad (30)$$

Тобто, схема по суті є підвищуваним трансформатором з коефіцієнтом трансформації K_δ :

$$\frac{U_{H.cp}}{E} = \frac{I_{Lcp}}{I_{H.cp}} = K_\delta. \quad (31)$$

Визначимо, як впливає умова $R_0 = 0$ на $U_{H.cp}$, I_{Lcp} ?

При виконанні умови $R_0 \neq 0$ вихідна напруга генератора (джерела живлення) описується виразом:

$$U_{дж} = E - I_{Lcp} \cdot R_0 \quad (32)$$

Тоді напруга на навантаженні

$$U_{H.cp} = K_\delta \cdot (E - I_{Lcp} \cdot R_0) = K_\delta (E - K_\delta \cdot I_{H.cp} \cdot R_0) = K_\delta (E - K_\delta \frac{U_{H.cp}}{R_H} R_0),$$

звідки
$$U_{H.cp} = \frac{K_{\delta} \cdot E}{1 + K_{\delta}^2 \frac{R_0}{R_H}}.$$

Відповідно, усереднені значення можна знайти за формулами:

$$I_{H.cp} = \frac{U_{H.cp}}{R_H}$$

$$I_{Lcp} = K_{\delta} \cdot \frac{U_{H.cp}}{R_H} = \frac{K_{\delta}}{R_H} \cdot \frac{K_{\delta} E}{1 + K_{\delta}^2 \frac{R_0}{R_H}}.$$

В фазі 1 виконуються умови:

$$U_C = U_{Cmax} e^{-t/R_H C}$$

$$U_{Cmin} = U_{Cmax} e^{-t/R_H C}$$

$$t_1 = -R_H C \ln \frac{U_{H.cp} - \Delta U}{U_{H.cp} + \Delta U}.$$

При $\Delta = 0,1$ $R_H C = 20 \cdot 10^{-3}$ $t_1 = 0,004$ с .

Тоді визначимо, при якому $R_0 = 0$ по відношенню до R_H схема не буде мати переваги перед прямим підключенням R_H до джерела.

Необхідна умова:

$$U_{H.cp} > E \frac{R_H}{R_0 + R_H},$$

або:

$$\frac{K_{\delta} E}{1 + K_{\delta}^2 \cdot \frac{R_0}{R_H}} > \frac{E R_H}{R_0 + R_H}.$$

Після перетворень отримаємо:

$$R_0 < \frac{R_H}{K_\delta}, \quad (33)$$

а при $R_0 = \frac{R_H}{K_\delta}$ схема видає таку саму напругу, що і при прямому підключенню R_H до джерела.

Повернемося ще раз до вибору $T = t_1 + t_2$.

В фазі 1 визначено t_1 , виходячи з потрібного ΔU_L . Напруга U_H в фазі 1

описується виразом (23). Тут $U_{C \min} = U_{C \max} e^{-\frac{t_1}{R_H C}}$, або:

$$U_{H.cp} - \Delta U_H = (U_{H.cp} + \Delta U_H) e^{-\frac{t_1}{R_H C}},$$

звідки

$$t_1 = -R_H C \ln \frac{U_{H.cp} - \Delta U_H}{U_{H.cp} + \Delta U_H}$$

Якщо задати $\Delta U_H = K_1 \cdot U_{H.cp}$, то

$$t_1 = -R_H C \ln \frac{1 - K_1}{1 + K_1}. \quad (34)$$

На наступному інтервалі часу (фаза 2) справедливою буде умова

$$t_2 \ll \frac{2\pi}{\omega_B}, \quad (35)$$

що також забезпечує практично лінійну зміну напруги (початкова частина експоненти).

Аналіз та вимірювання [33, 34], що при $t_1 = t_2 = \frac{2\pi}{\omega_B} > 3 \cdot R_{HC}$

конденсатор розряджається практично до нуля, тобто $U_{H \min} = 0$, а

$$U_{H.cp} = \frac{U_{H \max}}{2} \quad \text{і} \quad \Delta U_H = \frac{U_{H \max}}{2}.$$

Тому, для вибору величини C можна прийняти:

$$t_2 = t_1 = \frac{R_H C}{5 \dots 10} \rightarrow C.$$

Оптимальне значення коефіцієнта трансформації $K_{\delta opt}$ можна визначити з умови:

$$\frac{dU_H}{dK_\delta} = \left(\frac{K_\delta E}{1 + K_\delta^2 \left(\frac{R_0}{R_H} \right)} \right)' = 0, \quad (36)$$

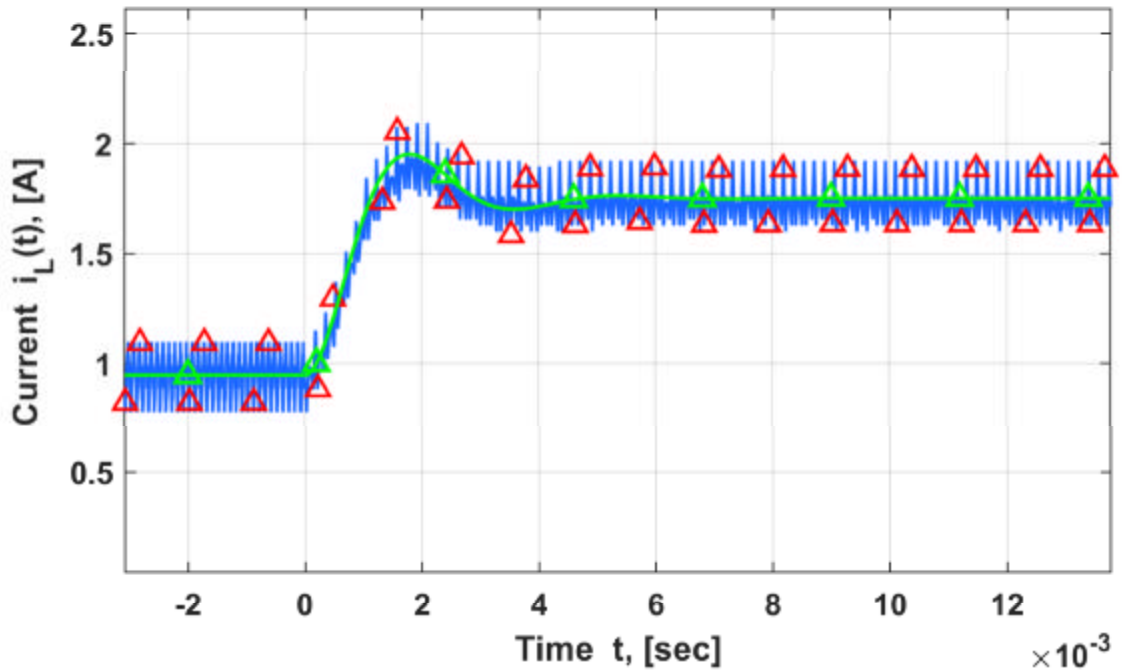
Звідки отримуємо коефіцієнт:

$$K_{\delta opt} = \sqrt{\frac{R_H}{R_0}}. \quad (37)$$

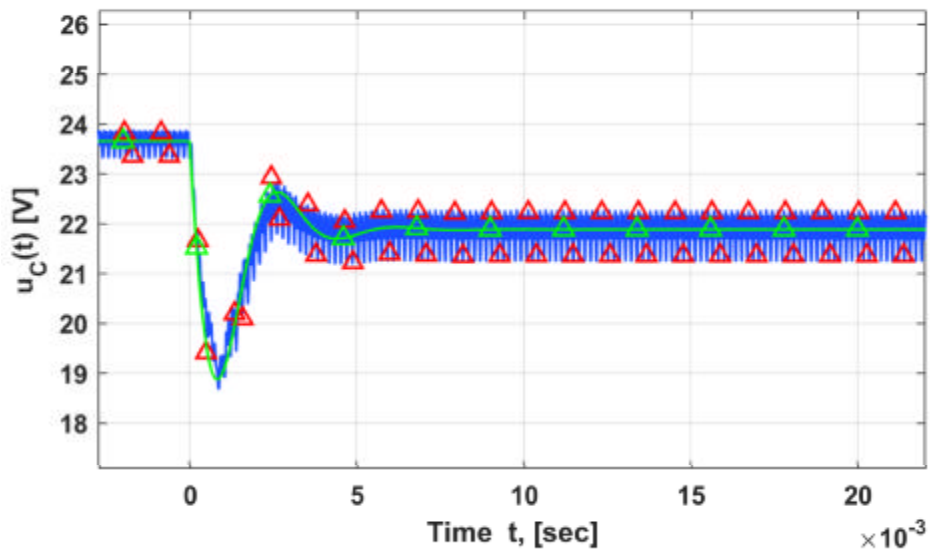
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1 Перехідні процеси імпульсного перетворювача

Приведено характеристики перехідних процесів імпульсного перетворювача, отримані згідно з науковими результатами [34].



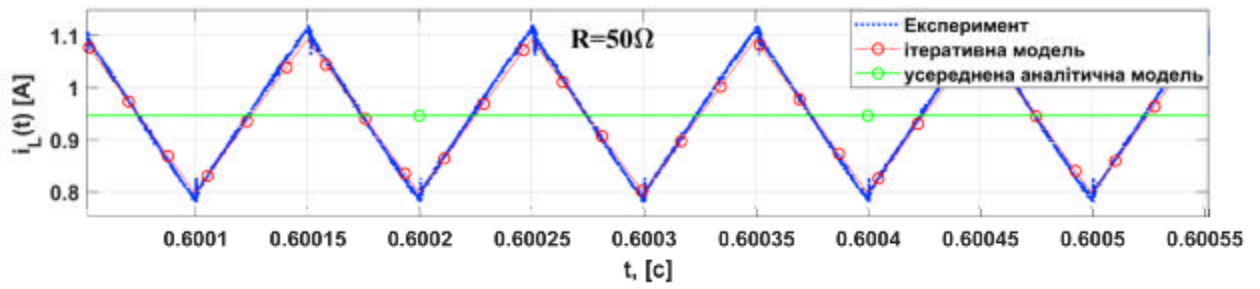
а)



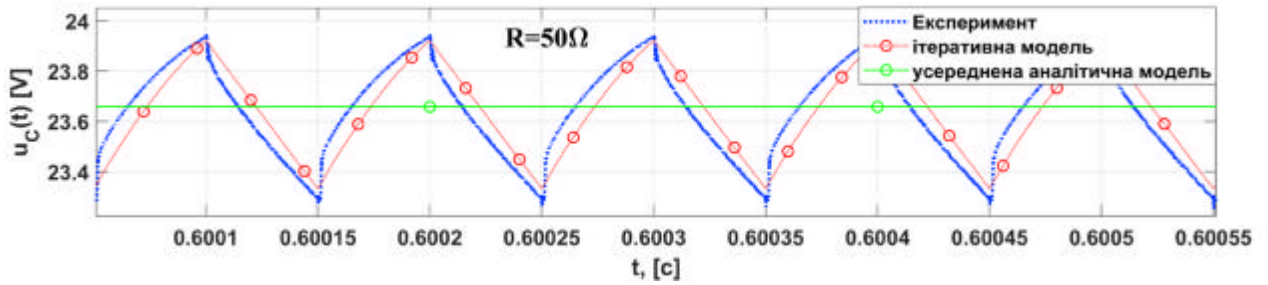
б)

а) струм; б) напруга

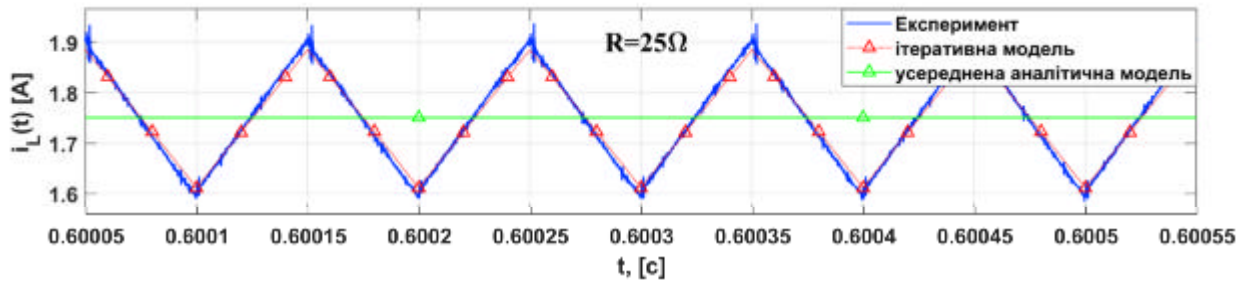
Рисунок 5.1 – Перехідні процеси перетворювача з вихідною ємністю 40мкФ при зменшенні опору навантаження від 50 Ом до 25 Ом.



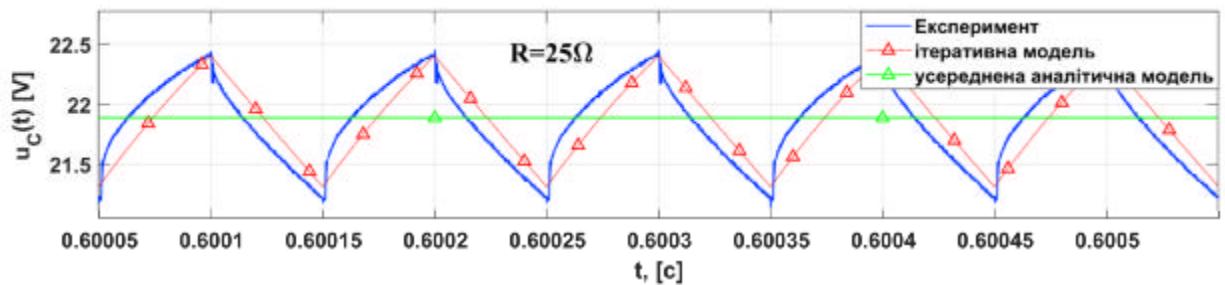
а)



б)



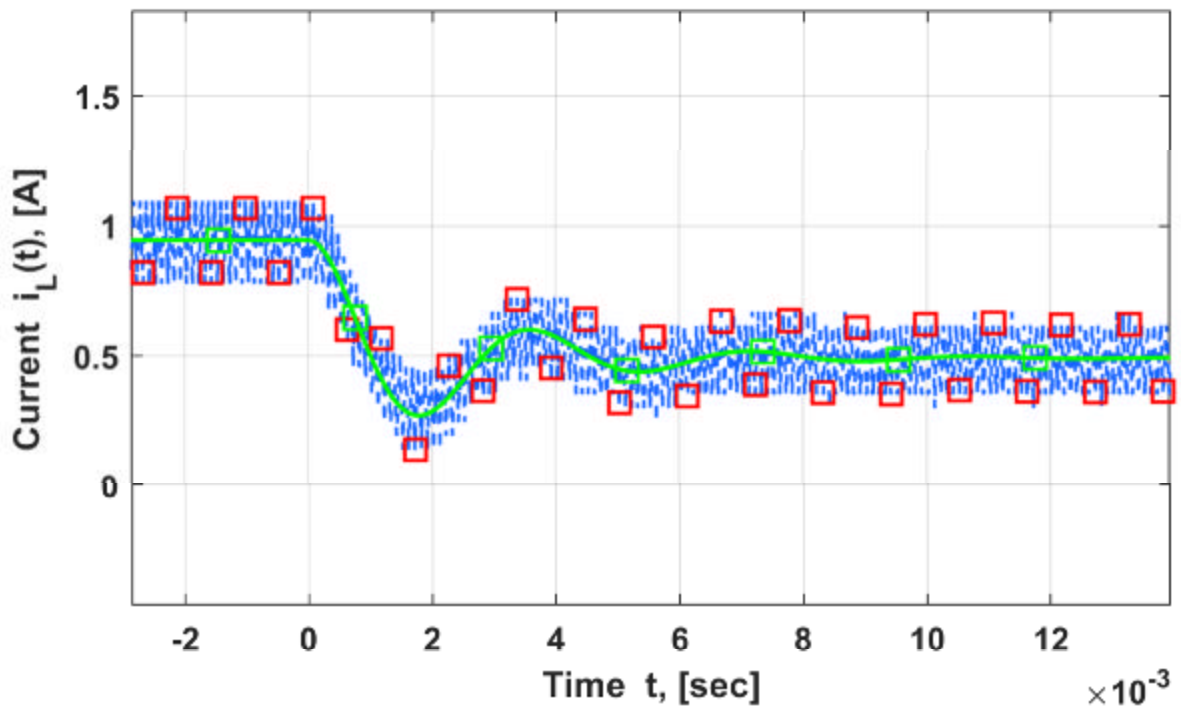
в)



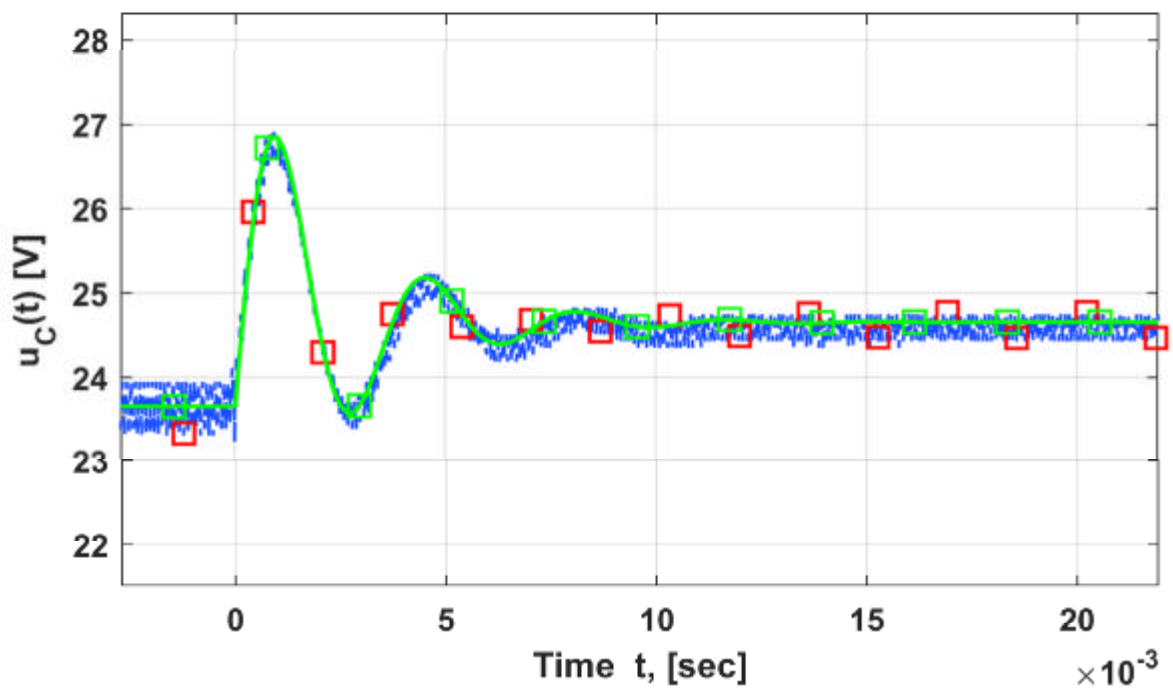
г)

а) струм (50 Ом); б) напруга (50 Ом); в) струм (25 Ом); г) напруга (25 Ом);

Рисунок 5.2 – Пульсації струму та напруги перетворювача з вихідною ємністю 40мкФ при зменшенні опору навантаження від 50 Ом до 25 Ом.



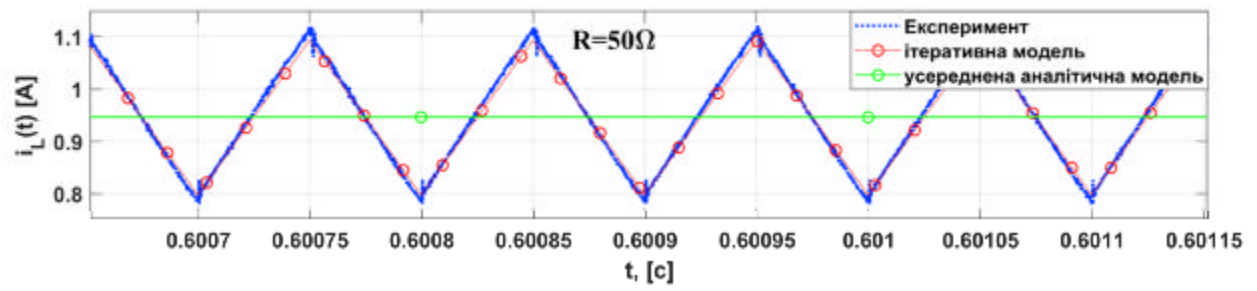
a)



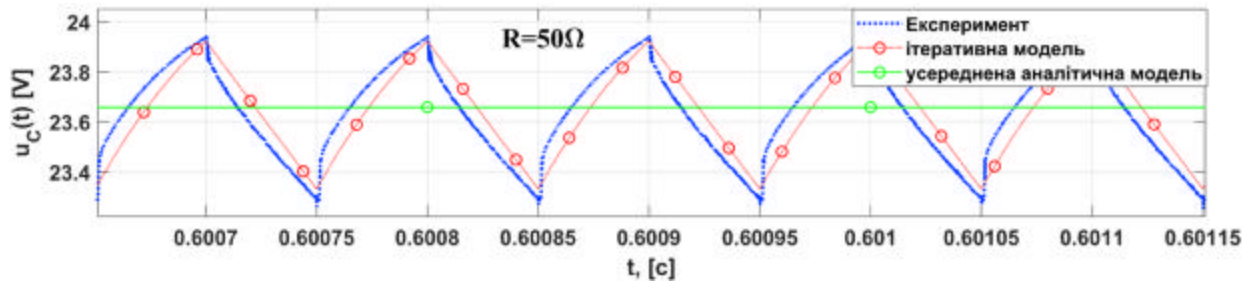
б)

а) струм; б) напруга

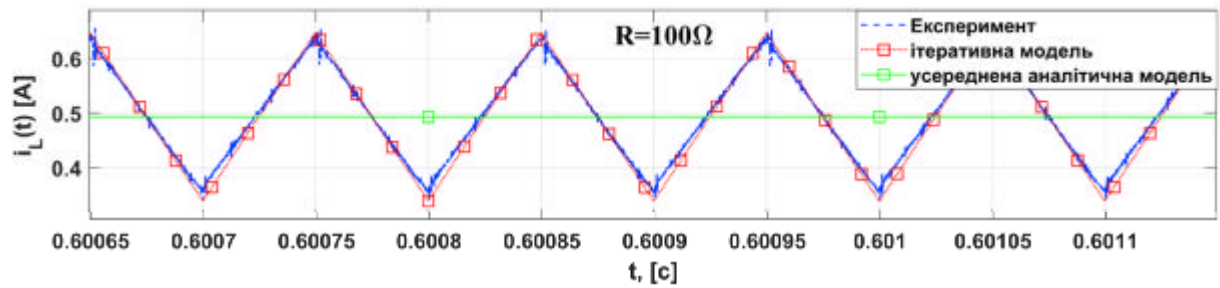
Рисунок 5.3 – Перехідні процеси перетворювача з вихідною ємністю 40мкФ при збільшенні опору навантаження від 50 Ом до 100 Ом.



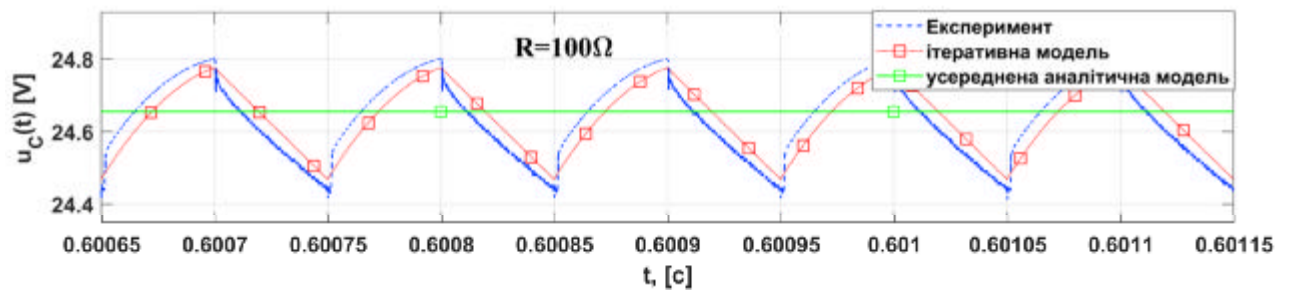
а)



б)



в)



г)

а) струм (50 Ом); б) напруга (50 Ом); в) струм (25 Ом); г) напруга (25 Ом);

Рисунок 5.4 – Пульсації струму та напруги перетворювача з вихідною ємністю 40мкФ при збільшенні опору навантаження від 50 Ом до 100 Ом.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Вимоги до охорони праці при імітаційному моделюванні та виготовленні автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця

Сонячна енергетика - це напрямок альтернативної енергетики, який заснований на безпосередньому застосуванні сонячного випромінювання з метою отримання енергії. Сонячна енергетика застосовує відновлювані джерела енергії, вона є «екологічно чистою», яка не виробляє відходів у процесі використання. Виробництво енергії за допомогою сонячних електростанцій відмінно поєднується з концепцією виробництва енергії, що розподіляється.

Як і будь-яке джерело живлення, джерело, що модернізується, є електротехнічним виробом, до якого на всіх етапах і стадіях життєвого циклу потрібно забезпечити певний рівень безпеки і нешкідливості.

Стадія – період у межах життєвого циклу деякого об'єкта, що належить до стану його опису чи реалізації. Стадії можуть включати:

- визначення потреб;
- дослідження та опис основних концепцій;
- демонстрацію та атестацію основних концепцій;
- проектування та розробку;
- створення та виробництво;
- поширення та продаж;
- експлуатацію;
- супровід та підтримку; зняття з
- експлуатації (утилізацію).

Джерело живлення працюватиме у різних погодних умовах. Сонячні модулі збирають як прямі сонячні промені, а й непрямі. Це означає, що й у

похмурі дні модулі виробляють струм, а взимку сніг відбиває сонячні промені, що збільшує кількість сонячної енергії, що приймає модулі.

Сонячні панелі можуть знижувати вироблювану потужність через затінення від розташованого поруч об'єкта (гори, високий ліс, будівлі). Також впливає хмарність, туман, сильний дощ, пил, листопад і навіть пташиний послід.

Гарантована його робота буде, якщо температура в діапазоні від -50 до +750С, відносна вологість до 100%, атмосферний тиск 84-106,7 кПа, вплив дощу інтенсивністю 5 мм/хв, снігового або ожеледице-вітрового навантаження до 2000 Па. 39]

6.2 Екологічні вимоги при виготовленні та експлуатації автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця

При цьому енергетика - це одне з вогнищ несприятливого впливу на людину та навколишнє середовище. Вона впливає на атмосферу (викиди газів, споживання кисню, вологи, твердих частинок), гідросферу (створення штучних водоймищ, споживання води, скиди нагрітих і забруднених вод, рідких відходів), на літосферу (зміна ландшафту, споживання викопних палив, викиди). У процесі виробництва фотоелементів обсяг забруднень не перевищує допустимий рівень для виробничих підприємств мікроелектронної промисловості. Фотоелементи мають заданий термін служби, який становить 30-50 років. Використання кадмію, при виробництві деяких видів фотоелементів з метою підвищення ефективності перетворення, утворює складне питання їх знешкодження та утилізації, з урахуванням зазначених факторів негативного впливу енергетики на навколишнє середовище, приріст споживання енергії особливої тривоги у громадськості не викликав. Так тривало до 70-х років, коли фахівці оголосили про численні дані, що свідчать про значний антропогенний тиск на клімат, що загрожує катастрофою при неконтрольованому зростанні рівня енергоспоживання. З того часу жодна інша

проблема такої пильної уваги не привертає, як проблема справжніх та майбутніх змін клімату. Вважають, що однією з основних причин цієї зміни стала енергетика. Під енергетикою розуміється будь-яка сфера діяльності, пов'язана із споживанням і виробництвом енергії. Значна частина енергетичних ресурсів забезпечує енергією, що звільняється при спалюванні викопного палива (вугілля, газу та нафти), що призводить до викиду величезної кількості речовин в атмосферу.

Несприятливі дії сонячної енергії можуть проявлятися:

- у можливості витоку робочих рідин, що містять хлорати та нітрити;
- у небезпеці перегріву та займання систем, зараження продуктів

токсичними речовинами при використанні сонячних систем у сільському господарстві;

- у створенні перешкод телевізійного та радіозв'язку;
- у передачі енергії Землю як мікрохвильового випромінювання,
- небезпечного для живих організмів та людини.

У виготовленні фотоелектричних панелей використовується кремній "сонячної" якості. Його виробництво шкідливе. У світі розробляються безхлорні технології його одержання замість «хлорних», так що цю проблему можна вирішити.

Загрозу представляє також застосування геліосистемах низькокиплячих рідин (особливо хроматів і нітритів), які є високотоксичними речовинами, ризик витоків не виключено, що призводить до забруднення підземних вод.

6.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях при експлуатації автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця

Відповідно до чинної нормативної бази основними небезпечними факторами вважаються:

1) небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з електричним струмом, що викликається різницею електричних потенціалів, під дію якого потрапляє працюючий, включаючи дію блискавки та високовольтного розряду у вигляді дуги, а також електричного розряду живих організмів; [38]

2) небезпечні та шкідливі виробничі фактори, пов'язані з електромагнітними полями, що не іонізують тканини тіла людини:

постійного характеру, пов'язаного з:

підвищеним утворенням електростатичних зарядів;

наявністю електростатичного поля, що надмірно відрізняється від поля Землі;

наявністю постійного магнітного поля, що надмірно відрізняється від геомагнітного поля Землі;

змінного характеру, пов'язаного з:

наявністю електромагнітних полів промислових частот (близько 50-60 Гц);

наявністю електромагнітних полів радіочастотного діапазону;

Основні вимоги для виключення небезпек

Відповідно до чинної нормативної бази

Загальні положення.

Електробезпека повинна забезпечуватися:

конструкцією електроустановок; технічними

способами та засобами захисту; організаційними

та технічними заходами.

Електроустановки та їх частини повинні бути виконані таким чином, щоб працюючі не піддавалися небезпечним та шкідливим впливам електричного струму та електромагнітних полів, та відповідати вимогам електробезпеки.

Забезпечення електробезпеки технічними способами та засобами.

Для забезпечення захисту від випадкового дотику до

струмоведучим частинам необхідно застосовувати такі способи та засоби:

захисні оболонки;

захисні огороження (тимчасові чи стаціонарні);

безпечне розташування струмоведучих частин;

ізоляцію струмопровідних частин (робочу, додаткову, посилену, подвійну);

ізоляцію робочого

місця; мала напруга;

захисне відключення;

попереджувальну сигналізацію, блокування, знаки безпеки.

Організаційні та технічні заходи щодо забезпечення електробезпеки.

Для забезпечення безпеки робіт в електроустановках слід

виконувати:

відключення установки (частини установки) від джерела живлення;

перевірка відсутності напруги;

механічне замикання приводів комутаційних апаратів,

зняття запобіжників, від'єднання кінців живильних ліній та інші

заходи, що виключають можливість помилкового подання напруги до місця роботи;

- заземлення відключених струмоведучих частин (накладання переносних заземлювачів, включення заземлювальних ножів);

огороження робочого місця або тих, що залишаються під напругою струмоведучих частин, яких у процесі роботи можна доторкнутися або наблизитися на неприпустиме відстань.

Вимога безпеки до електричного виробу та його частин.

Кабелі на напругу від 1 кВ та вище повинні мати металеві оболонки, екрани або броню.

Вимога не розповсюджується на кабелі спеціального призначення. Допускається виготовляти кабелі на напругу до 3 кВ без оболонок, екрану

та броні, якщо вони призначаються для прокладання в трубах або місцях, що унеможливають створення небезпечної ситуації.

Елементами для заземлення мають бути обладнані наступні

металеві нетоківідні частини виробів, що підлягають заземленню:

оболонки, корпуси, шафи;

каркаси, рами, обійми, стійки, шасі, основи, панелі, плити та інші частини виробів, які можуть бути під напругою при пошкодженні ізоляції.

Допускається не виконувати елементи для заземлення у наступних частин виробів (з перелічених вище):

корпусів виробів, призначених для встановлення на заземлених щитах, металевих стінах камер розподільних пристроїв у шафах;

невідповідні металеві частини виробу, що мають електричний контакт із заземленими частинами, за умови виконання вимог п. 3.3.7;

частин, закріплених в ізоляційному матеріалі або що проходять крізь нього та ізольованих як від заземлених, так і від частин, що знаходяться під напругою (за умови, що при роботі виробу вони не можуть опинитися під напругою або стикатися із заземленими частинами).

Вимоги безпеки до електротехнічного виробу та його частинам.

Елементом для заземлення повинні бути обладнані вироби, призначення яких вимагає здійснення способу захисту людини від ураження електричним струмом, відповідного класам II і III.

Дозволяється при цьому виконувати без елемента заземлення та не заземлювати такі вироби:

призначені для встановлення у недоступних, без застосування спеціальних засобів, місцях (у тому числі - всередині інших виробів);

призначені для встановлення тільки на заземлених металевих конструкціях, якщо при цьому забезпечується стабільний електричний контакт дотичних поверхонь.

Відповідно до ПУЕ заходи захисту від прямого дотику.

Основна ізоляція струмопровідних частин має покривати струмоведучі частини та витримувати всі можливі впливи, яким вона може піддаватися у процесі її експлуатації. Видалення ізоляції має бути можливим лише шляхом її руйнування. Лакофарбові покриття не є ізоляцією, що захищає від ураження електричним струмом, за винятком випадків, спеціально обумовлених технічними умовами на конкретні вироби. При виконанні ізоляції під час монтажу вона повинна бути випробувана відповідно до вимог гол. 1.8.

випадках, коли основна ізоляція забезпечується повітряним проміжком, захист від прямого дотику до струмоведучих частин або наближення до них на небезпечну відстань, у тому числі в електроустановках напругою вище 1 кВ, повинен бути виконаний за допомогою оболонок, огорож, бар'єрів або розміщення поза зоною досяжності.

ВИСНОВКИ

У запропонованій роботі виконано розробку та дослідження імітаційної моделі автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця.

На відміну від відомих імітаційних моделей автоматизованих систем керування пристроями відслідковування положення сонця, у кваліфікаційній роботі використано комплексний мультифізичний підхід. Проаналізовано процес роботи автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця з електричної та механічної сторони, а також проведено моделювання нештатних режимів роботи.

Основні наукові результати:

- проведено дослідження залежності характеристик фотоелектричного модуля від рівня освітленості у різних режимах експлуатації;
- досліджено залежність між характеристиками поворотних механізмів пристроїв відслідковування положення сонця та втратами енергії;
- проведено моделювання перетворювачів енергії, які використовуються у пристроях відслідковування положення сонця;
- побудовано імітаційну модель автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця, яка на відміну від відомих, враховує втрати енергії на живлення електродвигунів, контролера та втрати, спричинені нелінійними характеристиками навантаження.

Запропонована імітаційна модель автоматизованої системи керування пристроєм відслідковування положення сонця може бути використана при розробці систем електроживлення на базі сонячних фотоелектричних модулів з метою формулювання рекомендацій щодо вибору електричних та механічних вузлів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Djamiykov T. S. Sun tracker with sensor - Photovoltaic cell. 2017 26th Int. Sci. Conf. Electron. 2017 - Proc., vol. 2017–January, 2017, p. 1–3.
2. Jiu T. Control system for photovoltaic panels tracker / T. Jiu // Fiabilitate si durabilitate -, 2018. – P. 333–338.
3. Liu W. Sun tracker: Design, build and test. IEEE Veh. Technol. Conf., vol. 2015, 2015.
4. Tania M. H. Sun tracking schemes for photovoltaic panels. Proc. 2014 3rd Int. Conf. Dev. Renew. Energy Technol. ICDRET 2014, 2014.
5. Rhif A. A position control review for a photovoltaic system: dual axis sun tracker / A. Rhif // Iete technical review (institution of electronics and telecommunication engineers, india), 2011. – № 28. – P. 479–485.
6. Rhif A. A sliding mode control for a sensorless tracker: application on a photovoltaic system / A. Rhif // International journal of control theory and computer modeling, 2012. – № 2. – P. 1–14.
7. Konar A. Microprocessor based automatic sun tracker / A. Konar, A. K. Mandal // Iee proceedings a: physical science measurement and instrumentation management and education reviews, 1991. – № 138. – P. 237–241.
8. Martynyuk V. V. The analysis of energy transition processes in boost converter / V. V. Martynyuk, V. D. Kosenkov, O. V. Geydarova, M. V. Fedula // Visnyk ntuu kpi seriia – radiotekhnika radioaparaturbuduvannia, 2019. – P. 17–29.
9. Lazaroiu G. C. Comparative analysis of fixed and sun tracking low power pv systems considering energy consumption / G. C. Lazaroiu, M. Longo, M. Roscia, M. Pagano // Energy conversion and management, 2015. – № 92. – P. 143–148.
10. Fathabadi H. Novel online sensorless dual-axis sun tracker / H. Fathabadi // Ieee/asme transactions on mechatronics, 2017. – № 22. – P. 321–328.
11. Riley D. Sun-relative pointing for dual-axis solar trackers employing azimuth and elevation rotations / D. Riley, C. Hansen // Journal of solar energy engineering, transactions of the asme, 2015. – № 137.

12. Rashid M. H., editor. Advanced dc/dc converters. second edition / 2017. – 1734 p.
13. Liu M. Switched-Capacitor DC-DC Converters. Demystifying Switch. Capacit. Circuits, 2007, p. 223–245.
14. Abdulslam A. Evaluation of multi-level buck converters for low-power applications. Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst., vol. 2016–July, 2016, p. 794–797.
15. Muntean N. Comparative evaluation of buck and hybrid buck DC-DC converters for automotive applications. 15th Int. Power Electron. Motion Control Conf. Expo. EPE-PEMC 2012 ECCE Eur., 2012.
16. Lopa S. A. Design and simulation of dc-dc converters / S. A. Lopa, S. Hossain, M. K. Hasan, T. K. Chakraborty // International research journal of engineering and technology, 2016. – P. 2395–56.
17. Nidhi N. Different aspects of smart grid: An overview. Lect. Notes Electr. Eng., vol. 511, 2019, p. 451–456.
18. Marodkar M. Design and simulation of DC-DC converters for Photovoltaic system based on MATLAB. 2015 Int. Conf. Ind. Instrum. Control. ICIC 2015, 2015, p. 1478–1483.
19. Yang N. Modeling and characteristics analysis for a buck-boost converter in pseudo-continuous conduction mode based on fractional calculus / N. Yang, C. Wu, R. Jia, C. Liu // Mathematical problems in engineering, 2016. – № 2016.
20. Diarra B. Design of a photovoltaic system with ultracapacitor energy buffer. Procedia Manuf., vol. 33, 2019, p. 216–223.
21. Beltrame F. Different optimum designs investigation of DC/DC boost converter applied to the photovoltaic system. 2013 Brazilian Power Electron. Conf. COBEP 2013 - Proc., 2013, p. 538–543.
22. Pérez Taborda J. A. Deposition pressure effect on chemical, morphological and optical properties of binary al-nitrides / J. A. Pérez Taborda, J. C. Caicedo, M. Grisales, W. Saldarriaga, H. Riascos // Optics & laser technology, 2015. – № 69. – P. 92–103.
23. How mocvd works. deposition technology for beginners, aixtron, may 2011 / n.d.

24. Bolkhovityanov Y. B. The peculiarities of isothermal contact of liquid and solid phase during the lpe of a3b5 compounds / Y. B. Bolkhovityanov // Journal of crystal growth, 1981. – № 55. – P. 591–598.
25. Gorelenok A. T. Rare-earth elements in the technology of iii–v compounds and devices based on these compounds / A. T. Gorelenok, A. V. Kamanin, N. M. Shmidt // Semiconductors, 2003. – № 37. – P. 894–914.
26. Krukovsky S. I. Effect of rare earth addition on gaas-based layers grown by liquid phase epitaxy / S. I. Krukovsky, V. M. Popov, R. K. Savkina, A. B. Smirnov // The european physical journal applied physics, 2004. – № 27. – P. 177–179.
27. Марончук И. Е. Получение низкоразмерных структур методом импульсного охлаждения раствора-расплава / И. Е. Марончук // Известия вузов северо-кавказский регион технические науки, 2002. – ст. 22–30.
28. Марончук И. Е. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава / И. Е. Марончук, А. И. Марончук, Т. Ф. Кулюткина, М. В. Найденков, Ч. И.В. // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2005. – ст. 95–99.
29. Романенко В. Н. Коэффициенты распределения и кривые растворимости некоторых редкоземельных элементов в gaas / В. Н. Романенко, В. С. Хейфец // Неорганические материалы, 1973. – № 9. – ст. 190–197.
30. Andreev V. M. High-efficiency algaas/gaas concentrator (2500 suns) solar cells / V. M. Andreev, V. P. Khvostikov, V. R. Larionov, V. D. Rumyantsev, E. V. Paleeva, M. Z. Shvarts // Semiconductors, 1999. – № 33. – P. 976–977.
31. Алфёров Ж. И. Низкопороговые ($i_{in} = 6.2$ ма, $t = 300$ к) полосковые квантоворазмерные algaas-гетеролазеры, полученные методом низкотемпературной жфэ / Ж. И. Алфёров, В. М. Андреев, В. Ю. Аксенов, В. Р. Ларионов, И. А. Мокина, В. Д. Х. В. П. Румянцев // Письма в журнал технической физики, 1988. – ст. 1537.
32. Kosten E. D. Highly efficient gaas solar cells by limiting light emission angle / E. D. Kosten, J. H. Atwater, J. Parsons, A. Polman, H. A. Atwater // Light: science & applications, 2013. – № 2. – P. 45.

- 33.Нові матеріали та пристрої для сонячної енергетики : монографія / В. В. Мартинюк, Г. А. Ільчук, В. Д. Косенков, С. І. Круковський, М. В. Федула, Р. Ю. Петрусь. – Хмельницький : ХНУ, 2019. – 144 с.
- 34.Fedula M.V. The Analysis of Energy Transition Processes in Boost Converter // Martynyuk, V. V.; Kosenkov, V. D.; Geydarova, O., V, M.V. Fedula // Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, 2019, Iss. 77, pp. 17–29.