

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Розробка та дослідження системи автоматичного керування
положенням сонячних панелей

Виконав: студент б курсу, групи 601МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Гурін Д.Д.

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Єрмілова Н.В.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Магістр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій
_____ О.В. Шефер
“ 03 ” вересня 2021 р.

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Гуріну Данилу Дмитровичу

1. Тема проекту (роботи) «Розробка та дослідження системи автоматичного керування положенням сонячних панелей».

керівник проекту (роботи) Галай В.М., к.т.н., доцент

затверджена наказом вищого навчального закладу від “25” серпня 2021 року №688фа.

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15.12.2021 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) потужність сонячних панелей – 3-5кВт; точність стеження за Сонцем – до 1°С; переміщення азимутом на 180 градусів; переміщення за кутом місця на 70 градусів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Фотоелектричні енергоустановки зі спостереженням за Сонцем. Структура АСУ спостереження АФЕУ за Сонцем і технічні характеристики схем спостереження за Сонцем. Датчики положення сонця автономних фотоелектричних енергетичних установок. Вимоги до систем спостереження автономних фотоелектричних енергетичних установок як об'єкта АСУТП і основні напрямки дослідження. Дослідження та розробка функціональної та структурної схеми системи спостереження сонячних панелей за Сонцем на основі принципу безперервно-дискретного переміщення в режимі спостереження. Дослідження та розробка алгоритму спостереження сонячних панелей за сонцем з використанням датчика положення Сонця. Дослідження та розробка алгоритму спостереження сонячних панелей за сонцем з використанням датчика положення Сонця. Мінімізація енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом в слідкуючій-позиційній системі спостереження сонячних панелей за Сонцем. Розрахунок моменту інерції механізмів переміщення і величини додаткового моменту від дії вітрового навантаження для автономних фотоелектричних енергоустановок. Дослідження та розробка алгоритму управління електромеханічною системою спостереження при дії вітрового навантаження. Підвищення живучості та надійності функціонування АСК спостереження при дії вітрового навантаження. Дослідження на цифровій моделі динамічних характеристик електромеханічної системи спостереження при дії вітрового навантаження. Розрахунок економічної ефективності.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

1. Аналіз існуючих систем автоматичного керування положенням сонячних панелей.
2. Функціональна схема системи слідкування з урахуванням вітрового навантаження.
3. Функціональна схема АСКТП виробництва електричної енергії АФЕУ.
4. Функціональна схема системи спостереження з КД.
5. Функціональна схема системи стеження з урахуванням зміни коефіцієнта зони нечутливості.
6. Алгоритми керування сонячними панелюми.
7. Дослідження системи спостереження за Сонцем.
8. Дослідження та розробка алгоритму керування електромеханічною системою спостереження .
9. при дії вітрового навантаження.
10. Дослідження на цифровій моделі динамічних характеристик електромеханічної системи спостереження при дії вітрового навантаження
11. Таблиця техніко-економічних показників.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Економіка	Григор'єва Олеся Володимирівна, к.е.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 03.10.2021 р.**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

Пор. №	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Фотоелектричні енергоустановки зі спостереженням за Сонцем. Структура АСК спостереження АФЕУ за Сонцем і технічні характеристики схем спостереження за Сонцем	10.10.21		10%	Пл. 1
2	Датчики положення сонця автономних фотоелектричних енергетичних установок. Вимоги до систем спостереження автономних фотоелектричних енергетичних установок як об'єкта АСУТП і основні напрямки дослідження	15.10.21		20%	Пл. 2
3	Дослідження та розробка функціональної та структурної схеми системи спостереження сонячних панелей за Сонцем на основі принципу безперервно-дискретного переміщення в режимі спостереження	27.10.21	I	30%	Пл. 3
4	Дослідження та розробка алгоритму спостереження сонячних панелей за сонцем з використанням датчика положення Сонця.	02.11.21		40%	Пл. 4
5	Мінімізація енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом в слідкуючій-позиційній системі спостереження сонячних панелей за Сонцем	10.11.21		50 %	Пл. 5
6	Розрахунок моменту інерції механізмів переміщення і величини додаткового моменту від дії вітрового навантаження для автономних фотоелектричних енергоустановок. Дослідження та розробка алгоритму управління електромеханічною системою спостереження при дії вітрового навантаження	24.11.21	II	60%	Пл. 6
7	Підвищення живучості та надійності функціонування АСК спостереження при дії вітрового навантаження	30.11.21		70%	Пл. 7
8	Дослідження на цифровій моделі динамічних характеристик електромеханічної системи спостереження при дії вітрового навантаження	04.12.21		80%	Пл. 8
9	Розрахунок економічної ефективності	10.12.21		90%	Пл. 9
10	Оформлення магістерської роботи	15.12.21	III	100%	Пл. 10

Магістрант _____ Гурін Д.Д.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Галай В.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1 Фотоелектричні енергоустановки зі спостереженням за Сонцем	9
1.2 Структура АСК спостереження АФЕУ за Сонцем і технічні характеристики схем спостереження за Сонцем	15
1.3 Датчики положення сонця автономних фотоелектричних енергетичних установок	18
1.4 Вплив вітрового навантаження на автономну фотоелектричну енергетичну установку, особливості структур систем спостереження, що враховують вплив вітрового навантаження	22
1.5 Вимоги до систем спостереження автономних фотоелектричних енергетичних установок як об'єкта АСКТП і основні напрямки дослідження	27
РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	
2.1 Дослідження та розробка функціональної та структурної схеми системи спостереження сонячних панелей за Сонцем	32
2.2 Дослідження та розробка алгоритму спостереження сонячних панелей за сонцем з використанням датчика положення Сонця	41
2.3 Мінімізація енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом в слідкуючо-позиційній системі спостереження сонячних панелей за Сонцем	55
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ	
3.1 Розрахунок моменту інерції механізмів переміщення і величини додаткового моменту від дії вітрового навантаження для автономних фотоелектричних енергоустановок	64
3.2 Дослідження та розробка алгоритму керування електромеханічною системою спостереження при дії вітрового навантаження	69
3.3 Підвищення живучості та надійності функціонування АСК	

спостереження при дії вітрового навантаження	83
3.4 Дослідження на цифровій моделі динамічних характеристик електромеханічної системи спостереження при дії вітрового навантаження	84
3.5 Дослідження та розробка двохкоординатного датчика положення Сонця	89
3.6 Розробка спеціалізованого контролера спостереження за Сонцем і блоку драйверів крокового двигуна	92
3.7 Розробка механічних конструкцій автономних фотоелектричних установок	97
РОЗІДЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	
4.1 Техніко-економічне обґрунтування	102
4.2 Визначення витрат на розробку САК положенням сонячних панелей	102
4.3 Розрахунок річного фонду роботи сонячних панелей	104
4.4 Розрахунок річної експлуатаційної продуктивності	105
4.5 Розрахунок поточних річних витрат	106
4.6 Розрахунок вартості машино–години роботи сонячних панелей	108
4.7 Розрахунок вартості технологічної операції на одиницю продукції	109
4.8 Розрахунок економічного ефекту від проведення модернізації	109
ВИСНОВКИ	111
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	112
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Знаходження сучасних відновлювальних та екологічно чистих джерел енергії є найактуальнішим питанням сьогодення в усьому світі. Традиційна електроенергетика, особливо вітчизняна, має негативний вплив на навколишнє середовище, обумовлена постійним подорожчанням та виснаженням самих енергоресурсів. Практично доведено, що найбільш перспективним напрямком серед поновлюваних джерел енергії є невичерпна сонячна енергія.

Питанням активного впровадження та аналізом ефективності використання сонячної енергії займається Європейська енергетична комісія. Спираючись на дані, отримані від комісії, відомо, що станом на початок 2020 року, у індустрії поновлюваної енергетики буде створено 2,8 мільйона робочих місць. Аналізуючи темпи росту використання поновлюваної енергетики визначено, що індустрія відновлюваної енергетики буде створювати 1,1% ВВП.

Через відсутність у багатьох енергетичних системах безперервного автоматичного слідкування за Сонцем, сонячні панелі генерують до 50 % менше енергії ніж могли потенційно. Суттєве підвищення енергетичної ефективності автономних фотоелектричних енергетичних установок (АФЕУ) можливе завдяки наявності системи автоматичного слідкування сонячних панелей за Сонцем. Через постійне підвищення ККД сонячних установок відбувається зниження вартості вироблюваної електроенергії.

Отже, система спостереження АФЕУ створює високоефективне керування процесом спостереження фотоелектричних енергетичних установок за Сонцем, враховуючи особливості об'єкта керування та вплив зовнішніх факторів. АФЕУ забезпечує максимальну енергетичну ефективність мінімізуючи витрати енергії на спостереження за Сонцем, а також реалізує передачу керування системою оператору в аварійних або налагоджувальних режимах роботи. Тобто, АФЕУ має функцію реалізації

людино-машинної системи, що являє собою автоматизовану систему керування технологічним процесом нижнього та середнього рівня.

Метою магістерської роботи є підвищення енергетичної ефективності технологічного процесу виробництва електричної енергії АФЕУ. Поставлену мету можна досягти шляхом розробки автоматизованої системи керування, яка за рахунок спостереження за Сонцем буде забезпечувати максимальну енергетичну ефективність сонячних панелей. Процес спостереження за Сонцем відбувається з мінімальним енергоспоживанням та керуванням при збурюючих впливах, в тому числі навантаження вітру.

Визначимо наступні напрямки дослідження для реалізації поставленої мети:

1. Аналіз конструкцій наземних фотоелектричних енергоустановок, систем автоматизованого керування режимом спостереження сонячних панелей за Сонцем, що застосовуються в електромеханічних виконавчих механізмах, датчиків положення Сонця (ДПС) та формування вимог до АСК спостереження АФЕУ за Сонцем з метою підвищення їх енергетичної ефективності.

2. Дослідження та розробка структурної, функціональної схеми та алгоритмів керування АСК спостереження фотоелектричних енергоустановок за Сонцем з двохкоординатними електромеханічними виконавчими механізмами. Такі механізми забезпечують задану точність спостереження при мінімізації споживання електричної енергії двохкоординатними електромеханічними виконавчими механізмами під час спостереження за Сонцем, при зміні поточної освітленості, дії зовнішніх збурень, випадкового навантаження, в тому числі вітрового.

3. Розробка цифрових моделей елементів систем спостереження з електромеханічними виконавчими механізмами. Дослідження алгоритмів спостереження сонячних батарей за Сонцем та нелінійних законів керування контуром струму електромеханічним виконавчим механізмом.

4. Розробка складових частин АФЕУ, а саме спеціалізованого контролера керування рухом рами з сонячних панелей, що забезпечує спостереження за Сонцем; механічної конструкції рами з сонячної панелі двохкоординатної системи спостереження; двохкоординатного датчика положення Сонця; блоку силових драйверів для виконавчого електромеханічного механізму.

5. Експериментальні дослідження енергетичних характеристик системи спостереження на установці АФЕУ-0,5.

Загальні положення теорії електричних ланцюгів, теорії автоматичного керування, обчислювальні та методи математичного моделювання MATLAB (Simulink) є методами дослідження системи спостереження за Сонцем. Шляхом математичного моделювання та експериментальних досліджень на реальних фотоелектричних енергетичних установках здійснюється перевірка основних теоретичних положень.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Фотоелектричні енергоустановки зі слідуванням за Сонцем

Створення та використання двохкоординатної системи слідуванням АФЕУ за Сонцем, що забезпечує підвищення енергетичної ефективності до 50% порівняно з енергетичними установками без систем слідуванням за Сонцем є основним напрямком підвищення енергетичної ефективності АСКТП шляхом вироблення електричної енергії АФЕУ.

Сьогодні фотоелектричні енергоустановки зі слідуванням за Сонцем виробляють вітчизняні (DITRAS, Селтек, ФТІ РАН ім. А.Ф. Йоффе, НВО Астрофізика тощо) та зарубіжні фірми: США – Sunpower, Merlin Power Systems, SUNPOWER20 TRACKER, First Solar, Konza Portable Solar Trackers; Китай – Gintech, Yingli Green Energy; Канада – Canadian Solar; Тайвань – Motech; Іспанія – Titan tracker, Чехія – TRAXLE тощо.

На рисунку 1.1 наведені енергетичні установки, розроблені в ФТІ РАН ім. А.Ф. Йоффе.

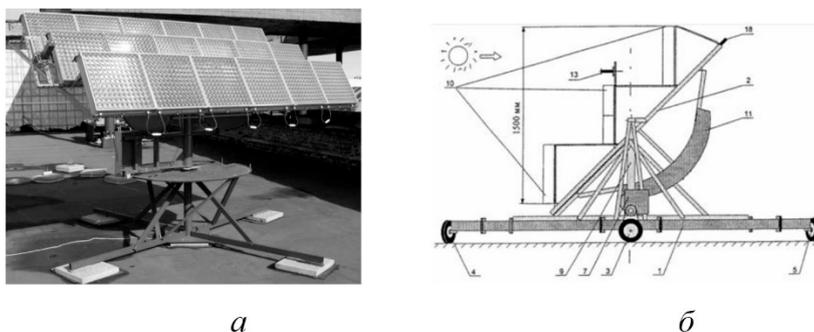


Рисунок 1.1 – Енергетичні установки ФТІ РАН ім. А.Ф. Йоффе

Вищенаведена установка оснащена спеціальним датчиком положення Сонця, що відслідковує його з точністю до 0,1 градуса. Площа панелей у цій установці складає 5,54 м². Для енергетичної установки ФТІ РАН ім. А.Ф. Йоффе індивідуально розроблені сонячні концентраторні модулі з пристроями слідуванням за Сонцем, оснащені лінзами Френеля та

каскадними фотоперетворювачами у фокусі кожної лінзи. Як видно з рисунка 1.1 а сонячні елементи розташовуються в фокусі лінз Френеля та закріплюється на мідній теплоскидаючій підставці, закріпленій на тильній скляній пластині. Модулі розташовуються східчасто на електронно-механічній системі слідкуванням у середині фотоелектричної установки.

Американська фірма Konza Portable Solar Trackers випускає транспортабельні (наприклад, перевозитися на причепі) сонячні енергетичні установки. Фотографію такої енергетичної установки ми можемо бачити на рисунку 1.2. За допомогою датчика положення Сонця відбувається слідкування за ним.



Рисунок 1.2 – Енергетична установка фірми Konza Portable Solar Trackers

Як зазначалося вище, виробництвом енергетичних установок займається фірма Селтек. Приклади таких установок наведені у вигляді фотографій на рисунку 1.3. На ній можна розташувати сонячні панелі площею до 6 м². Сама система слідкування використовує електроприводи постійного струму, датчики положення Сонця та контролер слідкування. Енергетична установка фірми Селтек має точність слідкуванням до одного градуса. Якщо вага сонячної панелі 50 кг, то потрібно встановлювати

противаги. Наявність противаг у системі збільшує витрати енергії на слідування.



Рисунок 1.3 – Енергетичні установки фірми Селтек

Енергетична установка ГЕУ-1,5 фірми НВО Астрофізика приведена у вигляді фотографії на рисунку 1.4. По оптико-електронних датчиках положення Сонця здійснюється безперервне слідування з точністю до двох градусів. Ці датчики розміщуються на гранчастій рамі-підставі та станині опорно-поворотного пристрою. Фотоелектричні модулі МС-40 в поєднанні з плоскими дзеркальними концентраторами сонячного випромінювання застосовуються в ГЕУ-1,5. Енергетична установка ГЕУ-1,5 оснащена двигуном Стірлінга та має потужність 1,5 кВт.



Рисунок 1.4 – Енергетична установка НВО Астрофізика (ГЕУ-1,5)

Фотографія енергетичної установки фірми DITRAS приведена на рисунку 1.5. Вона оснащена датчиком положення Сонця та забезпечує точність слідування до одного градуса. Фірма DITRAS активно випускає свої енергетичні установки на вітчизняний та зарубіжний ринки.

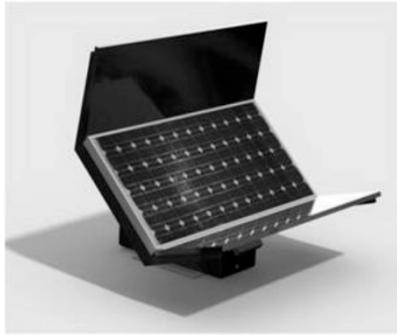


Рисунок 1.5 – Енергетична установка фірми DITRAS

Іспанська фірма Titan tracker випускає енергетичні установки, що наведені на рисунку 1.6 у вигляді фотографії. Установка Titan tracker включає в себе велику кількість сонячних панелей загальною площею більше 200 м². Який тип двигуна використовується в такій установці не розголошується, наскільки можливо мінімізувати енергоспоживання під час слідкування не повідомляється. Відомо, що слідкування ведеться по двох вісях.



Рисунок 1.6 – Енергетична установка Titan tracker (Іспанія)

На рисунку 1.7 приведена фотографія енергетичної установки американської фірми SUNPOWER20 TRACKER.



Рисунок 1.7 – Енергетична установка фірми SUNPOWER20 TRACKER

Під кутом нахилу або горизонтально встановлюється фотоелектрична енергетична установка. По одній вісі відстежується положення Сонця. Можлива варіація, коли на одній горизонтальній вісі розміщується 9 модулів, що складаються з 128 осередків, або 12 модулів, що складаються з 96 осередків.

Технічні характеристики сонячних енергоустановок деяких вітчизняних та зарубіжних фірм наведені у таблицях 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики сонячних енергоустановок

Характеристики	Установка фірми Селтек	Установка ФТІ ім. А.Ф. Йоффе	Установка НВО Астрофізика (ГЕУ-1,5)	Установка фірми DITRAS	Установка Titan tracker
Кути переміщення по азимуту і по куту місця, град	По азимуту – 180 град., по куту місця – 70 град	По азимуту – 360 град., по куту місця – 90 град.	По азимуту – 360 град., по куту місця – 90 град.	По азимуту – 360 град., по куту місця – 90 град.	По азимуту – 360 град., по куту місця – 75 град.
Тип виконавчого двигуна	Постійного струму	Не вказано	Стірлінга	Не вказано	Не вказано
Точність слідкуванням, град.	1	0,1	2	1	0,01
Вихідна потужність, кВт; площа ФП, м ²	Площа до 6 м ²	Концентраційні модулі, площа 5,54 м ²	Потужність 1,5 кВт, площа 25 м ²	Потужність 0,3 кВт, площа 2 м ²	Площа до 216 м ²
Система слідкуванням за Сонцем	Безперервна, по датчику положення Сонця	Безперервна, по датчику ФЕП	Безперервна, по оптикоелектронному датчику	Безперервна, по датчику положення Сонця	Не вказана

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики сонячних енергоустановок

Характеристики	Установка фірми ТОВ електромехатронні системи	Встановлення Л.М. Буркова	Установ-ка ФТІ ім. А.Ф. Йоффе	Установка НВП сервомеханізми	Установ-ка фірми TRAXLE
Кути переміщення азимуту і кутом місця, град.	По азимуту – 180 град., по розі місця – 70 град.	По азимуту – 360 град., по розі місця – 90 град.	По азимуту – 360 град., по розі місця – 90 град.	По азимуту – 360 град., по розі місця – 90 град.	По азимуту – 360 град., по углу места – 90 град.
Тип виконавчого двигуна	Електромехатронний модуль	Постійного струму	Постійного струму	Постійного струму, кроковий	Постійного струму
Точність стеження, град.	Не вказана	1	2	Не вказана	Не вказана
Вихідна потужність, кВт; площа ФП, м ²	Площа до 2,5 м ²	Потужність 1,5 кВт, площа 5,54 м ²	СБ, площа до 25 м ²	Площа від 40 до 300 м ²	Площа до 45 м ²
Система стеження за Сонцем	По заздалегідь заданій траєкторії	Безперервна, за датчиком положення Сонця	Безперервна, за оптикоелектронному датчику	По заздалегідь заданій траєкторії	Площа до 2,5 м ²

Слід зазначити, що в технічній документації зарубіжних фірм не вказуються деякі важливі технічні характеристики сонячних енергоустановок. При створенні АФЕУ застосовуються різні типи двохкоординатних електромеханічних виконавчих механізмів. Енергетична установка може бути з двигунами постійного або змінного струму, з синхронно-реактивними або кроковими двигунами, а також з лінійними двигунами. В якості силового перетворювача використовуються тиристорні та транзисторні перетворювачі, в тому числі перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) на польових або IGBT-транзисторах. Такі

висновки були зроблені з проведеного аналізу технічних характеристик АФЕУ.

Багатоконтурні системи керування з різними регуляторами положення, швидкості та струму, використовуються для отримання високоякісних статичних та динамічних характеристик. Багато-розрядні датчики положення, високоточні датчики положення Сонця, а також багатодвигунні системи для компенсації люфту редуктора використовуються для забезпечення високої точності слідкуванням.

1.2 Структура АСК слідкуванням АФЕУ за Сонцем і технічні характеристики схем слідкуванням за Сонцем

На рисунку 1.8. у загальному вигляді показана функціональна схема АСКТП.

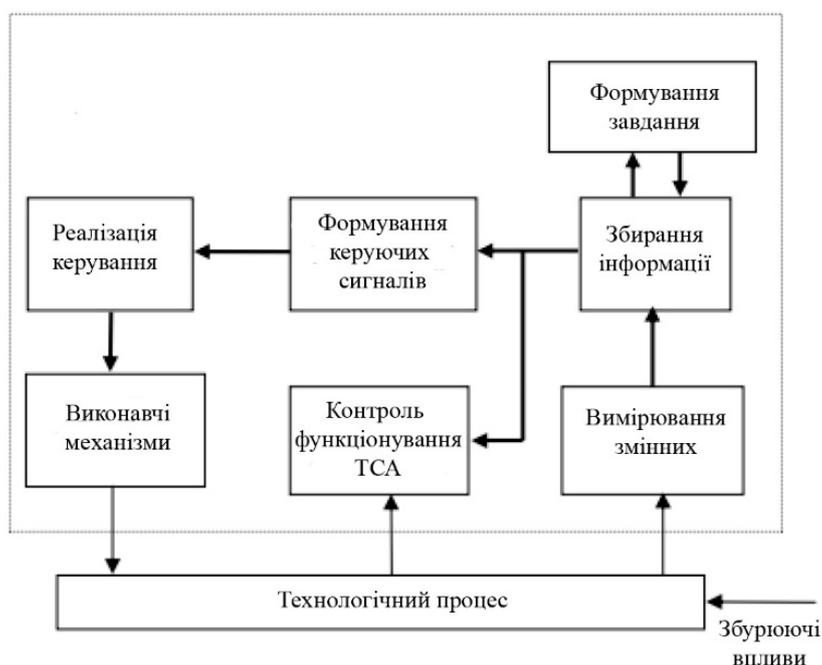


Рисунок 1.8 – Функціональна схема АСКТП в загальному вигляді

До складу АСКТП виробництва електричної енергії АФЕУ вході:

- 1) АСК слідкуванням сонячних панелей за Сонцем;

- 2) система автоматичного керування (САК) ;
- 3) заряд акумуляторних панелей з функцією максимуму вироблення енергії сонячними батареями враховуючи можливості акумуляторної батареї.

На рисунку 1.9. у загальному вигляді показано АСК слідуванням сонячних панелей за Сонцем, використовуючи наступні позначення:

- ПЗО – пристрій зв'язку з об'єктом;
- ВП – вимірювальний перетворювач: містить датчик положення Сонця, датчики струму та температури двигуна, а також кінцеві вимикачі;
- ОК – об'єкт керування: являє собою двохкоординатний виконавчий механізм переміщення рами з сонячною батареєю;
- РП – регулюючий пристрій: містить контролери та драйвери керування електромеханічними виконавчими механізмами;
- ВМ – виконавчий механізм: включає в себе контролери та драйвери керування;
- РЕГ – регулятор: реалізований на мікроконтролері та керуючий процесами слідуванням та діагностики системи АФЕУ;
- ЗП – задаючий пристрій: містить пристрій завдання режиму роботи, пристрій введення-виведення інформації на зовнішній комп'ютер.

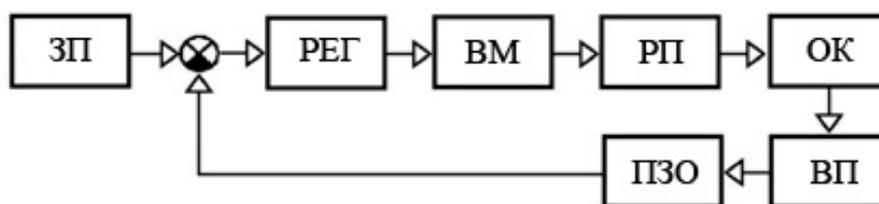


Рисунок 1.9 – Функціональна схема АСК

Керування системою АФЕУ є повністю автоматичне. Проте, в режимі налагодження та в аварійних умовах керування передається оператору. Саме тому, АСК слідуванням АФЕУ за Сонцем представляє людино-машинну систему.

Існує декілька способів слідкування за Сонцем в АСК слідкуванням АФЕУ, серед них: програмне, пошук максимуму енергії та використання датчиків положення Сонця.

Програмне керування передбачає слідкування від мікроконтролера по заздалегідь заданими координатами азимуту та куту місця. Режим безперервного слідкування за Сонцем забезпечується з використанням датчиків положення Сонця.

Функціональна схема системи слідкування АФЕУ по заздалегідь заданій траєкторії для однієї координати наведена на рисунку 1.10.

В системі слідкування за Сонцем використовується триконтурна система з підлеглим регулюванням параметрів, тобто спостерігаючий електропривод постійного струму, та використані наступні позначення:

- КН – контролер наведення;
- РП – регулятор положення;
- РШ – регулятор швидкості;
- РС – регулятор струму;
- М – двигун;
- ТГ – тахогенератор;
- Р – редуктор;
- ВМ з СБ – виконавчий механізм з сонячною панеллю;
- $\alpha_{\text{зад}}$ – кут завдання положення механізму з сонячною панеллю;
- $\alpha_{\text{ос}}$ – дійсний кут положення механізму з сонячною панеллю;
- ШП – широтно-імпульсний перетворювач;
- ДШ – датчик швидкості;
- ДП – датчик положення сонячної панелі;
- ДС – датчик струму.

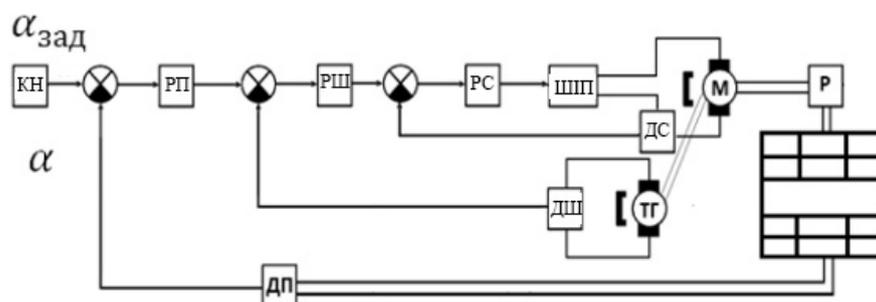


Рисунок 1.10 – Функціональна схема системи слідуванням

По передбачуваному положенню Сонця на небосхилі, тобто по заздалегідь заданому, відбувається слідування АФЕУ за допомогою сліdkуючих електроприводів постійного струму. Зауважимо, що коли хмари дуже щільні, все одно відбувається переміщення. У такому випадку сліdkування АФЕУ за Сонцем не виграє в виробленні енергії, адже відбувається додаткова витрата електричної енергії в електроприводах на переміщення безпосередньо АФЕУ.

Виявлено, що є сенс у переважному використанні крокового двигуна з черв'ячними редукторами та силовими драйверами керування крокового двигуна у АФЕУ потужністю 3–5 кВт. Такий вибір призведе до зменшення споживання електричної енергії двохкоординатними електромеханічними виконавчими механізмами при безперервно-дискретним сліdkуванням за Сонцем.

1.3 Датчики положення Сонця автономних фотоелектричних енергетичних установок

Сьогодні існує велика кількість різноманітних датчиків положення Сонця для АСК. Робота цих датчиків заснована на різних принципах визначення положення Сонця. Датчики положення сонця бувають щілинні або засновані на ефекті Саньяка. Також, це можуть бути геліотрекери або інші оригінальні пристрої та конструкції.

Кремнієві фотодіоди використовуються у якості чутливих щілинних сонячних елементів датчиків. Такі датчики порівнюють сигнали, що надійшли з кожного фотодіода, який розташований у своїй щілині. Потім датчик виявляє максимальний сигнал як зображено на рисунку 1.11.

При переміщенні Сонця по екліптиці один з фотодіодів освітлений, а інші, через створені перегородки, паралельно знаходяться в тіні. Це досягається шляхом спеціального розташування датчика. Відповідно сигнал з найбільш освітленого фотодіода буде максимальний. Максимальний сигнал виявляється системою керування та відбувається подача команди повороту сонячної панелі на кут, який відповідає положенню цього фотодіода. Тобто, в заданих полях огляду датчики формують релейні сигнали наявності Сонця.

Поряд з вищенаведеними перевагами щілинних датчиків, існують і недоліки. До них можна віднести складність самої конструкції, складну систему контролю та керування, а також їх високу вартість.



Рисунок 1.11 – Щілинні сонячні датчики

Якщо по круговому оптичному шляху, завдяки розщеплювача променя, світло поширюється в двох протилежних напрямках, то йдеться мова про застосування принципу дії оптичного гіроскопа, заснованого на ефекті Саньяка. Обидва світлових променя поширюються зустрічно по оптичному шляху однакової довжини, якщо площина сонячної батареї перпендикулярна променям Сонця. Відсутній фазовий зсув при додаванні променів в розщеплювач по завершенню шляху. Між світловими хвилями виникає

різниця фаз, якщо Сонце переміщається з кутовою швидкістю. Така різниця називається ефектом Саньяка.

«Відстежувач шляху Сонця» таке визначення фактично підійде до визначення геліотрекер, який постійно спрямований на Сонце. Один з варіантів геліотрекера [8] схематично зображений на рисунку 1.12.

До складу геліотрекера входить:

- фотоприймач;
- контролер;
- виконавчий механізм у вигляді двох двигунів з редукторами, що повертають сонячні батареї.

Фотоприймач кріпиться на виконавчий механізм та являє собою невелику плату з чотирма фотодатчиками, що розділені між собою перегородкою у вигляді хреста. Висвітлені всі чотири фотодатчика під час орієнтації на Сонце. Сонце, коли рухається по небосхилу, змінює освітленість фотоприймача, тому 2 або 3 фотодатчика виявляються в тіні. В залежності від положень фотоприймача алгоритм роботи датчика сприймає лише дев'ять команд. На рисунку 1.12 кожен фотодатчик позначений відповідною літерою.

У таблицях 1.3 та 1.4 представлені усі можливі варіанти освітлення датчиків та прийняті наступні позначення: 1 – датчик освітлений; 0 – датчик в тіні перегородки.

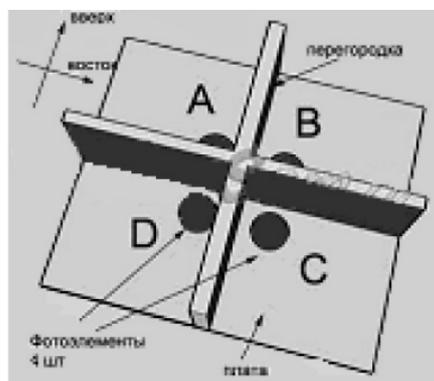


Рисунок 1.12 – Геліотрекер

Таблиця 1.3 – Можливі варіанти освітлення датчиків для двохкоординатної системи слідкуванням

Датчик А	1	0	1	1	0
Датчик В	0	1	1	0	0
Датчик С	0	0	0	0	1
Датчик D	0	0	0	1	0
Примітка	Сонце вище і на захід	Сонце вище і на схід	Сонце вище	Сонце на захід	Сонце нижче і на схід
Вертикальний рух	Вгору	Вгору	Вгору	Стояти	Вниз
Горизонтальний рух	На захід	На схід	Стояти	На захід	На схід

Таблиця 1.4 – Можливі варіанти освітлення датчиків для двохкоординатної системи слідкуванням

Датчик А	0	0	0	1
Датчик В	1	0	0	1
Датчик С	1	1	0	1
Датчик D	0	1	1	1
Примітка	Сонце на схід	Сонце нижче	Сонце нижче і на захід	Точно на Сонце
Вертикальний рух	Стояти	Вниз	Вниз	Стояти
Горизонтальний рух	На схід	Стояти	На захід	Стояти

Розроблений цікавий датчик положення Сонця групою науковців з малайзійського університету UNIMAS [9]. Його особливістю є використання фоторезисторів як чутливого елемента. За конструкцією він схожий на класичний геліотрекер, який ми розглядали вище.

У пірамідні блоки датчика закріплені чотири фоторезистора LDRs. Фоторезистори отримують однакову кількість світла та мають однаковий опір, коли Сонце світить у центр системи. При зміщенні Сонця перегородка між фоторезисторами утворює тінь, що змінює інтенсивність світла, яке вимірюють датчики LDR. На рисунку 1.13 показаний фотодатчик.

Система слідкуванням має 10-розрядний АЦП.

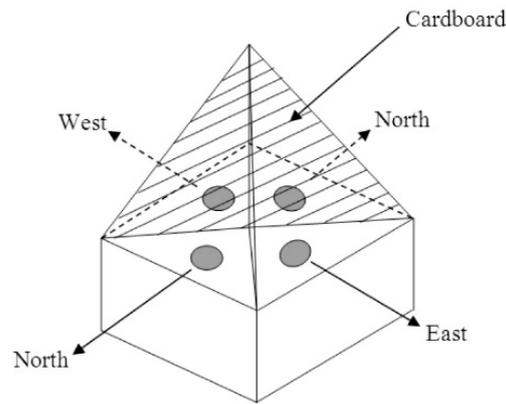


Рисунок 1.13 – Датчик положення Сонця

Розробка нового двохкоординатного фотодатчика положення Сонця з високою точністю вимірювання в заданому діапазоні зміни освітленості буде перспективною для подальшого розвитку вироблення екологічно чистої енергії. Такий фотодатчик повинен мати металеву основу для вирівнювання температури у всіх фотоелементах.

1.4 Вплив вітрового навантаження на автономну фотоелектричну енергетичну установку, особливості структур систем слідкування, що враховують вплив вітрового навантаження

На навантажувальний момент, що прикладається до валу електромеханічного виконавчого механізму АФЕУ, суттєво впливає вітрове навантаження. Здійснити слідкуванням рами з сонячною панеллю за Сонцем може стати зовсім неможливим через великі вітрові навантаження. Ураган більше 25 м/с може взагалі вивести з ладу виконавчий механізм слідкуванням фотоелектричної енергоустановки.

Розрахувати вітрове навантаження для конкретної установки досить складно. При такому розрахунку необхідно враховувати багато зовнішніх факторів.

Фактори, що впливають на розрахунок вітрового навантаження фотоелектричної енергоустановки:

- метеорологічні особливості району, де буде споруджуватися установка;
- особливості місцевості монтажу установи (наприклад, будівлі, споруди, штучні та природні перешкоди по сусідству з установкою);
- вплив деталей та елементів конструкції самої фотоелектричної енергоустановки на розподіл вітрового потоку.

Тому, необхідно знайти узагальнений варіант для розрахунку вітрових навантажень в рамках обраних умов, що дозволить значно спростити розрахунки, не вдаючись до особливостей місцевості установки та способу виконання самої установки.

Розрахунок впливу вітру на будівлі та споруди регламентується нормативним документом «Навантаження і впливи». Нормативне значення середньої складової вітрового впливу визначається за формулою:

$$W_m = W_n k c; \quad (1.1)$$

де: W_0 – нормоване значення вітрового тиску;

k – коефіцієнт, що враховує зміну вітрового тиску по висоті;

c – аеродинамічний коефіцієнт.

При цьому нормативне значення вітрового тиску W_0 , яке визначається для певної місцевості шляхом використання даних метеостанцій, слід визначати за формулою:

$$W_{шд(p)} = \frac{e^{-p\tau}}{T_{10} T_{11} p^2 + T_{10} p + 1}; \quad (1.2)$$

де: V_0 – швидкість вітру (м/с).

Якщо технічними умовами, не регламентовані інші періоди повторюваності швидкостей вітру, то швидкість вітру на рівні 10 м над поверхнею землі для місцевості типу А, відповідна 10-хвилинному інтервалу усереднення та перевищує в середньому раз в 5 років.

Нормативне значення вітрового тиску W_0 обирається в залежності від вітрового району за даними таблиці 1.5. Коефіцієнт k , що враховує зміну

вітрового тиску по висоті (z), визначається по таблиці 1.6 в залежності від типу місцевості.

Визначено, що на розрахунок вітрового навантаження впливає тип місцевості. Розглянемо, які типи місцевості визначають:

A – пустелі, степи, лісостепу, тундра, відкриті узбережжя морів, озер та водосховищ,;

B – міські території, лісові масиви та інші місцевості, рівномірно покриті перешкодами висотою більше 10 м;

C – міські райони з забудовою будинками заввишки більше 25 м.

Якщо місцевість зберігається з навітряної сторони споруди на відстані $30h$ при висоті споруди h до 60 м та 2 км – при більшій висоті, то споруда вважається розташованою в місцевості даного типу

Таблиця 1.5 – Нормативне значення вітрового тиску

Вітрові райони	Ia	I	II	III	IV	V	VI	VII
W_0 , кПа (кгс/м ²)	0,17 (17)	0,23 (23)	0,30 (30)	0,38 (38)	0,48 (48)	0,60 (60)	0,73 (73)	0,85 (85)

Таблиця 1.6 – Коефіцієнт k в залежності від типу місцевості

Висота z , м		≤ 5	10	20	40	60	80	100	150	200	250	300	350
Коеф. k для типів місцевості	A	0,7 5	1	1,25	1,5	1,7	1,85	2	2,25	2,45	2,65	2,75	2,75
	B	0,5	0,6 5	0,85	1,1	1,3	1,45	1,6	1,9	2,1	2,3	2,5	2,75
	C	0,4	0,4	1,55	0,8	1	1,15	1,25	1,55	1,8	2	2,2	2,35

Визначено особливості розрахунків вітрового навантаження для двохкоординатної системи слідкуванням та проведено детальний розрахунок величини додаткового моменту від вітрового навантаження на раму з сонячною батареєю.

Необхідно збільшувати максимальний момент двигуна, тобто встановлювати двигун з більшою потужністю і моментом, або вводити

додатковий контур керування зі зв'язком по датчикам. Датчик визначає момент від дії вітрового навантаження, щоб компенсувати вплив цього моменту, якщо дозволяє потужність двигуна в АСК слідуванням в АФЕУ в електромеханічній частині при дії вітрового навантаження. Компенсацію моменту вітрового навантаження можна забезпечити шляхом установки на АФЕУ тензометричних датчиків, зміни алгоритму роботи контролера слідуванням за Сонцем та блоку керування електромеханічними виконавчими механізмами. У систему керування введений додатковий контур зі зворотним зв'язком по спеціальному датчику вітрового навантаження в енергетичній установці, розробленій в МЕІ, де в електромеханічній частині використовується ДПС. Функціональна схема системи слідуванням з урахуванням вітрового навантаження наведена на рисунку 1.14, на якій прийняті наступні позначення:

- РР – релейний регулятор положення;
- М – двигун;
- Р – редуктор;
- ВМ – виконавчий механізм;
- α – кут неузгодженості;
- ПП – пристрій перетворення;
- ДН – датчик неузгодженості;
- БП – блок перетворення;
- ДВН – датчик вітрового навантаження.

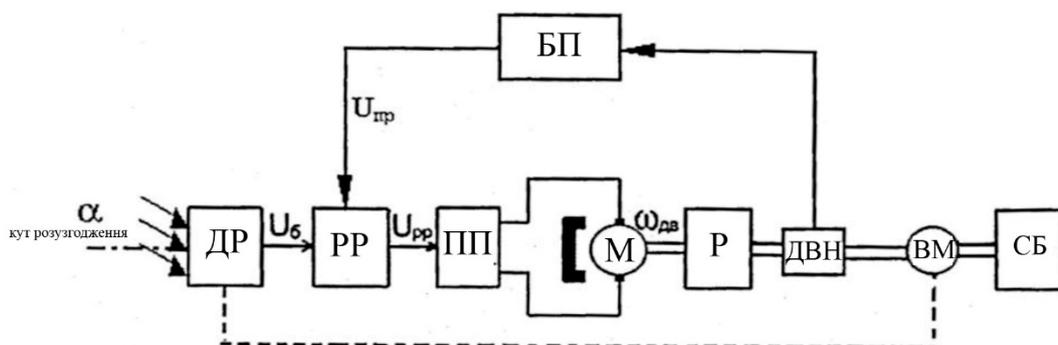


Рисунок 1.14 – Функціональна схема системи слідуванням з урахуванням вітрового навантаження

Шляхом збільшення заданого моменту на ДПС за допомогою регулятора струму та датчика вітрового навантаження, відбувається компенсація вітрового навантаження в даній системі зі складним датчиком тиску.

Враховуючи вищенаведені дані, запропоновано відстежувати швидкість вітру та при переміщати сонячної панелі в горизонтальне положення за необхідності для захисту сонячної електростанції від високих вітрових навантажень. До скалу системи захисту від вітру включається датчик вітру та контролер керування. Відбувається опитування датчиків в реальному часі та контролер слідування оцінює дані додатково в АСК. Коли швидкість вітру перевищує 46 км/год, то сонячна батарея переміщається в горизонтальне положення. Контролер переводить сонячну електростанцію в горизонтальне положення в разі несправності, адже постійно здійснює самодіагностику всієї системи.

Датчик вітру включає в себе додатково інтегрований нагрівач для безперервної роботи системи слідування при низьких температурах та зображений на рисунку 1.15.



Рисунок 1.15 – Датчик вітру

Американська фірма Merlin Power Systems використовує датчики вітру в своїх сонячних установках, які автоматично за допомогою контролера та виконавчих механізмів переводять панелі в горизонтальне положення при високій швидкості вітру, щоб уникнути пошкодження установки.

Підсумовуючи вищенаведене зазначимо, що для АФЕУ необхідно розрахувати величину додаткового моменту в електромеханічній частині з

КД від дії вітрового навантаження. Для забезпечення зменшення впливу вітрового навантаження на електромеханічну частину з КД при реалізації режиму слідкування за Сонцем необхідно розробити алгоритм керування в АСК. При попередженні шторму від служб МНС також необхідний алгоритм керування в АСК.

1.5 Вимоги до систем слідкування автономних фотоелектричних енергетичних установок як об'єкта АСКТП і основні напрямки дослідження

Існує необхідність у створенні АСК слідкування за Сонцем при мінімізації витрат електричної енергії на керування та слідкування, як показує аналіз технічних рішень у сфері АФЕУ для найбільш ефективного виробництва електричної енергії за допомогою сонячної панелі.

Необхідно висунути основні вимоги до АСК слідкування АФЕУ за Сонцем для подальшого створення енергетично ефективною наземної автономної системи АФЕУ потужністю 3–5 кВт.

Такі вимоги висуваються до необхідної точності слідкування АФЕУ на Сонце, до датчиків положення Сонця, до двохкоординатної механічної системи переміщення та до мікропроцесорної системи керування двохкоординатним електромеханічним виконавчим механізмом слідкування.

Для забезпечення мінімальних втрат енергії, що виробляється сонячною панеллю, визначено необхідну точність слідкування АФЕУ за Сонцем. Відносна величина втрат енергії ΔE в залежності від помилок слідкування по азимуту і куту місця визначається за такою формулою:

$$\Delta E = 1 - \Delta \alpha \cdot \Delta \beta; \quad (1.3)$$

де: $\Delta \alpha$ – помилка слідкування по азимуту;

$\Delta \beta$ – помилка слідкування за кутом місця.

Втрати енергії від сонячної батареї при різній точності слідкуванню сонячних панелей за Сонцем наведені у таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Втрати енергії від СБ при різній точності слідкуванню

Помилка під час слідкуванню СБ за Сонцем, градус	0,5	1	2	3	4	5
Втрати енергії від СБ під час слідкуванню, %	0,0076	0,03	0,12	0,27	0,48	0,76

Графік втрат енергії від помилки слідкуванню зображений на рисунку 1.16. Немає необхідності зменшувати помилку або підвищувати точність менше/більше одного градуса під час слідкуванню сонячної батареї за Сонцем, адже підвищення точності до 0,5 градуса забезпечує несуттєве зменшення втрати потужності за рахунок помилки слідкуванню (зменшення втрати енергії від сонячної батареї на 0, 0224%) як видно з таблиці 1.7.

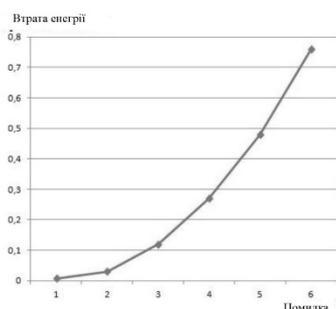


Рисунок 1.16 – Графік втрат енергії від помилки слідкуванню

Системою АФЕУ до датчика положення Сонця висуваються певні технічні вимоги. До них відносяться:

– для можливості слідкуванню сонячної панелі за Сонцем при зменшенні освітленості в 10 разів потрібен режим вимірювання освітленості датчиком при зміні інтервалу освітленості не менше ніж 1:10;

- двокоординатне виконання датчика по азимуту і куту місця, для виключення помилки за координатами при установці системи слідуванням та забезпечення однакової температури в вимірвальних фотоелементах датчика;

- для забезпечення заданої точності слідуванням, необхідне визначення чутливості датчика та діапазону зміни освітленості заданої розрядності АЦП спеціалізованого контролера слідуванням;

- чутливість датчика має бути не менше 0,25 градуса за матеріальним становищем по обох координатах для забезпечення точності слідуванням в 1 градус;

- установка має бути негабаритною, нескладною у використанні та з мінімальною вартістю датчика.

Безпосередньо до конструкції АФЕУ, мікропроцесорної системи керування електромеханічним виконавчим механізмом установки та автоматизованої паспортної системи керування пред'являються такі технічні вимоги:

- АСК слідуванням повинна мати безперервну самодіагностику, тобто діагностику всієї системи, силового драйвера крокового двигуна та самого двигуна, контролера заряду акумуляторної батареї; також має відбуватися безперервне опитування кінцевих вимикачів та забезпечена передача інформації оператору при аварійному стані системи;

- за матеріальним становищем задана точність слідуванням сонячної панелі на Сонце має бути менше одного градуса;

- мікропроцесорна АСК слідуванням повинна бути багато режимною та функціональною;

- механічна конструкція та автоматизоване керування системою АФЕУ повинні забезпечувати розворот рами з сонячною панеллю на 270 градусів по азимуту та 90 градусів за кутом місця;

- зовнішній комп'ютер повинен контролювати параметри переміщення по азимуту і куту місця, задавати параметри обмежень по швидкості,

прискорення та ривка в траєкторії переміщення, задавати параметри нелінійного струму в двигуні та параметри в алгоритмі керування слідуванням при використанні датчика положення Сонця;

- забезпечення мінімізації енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом установки під час слідуванням АФЕУ за Сонцем;

- забезпечення швидкодії та розрядності мікроконтролера, розрядності вхідного АЦП мікроконтролера, забезпечення необхідної кількості входів - виходів контролера; повинні забезпечуватися керування по двох координатах одночасно із заданою точністю слідуванням та можливість підключення зовнішнього комп'ютера та блоку зв'язку з GPRS;

- двохкоординатний електромеханічний виконавчий механізм АФЕУ повинен забезпечувати задані режими переміщення по обох координатах, в тому числі при дії значного вітрового навантаження;

- повинна бути передбачена в АСК слідуванням можливість переведення рами з сонячною панеллю в горизонтальне захисне положення при ураганних вітрах, при цьому зв'язок в контролері слідуванням повинна бути по GPRS від МНС або іншого аварійного розповсюджувача інформації;

- двигуни, датчики, кінцеві вимикачі, редуктори, тобто вся апаратура, укріплена на рамі фотоелектричної енергоустановки, повинна бути захищена від зовнішніх впливів та витримувати суттєві перепади температур.

Для досягнення поставленої мети магістерської роботи визначені наступні напрямки дослідження. Необхідність аналізу конструкцій наземних АФЕУ, АСК слідуванням сонячної панелі, датчиків положення Сонця для створення енергетично ефективного виробництва електричної енергії АФЕУ, а також необхідність у чітко визначених та обґрунтованих вимогах, що пред'являються АСК слідуванням АФЕУ за Сонцем до двохкоординатних електромеханічних виконавчих механізмів системи слідування.

Розробити та ретельно дослідити функціональну схему та алгоритм АСК слідуванням сонячних батарей за Сонцем, що включає релейний регулятор слідуванням з нелінійною характеристикою зони нечутливості,

що змінюється в залежності від поточної освітленості, і корекцією заданої траєкторії позиціонування в електромеханічному виконавчому механізмі в залежності від помилки слідування, щоб забезпечити підтримку заданої точності слідування при зміні поточної освітленості та зовнішніх факторів.

Дослідити та розробити в АСК слідуванням АФЕУ структуру та алгоритм керування системою слідуванням сонячної панелі на Сонце з безперервно-дискретним слідуванням з регульованим дискретним кроком переміщення під час слідуванням в функції поточної освітленості, що забезпечують задану точність слідуванням та підвищення енергетичних характеристик АФЕУ.

Для мінімізації споживання енергії електромеханічними виконавчими механізмами в режимі слідуванням сонячної панелі за Сонцем, необхідно розробити та дослідити спосіб та алгоритм керування двохкоординатним електромеханічним виконавчим механізмом в режимі позиціонування, які мають нелінійні контури регулювання амплітуди струму крокового двигуна.

Для підвищення плавності та безперервності руху рами з сонячною батареєю в процесі слідуванням при дії зовнішніх факторів, випадкового навантаження, в тому числі вітрового, потрібно розробити та ретельно дослідити структуру та параметри контуру керування амплітудою струму в електромеханічному виконавчому механізмі, керовані в функції від непрямой помилки слідуванням та її похідної.

Розробити та дослідити цифрові моделі елементів систем слідуванням з електромеханічними виконавчими механізмами. Провести дослідження на цифровій моделі алгоритмів слідуванням сонячних батарей за Сонцем, нелінійних законів керування контуром струму електромеханічним виконавчим механізмом, оптимізацію параметрів слідууючо-позиційної системи слідуванням сонячної панелі за Сонцем.

РОЗДІЛ 2 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Дослідження та розробка функціональної та структурної схеми системи спостереження сонячних панелей за Сонцем

Для створення енергетично ефективної АСКТП виробництва електричної енергії в АФЕУ потужністю 3–5 кВт необхідно розробити структурну та функціональну схеми системи спостереження з двохкоординатним електромеханічним виконавчим механізмом з КД та з двохкоординатним датчиком положення Сонця як показує аналіз досліджень, проведений в першому розділі магістерської роботи. Визначили, що АСК спостереження сонячними батареями за Сонцем має бути багато режимною, безперервно проводити самодіагностику, мати зв'язок з зовнішнім оператором в аварійних ситуаціях. Поряд з мінімізацією витрат електричної енергії, що витрачається двохкоординатним електромеханічним виконавчим механізмом з КД на спостереження сонячними батареями за Сонцем, спостерігача система керування повинна забезпечувати задану точність спостереження сонячними батареями за Сонцем.

Для розробки функціональної та структурної схеми АСК спостереження для АФЕУ повинні використовуватися:

- сучасні фотоелектричні сонячні панелі з високими техніко-економічними показниками;
- спеціалізований контролер спостереження, що забезпечує функціонування механізму безперервно-дискретного спостереження АФЕУ за Сонцем з заданою точністю, який реалізує несиметричний режим позиціонування і керування периферійними пристроями з діагностикою всієї системи;
- контролер заряду акумуляторних панелей з реалізацією режиму відбору максимальної потужності з сонячної панелі;

- двохкоординатний фотоелектричний датчик положення Сонця, що володіє високою чутливістю, для забезпечення високої точності спостереження АФЕУ;
- КД для забезпечення заданого переміщення по обох координатах;
- силові драйвери КД, мають можливість керування амплітудою струму, регулювання кроку переміщення, реалізації мікрокрокового режиму, захисту по струму та напрузі;
- для забезпечення необхідного моменту обертання рами з сонячною батареєю та для утримання рами при дії вітрового навантаження при відключеному двигуні доцільним буде використання черв'ячних редукторів суміщених з циліндричними;
- акумулятори, які не потребують обслуговування, з великою кількістю циклів «заряд – розряд» без втрати ємності та з величиною ємності, розрахованої на заданого споживача;
- кінцеві вимикачі, що забезпечують обмеження переміщення рами по двох координатах і можливість перекладу рами в горизонтальне положення;
- конвертор, що має оптичну розв'язку, для зв'язку контролера спостереження з зовнішньою ЕОМ;
- при виникненні екстремальних умов GPRS – модуль зв'язку для віддаленого керування АФЕУ.

На рисунку 2.1 розроблена функціональна схема АСКТП виробництва електричної енергії АФЕУ [16], на якій прийняті наступні позначення:

СБ – сонячна батарея, яка складається з декількох фотоелектричних панелей;

КСС – контролер спостереження за Сонцем;

ДКД1, ДКД2 – драйвери керування кроковими двигунами;

ДПС1, ДПС2 – датчики положення Сонця по азимуту та куту місця;

КВ1-КВ5 – кінцеві вимикачі;

М1, М2 – крокові двигуни;

Р1-Р4 – редуктори;

КЗАБ – контролер заряду акумуляторної батареї;

I – інвертор;

АБ1, АБ2 – акумуляторні батареї, конвертор (тип I-7561) – пристрій зв'язку комп'ютера з контролером по каналу RS 485;

GPRS – блок зв'язку з каналом GPRS.

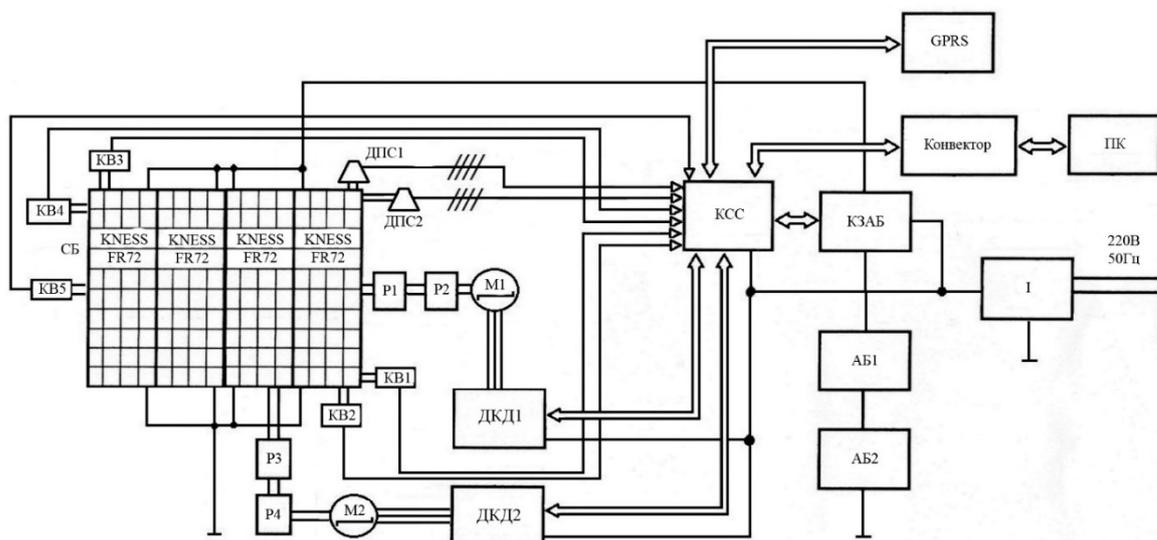


Рисунок 2.1 – Функціональна схема АСКТП виробництва електричної енергії АФЕУ

Забезпечення реалізації людино-машинної системи можливе завдяки використанню при управлінні АФЕУ даних та команд, які приймаються і передаються по модулю GPRS. Завдяки діагностиці всієї системи та відправки повідомлення оператору при наявності несправності в системі АФЕУ, реалізується контроль за станом системи АФЕУ. Також здійснюється перекид рами з сонячною панеллю в горизонтальне захисне положення при впливі вітрового навантаження, що перевищує максимально допустиму норму (наприклад, ураганного вітру).

На рисунку 2.2 розроблено функціональну схему двохкоординатної системи спостереження сонячними батареями за Сонцем з використанням КД і датчиків положення Сонця, де прийняті наступні позначення:

НЗ1, НЗ2 – нелінійні ланки;

РП1, РП2 – регулятори положення;

ДКД1, ДКД2 – драйвери крокового двигуна;

КД1, КД2 – крокові двигуни;

Р1, Р2 – редуктори;

ВМ1, ВМ2 – виконавчі механізми;

$\alpha_{\text{зад}}$ – задане (необхідне в даний момент часу) положення механізму по азимуту;

$\beta_{\text{зад}}$ – задане (необхідне в даний момент часу) положення механізму по куту місця;

ДПС1, ДПС2 – датчики положення Сонця;

$\Delta\alpha$ – помилка по куту спостереження (по азимуту);

$\alpha_{\text{дійс}}$ – дійсний стан механізму по азимуту;

$\Delta\beta$ – помилка по куту спостереження (куту місця);

$\beta_{\text{дійс}}$ – дійсний стан механізму по куту місця.

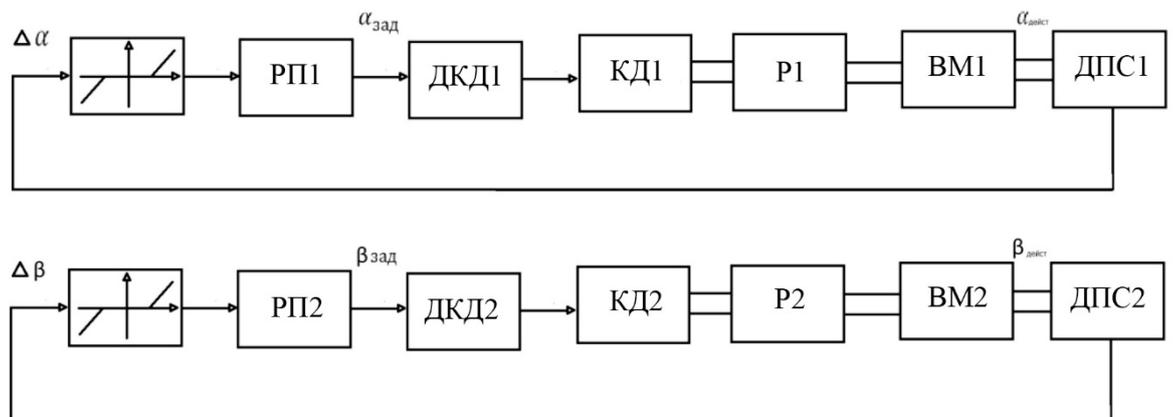


Рисунок 2.2 – Функціональна схема системи спостереження з КД

Визначено два цільових завданням створення керування системою спостереження сонячної панелі за Сонцем, виходячи з вимог до системи спостереження сонячної панелі за Сонцем, що забезпечують:

- 1) спостереження за Сонцем по двох координатах із заданою точністю;
- 2) мінімізацію енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом з КД під час спостереження.

Перше завдання можна вирішити за допомогою розробки нелінійного алгоритму спостереження за Сонцем, що враховує специфічні вимоги до систем АФЕУ, забезпеченням підвищення статичної точності переміщення при використанні крокового двигуна, що досягається підвищенням розвиваючого моменту КД, а також використанням спеціалізованого контролера, датчика та спеціалізованого механізму спостереження за Сонцем. Спеціалізований контролер спостереження за Сонцем – це 32-розрядних мікроконтролера з вбудованим 16-розрядних АЦП. Спеціальний двохкоординатний датчик положення Сонця, що володіє заданою чутливістю в широкому діапазоні зміни освітленості. Двохкоординатний електромеханічний виконавчий механізм з кроковим двигуном, забезпечує нелінійний режим позиціонування.

Мінімізація енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом досягається переходом від безперервного спостереження за Сонцем до безперервно-дискретного спостереження зі змінним кроком переміщення і винятком споживання струму КД під час відсутності переміщення рами з сонячною панеллю. Необхідним буде створенням закону керування, що забезпечує максимальне за швидкодією переміщення рами з сонячною панеллю при обмеженнях по швидкості, прискорення та ривка в управлінні крокового двигуна, тобто створення задаючої траєкторії переміщення в режимі позиціонування. Створенням нелінійного керування величиною амплітуди струму в КД під час переміщення в режимі позиціонування також призведе до мінімізації енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом.

Розглянемо алгоритм керування, що реалізується при класичному управлінні кроковим двигуном. Після закінчення режиму переміщення збереження амплітуди струму крокового двигуна в статичному режимі, для підтримки утримуючого моменту крокового двигуна. Зменшення амплітуди струму в КД в статичному режимі до 0,6 від номінальної амплітуди струму.

Переміщення на необхідний заданий кут з подальшою зупинкою КД є безперервно-дискретним спостереженням за Сонцем. Реалізується режим позиціонування з обмеженням прискорення, швидкості та ривка, під час інтервалу переміщення. Визначимо, що інтервал переміщення – це рух від одного положення до іншого положення з реалізацією максимальної швидкодії руху рами з сонячною панеллю. Режимми розгону та гальмування в даному випадку відбуваються симетрично. Діаграми двох режимів позиціонування [12] в системі спостереження зображені на рисунку 2.3. На рисунку 2.3, а ми бачимо максимальне переміщення по швидкодії з обмеженням по швидкості, прискорення та ривка, з обмеженням по швидкості та прискорення ми бачимо на рисунку 2.3, б.

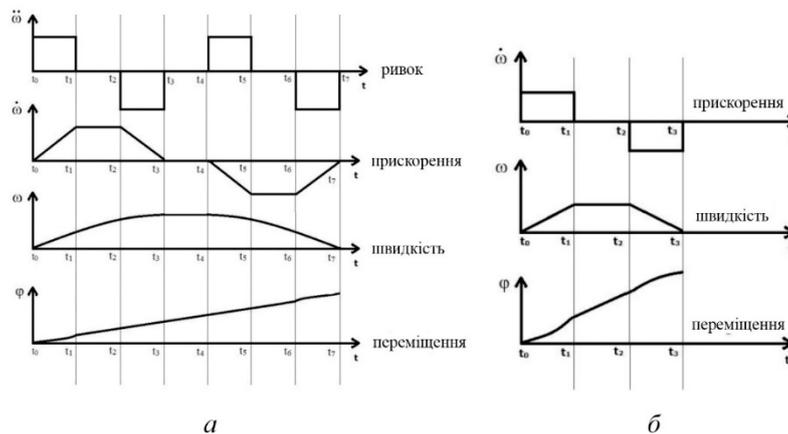


Рисунок 2.3 – Діаграма симетричного режиму позиціонування

Для вирішення поставлених завдань використаємо принцип безперервно-дискретного спостереження сонячної панелі за Сонцем. Цей принцип базується на наступних положеннях:

- сонячні панелі виробляють більше електричної енергії, якщо досягнемо високої точності спостереження за Сонцем. Шляхом зменшення кроку переміщення в електромеханічному виконавчому механізмі системі АФЕУ відбувається підвищення точності спостереження;

- доречним буде збільшення дискретного кроку переміщення, що, в свою чергу, призведе до зниження витрат електричної енергії в

електромеханічному виконавчому механізмі з кроковим двигуном під час спостереження;

- вироблення енергії сонячними панелями знижується у разі зниження рівня освітленості у декілька разів, тоді, навіть суттєве підвищення точності спостереження в системі не дасть збільшення вироблення енергії.

Враховуючи вищенаведе, бачимо парадокс ситуації: збільшуючи точність спостереження, отримуємо підвищення енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом, а збільшуючи крок переміщення при спостереженні, отримаємо зниження рівня точності спостереження. Отже, постає питання у знаходженні компромісу, враховуючи те, що чим більша освітленість, тим менший крок переміщення.

Графік зміни дискретного кроку переміщення в залежності від освітленості зображений схематично на рисунку 2.4.

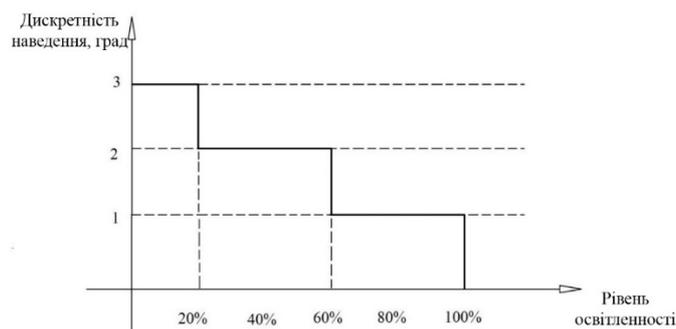


Рисунок 2.4 – Графік зміни дискретного кроку переміщення

Коли освітленість знижується у п'ять разів, через низький рівень вироблення енергії сонячними панелями, то дискретний крок переміщення підвищується з одного до трьох градусів. Якщо освітленість менше 20% від максимальної, то акумуляторна батарея може не заряджатися через низьку напругу та струму, що генерується сонячними батареями. Тому обмеження зміни дискретного кроку переміщення діють на рівні 20% від максимальної освітленості.

Датчик положення Сонця (ДПС) – це датчик, який відображає поточну освітленість (E_1), яку можна виміряти як середнє значення струмів в

фотоелементах в протилежних гранях піраміди або від кожного окремого фотоелемента, розташованого у верхній межі усіченої піраміди ДПС.

Наступні умовні позначення прийняті у ДПС:

- $I_{\phi 1}$, $I_{\phi 3}$ і $I_{\phi 2}$, $I_{\phi 4}$ – струми в протилежних гранях фотоелементів датчика;
- $I_{\phi 5}$ – струм в тилевій частині фотоелемента датчика,
- $I_{\phi 6}$ – струм фотоелемента у верхній межі усіченої піраміди.

На протязі однієї секунди відбувається 60 опитувань струму граней ДПС та усереднення значень струму, тобто здійснюється фільтрація значення струмів фотоелементів, під час вимірюванні струмів в ДПС в мікроконтролері КСС. Така процедура є вкрай необхідною, адже потрібно враховувати можливість випадкових змін освітленості та наявність зовнішніх перешкод. Наприклад, від прольоту птиці або літака може випадково затінитися ДПС. Аналогова фільтрація на операційних підсилювачах, підключених до фотоелементів ДПС також є в КСС.

Середні значення струму в протилежних гранях фотоелементів датчика визначимо за формулами:

$$I_{cp1} = \frac{I_{\phi 1} + I_{\phi 2}}{2}; \quad (2.1)$$

$$I_{cp2} = \frac{I_{\phi 3} + I_{\phi 4}}{2}; \quad (2.2)$$

Середню поточну освітленість E_1 можна представити як середнє значення струмів в протилежних гранях ДПС, наведене в відносних одиницях (в порівнянні з максимальним струмом фотоелемента датчика при максимальній освітленості), за такою формулою:

$$E_1 = \frac{I_{cp1} + I_{cp2}}{2I_{\max}}; \quad (2.3)$$

де: I_{\max} – максимальне значення струму фотоелемента датчика.

У якості приклада наведемо енергетичні характеристики системи АФЕУ-0,5 при зміні дискретного кроку переміщення, що відображають, що

зменшення величини кута переміщення, призводить до збільшення споживаної електричної енергії. Енергетичні характеристики системи АФЕУ-0,5 згрупуємо у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Споживання енергії виконавчим механізмом з КД при переміщенні на 180 градусів по азимуту (при дискретному кроці переміщення рами з сонячною панеллю на 2, 3, 5 градусів)

№	Швидкість (Гц)	Прискорення (крок/с ²)	Гальмування (крок/с ²)	Час (с)	Струм робочий (А)	Струм пусковий (А)	Споживана потужність (Вт)	Споживана енергія (Вт · год)
1	3000	3000	3000	0,9	1	1,4	29,4	0,92
2	3000	3000	3000	1,3	1	1,4	29,4	0,637
3	3000	3000	3000	1,67	1	1,4	29,4	0,49

Примітка: експеримент № 1 з дискретним кроком переміщення 2 градуси; експеримент № 2 з дискретним кроком переміщення 3 градуси; експеримент № 3 з дискретним кроком переміщення 5 градусів.

Розрахункові величини втрати енергії (потужності) для двох сонячних батарей типу KNESS FR72(установка АФЕУ-0,5) при різній дискретності переміщення і максимальній освітленості згруповані у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахункові величини втрати енергії для двох СБ типу KNESS FR72при різній дискретності переміщення

Помилка під час спостереження Сонцем, градус	0,5	1	2	3	4	5
Втрати енергії від СБ під час спостереження,%	0,0076	0,03	0,12	0,27	0,48	0,76
Величина втрати потужності в СБ, мВт	2,432	9,6	38,4	86,4	157,2	243,2
Орієнтовна добова втрата енергії (при еквівалентній 12-годинно́й максимальної освітленості) в СБ, Вт·год	0,29	1,15	4,6	10,36	18,86	29,18

Графік втрати потужності (крива 1) та графік добової втрати енергії від помилки спостереження (крива 2) зображені на рисунку 2.5.

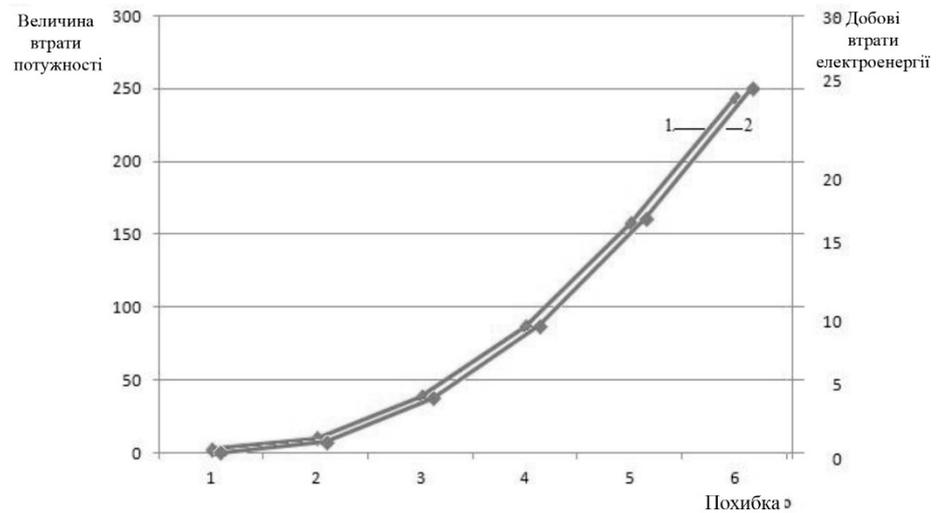


Рисунок 2.5 – Залежність втрат енергії від помилки спостереження

Отже, маємо структуру та алгоритм керування АСК спостереження для АФЕУ, що забезпечують підвищення швидкодії системи та точності спостереження, а також суттєво поліпшують енергетичні характеристики системи АФЕУ поряд зі зменшенням енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом з кроковим двигуном під час спостереження сонячними панелями за Сонцем.

2.2 Дослідження та розробка алгоритму спостереження сонячних батарей за Сонцем з використанням датчика положення Сонця

Враховуючи вищенаведене, маємо можливість розробити алгоритм спостереження рами з сонячних панелей за Сонцем із заданою точністю спостереження поряд з мінімальним енергоспоживанням електромеханічним виконавчим механізмом під час спостереження.

Розглянемо алгоритм спостереження з використанням датчика положення Сонця. Якщо струми в фотоелементах протилежних граней піраміди фотодатчика ($I_{\phi 1}$, $I_{\phi 3}$ і $I_{\phi 2}$, $I_{\phi 4}$) рівні, то переміщати раму з сонячними панелями не має сенсу, а якщо є відмінність, то необхідно провести переміщення рами з сонячними панелями з датчиком положення Сонця в

напрямку, щоб нівелювати різницю по струму. Якщо в протилежних гранях усіченої піраміди два протилежних фотоелемента у датчика положення Сонця показують однаковий струм, то датчик положення Сонця прямо наведений на Сонце або знаходиться в тіні, отже не потрібно переміщувати раму. Якщо Сонце світить із зворотного боку рами, то необхідно розгорнути раму в напрямку Сонця, а тильний фотоелемент датчика положення Сонця ($I_{\phi 5}$) видає найбільший струм. Така ситуація притаманна наступному дню після сходу сонця.

Розберемо детально вищеописаний алгоритм спостереження. Середнє значення струму (струм в гранях фотоелементів ДПС) визначається за формулами (2.1) та (2.2). Розрахунок відносної помилки положення по азимуту відбувається за наступною формулою:

$$\Delta I_1 = \frac{I_{\phi 1} + I_{\phi 2}}{I_{cp,1}}; \quad (2.4)$$

При $\Delta I_1 > 0$ йде відставання дійсної траєкторії і необхідно робити переміщення (спостереження за Сонцем) при виконанні умови:

$$\Delta I_1 \geq K_{EH}; \quad (2.5)$$

При цьому відбувається переміщення по азимуту з формуванням заданої траєкторії позиціонування на заданий кут. За умови $\Delta I_1 < 0$ відбувається випередження дійсної траєкторії по азимуту і переміщати рами з сонячними панелями не потрібно. За умови:

$$\Delta I_1 \leq K_{EH}; \quad (2.6)$$

рама з сонячною панеллю наведена із заданою точністю на Сонце.

При виконанні умови:

$$I_{\phi 1} = I_{\phi 3} = I_{\phi 5}; \quad (2.7)$$

переміщення немає та рама з сонячною панеллю знаходиться в тіні.

Виконання умов:

$$I_{\phi 5} > I_{\phi 1}; I_{\phi 5} > I_{\phi 2}; I_{\phi 5} > I_{\phi 3}; I_{\phi 5} > I_{\phi 4} \quad (2.8)$$

означає, що Сонце світить із зворотного боку рами і необхідно виконати розворот рами (по азимуту) в початкове положення.

Розворот рами з сонячною панеллю по азимуту здійснюється при максимально можливій швидкості обертання крокового двигуна. При підході до заданому положенню (коли помилка зменшується до 0,5 градуса) відбувається гальмування зі зниженою швидкістю та прискоренням.

Розрахунок відносної помилки положення по куту місця визначається за такою формулою:

$$\Delta l_2 = \frac{1_{\phi 2} - 1_{\phi 4}}{1_{cp.2}}; \quad (2.9)$$

Переміщення рами здійснюється, коли відносна помилка перевищить задану відносну величину помилки, яка визначається як зона нечутливості K_{3H} При виконанні умови:

$$\Delta l_2 \geq K_{3H}; \quad (2.10)$$

раму з сонячними панелями необхідно переміщати вгору, при цьому відбувається формування алгоритму переміщення на заданий кут.

При виконанні умови:

$$\Delta l_2 \leq -K_{EH}; \quad (2.11)$$

раму з сонячними панелями необхідно переміщати вниз, при цьому відбувається формування алгоритму переміщення на заданий кут.

При виконанні умови:

$$-K_{3H} < \Delta l_2 < K_{3H}; \quad (2.12)$$

рама з сонячними панелями не рухається та вона точно наведена на Сонце або знаходиться в тіні.

Виходячи з 5–10% зони при визначенні закінчення перехідного процесу по керуючому впливу, обирається величина коефіцієнта зони нечутливості [21]. Необхідно забезпечити чутливість датчика положення Сонця 0,05–0,1 градуса, що не легко реалізується в датчиках положення Сонця, при переміщенні на один градус і коефіцієнті зони нечутливості 5–

10%. Значення коефіцієнта зони нечутливості $K_{ЗН}$ має бути не більше 25% від заданої величини переміщення, для недопущення великої величини перерегулювання по положенню при спостереженні. Визначено, що значення коефіцієнта зони нечутливості $K_{ЗН}$ має бути змінно залежно від заданої величини переміщення, яка в свою чергу залежить від поточної освітленості, враховуючи що переміщення відбувається дискретно на 1–3 градуси за обох координатах. Зміна значення коефіцієнта зони нечутливості $K_{ЗН}$, розрахованого за формулою та наведена у таблиці 2.3:

$$\begin{aligned}
 K_{ЗН} &= 0,25^0 \text{ при } E_1 = (100 - 60)\% \text{ від } E_{\max} \\
 &0,5^0 \text{ при } E_1 = (60 - 20)\% \text{ від } E_{\max} \\
 &0,75^0 \text{ при } E_1 = (20 - 0)\% \text{ від } E_{\max}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

де: E_1 – значення поточної освітленості;

E_{\max} – максимальна освітленість.

Таблиця 2.3 – Зміна значення коефіцієнта зони нечутливості

Дискретність заданого переміщення в режимі спостереження сонячною панеллю за Сонцем, градус	1	2	3
Точність переміщення, %	25	25	25
Величина поточної освітленості від максимальної, %	100–60	60–20	20–0
Значення коефіцієнта зони нечутливості, градус	0,25	0,5	0,75

На рисунку 2.6 показана функціональна схема системи спостереження (для однієї координати) з урахуванням алгоритму спостереження за таблицею 2.3.

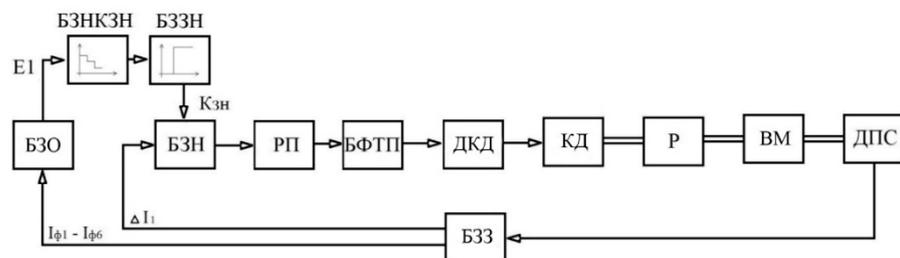


Рисунок 2.6 – Функціональна схема системи спостереження з урахуванням зміни коефіцієнта зони нечутливості

Наступні умовні позначення прийняті на рисунку 2.6:

- БЗНКЗН – блок завдання нелінійного коефіцієнта зони нечутливості;
- ДКД – драйвер крокового двигуна;
- КД – кроковий двигун;
- Р – редуктор;
- ВМ – виконавчий механізм;
- ДПС – датчик положення Сонця;
- БЗЗ – блок зворотного зв'язку;
- БВО – блок визначення освітленості;
- БЗЗН – блок визначення зони нечутливості;
- БЗН – блок завдання нелінійного коефіцієнта зони нечутливості;
- РП – регулятор положення;
- БФТІ – блок формування траєкторії позиціонування;
- КЗН – коефіцієнт зони нечутливості;
- ΔЕ1 – середня поточна освітленість, розрахована (виміряна) по ДПС;

відносна величина помилки положення по азимуту;

- $I_{\phi 1}, I_{\phi 2}, I_{\phi 3}, I_{\phi 4}$ – струми в похилих площинах ДПС.

Регулятор положення (РП) можна уявити як релейний елемент із змінною величиною зони нечутливості по формулі:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вих рп}} &= -U_{\text{max}} \text{ при } -U_{\text{вх}} < -K_{\text{ЗН}} \\
 0 &\text{ при } -K_{\text{ЗН}} < U_{\text{вх}} < K_{\text{ЗН}} \\
 +U_{\text{max}} &\text{ при } U_{\text{вх}} > K_{\text{ЗН}}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

де: $U_{\text{вх}}$ – вхідний сигнал;

$U_{\text{вих рп}}$ – вихідний сигнал;

$K_{\text{ЗН}}$ – величина зони нечутливості релейного елемента.

Характеристика регулятора положення зображена на рисунку 2.7.

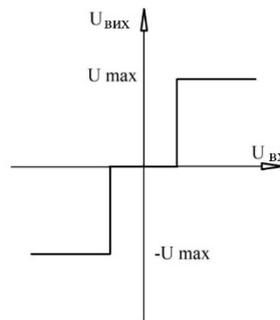


Рисунок 2.7 – Характеристика регулятора положення

По таблиці 2.3 визначається характеристика блоку зони нечутливості визначається, а її величина пропорційна поточній освітленості $E1$, яка визначається за формулою (2.3). Вона виглядає як зовнішній збурюючий вплив у вигляді формули:

$$K_{3H} = K_2 E1; \quad (2.15)$$

де: K_2 – коефіцієнт передачі блоку визначення зони нечутливості.

При переміщенні рами з сонячними батареями закінчення режиму переміщення на заданий кут в режимі позиціонування (закінчення реальної траєкторії відпрацювання заданого переміщення) може йти вперед, або відставати до закінчення розрахункової траєкторії. Доцільним буде розроблення алгоритму корекції траєкторії, що буде забезпечувати істотне зменшення перерегулювання по положенню. Наведено його на рисунку 2.8.

Суть запропонованого алгоритму полягає в тому, що в ньому відбувається безперервна оцінка помилки в переміщенні в реальному часі та в релейному регуляторі порівнюється з зоною нечутливості. Відбувається припинення переміщення шляхом відключення драйверів крокового двигуна, коли значення помилки в переміщенні стає менше значення зони нечутливості. Виникає необхідність в перерегулюванні по положенню. Якщо значення помилки в переміщенні вище значення зони нечутливості, є необхідність корекції положення рами шляхом введення додаткового завдання на переміщення у разі завершення позиціонування. Застосуємо коригувальну траєкторію 0,5 градуса за матеріальним становищем. У

мікроциклі спостереження за Сонцем, завдання на коригувальну траєкторію є можливість формувати декілька разів до повної компенсації помилки по положенню.

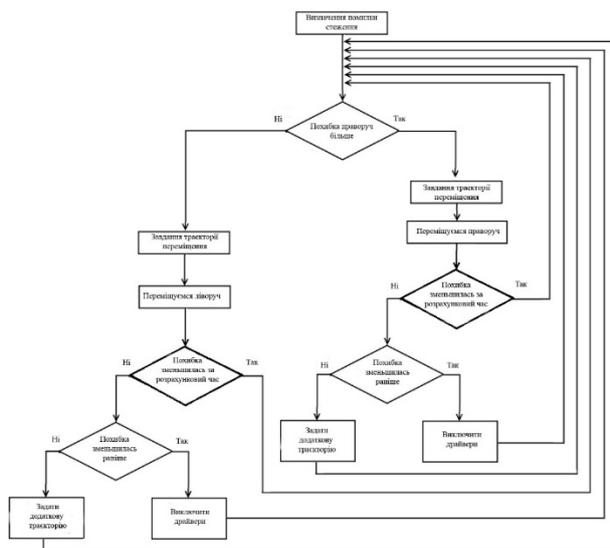


Рисунок 2.8 – Алгоритм корекції траєкторії спостереження

На рисунку 2.9 наведено загальний алгоритм спостереження за Сонцем.

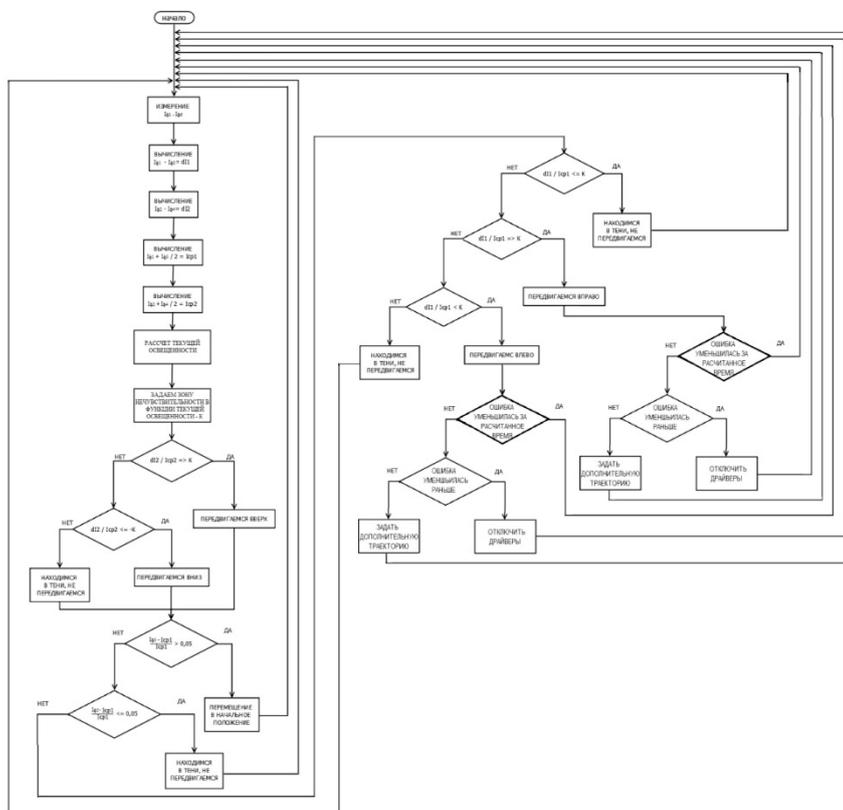


Рисунок 2.9 – Алгоритм спостереження за Сонцем

Наступною системою рівнянь описується кроковий двигун [72]:

$$\begin{cases} Ri_m(t) + L \frac{di_m(t)}{dt} + E_m = U_m(t) \\ J \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + K \frac{d\alpha(t)}{dt} + F \frac{d\alpha(t)}{dt} \end{cases} \quad (2.16)$$

де: $u_m(t)$ – миттєве значення напруги на фазі статора;

R – опір фази статора;

$i_m(t)$ – миттєве значення струму в фазі;

L – індуктивність фази;

E_m – наведена ЕРС в фазній обмотці;

α – кут повороту ротора;

J – приведений момент інерції крокового двигуна з урахуванням механізму;

K – коефіцієнт демпфірування силами в'язкого тертя;

F – момент сухого тертя;

$M_H(t)$ – загальний момент навантаження;

$M(t)$ – миттєве значення синхронізуючого моменту крокового двигуна.

У наступному вигляді можна представити передавальну функцію крокового двигуна [22]:

$$W_{кд} p = \frac{e^{-p\tau_{дв}}}{T^2 p^2 + 2T + \xi + 1}; \quad (2.17)$$

де: T – постійна часу двигуна;

$\tau_{дв}$ – електромагнітна постійна часу фази двигуна.

У формулі (2.17)

$$T = \frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{J}{PM_m}}; \quad (2.18)$$

$$\xi = \frac{9.81 \cdot 10^{-5} M_m}{PI^2 R} = \omega_0 k_m; \quad (2.19)$$

де: ω_0 – власна частота малих коливань ротора біля положення рівноваги;

P – число пар полюсів двигуна;

M_m – максимальний статичний синхронізуючий момент двигуна;

J – момент інерції крокового двигуна;

$k_{ш}$ – коефіцієнт, що враховує демпфірування обмоток КД (змінюється в межах від 1 до 2);

R – опір фази статора двигуна.

Представити передавальну функцію (2.17) можна в наступному вигляді:

$$W_{10(p)} = \frac{e^{-p\tau}}{T_{20}^2 T_{11} p^2 + T_{10} p + 1}; \quad (2.20)$$

$$T_{10} = \frac{k}{p M_m}; \quad (2.21)$$

$$W_{КД(p)} = \frac{e^{-p\tau}}{T_{10} T_{11} p^2 + T_{10} p + 1}; \quad (2.22)$$

$$T_{11} = \frac{J}{k}; \quad (2.23)$$

Драйвер крокового двигуна (ДКД) дорівнює половині періоду квантування в ШІМ-перетворювачі та являє собою аперіодичну ланку з постійною часу:

$$W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad (2.24)$$

де: T_3 – постійна часу;

k_3 – коефіцієнт передачі в драйвері.

Редуктор умовно можна взяти з одиничним коефіцієнтом передачі, датчик положення Сонця представити як безінерційну ланку з одиничним коефіцієнтом для проведення подальших розрахунків. У вигляді аперіодичної ланки з постійною часу вихідного фільтра можна уявити блок зворотного зв'язку. Нагадаємо, що у зворотному зв'язку по ДПС має місце аналогова та цифрова фільтрація:

$$W_4(p) = \frac{k_4}{T_4 p + 1}; \quad (2.25)$$

де: T_4 – постійна часу;

k_4 – коефіцієнт передачі в блоці зворотного зв'язку.

Для однієї координати керування на рисунку 2.10 зображена структурна схема системи спостереження, враховуючи вимоги, що висувалися вище, та сигналізування про помилку по положенню $\Delta\alpha$ як різниці сигналу завдання по положенню $\alpha_{зад}$ і сигналу з датчика положення $\alpha_{оз}$.

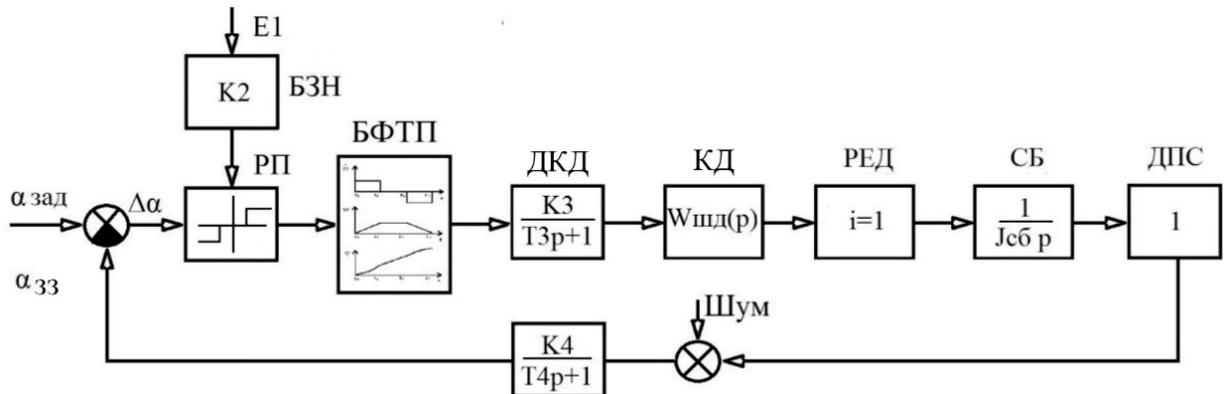


Рисунок 2.10 – Структурна схема системи спостереження з урахуванням зміни коефіцієнта зони нечутливості

Виникає потреба у моделюванні динамічних характеристик системи спостереження з урахуванням об'єкта регулювання для уточнення параметрів регулятора положення та блоку формування траєкторії позиціонування.

Сьогодні існує безліч систем, що використовуються для моделювання електромеханічних систем спостереження за Сонцем [13, 14, 15]. Найпопулярнішою та найпростішою в реалізації є модель, що використовує пакет прикладних програм MATLAB (Simulink). MATLAB 7.11 (Simulink) моделює складні динамічні системи, автоматизує всі етапи розробки завдяки використанню методів розв'язання математичних задач, активно залучає до роботи графічний інтерфейс користувача та РС. Можна припустити, що сукупність методів та засобів автоматизації процесу розробки АСКТП і є MATLAB (Simulink).

Структура моделі системи, що спостерігає за Сонцем, розроблена в MATLAB 7.11 (Simulink) зображена на рисунку 2.11. У моделі враховані всі технічні особливості: передавальна функція крокової двигуна з урахуванням моменту інерції рами; особливість релейного регулятора із змінною зоною нечутливості; блок формування траєкторії позиціонування; зона нечутливості датчика положення.

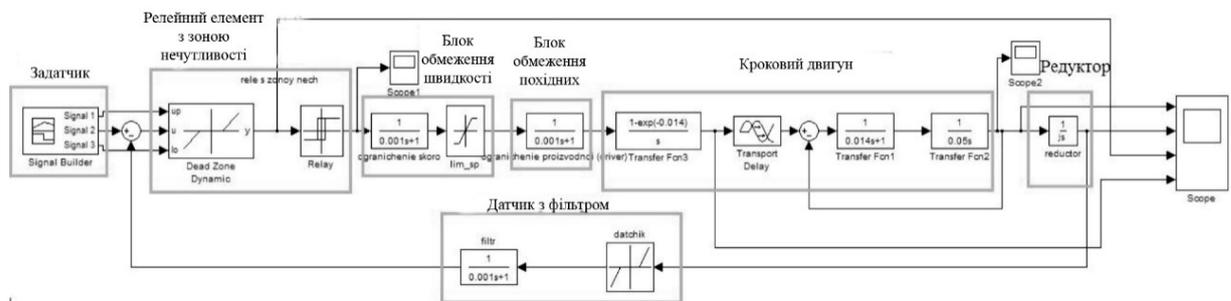


Рисунок 2.11 – Структура моделі стежучої системи

Параметри крокового двигуна типу КД-5д-1М, який ми застосували в даній моделі, згруповані у таблиці 2.4.

Динамічні характеристики приведені на рисунках 2.12–2.14, що були отримані на цифровій моделі (зона нечутливості в релейному регуляторі 0,05; $T_m = 0,05$ с; $T_e = 0,0014$ с; зона нечутливості в датчику положення 0,05; постійна часу фільтра у датчика положення $T = 0,001$ с; постійна часу на обмеження завдання по швидкості $T = 0,001$ с).

На рисунку 2.12, 2.13 та 2.14 показано переміщення на один, два та три градуси відповідно. У системі позиціонування при переміщенні від одного до трьох градусів вірно обраний підхід до заданого положення, адже в системі забезпечується задана точність спостереження. Такі висновки можна зробити за результатами моделювання стежучої системи з кроковим двигуном для АФЕУ з урахуванням особливостей об'єкта керування, проте без урахування зміни сигналу освітленості. При переміщенні рами з сонячними панелями до одного градуса за матеріальним становищем, враховуючи обмеження по швидкості та прискорення, двигун не вийде на максимальну швидкість, тобто маємо справу з граничними динамічними характеристиками.

Таблиця 2.4 – Паспортні характеристики крокового двигуна КД-5д-1М

Характеристики	Показники
Напруга живлення, В	24,48
Максимальний струм фази, А	3
Статична похибка відпрацювання кроку, хв	20
Номинальний момент, Н·м	0,1
Максимальна частота відпрацювання кроків в номінальному режимі, Гц	16000
Режим роботи	Тривалий
Одиничний крок КД, градус	1,5
Одиничний крок при використанні драйвера типу DQ-356M, градус	0,03
Номинальний момент інерції навантаження, кг·м ²	$4 \cdot 10^{-6}$
Номинальна приємність, крок/с	2000
Момент інерції ротора, кг·м ²	$7 \cdot 10^{-6}$
Опір фазної обмотки постійному струму, Ом	$1 \square 0,1$
Індуктивність фазної обмотки, мГн	$16 \square 4$
Максимальне допустиме значення струму в фазових обмотках при імпульсній форсунці, А	7
Граничне підвищення температури обмоток, °С	+ 170
Граничне підвищення температури корпусу, °С	+ 130
Момент інерції навантаження, кг·м ²	$4 \cdot 10^{-6}$
Максимальний розвиваючий момент при частоті задаючого імпульсів 2000 Гц і інерції навантаження $J_H = 2 \cdot 10^{-6}$, кг·м ²	0,5 Н·м
Максимальний розвиваючий момент при частоті задаючого імпульсів 2000 Гц і інерції навантаження $J_H = 8 \cdot 10^{-6}$, кг·м ²	0,4 Н·м

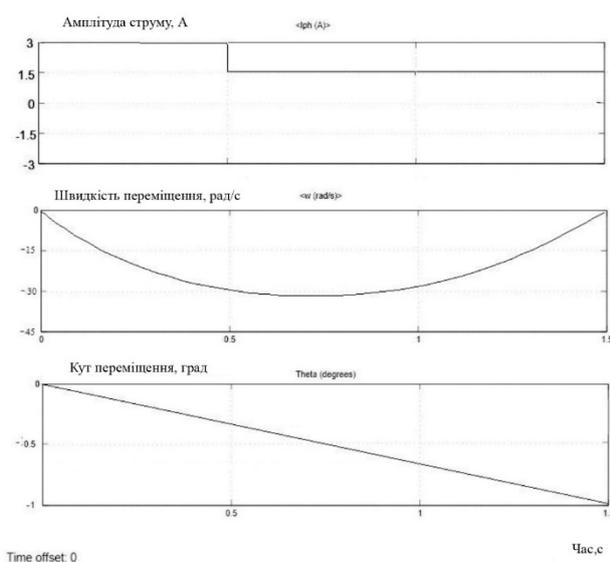


Рисунок 2.12 – Динамічні характеристики

Уявляємо електромеханічну систему з задаючими струмами по фазах двигуна, при моделюванні системи спостереження крокового двигуна можна. Структура моделі КД з задаючими амплітудами струмів, розроблена в MATLAB 7.11 (Simulink) зображена на рисунку 2.15.

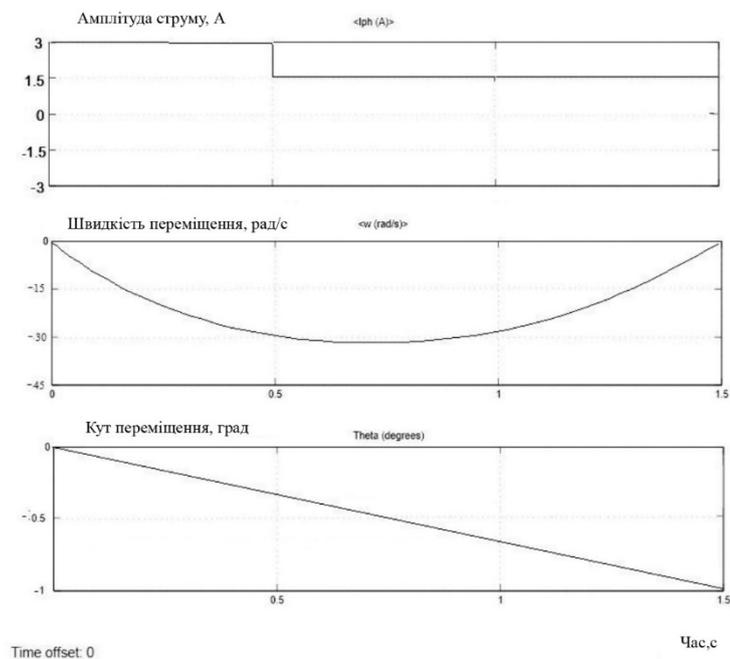


Рисунок 2.13 – Динамічні характеристики

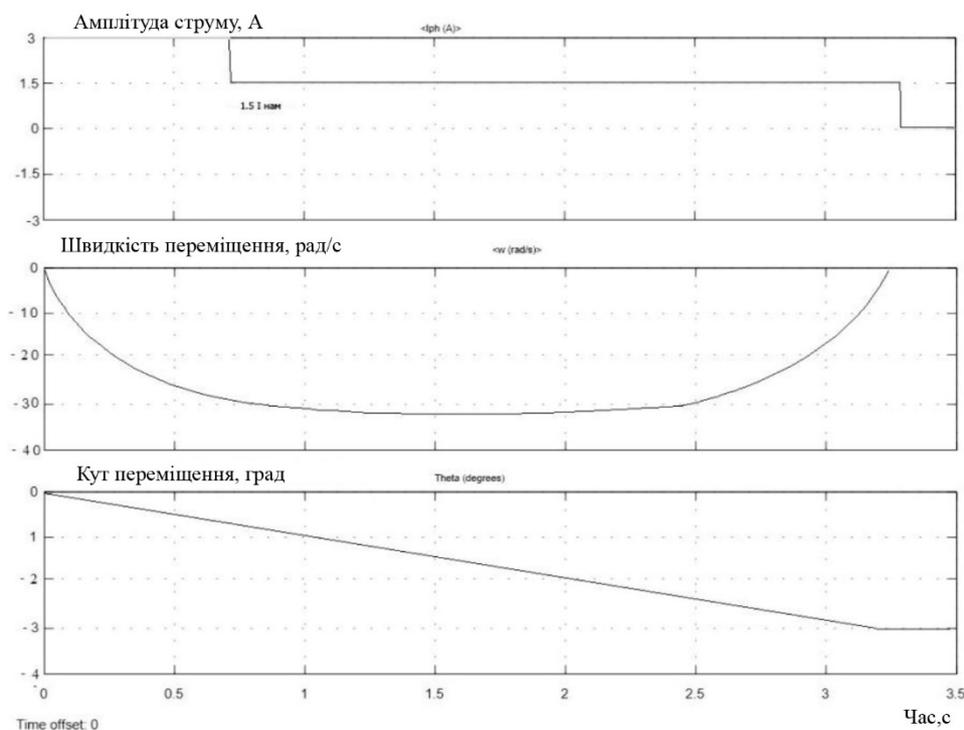


Рисунок 2.14 – Динамічні характеристики

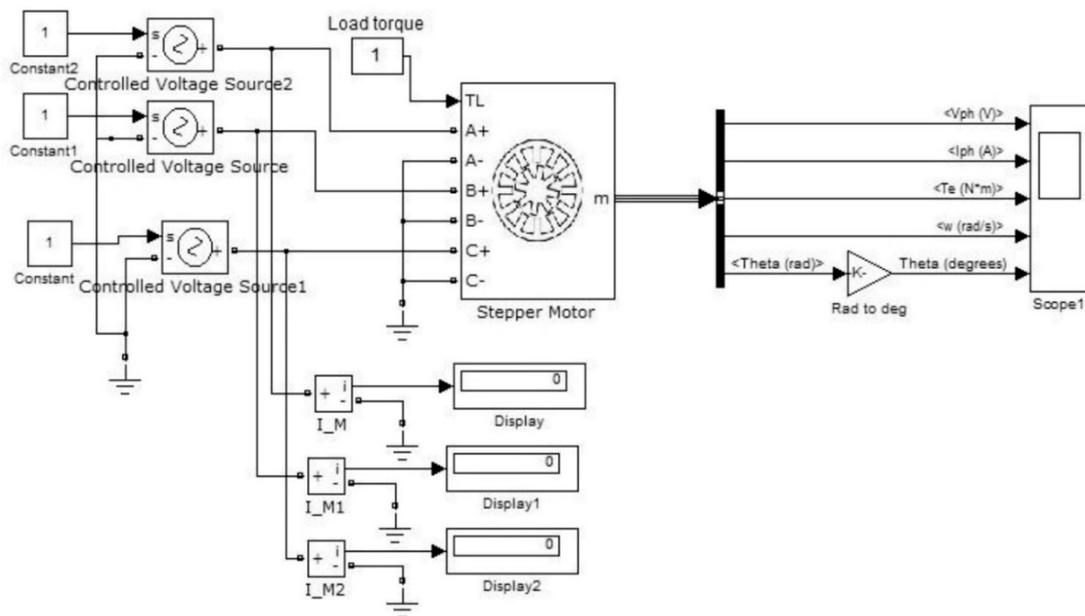


Рисунок 2.15 – Структура моделі КД

Нагадаємо, що за рисунками 2.7 та 2.9 у структурній схемі АСК спостереження за Сонцем, що пропонується в цій магістерській роботі, в прямому каналі є релейний елемент із змінною величиною зони нечутливості. Безпосередньо у самій системі спостереження погіршується співвідношення сигналу та шуму в умовах низької освітленості. Дамо визначення поняттю «шум» в даному випадку. Шум – це фактично фонове засвічення, сигнал світла, що відбивається від сторонніх предметів. До значного поліпшення фільтрації в системі АСК спостереження за Сонцем та до зниження вірогідності помилки від сигналу перешкод, призводить збільшення зони нечутливості. Збільшення такої зони означає, що значення коефіцієнта зони нечутливості КЗН зменшується при зменшенні поточної середньої освітленості E_1 . Проведені дослідження дозволили створити алгоритм спостереження СБ за Сонцем при використанні датчика положення Сонця, що має нелінійну характеристику блоку зони нечутливості, тобто перемінну у функції освітленості, при визначенні необхідності режиму переміщення.

2.3 Мінімізація енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом в слідкуючо-позиційній системі спостереження сонячних панелей за Сонцем

Враховуючи вищенаведене, визначено, що при безперервно-дискретному спостереженні сонячних панелей за Сонцем, переміщення від однієї координати до іншої відбувається по траєкторії з мінімальним витраченим часом, враховуючи обмеження по швидкості, прискорення та ривка, поряд з реалізацією симетричного режиму позиціонування.

При загальноприйнятому включенні драйвера та крокового двигуна при автоматичному супроводженні сонячних батарей за Сонцем, КД завжди знаходиться під номінальним струмом [7]. Такий режим характеризується великим споживанням струму кроковим двигуном. В даному випадку буде прийнятним спостереження сонячними панелями за Сонцем в АФЕУ виконувати безперервно-дискретним, тобто забезпечити переміщення на один – три градуси за матеріальним становищем, а потім доцільно зупинитися. Наступне переміщення сонячних батарей за Сонцем в АФЕУ буде здійснено через 10–20 хвилин.

Створений несиметричний режим позиціонування, де закладені різні обмеження по струму при пуску та гальмуванні, для зменшення кількості ривків та хитань при переміщенні рами з сонячними панелями та зниження споживання енергії кроковим двигуном при безперервно-дискретним спостереженням. При підході по заданому положенню доцільним буде зменшення коливань при гальмуванні, для зниження величини перерегулювання по положенню, а також для успішного проходження нелінійного моменту сухого тертя та зменшення обсягу споживаного струму кроковим двигуном в режимі переміщення. Характеристики моменту сухого тертя двох типів зображені на рисунку 2.16 [18].

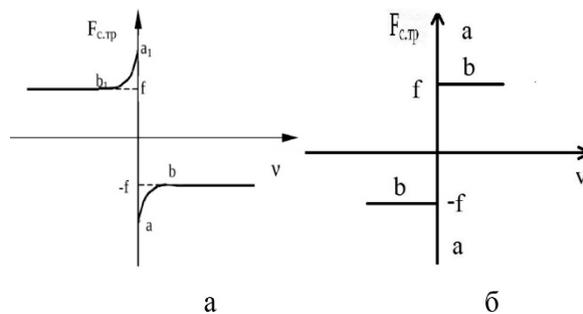


Рисунок 2.16 – Характеристики нелінійного моменту сухого тертя

Для подолання нелінійного моменту сухого тертя необхідно поступово збільшувати розвиваючий момент крокового двигуна при стандартному його включенні, адже може відбутися збій при пуску двигуна. Існують схеми керування крокових двигунів [19], де збільшують момент шляхом короткочасного підвищення струму.

Є пропозиція щодо збільшення амплітуди струму крокового двигуна до $1,5 I_n$ у запропонованому КД. Коли він подолає початковий момент сухого тертя, тоді можна амплітуду струму КД можна знизити до $0,75 I_{лв}$. Це дозволить в цілому зменшити споживання струму двигуном під час мікроциклу спостереження та уникнути збоїв при пуску крокового двигуна. В режимі позиціонування при позитивному значенні прискорення на рисунку 2.17, а, потрібно збільшувати пусковий струм в кроковому двигуні. Існує можливість застосування складнішого алгоритму позиціонування: на додаток до діаграми по рисунку 2.17, а при гальмуванні доцільно зменшувати амплітуду струму крокового двигуна – рисунок 2.17, б.

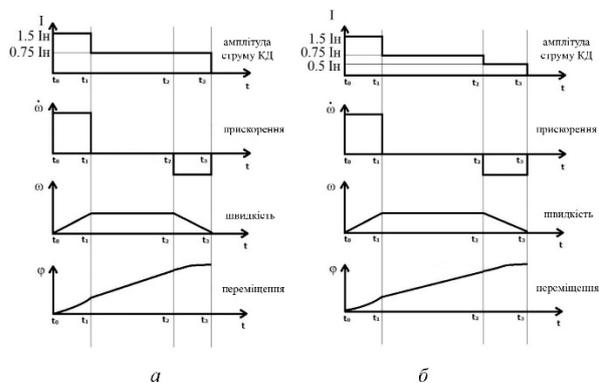


Рисунок 2.17 – Діаграма режиму позиціонування

Через те, що у механізмі переміщення рами сонячної панелі присутній великий момент інерції, необхідно зменшувати амплітуду струму крокового двигуна, для зниження рівня коливань при гальмуванні. Приведений до валу момент інерції механізму може бути вищим у декілька разів, ніж момент інерції крокового двигуна. Це може привести до зменшення споживаного струму кроковим двигуном при позиціонуванні в цілому.

По рисунку 2.17 розрахуємо енергоспоживання кроковим двигуном для струмових діаграм при переміщенні на заданий кут при нелінійному режимі позиціонування.

Двигун типу КД-5д-1М використовується в установці АФЕУ-0,5. Для розрахунку допускаємо, що потрібна ідеальна струмова діаграма, яка зображена на рисунку 2.17, а струм двигуна є постійним протягом заданого проміжку часу.

Параметри електромеханічної системи будуть наступними:

- напруга на двигуні – 24 В (реально використовується в установці);
- номінальний струм двигуна – 3 А (по паспорту на КД-5д-1М);
- номінальна частота керування, що забезпечує максимальний момент, – 2000 Гц;
- максимально досягаючи швидкість обертання на реальній установці АФЕУ-0,5 – 300 об/хв.

Розрахунок проведемо при переміщенні по куту на один, два або три градуси. З експериментальних досліджень отримано час переміщення [66, 67]. Енергія, що споживається кроковим двигуном в режимі позиціонування, розраховується за формулою:

$$E_{oe} = UI_1t_1 + UI_2t_2 + UI_3t_3 + I_2t_2 + I_3t_3; \quad (2.26)$$

де: U – напруга на двигуні;

I_1 – струм двигуна при розгоні;

I_2 – струм двигуна при русі з постійною швидкістю;

I_3 – струм двигуна при гальмуванні;

t_1 – час розгону двигуна;

t_2 – час руху з постійною швидкістю;

t_3 – час гальмування двигуна.

Обґрунтування визначення витраченої енергії за формулою (2.26) буде наступним. Існує традиційне включення двигуна, адже ротор двигуна КД-5Д1МУ3 не має постійних магнітів [24, 22]. Кінці всіх обмоток двигуна підключаються до загального проводу живлення, попередньо з'єднавши їх між собою. Сигнал на другу обмотку надходить, коли з попередньої обмотки сигнал ще не знято, адже на початку обмоток двигуна подається шестифазна послідовність імпульсів F_1 – F_6 у пів кроковому режимі. Тобто процес є таким, що з першої обмотки сигнал знімається та керування повністю передається до другої обмотки тощо. На рисунку 2.18 наведена послідовність подачі імпульсів на обмотки в режимі півкроку при різних напрямках обертання.

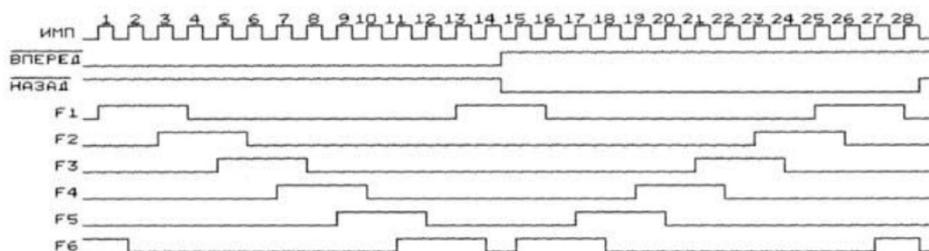


Рисунок 2.18 – Діаграма підключення обмоток двигуна КД-5д

Припускаємо, що відбувається безперервне еквівалентне споживання струму від джерела живлення, через те, що у будь-який момент часу в двигуні підключені дві обмотки та існує два імпульси струму.

У таблицях 2.5, 2.6, 2.7 наведені розрахунки споживаної енергії для трьох алгоритмів позиціонування (рис. 2.3, б, 2.17, а, 2.17, б) при переміщенні на один, два та три градуси за матеріальним становищем для механізму по куту місця.

З таблиць 2.5–2.7 витикає, що в запропонованій системі позиціонування (рис. 2.17, а) з урахуванням припущень відбувається

зменшення енергії, що витрачається на переміщення від 13 до 25% в порівнянні з симетричним алгоритмом позиціонування і з незмінною амплітудою струму в крокового двигуна. Знижуються витрати енергії на переміщення поряд зі збільшенням переміщення по положенню, тому енергетична ефективність алгоритму зростає. Як видно з рисунку 2.17, б у системі позиціонування відбувається зниження енергії, що потрібна для переміщення від 3,55 до 4,8% в порівнянні з електромеханічною системою спостереження з кроковим двигуном з несиметричним алгоритмом позиціонування.

Таблиця 2.5 – Розрахунки споживаної енергії в режимі позиціонування (відповідно до алгоритму по рисунку 2.3, б)

Характеристика переміщення, технічні дані електромеханічної системи спостереження	3 градуси, по куту місця у рами з СБ	3 градуси, по азимуту у рами з СБ
Одиничний крок переміщення у двигуна, градус	1,5	1,5
Передавальне число у редуктора	900	250
Кількість кроків у двигуна	1800	500
Струм двигуна I, А	3	3
Напруга двигуна U, В	24	24
Частота керуючих імпульсів, Гц	3000	3000
Максимальна швидкість обертання, об/хв	300	300
Загальний час переміщення t, с	2,35	1,5
Час розгону t, с	0,25	0,25
Час руху з постійною швидкістю t, с	1,85	1
Час гальмування t, с	0,25	0,25
Споживана енергія, Вт·с	169,2	108

Використовуючи моделювання в MATLAB (Simulink) стає можливим здійснити розрахунок споживання енергії крокового двигуна при позиціонуванні. Схема такої моделі наведена на рисунку 2.19.

Таблиця 2.6 – Розрахунки споживаної енергії в режимі позиціонування
(відповідно до алгоритму по рисунку 2.17, а)

Характеристика переміщення, технічні дані електромеханічної системи спостереження	3 градуси, по куту місця у рами з СБ	3 градуси, по азимуту у рами з СБ
Одиничний крок переміщення у двигуна, градус	1,5	1,5
Передавальне число у редуктора	900	250
Кількість кроків у двигуна	1800	500
Струм двигуна I, А	3	3
Напруга двигуна U, В	24	24
Частота керуючих імпульсів, Гц	3000	3000
Максимальна швидкість обертання, об/хв	300	300
Загальний час переміщення t, с	2,35	1,25
Час розгону t, с	0,25	0,25
Час руху з постійною швидкістю t, с	1,85	1
Час гальмування t, с	0,25	0,25
Споживана енергія, Вт·с	126,9	94,5

Таблиця 2.7 – Розрахунки споживаної енергії в режимі позиціонування
(відповідно до алгоритму по рисунку 2.17, б).

Характеристика переміщення, технічні дані електромеханічної системи спостереження	3 градуси, по куту місця у рами з СБ	3 градуси, по азимуту у рами з СБ
Одиничний крок переміщення у двигуна, градус	1,5	1,5
Передавальне число у редуктора	900	250
Кількість кроків у двигуна	1800	500
Струм двигуна I, А	3	3
Напруга двигуна U, В	24	24
Частота керуючих імпульсів, Гц	3000	3000
Максимальна швидкість обертання, об/хв	300	300
Загальний час переміщення t, с	2,35	1,25
Час розгону t, с	0,25	0,25
Час руху з постійною швидкістю t, с	1,85	1
Час гальмування t, с	0,25	0,25
Споживана енергія, Вт·с	122,4	90

Для мінімізації енергоспоживання кроковим двигуном при безперервно-дискретному спостереженні сонячною панеллю за Сонцем в системі пропонується після здійснення циклу переміщення сонячної батареї, вимикати силові драйвери крокового двигуна та виключати споживання енергії двигуна за відсутності переміщення.

Пропозиція по використанню в механічній системі переміщення черв'ячних редукторів, обґрунтована виключенням мимовільного переміщення рами при відсутності завдання на переміщення в кроковому двигуні. Наприклад, при дії вітрового навантаження, потрібно обов'язково не допустити переміщення рами. Для забезпечення максимального ККД у механічній системі доцільно використовувати черв'ячний редуктор з передавальним числом не більше 10, а залишкову частину передавального числа перенести на стандартний циліндричний редуктор.

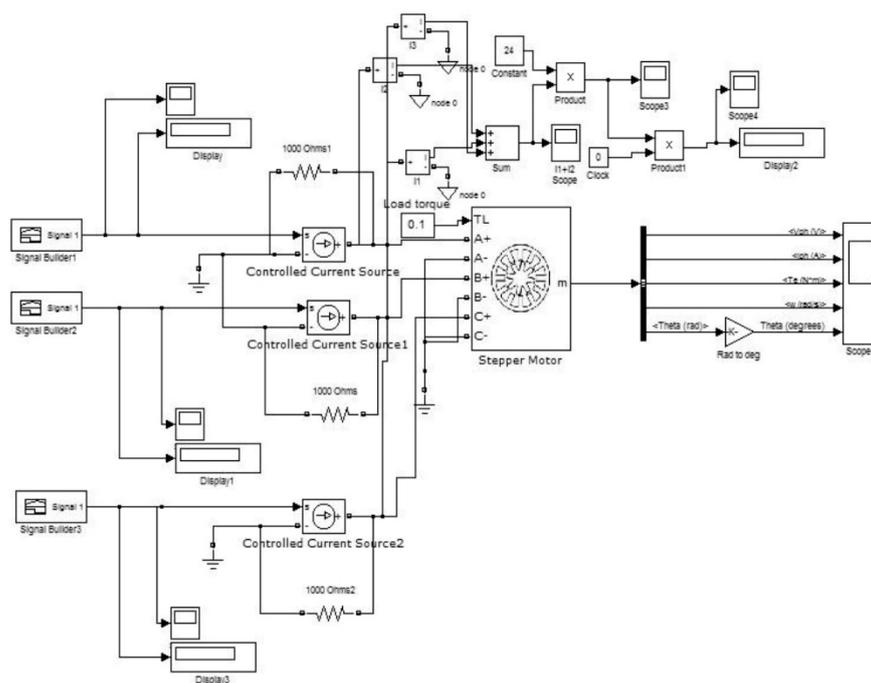


Рисунок 2.19 – Модель для розрахунку енергоспоживання в КД

У режим утримання та відсутності режиму переміщення доцільним буде провести розрахунок витрат електричної енергії при включенні крокового двигуна. Параметри електромеханічної системи спостереження,

використаємо для розрахунків. Розрахуємо дані при дискретному переміщенні по куту на три градуси з подальшою зупинкою та витримкою необхідного часу до наступного переміщення. Результати розрахунків споживаної енергії для крокового двигуна по азимуту та куту місця при номінальному струмі I_n утримання двигуна та 0,6 від номінального струму, утримання двигуна для установки АФЕУ-0,5 з двигунами КД-5д та з використанням експериментальних даних згруповані у таблиці 2.8 [27].

Таблиця 2.8 – Розрахунки споживаної енергії КД в режимі очікування

Характеристика переміщення	Переміщення по азимуту на 180 градусів		Переміщення по куту місця на 70 градусів	
Струм двигуна в режимі утримання I, А	3	1,8	3	1,8
Напруга двигуна U, В	24	24	24	24
Час переміщення рами на 3 градуси t, с	1,67		3,22	
Час переміщення рами на 180 градусів по азимуту t, с (хв)	100,2 (1,67)			
Час переміщення рами на 70 градусів за кутом місця t, с (хв)			75,13 (1,25)	
Час відсутності переміщення (при 12-годинній роботі системи) t, хв	718,33		718,75	
Потужність P, Вт	72	43,2	72	43,2
Споживана енергія КД в режимі очікування (при 12-годинній роботі системи), Вт·год (кВт·год)	862 (0,862)	517 (0,517)	862,5 (0,862)	517,5 (0,517)
Споживання енергії для двох КД в режимі очікування при струмі утримання I_n (при еквівалентній 12-годинній роботі системи спостереження), кВт·год	1,724			
Споживання енергії для двох КД в режимі очікування при струмі утримання $0,6I_n$ (при еквівалентній 12-годинній роботі системи спостереження), кВт·год	1,034			

По отриманим даним видно, що теоретичне значення еквівалентного добового споживання потужності двох крокових двигунів (типу КД-5д) в режимі очікування досягає 1–1,7 кВт·год як видно з таблиці 2.8. Цей результат порівнюємо з виробленням двох сонячних батарей KNESS FR72 на протязі від 3 до 4,8 годин за одну добу при максимальній освітленості. Виникає необхідність у вимкненні крокового двигуна через драйвер, після закінчення циклу переміщення сонячної панелі при безперервно-дискретному спостереженні. Також, дійшли висновку про доцільність використання черв'ячного редуктора в електромеханічному виконавчому механізмі переміщення

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ

3.1 Розрахунок моменту інерції механізмів переміщення і величини додаткового моменту від дії вітрового навантаження для автономних фотоелектричних енергоустановок

Визначення величини приведенного до валу двигуна моменту інерції рами з сонячною батареєю є необхідним для дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи спостереження АФЕУ. Зміна положення рами з сонячною батареєю по куту місця приводить до зміни моменту інерції по азимуту у розробленій конструкції АФЕУ, а також змінюється момент інерції безпосередньо всього механізму. У АФЕУ-0,5 та АФЕУ-1 встановлені дві або чотири сонячних панелі типу KNESS FR72. Для них потрібно розрахувати момент інерції механізму. Момент інерції механізму по куту місця визначається за наступною формулою [13]:

$$J_1 = \frac{1}{12} m(h^2 + d^2); \quad (3.1)$$

де: m – маса рами з сонячною батареєю;

h – висота рами з сонячною батареєю;

d – ширина рами з сонячною батареєю.

Величина маси рами з двома сонячними панелями типу KNESS FR72 (для АФЕУ-0,5) становить 53 кг, ширина – 1,6 м, висота – 1,607 м.

Момент інерції згідно розрахунку по формулі 3.1 буде становити:

$$J_1 = 22,71 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (3.2)$$

Величина маси рами з чотирма сонячними панелями типу KNESS FR72(для АФЕУ-1) становить 102 кг, ширина – 3,2 м, висота – 1,607 м.

Момент інерції згідно розрахунку по формулі 3.1 буде становити:

$$J_1 = 108,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (3.3)$$

Наведений до валу двигуна момент інерції для обох установок зменшується на величину в квадратній залежності від передавального числа

редуктора i ($i = 900$ в установках АФЕУ-0,5 та АФЕУ-1 по куту місця) та має наступний вигляд:

$$J_3 = J_1 / i^2 = 28 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (3.4)$$

$$J_4 = J_2 / i^2 = 134 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (3.5)$$

де: i – передавальне число редуктора.

Величина моменту інерції крокового двигуна КД-5д за паспортними даними становить $J_{\text{дв}} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Тобто наведений до валу двигуна момент інерції механізму вище, ніж у двигуна, в 7–33 рази.

Розрахуємо зміни моменту інерції для установок АФЕУ-0,5 та АФЕУ-1 по азимуту при крайніх положеннях рами по куту місця. На рисунку 3.1 показані ескізи двох механічних конструкцій АФЕУ.

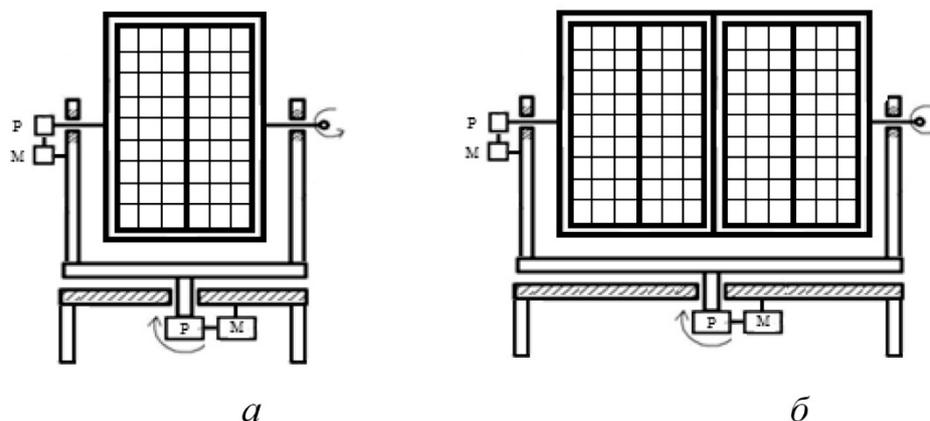


Рисунок 3.1 – Ескізи механічних конструкцій АФЕУ

Механічна конструкція АФЕУ складається з нерухомої підстави та рухомої основи, що рухається завдяки електромеханічній системі азимутального обертання. Має дві стінки та раму, на якій закріплені дві або чотири сонячні батареї. Рама рухається завдяки електромеханічній системі спостереження за кутом місця.

Необхідно при двох крайніх положеннях рами з сонячними батареями по куту місця розрахувати момент інерції для азимутального виконавчого механізму спостереження. При першому варіанті, рама з сонячними батареями знаходиться у вертикальному положенні, тобто кут місця

дорівнює 0 градусів. У другому варіанті кут місця дорівнює 90 градусів, тобто рама з сонячними панелями знаходиться в горизонтальному положенні. На рисунку 3.2, а зображена у спрощеному вигляді механічна частина установки, коли рама з сонячними панелями знаходиться в горизонтальному положенні. Коли рама з сонячними панелями знаходиться у вертикальному положенні, схематично зображено на рисунку 3.2, б.

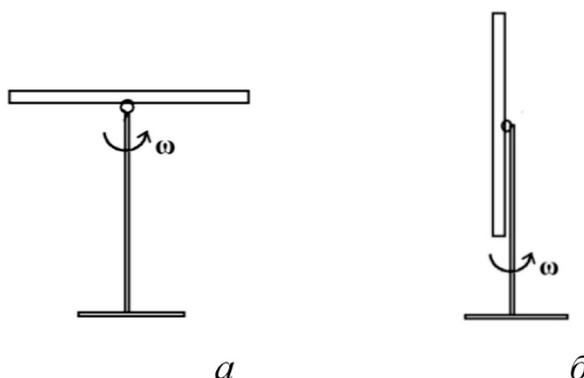


Рисунок 3.2 – Розташування конструкції рами з сонячними панелями при куті місця 0 та 90 градусів відповідно

Для пластини з шириною d та масою m у першому варіанті можна розрахувати момент інерції [22] у такому вигляді:

$$J_3 = \frac{1}{12} = md^2; \quad (3.6)$$

Для твердого куба з висотою h , шириною d , глибиною w і масою m у другому варіанті можна розрахувати момент інерції по формулі (3.1).

Отже, з формул (3.6) та (3.1) випливає, за умови, якщо рама являє собою квадрат в установці АФЕУ-0, 5, що момент інерції при зміні кута місця від 0 до 90 градусів змінюється в 2 рази (J_3/J_4). У реальній системі при зміні положення по куту місця від 0 до 70 градусів, зміна моменту інерції є в 1,93 рази.

Розрахувати величину додаткового моменту від вітрового навантаження, що діє на раму з сонячними панелями, необхідно для дослідження динамічних характеристик електромеханічної системи

спостереження АФЕУ. Момент від вітрового навантаження визначаємо за формулою [8]:

$$M_{\text{вiтp}} = \frac{1}{4} = SLKW; \quad (3.7)$$

де: $W = 0,61V^2$;

$K = 0,4$ – коефіцієнт для місцевості;

S – площа сонячних панелей;

L – висота рами (установки);

V – швидкість вітру.

Для двох типів АФЕУ виконаний розрахунок додаткового моменту від вітрового навантаження. Таблиця 3.1 містить наведені величини додаткового моменту від вітрового навантаження для АФЕУ-0,5. Площа рами з двома сонячними батареями типу KNESS FR72 становить $2,54 \text{ м}^2$, редуктор у КД по азимуту $i = 250$, редуктор у КД по розі місця $i = 900$, висота установки 2 м . Установка АФЕУ-0,5 розташована на даху приміщення на висоті 8 м [16].

Таблиця 3.1 – Величина моменту для КД від швидкості вітру в АФЕУ-0,5

Швидкість вітру, м/с	1	5	10	15	20	25	30
Момент вітрового навантаження, Н·м	0,3	7,5	30	67,5	120	187,5	270
Наведений момент до валу двигуна по куту місця, Н·м	0,00033	0,0083	0,033	0,074	0,13	0,2	0,3
Наведений момент до валу двигуна по азимуту, Н·м	0,0012	0,03	0,12	0,27	0,48	0,75	1,08

При використанні двигуна КД-5д з максимальним момент $0,4 \text{ Н·м}$ (при $f = 2000 \text{ Гц}$ і $J_n = 8 \cdot 10^{-6}$), в установці АФЕУ-0,5 при швидкості вітру 20 м/с , момент від дії вітрового навантаження в системі переміщення по азимуту перевищить максимальний момент КД в $1,2$ раз, а при швидкості 25 м/с – в $1,9$ рази. Для установки з чотирма сонячними панелями типу KNESS FR72,

де площа становить $5,08 \text{ м}^2$, у таблиці 3.2 наведені величини додаткового моменту від вітрового навантаження.

Таблиця 3.2 – Величина моменту для КД від швидкості вітру в АФЕУ-

Швидкість вітру, м / с	1	5	10	15	20	25	30
Момент вітрового навантаження, Н·м	0,6	15	60	130	240	375	540
Наведений момент до валу двигуна по куту місця, Н·м	0,00066	0,0166	0,066	0,148	0,26	0,4	0,6
Наведений момент до валу двигуна по азимуту, Н·м	0,0024	0,06	0,24	0,54	0,96	1,5	2,16

При використанні двигуна КД-5д в установці АФЕУ-1 при швидкості вітру 15 м/с момент від дії вітрового навантаження в системі переміщення по азимуту перевищує максимальний момент двигуна КД-5д в 1,8 рази, при швидкості вітру 20 м/с – в 2,4 рази, а в системі переміщення по куту місця при швидкості 25 м/с момент від дії вітрового навантаження перевищує максимальний момент крокового двигуна. У рекомендаціях щодо застосування крокового двигуна [14] для виключення збою в КД момент навантаження не повинен бути вище 0,3–0,5 від максимального моменту.

На рисунку 3.3 показані графіки наведеного моменту навантаження до валу КД для двох АФЕУ при дії вітрового навантаження.

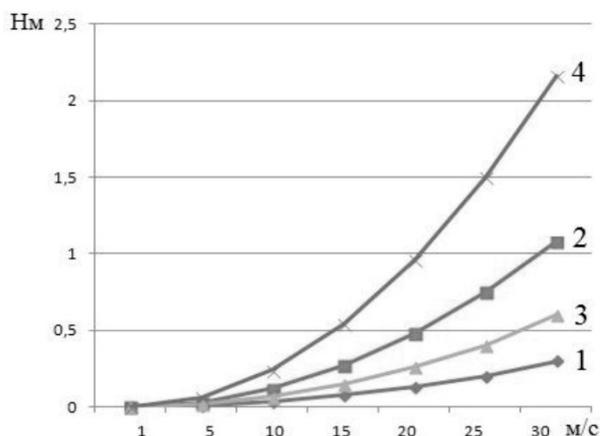


Рисунок 3.3 – Наведений момент від дії вітрового навантаження

На рисунку 3.3 означено: крива 1 – для двигуна по куту місця установки АФЕУ-0,5; крива 2 – для двигуна по азимуту установки АФЕУ-0,5; крива 3 – для двигуна по куту місця установки АФЕУ-1; крива 4 – для двигуна по азимуту установки АФЕУ-1.

3.2 Дослідження та розробка алгоритму керування електромеханічною системою спостереження при дії вітрового навантаження

Нелінійний момент навантаження, що зростає за квадратичним законом від величини швидкості вітру, присутній при дії вітрового навантаження на раму з сонячними панелями в АФЕУ.

У разі перевищення максимального навантаження на кроковий двигун, він «відскакує» назад по положенню або «смикається» близько стійкого положення, а не обертається вперед з малою швидкістю, при дії навантаження на вал двигуна. Це є його особливістю. В системі спостереження АФЕУ додаткові датчики переміщення відсутні, інформація в системі керування від драйвера керування КД про відсутність переміщення, через великий момент навантаження, не надходить в контролер спостереження.

Отже, враховуючи вищезазначене, приходимо до висновку, що при великих моментах від дії вітрового навантаження в системі спостереження з КД виникає збій при переміщенні. Збій при обертанні в кроковому двигуні виникає через велику частоту керуючих імпульсів. Граничні значення частоти керування залежать від моменту інерції та величини навантаження.

Розвиваючий динамічний момент крокового двигуна КД-5д за технічними умовами [14] при різних моментах інерції навантаження та частотах керування наведений у таблиці 3.3.

З таблиці 3.3 видно, що з перевищенням частоти 3000 Гц істотно зменшуються моментні характеристики КД, тобто вони носять характер не

лінійності. Відбувається зменшення створюваного моменту КД при підвищенні моменту інерції навантаження.

Таблиця 3.3 – Моментні характеристики двигуна КД-5

Частота керуючих імпульсів, Гц	Момент, що обертає навантаження (Н·м) при різних моментах інерції навантаження (кг·м ²)		
	2·10 ⁻⁶ кг·м ²	4·10 ⁻⁶ кг·м ²	8·10 ⁻⁶ кг·м ²
400	0,35	0,3	0,25
800	0,4	0,35	0,3
1000	0,45	0,4	0,35
1500	0,48	0,42	0,4
2000	0,5	0,45	0,4
4000	0,29	0,28	0,24
6000	0,2	0,15	0,12
8000	0,1	0,1	0,7
16000	0,1	0,1	0,7

У механічній передачі черв'ячний редуктор суміщений з циліндричним редуктором або колісною парою для забезпечення заданого передавального числа. Через те, що у механізмів переміщення як по азимуту, так і по куту місця, встановлений черв'ячний редуктор, то в системі АФЕУ, при відсутності руху, рама назад, вперед, вгору та вниз не рухається.

У режимі спостереження сонячних батарей за Сонцем при вітровому навантаженню, що не перевищує 0,5-0,6 від максимального, кроковий двигун забезпечує переміщення рами з панелями в задане положення. На рисунку 3.4, а зображено переміщення рами з сонячними панелями.

Кроковий двигун не забезпечує переміщення рами, якщо в режимі переміщення момент навантаження перевищує максимальний. У КД відбувається збій в переміщенні вала КД, а саме може відбуватися хаотичне переміщення валу двигуна, смикання або відскакування назад. Цей процес зображено на рисунку 3.4, б. Зазначимо, що помилка по положенню не зменшується та оцінюється по датчику положення Сонця побічно.

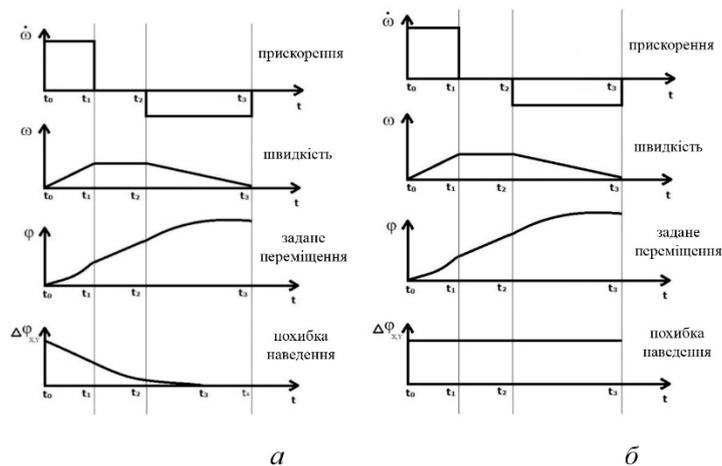


Рисунок 3.4 – Діаграма переміщення рами з сонячними батареями

Три можливі траєкторії зміни помилки по положенню залежно від моменту навантаження зображені на рисунку 3.5. У режимі спостереження сонячних батарей за Сонцем вітрове навантаження допомагає переміщенню рами. В цьому випадку закінчення переміщення може статися раніше заданого (рис. 3.5, крива 3). Ця помилка за положенням виникає при появі «перекидального» моменту в механізмі переміщення по куту місця, в разі опускання рами з панелями вниз при розбіжності центру вісі обертання двигуна і центру вісі обертання рами. За допомогою датчика положення Сонця при вимірюванні струмів в його протилежних гранях, визначаються помилки за матеріальним становищем та розраховуються за такими формулами:

$$\Delta\varphi_x = I_{\phi 1} - I_{\phi 3}; \quad (3.8)$$

$$\Delta\varphi_y = I_{\phi 2} - I_{\phi 4}; \quad (3.9)$$

де: $I_{\phi 1}$ $I_{\phi 2}$ $I_{\phi 3}$ $I_{\phi 4}$ – струми фотоелементів ДПС;

$\Delta\varphi_x$ – помилка в різниці струмів по ДПС по азимуту;

$\Delta\varphi_y$ – помилка в різниці струмів по ДПС по куту місця.

Якщо помилка по положенню не зменшується в заданий час, це означає, що діє велике вітрове навантаження.

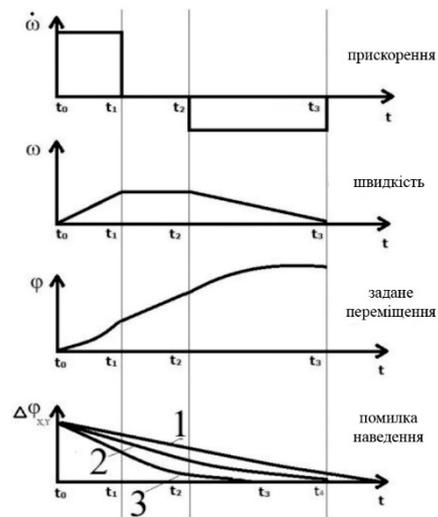


Рисунок 3.5 – Діаграма переміщення рами з СБ

Величина розвиваючого моменту крокового двигуна залежить від струму та визначається за наступним виразом [14]:

$$M_m = \frac{m}{2} p I \psi; \quad (3.10)$$

де: ψ – потокозчеплення;

I – струм двигуна;

m – кількість стійких положень ротора в межах одного обороту;

p – число пар полюсів.

Рівняння статичного синхронізуючого моменту крокового двигуна має вигляд [15]:

$$M_m = 0,25 z_p F (\lambda_d - \lambda_q) \sin(2\alpha_e); \quad (3.11)$$

де: λ_d і λ_q – повні магнітні провідності повітряного зазору крокової двигуна по поздовжній і поперечній вісях;

z_p – число зубців ротора;

w – число витків в обмотці статора;

I – струм в обмотці двигуна;

α_e – кут неузгодженості.

Підвищення розвиваючого моменту крокового двигуна можна реалізувати збільшенням струму, яке забезпечується за допомогою

додаткового сигналу керування для регулювання амплітуди струму в силовому драйвері КД як бачимо з формул (3.10) та (3.11).

Доцільно реалізувати розроблений алгоритм роботи системи спостереження, тобто виконати дії в програмному забезпеченні для КСС і драйвера КД), якщо в АФЕУ під час спостереження помилки за заданий час не зменшуються до нуля. Такий алгоритм полягає в наступному.

1. Необхідно опитати вузол захисту в драйвері КД. Можливо спрацював захист по струму в драйвері КД, він вимкнений або відсутнє живлення +24 В, якщо не зменшуються до нуля у драйвері від акумуляторів енергетичної установки, тобто спрацював автоматичний вимикач.

2. Якщо захист по струму в драйвері КД не спрацював і живлення +24 В від акумуляторів енергетичної установки присутній, то відсутнє задане переміщення в установці та не вистачає для заданого переміщення моменту в КД.

3. Необхідно збільшити амплітуду струму в КД в 1,5–2,5 рази від номінального значення. Це здійснюється програмним шляхом в КСС і драйвер КД подачею сигналу про збільшення завдання амплітуди струму в драйвері крокового двигуна.

4. Опитування помилки по азимуту і куту місця. Якщо помилки зменшуються, то відбувається переміщення рами в АФЕУ від КД та йде процес спостереження АФЕУ за Сонцем. Діаграма переміщення в цьому режимі відповідає рисунку 3.4.

5. Якщо процес переміщення закінчився раніше заданого (крива 1 на рисунку 3.4), то необхідно зменшити амплітуду струму в КД шляхом подачі сигналу (інформації) про зменшення заданої амплітуди струму в КД.

6. Якщо процес переміщення закінчився пізніше заданого (крива 3 на рисунку 3.4), то необхідно збільшити амплітуду струму в КД шляхом подачі сигналу (інформації) про збільшення заданої амплітуди струму в КД.

Процес регулювання може й не відбутися, а КСС вимкне драйвер та цикл переміщення буде закінчений. Будуть понесені великі витрати

електричної енергії в електромеханічному виконавчому механізмі з КД під час спостереження, якщо рама з сонячними батареями все ж таки переміститься.

Можна зменшити амплітуду струму крокового двигуна у режимі спостереження, коли вітрове навантаження допомагає переміщенню. Відбувається суттєва економія енергії в електромеханічному виконавчому механізмі з КД на спостереження за Сонцем.

Отже, доцільним буде використання алгоритму регулювання амплітуди струму в кроковому двигуні в функції від непрямої помилки сигналу по положенню і її похідної в системі спостереження сонячних батарей за Сонцем, а саме у функції від різниці струмів в протилежних гранях фотоелементів ДПС, враховуючи вищевикладені рекомендації та наведені вище діаграми переміщення.

Визначення похідних від помилки сигналу по положенню (від різниці струмів в протилежних гранях фотоелементів ДПС) виконується за такими формулами:

$$I_{3x} = K_{3x} \frac{d(I_{\phi 1} - I_{\phi 3})}{dt}; \quad (3.12)$$

$$I_{3y} = K_{3y} \frac{d(I_{\phi 2} - I_{\phi 4})}{dt}; \quad (3.13)$$

де: I_{3x} , I_{3y} – амплітуди задаюючих струмів ШД по азимуту (x) і розі місця (y); K_{3x} , K_{3y} – коефіцієнти пропорційності по азимуту (x) і розі місця (y).

Функціональна схема контуру керування струмом електромеханічного виконавчого механізму для однієї координати визначена в функції від різниці струмів в протилежних гранях фотоелементів ДПС (непрямої помилки по положенню) та її похідної, як запропоновано на рисунку 3.6.

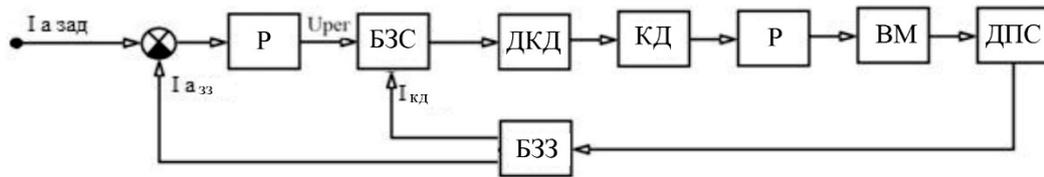


Рисунок 3.6 – Функціональна схема контуру керування струмом електромеханічного виконавчого механізму

На рисунку 3.6 прийняті наступні позначення:

- БЗС – блок завдання струму;
- Рег – регулятор;
- ДКД – драйвер КД;
- Р – редуктор;
- ВМ – виконавчий механізм;
- ДПС – датчик положення Сонця;
- БЗЗ – блок зворотного зв'язку;
- $I_{a_{зад}}$ – завдання на амплітуду струму КД;
- $I_{a_{ос}}$ – величина зворотного зв'язку по амплітуді струму КД;
- $U_{рег}$ – вихідний сигнал регулятора;
- $I_{зкд}$ – амплітуда струму завдання для КД;
- $I_{кдм}$ – максимальне значення амплітуди струму для КД.

Збільшення завдання амплітуди струму крокового двигуна при підтримці заданої швидкості зменшення помилки по положенню незалежно від навантаження на КД є особливістю даної функціональної схеми та алгоритму керування контуром струму крокового двигуна. Шляхом керування амплітудою струму в КД в функції помилки спостереження і її похідної, яка визначається за допомогою ДПС виконується коригування похибки.

На рисунку 3.7 приведена характеристика блоку завдання амплітуди струму для КД-5д. Максимальна амплітуда імпульсного струму $I_{кдм}$ для двигуна КД-5д за технічними умовами дорівнює 7 А.

Отже, розроблений принцип регулювання зміни амплітуди струму КД при випадковому впливі навантаження, включаючи дію вітрового навантаження враховуючи вище досліджене. Опис розробленого принципу автоматичного керування наведено в таблиці 3.4. На рисунку 3.8 наведено алгоритм керування контуром струму електромеханічного виконавчого механізму при дії вітрового навантаження.

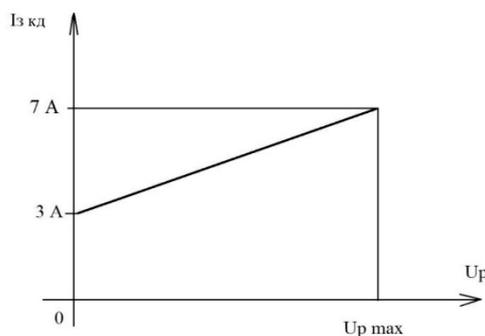


Рисунок 3.7 – Характеристика блоку завдання амплітуди струму КД

Виникне відставання ротора двигуна від вектора магніторухійної сили (МРС) на кут θ , званий кутом статичної помилки, який визначається співвідношенням моментів за такою формулою [15] при дії моменту навантаження на вал КД:

$$\Delta\theta = \arcsin; \quad (3.14)$$

де: M_{\max} – максимальний статичний момент, відповідний куту зсуву ротора щодо вектора МДС ($\theta = 90$ градусів) статора;

$M_{\text{наг}}$ – момент навантаження, прикладений до валу двигуна.

Збільшення розвиваючого моменту крокового двигуна призведе до підвищення статичної точності в КД (за формулою (3.14)), особливо при дії вітрового навантаження.

Відбувається підтримка заданої швидкості зменшення помилки спостереження, визначені ДПС, у зазначеній системі спостереження сонячних батарей за Сонцем. При цьому слід розрахувати величину необхідної похідної помилково і оптимізувати систему завдання струму в

драйвері КД. Необхідно ввести регулятор та розрахувати його параметри для якісного регулювання амплітуди струму КД.

Опис КД є системою рівнянь [22], а запропонований паралельний контур амплітуди струму з урахуванням формул (2.16) – (2.18) можна представити в наступному вигляді:

$$W(p) = \frac{k_n e^{-p\tau_{об}}}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}; \quad (3.15)$$

де: T_1, T_2 – постійні часу двигуна;

$\tau_{об}$ – електромагнітна постійна двигуна;

k_n – коефіцієнт передачі в прямому каналі.

За функціональною схемою на рисунку 3.6 об'єкт регулювання по амплітуді струму крокового двигуна можна представити як контур регулювання другого порядку.

Таблиця 3.4 – Опис принципу автоматичного керування амплітудою струму КД (по одній координаті) при дії вітрового навантаження

Спостереження по координаті X	Опис дій, здійснюваних за розробленим алгоритмом
$\Delta\varphi_x = I_{\phi1} - I_{\phi3}$	Вимірювання помилки по положенню ($\Delta\varphi_x$)
$\Delta\varphi_x$	Помилка зменшилася до нуля ($\Delta\varphi_x$) в заданий час, робота за алгоритмом, показаному на рисунку 3.6
	Помилка до нуля ($\Delta\varphi_x$) в заданий час не зменшилася
	Опитування драйвера КД на наявність несправності в роботі і відсутність живлення
	Драйвер КД працює в штатному режимі, живлення підключено
	Помилка до нуля ($\Delta\varphi_x$) в заданий час не зменшилася, при справному драйвері це означає брак розвиваючого моменту КД
	Збільшення до максимуму амплітуди струму в обмотках КД за допомогою драйвера
$I_{3X} = \frac{d(I_{\phi1} - I_{\phi3})}{dt}$	Вимірювання помилки по положенню і її похідної

Продовження таблиці 3.4

1	2
	Помилка не зменшується, необхідне збільшення амплітуди струму в КД до максимального, дозволеного в технічних умовах значення амплітуди струму в КД
	Помилка не зменшується за заданий час при максимальному значенні амплітуди струму в КД, це означає, що або сталася поломка в механізмі спостереження, або величина зовнішнього навантаження перевищує максимально задані межі. При цьому йде повідомлення на зовнішній комп'ютер, що в системі спостереження несправність
	Помилка по положенню зменшується. Вимірюємо похідну – швидкість зміни помилки, і регулюємо швидкість зміни помилки по ПД або ПІ закону регулювання. В цьому випадку відбувається підтримка швидкості зменшення помилки по положенню
	Підрахунок відносної величини помилки по положенню. Якщо відносна величина помилки менше K_{zn} , то регулювання (переміщення) припиняється. Досягнуто задане положення – рама точно наведена на Сонце. Якщо відносна величина помилки більше K_{zn} , то регулювання (переміщення) триває до значення помилки менше K_{zn}

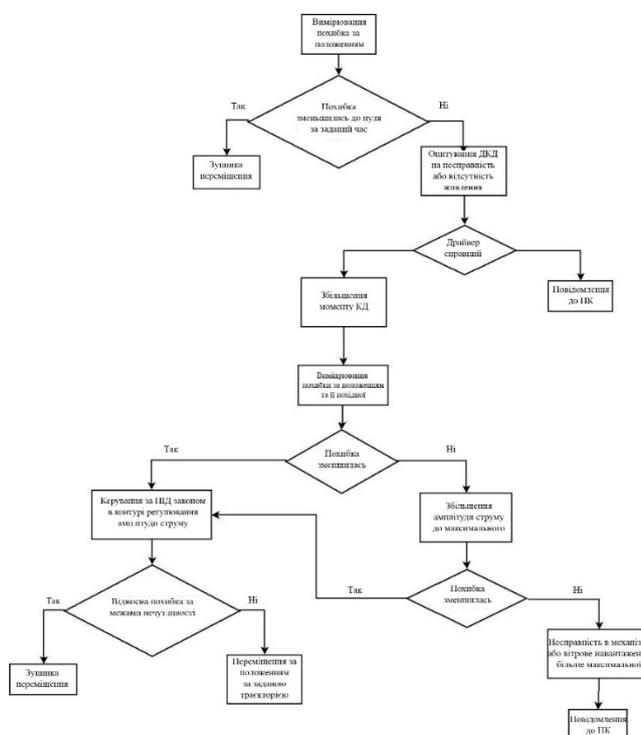


Рисунок 3.8 – Алгоритм керування контуром струму

електромеханічного виконавчого механізму при дії вітрового навантаження

Широкої популярності набирають адаптивні системи керування [20] та релейні регулятори для подальшої оптимізації динамічних характеристик при змінних параметрах об'єкта регулювання, де система працює в ковзних режимах [21]. В цьому випадку необхідно обчислювати похідні в кількості, що дорівнюють порядку об'єкта регулювання.

Отримаємо об'єкт другого порядку, де обчислити першу і другу похідні від помилки по похідній від різниці струмів в гранях датчика положення Сонця неможливо, адже амплітуди вказаних сигналів малі та мала їх швидкість зміни. Зміна моменту інерції рами з сонячними батареями по азимуту є повільною, отже в циклі спостереження можна вважати, що момент інерції є постійний.

Для поліпшення динамічних характеристик електромеханічного виконавчого механізму з кроковим двигуном, регулятор амплітуди струму в КД можна виконати як ПІД-регулятор або ПІ регулятор [21]. Такі введення суттєво поліпшують якість перехідного процесу по керуючому впливу за рахунок компенсації великий постійної часу системи, а саме компенсації еквівалентної електромеханічної сталої часу двигуна з урахуванням виконавчого механізму.

Передавальна функція ПІД-регулятора амплітуди струму в системі керування КД має вигляд:

$$w_1(p) = \frac{T_2 T_2 p^2 + T_2 p + 1}{T_1 p}; \quad (3.16)$$

де: K_k – коефіцієнт передачі регулятора;

T_1, T_2 – постійні часу регулятора;

p – оператор Лапласа.

Коефіцієнт передачі K_k в регуляторі амплітуди струму в КД визначається за формулою:

$$K_k = \frac{T_2}{K_{дв} T_H K_{дс} K_{пр}}; \quad (3.17)$$

де: $K_{дв}$ – статичний коефіцієнт передачі двигуна по положенню;

T_H – еквівалентна некомпенсована постійна часу;

K – коефіцієнт передачі датчика зворотного зв'язку по похідній від різниці струмів в протилежних гранях фотоелементів ДПС;

$K_{пр}$ – статичний коефіцієнт передачі драйвера КД (напівпровідникового перетворювача).

Постійні часу регулятора T_1 та T_2 відповідають формулі (3.15).

Еквівалентна некомпенсованих постійна часу визначається за висловом:

$$T_H = T_E + T_{\phi 1} + T_u + T_{\phi 2}; \quad (3.18)$$

де: $T_{\phi 1}$ – постійна часу фільтрів в прямому каналі керування і в каналі зворотного зв'язку по ДПС;

$T_{\phi 2}$ – постійна часу фільтрів в каналі по похідною від різниці струмів в протилежних гранях фотоелементів ДПС (зворотного зв'язку по похідній помилково, яка визначається за ДПС);

$T_{ик}$ – постійна часу, що дорівнює половині періоду ШІМ в силовому драйвер КД;

T_e – електромагнітна постійна часу фази КД.

Електромагнітна постійна часу фази двигуна КД-5д становить 14 мс. У силовому драйвері КД може бути проведена компенсація електромагнітної постійної часу фази двигуна за рахунок подачі високої напруги при регулюванні амплітуди струму. В цьому випадку еквівалентна електромагнітна постійна часу фази двигуна може бути зменшена в 3–5 разів [6].

Постійна часу T_2 з урахуванням моменту інерції механізму переміщення становить понад 100 мс, тобто еквівалентна електромагнітна постійна часу на порядок менше, ніж постійна часу T_2 (T_2 – аналог електромеханічної сталої часу двигуна постійного струму). В цьому випадку для поліпшення динамічних характеристик контуру регулювання струму регулятор можна виконати як ПІ-регулятор, що компенсує постійну часу T_2 .

Передавальна функція регулятора при цьому має такий вигляд:

$$W_p(p) = \frac{T_2 p + 1}{T_2 p}; \quad (3.19)$$

де: K_k – коефіцієнт передачі регулятора.

Коефіцієнт передачі K_k в регуляторі амплітуди струму в кроковому двигуні визначається за виразом (3.17). Еквівалентна некомпенсована постійна часу визначається за виразом (3.18).

Можна використовувати нелінійний задатчик інтенсивності на вході ПІ-регулятора [7]. Особливістю задатчика інтенсивності є те, що він змінює свою передавальну функцію в залежності від величини похідної вхідного задаючого сигналу. При малих швидкостях зміни вхідного сигналу передавальна функція задатчика інтенсивності має вигляд форсуючої ланки першого порядку:

$$W_2(p) = 1 + T_{11} p; \quad (3.20)$$

де: T_{11} – постійна часу диференційної ланки.

Це забезпечує форсировку перехідних процесів в контурі регулювання амплітуди струму.

Передавальна функція ПІ-регулятора з задатчиком інтенсивності при малих швидкостях зміни вхідного сигналу має вигляд ПІД-регулятора:

$$W_{p1}(p) = W_2(p) W_p(p) = \frac{(T_2 p T_{11} + T_{11} p + 1) K_k}{T_2 p}; \quad (3.21)$$

При великих швидкостях зміни вхідного сигналу передавальна функція задатчика інтенсивності має вигляд аперіодичної ланки:

$$W_{12}(p) = \frac{1}{1 + T_{12} p}; \quad (3.22)$$

де: T_{12} – постійна часу диференційної ланки.

При великих швидкостях зміни вхідного сигналу регулятор з задатчиком інтенсивності є ПІ-регулятор з додатковим включенням аперіодичної ланки. Це забезпечує зменшення перерегулювання по вихідному сигналу при ступеневій зміні вхідного впливу.

На рисунку 3.9 представлена модель задатчика інтенсивності.

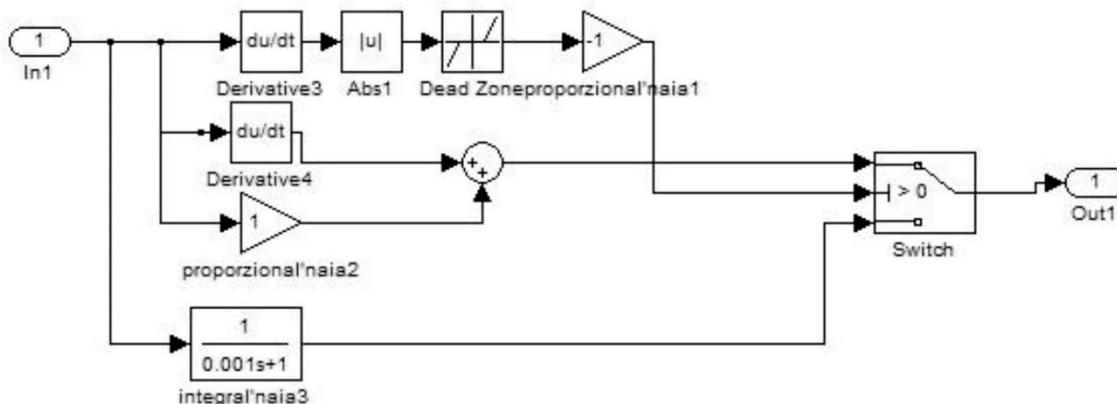


Рисунок 3.9 – Модель задатчика інтенсивності

Доцільним у практичному застосуванні буде нелінійний задатчик інтенсивності без дискретного перемикання структури, а постійні часу форсуючі частини та аперіодичної ланки безперервно змінюються у функції величини похідної вхідного задаючого сигналу. Такий вигляд має передавальна функція нелінійного задатчика інтенсивності:

$$W(p) = \frac{1 + T_{11}pK_{11}}{1 + T_{12}pK_{12}}; \quad (3.23)$$

де: T_{12} – постійна часу аперіодичної ланки;

K_{12} – змінний коефіцієнт передачі аперіодичної ланки;

T_{11} – постійна часу форсуючої ланки;

K_{11} – коефіцієнт передачі форсуючої ланки.

Еквівалентні постійні часу аперіодичної і форсуючої частини змінюються безперервно в залежності від величини похідної вихідного сигналу задатчика інтенсивності, тобто передавальна функція нелінійного задатчика інтенсивності (3.23) має вигляд інтегрально диференційованої ланки. Таким змінам ми завдячені коефіцієнтам передачі підсилювачів (K_{11} та K_{12}).

Передавальна функція нелінійного задатчика інтенсивності наближається до виду форсуючої ланки, що забезпечує форсування перехідних процесів при малих швидкостях зміни вхідного сигналу.

Передавальна функція нелінійного задатчика інтенсивності наближається до виду аперіодичної ланки, що забезпечує зменшення перерегулювання при перехідних процесах при великих швидкостях зміни вхідного сигналу.

Проведення дослідження на цифровій моделі буде доцільним для дослідження динамічних характеристик системи спостереження з кроковими двигунами з різними регуляторами і нелінійними задатчиками інтенсивності.

3.3 Підвищення живучості та надійності функціонування АСК спостереження при дії вітрового навантаження

Необхідним буде переведення рами з сонячними панелями в захисне горизонтальне положення для забезпечення надійності роботи АСУ спостереження при дії ураганного вітрового навантаження, що може привести до пошкодження самого механізму переміщення. Такі дії виконуються після отримання сигналу від МНС, інформаційно-технічного джерела поширення оперативної інформації про штормове попередження або від оператора компанії, яка обслуговує АФЕУ, через канал GPRS. Приймання команд від модуля GPRS через контролер спостереження відбувається в АСК спостереження.

Визначенням горизонтального положення рами по куту місця займається п'ятий кінцевий вимикач в АФЕУ. АСК спостереження переводить раму з сонячними панелями в горизонтальне положення при отриманні сигналу про ураганне вітрове навантаження з одночасним повідомленням оператора, що АФЕУ переведена в захисне положення.

Роботою АСК спостереження в цілому забезпечується підвищення надійності АФЕУ та досягається наступними науково-технічними підходами:

- підключення до контролера спостереження, введеного в схему АФЕУ додаткового кінцевого вимикача на механічну раму з сонячною панеллю по куту місця на 90 градусів;

- на корпусі крокового двигуна підключених до контролера спостереження змонтуємо додатково два датчика температури для уникнення перегріву двигунів;

- по каналу GPRS додамо у контролер спостереження додатковий вхід;

- для урахування виконання дій за вищевказаними науково-технічними рішеннями додамо в основне програмне забезпечення контролера спостереження додаткове програмне забезпечення.

На рисунку 3.10. схематично зображений алгоритм роботи АСУ спостереження сонячних панелей за Сонцем.

3.4 Дослідження на цифровій моделі динамічних характеристик електромеханічної системи спостереження при дії вітрового навантаження

Шляхом моделювання системи спостереження з КД в MATLAB (Simulink) досліджувались динамічні характеристики електромеханічної системи спостереження з кроковим двигуном, визначався вплив навантаження на характеристики системи спостереження, вивчався вплив змінного моменту інерції, виявлялась залежність динамічних характеристик від застосування різних регуляторів та нелінійного задатчика інтенсивності.

Структура моделі контуру регулювання амплітуди струму розроблена в MATLAB (Simulink) показана на рисунку 3.11.

Модель контуру струму по каналу зворотного зв'язку для системи спостереження з ПІД-регулятором та для ПІ-регулятора з нелінійним задатчиком інтенсивності на вході зображена на рисунку 3.12.

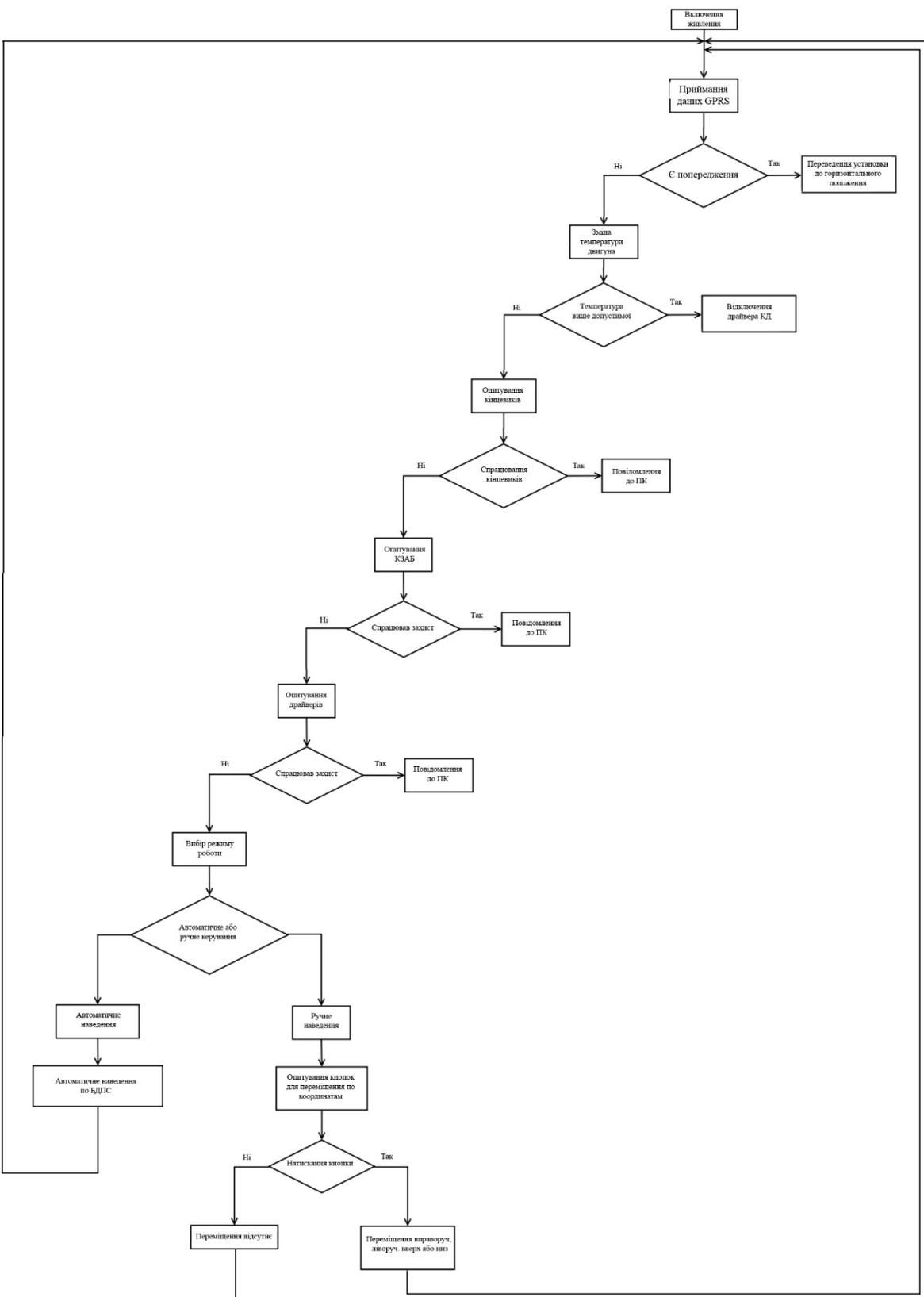


Рисунок 3.10 – Алгоритм роботи АСК спостереження СБ за Сонцем

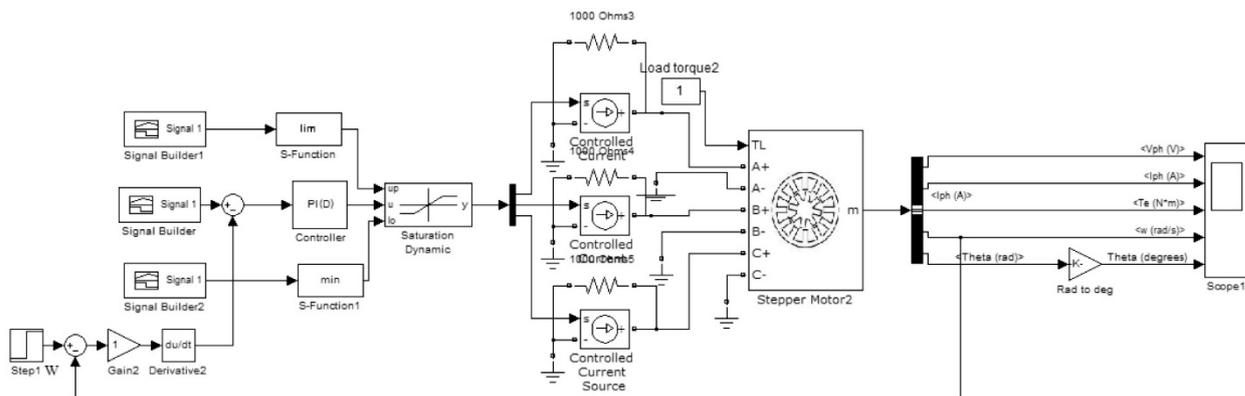


Рисунок 3.11 – Структура моделі контуру регулювання амплітуди струму

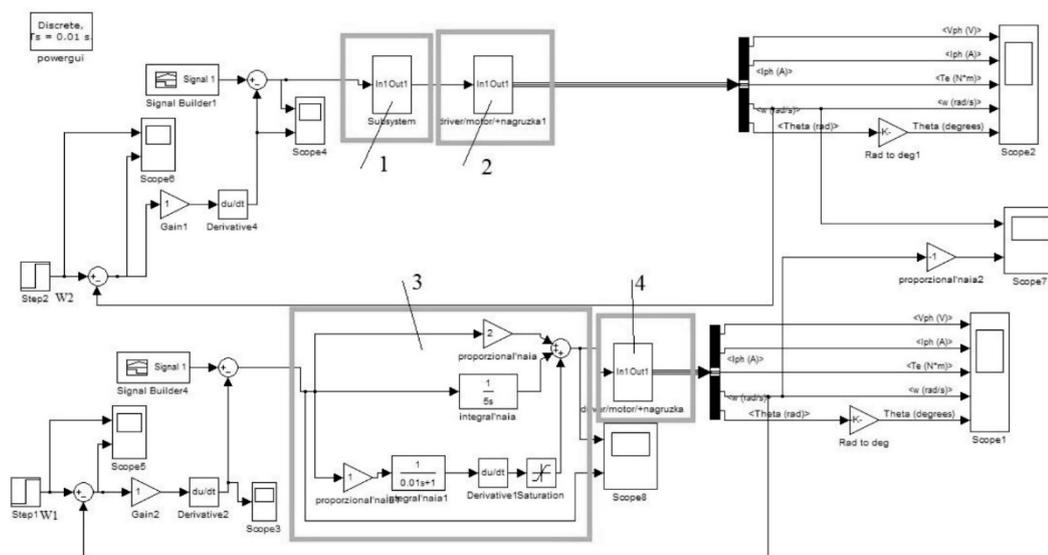


Рисунок 3.12 – Моделі контуру струму з ПІД регулятором і ПІ регулятором та задатчиком інтенсивності

На рисунку 3.12 прийняті наступні позначення:

- 1 – підсистема ПІ-регулятора з нелінійним задатчиком інтенсивності на вході;
- 3 – позначений ПІД-регулятор;
- 2,4 – позначена підсистема, що включає в себе керовані джерела струму, навантаження і кроковий двигун.

З урахуванням параметрів двигуна КД-5д і моменту інерції для установки АФЕУ-0,5 розраховані параметри регулятора за формулами (3.16) – (3.22).

Відпрацювання по швидкості переміщення на 25 градусів в кроковому двигуні (0,1 градуса на виході редуктора), отримані на цифровій моделі за різних моментів навантаження, тобто динамічні характеристики системи, наведені на рисунку 3.13. На рисунку 3.13, а бачимо графік швидкості обертання при відпрацюванні переміщення при навантаженні 0,5 номінального значення. На рисунку 3.13, б наведено графік швидкості обертання при відпрацюванні переміщення при номінальному навантаженні.

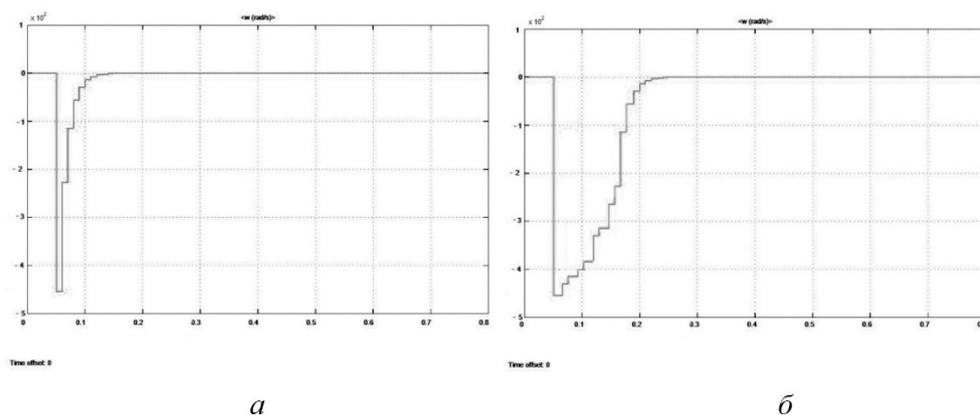


Рисунок 3.13 – Динамічні характеристики

Динамічні характеристики системи отримані на цифровій моделі за різних моментах навантаження наведені на рисунку 3.14. На рисунку 3.14, а та б маємо навантаження номінальне на рисунок 3.14, в та г маємо навантаження дворазове від номінального. Тобто, система регулювання з ПІ-регулятором з нелінійним задатчиком інтенсивності на вході відпрацьовує навантаження до $2 I_n$, як видно по результатам дослідження цифрової моделі.

Криві перехідного процесу зображені на рисунках 3.15 (а, г – показана швидкість обертання крокового двигуна, б, д – показане положення, в, е – показана амплітуда струму крокового двигуна) при збільшенні приведенного моменту інерції в 2 рази. Перехідні процеси зі збільшеним моментом інерції ми бачимо на рисунку 3.15, в, г та е.

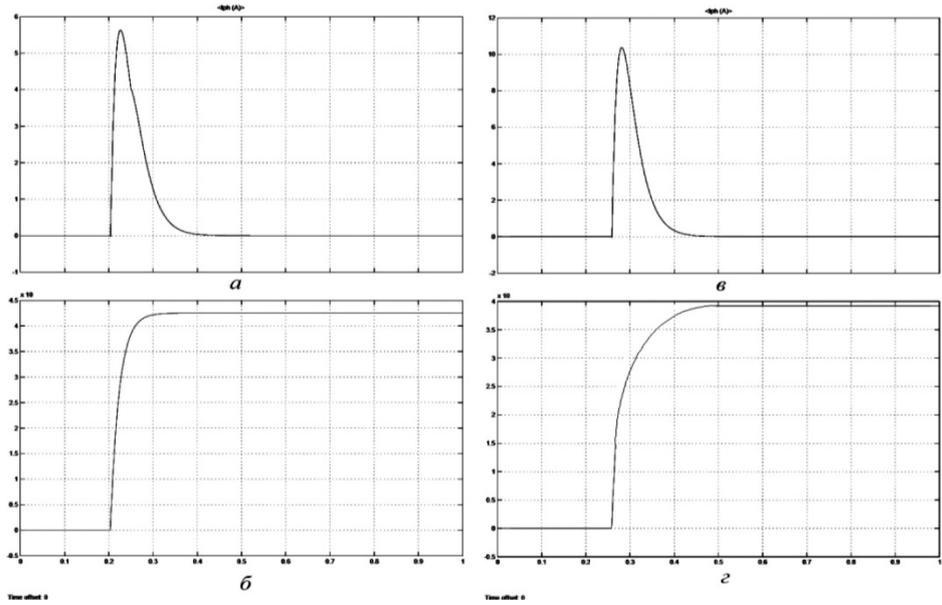


Рисунок 3.14 – Динамічні характеристики

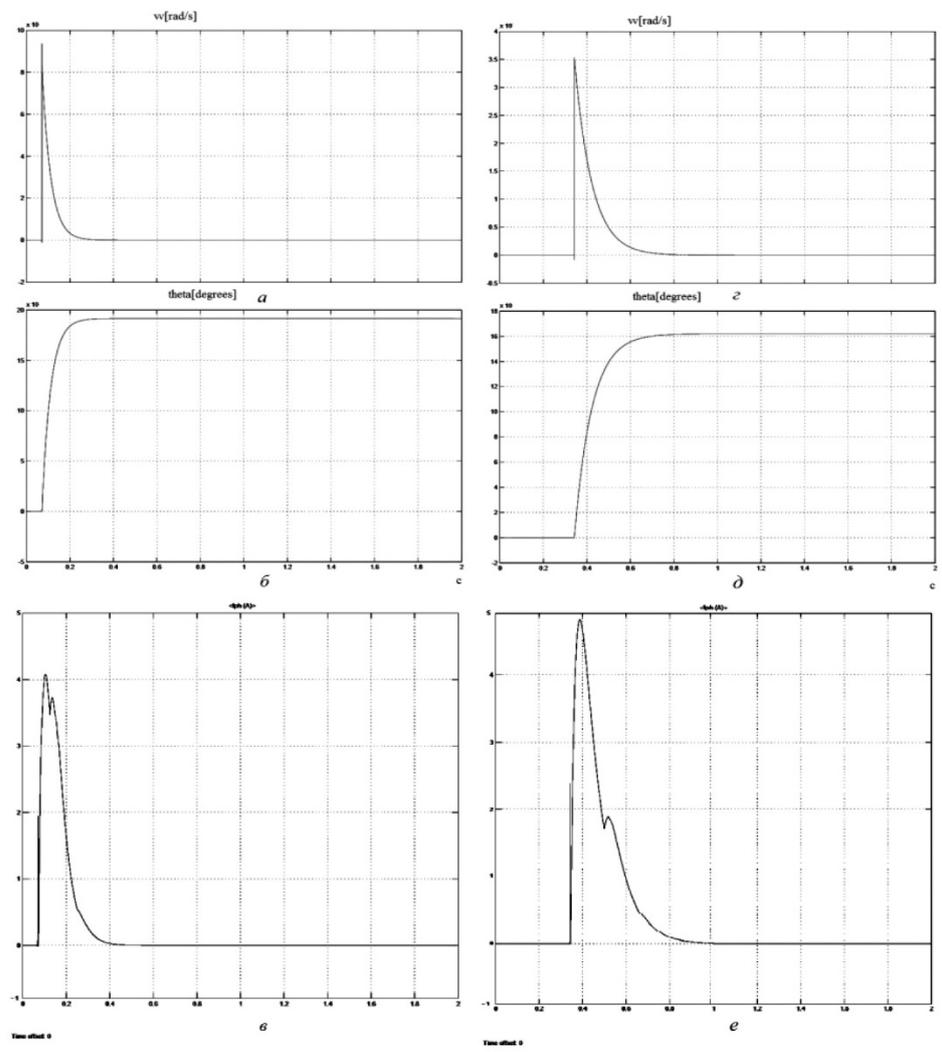


Рисунок 3.15 – Динамічні характеристики

Забезпечення динамічної стійкості системи та високої якості перехідних процесів є головними завданнями, що покладаються на систему регулювання з ПІ-регулятором з нелінійним задатчиком інтенсивності на вході.

3.5 Дослідження та розробка двохкоординатного датчика положення Сонця

У світовій практиці розроблені два двохкоординатні датчики положення Сонця [19] для стежучо-позиційної системи спостереження. Датчики являють собою чотиригранну усічену піраміду, в чотирьох бічних гранях якої є посадочні місця під чотири фотоелемента, в підставі передбачено посадочне місце під п'ятий фотоелемент, у верхній межі виконано посадочне місце під шостий фотоелемент. Всі фотоелементи розміщуються у чітко відведених посадочних місцях та закриті захисними стеклами. В основі піраміди закладені елементи кріплення датчика до рами. На рисунку 3.16 показані ескізи двох датчиків положення Сонця.

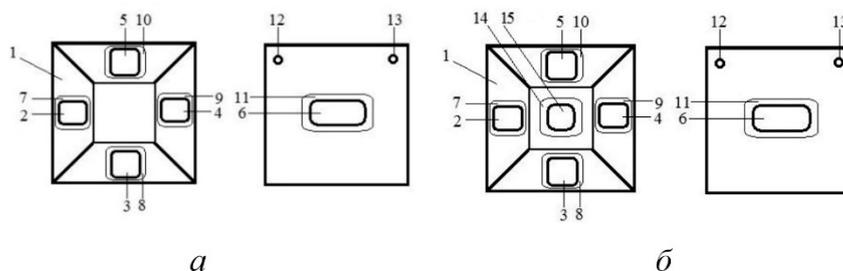


Рисунок 3.16 – Ескізи датчиків положення Сонця

На рисунку 3.16 прийняті наступні позначення:

- 1 – усічена чотиригранна піраміда;
- 2 – 6, 15 – фотоелементи;
- 7 – 11, 14 – захисне скло;
- 12, 13 – елементи кріплення датчика до рами.

Для визначення поточної освітленості призначений фотоелемент 15. Серед факторів, що визначають площу фотоелементів ДПС є максимальний струм фотоелементів при максимальній освітленості, що необхідний для визначення максимального коефіцієнта посилення операційного підсилювача в контролері спостереження. Також, до таких факторів відноситься чутливість датчика (струму фотоелементів) при зменшенні освітленості в 10 разів та можливість виміряти струм фотоелементів, що еквівалентний напрузі на виході операційного підсилювача, при малій освітленості за допомогою вбудованих в мікроконтролер АЦП, а також мінімізацією габаритів датчика.

Площа фотоелементів ДПС можна розрахувати за наступною формулою:

$$S = \frac{I_m}{K_i + E_n}; \quad (3.24)$$

де: I_m – максимальний струм фотоелементів ДПС;

K_i – значення коефіцієнта інтегральної чутливості [19];

E_n – рівень сонячної освітленості.

Щоб не збільшувати площу фотоелементів і відповідно габарити ДПС, максимальне значення струму фотоелементів ДПС I_m має бути не більше 100–200 мА. Мінімальною освітленістю можна вважати 200 В/м², при якій ДПС повинен проводити вимірювання. Коефіцієнт інтегральної чутливості $K_i = 10$ мА/лм.

Розрахована за формулою (3.24) площа повинна складати не менше 10 см². Датчик повинен забезпечувати можливість вимірювання переміщення не менше 0,5 градуса за матеріальним становищем при зменшенні освітленості в 10 разів від максимальної, при цій площі фотоелементів.

З метою визначення його чутливості в режимі малих переміщень проведено експериментальні дослідження ДПС. Переміщення ДПС виконувалося за допомогою поворотного столу, що має роздільну здатність при переміщенні 0,25 кутового градуса. На рисунку 3.17 показана фотографія установки для зняття характеристик фотодатчика. За допомогою потужного

освітлювального прожектора, що імітує сонячне випромінювання проводилося освітлення ДПС.

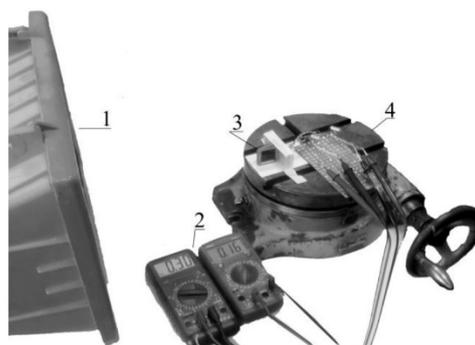


Рисунок 3.17 – Установка для зняття характеристик фотодатчика

На рисунку 3.17 позначені:

- 1 – прожектор зі спектром, близьким до сонячного;
- 2 – два цифрових мультиметра;
- 3 – фотоелектричний датчик положення Сонця;
- 4 – поворотний стіл.

Максимальний струм однієї панелі фотодатчика досягає 100 мА при максимальній сонячній освітленості. Експериментально отримані значення струму однієї панелі фотодатчика при переміщенні на малий кут при малій освітленості наведені у таблицях 3.5 та 3.6.

Таблиця 3.5 – Значення струму фотодатчика при переміщенні на малий кут

φ, градус	-1	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,5	0,25	0,75	1
Струм, мА	15,76	15,77	15,78	15,79	15,8	15,81	15,82	15,83	15,84

Таблиця 3.6 – Значення струму фотодатчика при переміщенні на малий кут

φ, градус	1,25	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
Струм, мА	15,84	15,85	15,85	15,86	15,86	15,87	15,88	15,89
	–		–		–			
	15,85		15,86		15,87			

Фотоелемент межі датчика положення Сонця забезпечує задану чутливість, а саме вимір зміни положення не менше 0,25 кутового градуса, а при вимірюванні зміни положення по двом фотоелементів граней датчика чутливість складе 0,125 кутового градуса як видно з таблиць 3.5 та 3.6. Максимальний діапазон вимірювання струму фотодатчика визначається за формулою:

$$D = \frac{I_{\max}}{\Delta I_{\min}}; \quad (3.25)$$

де: ΔI_{\min} – мінімальне значення різниці струмів фотоелементів датчика положення Сонця при переміщенні на 0,25 кутового градуса;

I_{\max} – максимальний струм фотоелемента датчика положення Сонця (100–200 мА).

При переміщенні на 0,25 кутового градуса зміна струму становить 5–10 мкА, а максимальний діапазон виміру струму становить 10000–20000, як показує розрахунок за формулою (3.25) з використанням таблиць 3.5 та 3.6. Необхідна розрядність АЦП мікроконтролера повинна бути мінімум 14–15 розрядів, а з урахуванням можливості регулювання і вибору стандартного АЦП повинна складати 16-розрядів, для забезпечення чутливості в 0,25 кутового градуса. Тобто є сенс вибрати мікроконтролер з 16-розрядних вбудованим АЦП. Маємо висновки в ході дослідження, що при зміні температури від + 10 до + 60 °С відносна помилка в різниці струмів в протилежних гранях не перевищує 5%.

3.6 Розробка спеціалізованого контролера спостереження за Сонцем і блоку драйверів крокового двигуна

Розроблений контролер спостереження за Сонцем (КСС) повинен враховувати всі вищенаведені вимоги та схематично зображений на рисунку 3.18.

До складу контролера спостереження за Сонцем входять наступні елементи:

- мікроконтролер STM32F372VCT6;
- перетворювач напруги; вузла зв'язку з USB зовнішнього комп'ютера;
- шість операційних підсилювачів, що забезпечують посилення сигналів з шести фотоелементів блоку датчиків положення Сонця;
- вузол зв'язку з 5 кінцевими вимикачами;
- вузол зв'язку з GPRS;
- вузол зв'язку з двома датчиками температури КД (ДТ1, ДТ2);
- пристрій виведення – введення (ПВВ) сигналів керування на контролер заряду акумуляторної батареї;
- перемикач режимів роботи системи спостереження (ППР);
- чотири кнопки керування переміщенням рами з сонячними панелями в ручному режимі (К1-К4);
- ввідний пристрій для підключення датчика вітрового навантаження (ДВН).

Контролер видає та приймає такі сигнали з двох драйверів крокового двигуна:

- 1) видає число кроків, яке необхідно відпрацювати КД1 і КД2 (СР1 і СР2);
- 2) сигнали напрямку обертання КД1 і КД2 (DR1 і DR2);
- 3) сигнали включення (виключення) двох драйверів КД (MF1 і MF2);
- 4) сигнали готовності двох драйверів КД (RDY1 і RDY2).

У драйвері завдання амплітуди струму крокового двигуна і величина мінімального кроку переміщення задається по протоколу MODBUS від КСС. Обмотки крокового двигуна КД-5д з'єднуються в трикутник при роботі з драйвером DM-356M [17]. Датчики температури типу DS 1 820 або аналогічні кріпляться на двигуни, виходи яких через вузол узгодження підключаються до мікроконтролеру. Розрахуємо вузол зв'язку фотоелементів блоку датчиків положення Сонця з мікроконтролером.

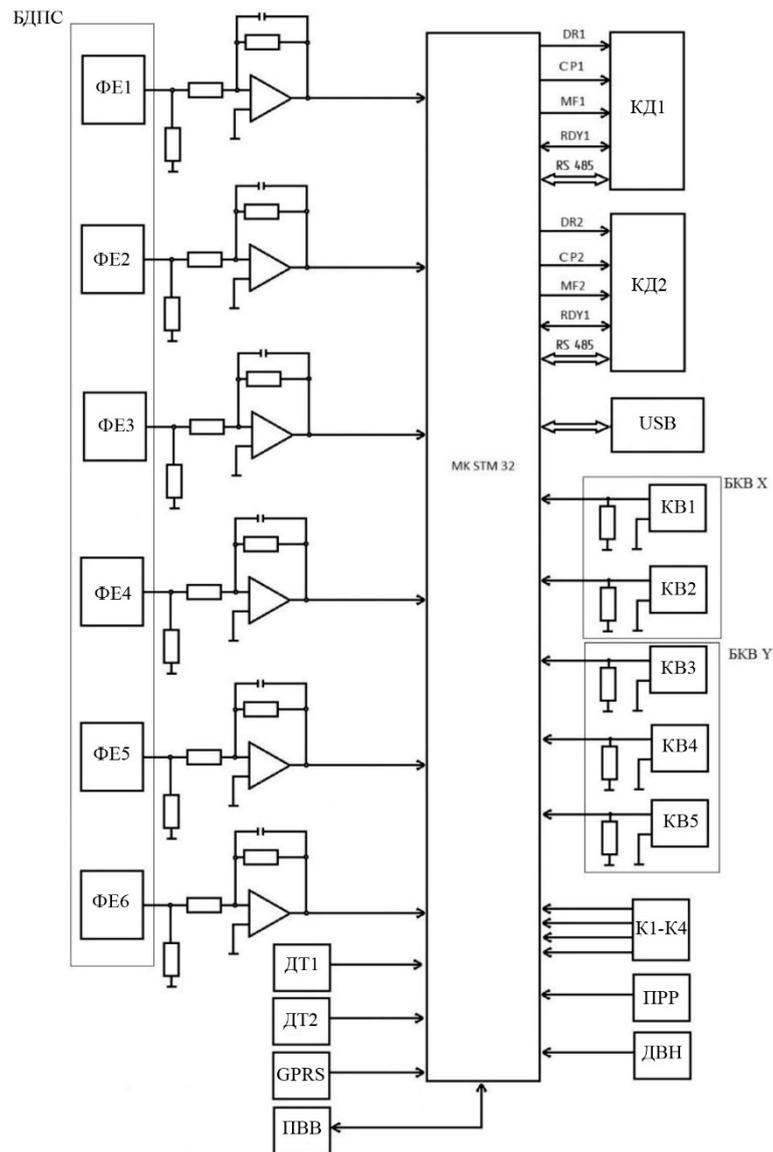


Рисунок 3.18 – Структурна схема контролера спостереження СБ за Сонцем

Параметри фотоелемента блоку положення Сонця: вихідна напруга при максимальній освітленості – 0,5 В; вихідний максимальний струм – 100 мА. Величина опору резистора навантаження вибирається за такою формулою:

$$R_H = \frac{U_D}{I_D} = \frac{0,58}{0,1A} = 5 \text{ Ом}; \quad (3.26)$$

де: U_D – напруга фотоелемента;

I_D – струм фотоелемента.

Обрано високоточний термостабільний резистор типу С2-29В-0,125 Вт номіналом 5,1 Ом з точністю 0,1%. Для забезпечення посилення сигналу з фотоелементів блоку датчика положення Сонця, розраховано коефіцієнт посилення операційного підсилювача. Напруга на виході операційного підсилювача повинна бути меншою напруги мікроконтролера STM32F372VCT6, а саме $U_{оп} = 2,56$ В. Коефіцієнт посилення розраховується за такою формулою:

$$K_{пос} = \frac{U_{оп}}{U_{д}} = \frac{2,56В}{0,5В} = 5,12; \quad (3.27)$$

де: $U_{оп}$ – опорна напруга.

Обрано вхід резистора операційного підсилювача (тип прецизійного резистора С2-29В) номіналом $R_{вх} = 10$ кОм. Опір резистора в колі зворотного зв'язку операційного підсилювача складає $R_{зз} = 51$ кОм. Операційний підсилювач обраний типу AD 822 є високоточним та термостабільним.

У залежності від кількості фаз КД, потужності, умов експлуатації та величини мінімального кроку вибираються драйвери для крокового двигуна. Для АФЕУ-0,5 застосовуються шестифазний двигуни КД-5д. Шість обмоток двигуна з'єднуються в трифазне включення у формі зірки або трикутника. В цьому випадку можна використовувати кілька типів драйверів: KND BD3H, DQ-356M та DM-356M.

Мікроперемикачем перед включенням системи у драйвері КД типу KND BD3H можна задавати значення амплітуди струму по фазі. Можна змінювати число імпульсів на оборот в КД мікроперемикачем перед включенням системи. Драйвер оснащений системою захисту від коротких замикань та перевищення напруги. У драйвер можна задавати половину амплітуди струму по фазі КД в статичному режимі після відпрацювання заданого переміщення, для зменшення споживання електричної енергії в КД. На рисунку 3.19 показана фотографія драйвера типу KND BD3H.



Рисунок 3.19 – Драйвер типу KNB BD3H

Для двигуна КД-5д може також використовуватися драйвер типу DQ-356M. Обмотки двигуна КД-5д з'єднуються в трикутник. У драйвері DQ-356M, на відміну від драйвера KNB BD3H, додатково введено сигнал включення (виключення): MF +, MF-.

Силові польові транзистори з частотою комутації 25 кГц використовуються у драйвері. Напруга живлення драйвера по постійному струму не повинна перевищувати 60 В.

Є можливість задавати значення амплітуди струму по фазі КД та змінювати число імпульсів на оборот у DQ-356M. Драйвер КД автоматично вимикається при підвищенні температури до $+85^{\circ}\text{C}$. При зниженні температури до $+50^{\circ}\text{C}$ драйвер може включитися. Потім його необхідно включити.

Можливо також використання драйвера типу DM-356M для крокового двигуна КД-5д. Сигнали керування збігаються з сигналами керування драйвера DQ-356M. У драйвері DM-356M додатково можна задавати значення амплітуди струму по фазі КД і число імпульсів на оборот в КД по каналу MOD BUS навіть під час роботи системи.

Фотографія розробленого обладнання для установки АФЕУ-0,5 приведена на рисунку 3.20:

- блок КСС (а);
- блок драйверів КД (в);
- конвертор (тип-І-7561) (б).

До складу блоку драйверів КД входить два драйвера DQ-356M, автоматичний вимикач типу АК 63 та амперметр постійного струму типу М 43001. За допомогою RS 485 та через оптрону розв'язку конвертор зв'язується із зовнішнім комп'ютером.

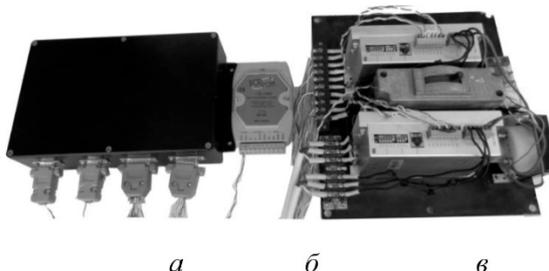


Рисунок 3.20 – Блок КСС, конвертор, блок драйверів КД

3.7 Розробка механічних конструкцій автономних фотоелектричних установок

Розроблена фотоелектрична енергетична установка потужністю 0,5 кВт за функціональною схемою зображена на рисунку 3.21.

На функціональній схемі АФЕУ-0,5 прийняті наступні позначення:

СБ – сонячна батарея;

КСС – контролер спостереження за Сонцем;

ДКД1, ДКД2 – драйвери керування кроковими двигунами;

ДПС 1, ДПС2 – датчики положення Сонця по азимуту і куту місця;

КВ1-КВ-4 – кінцеві вимикачі;

М1, М2 – крокові двигуни;

Р1-Р4 – редуктори;

КЗАБ – контролер заряду акумуляторної батареї;

І – інвертор;

АБ1, АБ2 – акумуляторні батареї.

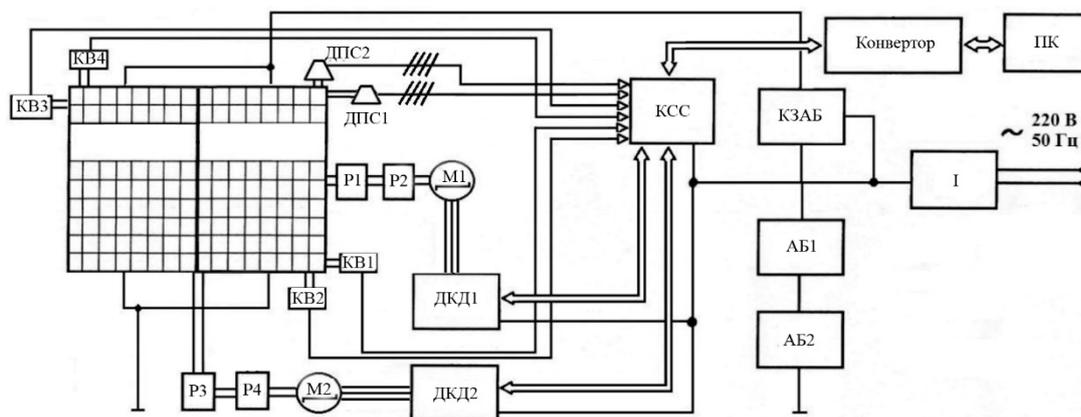


Рисунок 3.21 – Функціональна схема розробленої установки

На рисунку 3.22 приведена фотографія АФЕУ-0,5, встановлена на даху нежитлового приміщення.

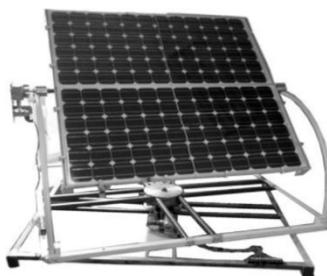


Рисунок 3.22 – Енергетична установка АФЕУ-0,5

На рисунку 3.23 наведені схеми АФЕУ-1 та АФЕУ-2. У таблиці 3.3 згруповані характеристики розроблених установок.

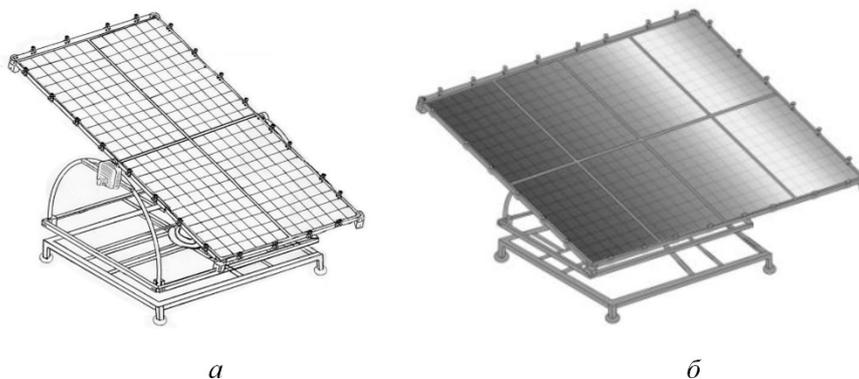


Рисунок 3.23 – Ескізи енергетичних установок АФЕУ-1 (а) та АФЕУ-2

(б)

Таблиця 3.7 – Характеристики розроблених установок

Характеристики	Установка АФЕУ-0,5	Установка АФЕУ-1	Установка АФЕУ-2
Кути переміщення, град.	По азимуту 270 град., по куту місця 70 град.	По азимуту 360 град., по куту місця 90 град.	По азимуту 360 град., по куту місця 90 град.
Тип двигуна	Кроковий	Кроковий	Кроковий або вентиляльний
Точність спостереження, град	1	1	1
Вихідна потужність, кВт	0,5	1	2
Площа СБ, м ²	2,54	5,08	10,16

Розглянемо основні деталі конструкції АФЕУ:

- рама з сонячною панеллю типу KNESS FR72;
- рухливий каркас;
- нерухомий каркас;
- блоки двох редукторів, що поєднують в собі черв'ячний редуктор і зчленований з ним циліндричний редуктор;
- два крокових двигуна;
- датчик положення Сонця;
- п'ять кінцевих вимикачів.

В якості силових механізмів застосовуються редуктори з загальними передавальними відносинами 1: 250 (по азимуту) і 1: 900 (по куту місця) для забезпечення повороту фотоелектричних установок АФЕУ-0,5 та АФЕУ-1. Редуктори, з'єднані з КД, для механізмів переміщення по азимуту і куту місця, зображені на рисунку 4.9.



Рисунок 3.24 – Двигуни КД-5д з редукторами для АФЕУ

Кріплення двигуна КД-5д з установкою АФЕУ-0,5 показано на рисунку 3.25.

На рисунку 3.25 позначено:

- 1 – цапфа;
- 2 – двигун КД-5д;
- 3, 4 – редуктори;
- 5 – рама.

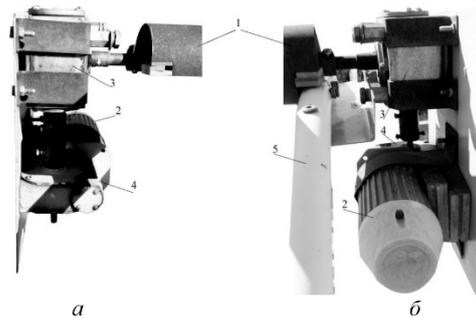


Рисунок 3.25 – Кріплення двигуна КД-5д з установкою АФЕУ-0,5

Механічна конструкція установки АФЕУ-0,5 запатентована. Згідно патенту забезпечується збіг центру обертання двигуна з центром обертання рами з сонячною батареєю.

Отже, у даному розділі магістерської роботи проведений розрахунок зміни моменту інерції азимутального механізму спостереження при зміні положення рами з сонячною панеллю по куту місця. Розрахунок показав, що момент інерції механізму переміщення в межі змінюється в два рази при зміні положення рами по куту місця на 90 градусів.

Також, розраховано додатковий момент навантаження на виконавчий механізм вітряній погоді. Розрахунок довів, що при використанні двигуна КД-5д з номінальним моментом 0,4 Н·м, в установці АФЕУ-0,5 при швидкості вітру 20 м/с момент від дії вітрового навантаження в системі переміщення по азимуту перевищує максимальний момент крокового двигуна в 1,2 рази, а при швидкості 25 м/с – в 1,9 рази.

У магістерській роботі запропонована нова функціональна схема контуру керування струмом електромеханічного виконавчого механізму з КД для забезпечення плавності і безперервності руху АФЕУ в процесі спостереження при дії зовнішніх збурень (вітрів, ураганів, штормів). При дії вітрового навантаження в функції від непрямої помилки спостереження і її похідної, яка визначається по датчику положення Сонця, дослідили алгоритм керування контуром струму електромеханічного виконавчого механізму.

Запропоновано використовувати ПІ-регулятор з нелінійним задатчиком інтенсивності на вході у структурі нелінійного керування амплітудою струму в КД в функції від непрямої помилки спостереження і її похідної. Також, дійшли висновку, що у кроковому двигуні відсутні перебої при дворазовому збільшенні зовнішнього навантаження.

Було визначено, що введення в схему системи АФЕУ п'ятого кінцевого вимикача на механічну раму з сонячною панеллю по куту місця на положення 90 градусів з підключенням його до контролера спостереження підвищує надійність роботи АСК спостереження. Введення додатково двох датчиків температури підключених до контролера спостереження, включенням в контролер спостереження входу по каналу GPRS, переведенням рами з сонячними батареями по куту місця в горизонтальне положення при отриманні штормових сигналів від МНС суттєво підвищує живучість та безперебійну роботу АСК спостереження в цілому.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Техніко-економічне обґрунтування

Ідея магістерського дослідження полягає в підвищенні енергоефективності фотоелектричних енергетичних установок за рахунок керування положенням сонячних панелей.

Для досягнення даної мети:

- розроблено алгоритм спостереження сонячних панелей за сонцем з використанням датчика положення Сонця;
- розроблено алгоритм керування електромеханічною системою спостереження при дії вітрового навантаження;
- мінімізовано енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом в слідкуючій-позиційній системі спостереження сонячних панелей за Сонцем за рахунок впровадження сучасних крокових двигунів.

За рахунок таких розробок отримали наступні результати:

На основі розробленої системи керування:

- зменшено енергоспоживання електромеханічними виконавчими механізмами сонячними панелями на 6 Вт/год;
- збільшено енергоефективність фотоелектричних енергетичних установок на 150 Вт/год.

4.2 Визначення витрат на розробку САК положенням сонячних панелей

Для розробки САК положенням сонячних панелей закуплені комплектуючі, перелік яких зведений у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Перелік необхідних комплектуючих

Найменування та технічна характеристика	Од.виміру	К-ть	Ціна за одиницю грн.	Ціна грн.
Сонячні панелі	шт.	2	4100	8200
Датчик стеження за сонцем	шт.	2	500	1000
Датчик вітру	шт.	2	2000	4000
Крокові двигуни	шт.	2	600	1200
Всього:				14400

Таким чином, витрати на придбання комплектуючих для розробки САК положенням сонячних панелей дорівнюють:

$$Z_k = 14\,400 \text{ грн.}$$

Розрахунок заробітної платні з нарахуваннями.

Для встановлення системи необхідно виконати роботи по встановленню, монтажу системи керування, демонтажу старого обладнання, налагодці та пуску системи. Вказані роботи будуть проводити бригада з 2-х слюсарів 5-го розряду протягом 3 днів.

Витрати на заробітну плату з нарахуваннями визначимо за формулою:

$$S_{\text{ЗПМ}} = K_{\text{НЗ}} \cdot \lambda \cdot t \cdot \sum_{i=1}^m C_{ti} (1 + H); \quad (4.1)$$

де: $K_{\text{НЗ}}$ – коефіцієнт, який враховує накладні витрати на заробітну плату, $K_{\text{НЗ}} = 1,3$;

λ – коефіцієнт, який враховує премії, $\lambda = 1,25$;

t – час виконання робіт, год;

C_{ti} – часова тарифна ставка працівника i -го розряду.

H – норма нарахування на заробітну плату, $H = 0,22$;

m – кількість робочих, чол.

$$S_{\text{ЗПМ}} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 3 \cdot (37,87 \cdot 2) \cdot (1 + 0,22) = 3603,71 \text{ грн.}$$

Визначення загальної суми витрат.

Витрати на розробку САК положенням сонячних панелей як суму витрат на купівлю комплектуючих та витрат на заробітну плату з нарахуваннями робітникам, які проводять модернізацію:

$$З_М = З_К + З_{ЗПМ} ; \quad (4.2)$$

$$З_М = 14\,400 + 3603,71 = 18\,003,71 \text{ грн.}$$

4.3 Розрахунок річного фонду роботи сонячних панелей

Розрахунок річного фонду часу роботи сонячних панелей проведемо за формулою:

$$T_P = \frac{T_\Phi}{\frac{1}{t_{CM} \cdot K_{CM}} + D_P} ; \quad (4.3)$$

де: T_Φ – річний фонд робочого часу, $T_\Phi = 180$ днів;

t_{CM} – тривалість зміни в машино-годинах, $t_{CM} = 8$;

K_{CM} – коефіцієнт змінності роботи устаткування, $K_{CM} = 2$;

D_P – простой в машино-днях у всіх видах технічного обслуговування і ремонту, який приходить на одну машино-годину, визначимо за формулою:

$$D_P = \frac{\sum_{i=1}^n d_{pi} \cdot a_i}{T_{Ц}} ; \quad (4.4)$$

де: n – число різновидів технічних обслуговувань та ремонтів за міжремонтний період;

d_{pi} – тривалість перебування в i -му ремонті чи технічному обслуговуванні;

a_i – кількість i -х ремонтів чи технічних обслуговувань за міжремонтний період;

До та після модернізації час міжремонтного циклу складає 8760 годин. До удосконалення САК проводилось 15 оглядів впродовж 1,0 години, а після

8 оглядів впродовж 1,0 години. Враховуючи наведене, розраховуємо простої в машино-днях при всіх видах технічного обслуговування до та після модернізації:

$$D_{p1} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 15}{8760} = 0,0017 \frac{\text{маш.днів}}{\text{маш.год}};$$

$$D_{p1} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 8}{8760} = 0,0009 \frac{\text{маш.днів}}{\text{маш.год}};$$

Тоді річний фонд часу роботи сонячних панелей дорівнюватиме відповідно:

$$T_{p1} = \frac{180}{\frac{1}{11} + 0,0017} = 1943,65 \text{ год},$$

$$T_{p1} = \frac{180}{\frac{1}{11} + 0,0009} = 1960,59 \text{ год},$$

4.4 Розрахунок річної експлуатаційної продуктивності

Річна експлуатаційна продуктивність сонячних панелей визначається за формулою:

$$B = B_{\text{Е.Г.П}} \cdot T_{\text{Р}} \cdot K_{\text{ПР}}; \quad (4.5)$$

де: $B_{\text{Е.Г.П}}$ – годинна експлуатаційна продуктивність, (7,5 кВт/год),

$K_{\text{ПР}}$ – коефіцієнт, що враховує простій, не враховане в годинній експлуатаційній продуктивності.

Після розробки САК положенням сонячних панелей їх ефективність підвищиться на 150 Вт/год.

Таким чином до та після розробки САК положенням сонячних панелей річна продуктивність складає:

$$B_1 = 7,5 \cdot 1943,65 \cdot 0,9 = 13119,64 \text{ кВт/рік}.$$

Після модернізації:

$$B_2 = 7,65 \cdot 1960,59 \cdot 0,9 = 13498,66 \text{ кВт/рік.}$$

4.5 Розрахунок поточних річних витрат

Поточні річні експлуатаційні витрати визначаються для сонячних панелей до та після модернізації.

За сонячними панелями спостерігає один робітник 4-го розряду на 0,5 ставки, після удосконалення САК склад не зміниться.

Витрати на заробітну плату до та після модернізації складають:

$$S_{ЗП} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1943,65 \cdot 25,17 \cdot 0,5 \cdot (1+0,22) = 48\,493,61 \text{ грн.}$$

$$S_{ЗП} = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1960,59 \cdot 25,17 \cdot 0,5 \cdot (1+0,22) = 48\,916,25 \text{ грн.}$$

Визначення витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт сонячних панелей.

Витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт поліграфічної машини визначимо за формулою:

$$S_{ТО} = S_{ТОЗ} + S_{ТОМ}; \quad (4.6)$$

де: $S_{ТОЗ}$ – витрати на заробітну плату ремонтників з нарахуваннями;

$S_{ТОМ}$ – витрати на матеріали та запасні частини.

Витрати на заробітну плату ремонтних робітників з нарахуваннями визначаються за формулою:

$$S_{ТОЗ} = \frac{T_P}{T_{Ц}} \cdot K_{НЗ} \cdot \lambda \cdot C_P \cdot \sum_{i=1}^m a_{pi} \cdot \tau_{pi} \cdot (1 + H); \quad (4.7)$$

де: C_P – середня тарифна ставка ремонтного робітника, що обслуговують установку, грн/год;

a_{pi} – кількість техобслуговувань і поточних ремонтів без капітального ремонту;

τ_{pi} – трудємкість i -го технічного обслуговування та поточного ремонту, до і після – $\tau_{pi} = 14,3$; $\tau_{pi} = 10,2$.

Витрати на матеріали та запасні частини визначаються за формулою:

$$S_{\text{ТОМ}} = K_{\text{П}} \cdot \frac{S_{\text{ТОЗ}} \cdot (1 - H)}{K_{\text{НЗ}}} \cdot K_{\text{ЗР}}; \quad (4.8)$$

де: $K_{\text{П}}$ – норма накладних розходів за всіма видами витрат, крім заробітної плати, $K_{\text{П}} = 1,1$;

$K_{\text{ЗР}}$ – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запасні частини, $K_{\text{ЗР}} = 1,25$.

До модернізації для технічного огляду та поточного ремонту необхідно один слюсар КВПіА 5-го розряду. Після модернізації їх склад не змінився. Огляд проводиться 15 разів на рік до модернізації та 8 після.

$$S_{\text{ТОЗ1}} = \frac{1943,65}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 15 \cdot 14,3 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 3573,14 \text{ грн.}$$

$$S_{\text{ТОЗ2}} = \frac{1960,59}{8760} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1 \cdot 8 \cdot 10,2 \cdot 37,87 \cdot (1 + 0,22) = 1371,14 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріали та запасні частини до модернізації складають:

$$S_{\text{ТОМ1}} = 1,1 \cdot \frac{3573,14 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 2947,84 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріали та запасні частини після модернізації:

$$S_{\text{ТОМ2}} = 1,1 \cdot \frac{1371,14 \cdot (1 - 0,22)}{1,3} \cdot 1,25 = 1131,19 \text{ грн.}$$

Таким чином, витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт сонячних панелей до модернізації склали:

$$S_{\text{ТО1}} = 3573,14 + 2947,84 = 6520,84 \text{ грн.}$$

після модернізації:

$$S_{\text{ТО2}} = 1371,14 + 1131,19 = 2502,19 \text{ грн.}$$

Величину витрат на електроенергію визначимо за формулою:

$$S_{\text{ЕЛ}} = K_{\text{П}} \cdot W_{\text{ЕЛ}} \cdot V_{\text{ЕЛ}} \cdot T_{\text{Р}}; \quad (4.9)$$

де: $V_{\text{ЕЛ}}$ – ціна 1 кВт/год електроенергії – 5,5 грн;

$W_{\text{ЕЛ}}$ – витрата за годину енергії, кВт/год.

Споживання електроенергії сонячними панелями складало 0,026 кВт/год, після удосконалення САК енергоспоживання зменшиться до 0,02 кВт/год.

Виходячи з цього витрати на електроенергію до модернізації склали:

$$S_{\text{ЕЛ1}} = 1,1 \cdot 0,026 \cdot 5,5 \cdot 1943,65 = 305,74 \text{ грн.}$$

після модернізації:

$$S_{\text{ЕЛ2}} = 1,1 \cdot 0,020 \cdot 5,5 \cdot 1960,59 = 237,23 \text{ грн.}$$

Розрахунок суми річних витрат на експлуатацію сонячних панелей зведений у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Сума річних витрат на експлуатацію

Найменування статті витрат	Величина витрат	
	До впровадження САК, грн.	Після впровадження САК, грн.
Зарплата з нарахуваннями	48493,61	48916,25
ТО та поточний ремонт	6520,98	2502,33
Електроенергія	305,74	237,23
Разом	55320,33	51655,81

4.6 Розрахунок вартості машино–години роботи сонячних панелей

Розрахунок вартості машино–годин розраховуємо за формулою:

$$S_{\text{МГ}} = \frac{S}{T_{\text{р}}}; \quad (4.10)$$

До модернізації вартість однієї машино-години складала:

$$S_{\text{МГ1}} = \frac{55320,33}{1943,65} = 28,46 \text{ грн. / год.}$$

Після модернізації вартість однієї машино-години змінилась і складає:

$$S_{\text{МГ2}} = \frac{51655,81}{1960,59} = 26,35 \text{ грн. / год.}$$

4.7 Розрахунок вартості технологічної операції на одиницю продукції

Вартість технологічної операції визначається за формулою:

$$S_{\Pi} = \frac{S}{B}; \quad (4.11)$$

До модернізації вартість складала:

$$S_{\Pi 1} = \frac{55320,33}{13119,64} = 4,22 \text{ грн. / кВт.}$$

Після модернізації вартість складає:

$$S_{\Pi 2} = \frac{51655,81}{13498,66} = 3,83 \text{ грн. / кВт.}$$

4.8 Розрахунок економічного ефекту від проведення модернізації

Річний економічний ефект від проведення модернізації визначається за формулою:

$$E = (S_{\Pi 1} - S_{\Pi 2}) \cdot B; \quad (4.12)$$

$$E = (4,22 - 3,83) \cdot 13498,66 = 5264,48 \text{ грн / рік.}$$

Термін окупності витрат по модернізації розраховуємо за формулою:

$$T = \frac{Z_M}{E}; \quad (4.13)$$

$$T = \frac{18003,71}{5264,48} = 3,42 \text{ років.}$$

Отже, термін окупності приблизно 3,42 років.

Висновки за розділом

Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт електрообладнання зменшились на 61,63%.

Витрати на електроенергію зменшилась на 22,41%.

Вартість машино-години роботи зменшились на 7,41%.

Вартість технічної операції для одиниці продукції після модернізації знизилась на 9,24%.

Економічна ефективність від проведеної модернізації склала 5264,48 грн.

Таблиця 4.3 – Техніко-економічні показники розробки та дослідження системи автоматичного керування положенням сонячних панелей

Показники	Одиниці виміру	Значення		
		до модернізації	після модернізації	абсолютне відхилення
1. Капітальні витрати на модернізацію	грн.	x	18003,71	x
2. Річний фонд часу роботи	год.	1943,65	1960,59	-16,94
3. Річна експлуатаційна продуктивність	кВт	13119,64	13498,66	-379,02
4. Річні експлуатаційні витрати, усього:	грн.	55320,33	51655,81	+3664,52
у тому числі: витрати на оплату праці	грн.	48493,61	48916,25	-422,64
витрати на ТО та ТР	грн.	6520,98	2502,33	+4018,65
витрати на електроенергію	грн.	305,74	237,23	+68,51
5. Вартість однієї машино-години роботи	грн./год.	28,46	26,35	+2,11
6. Вартість технологічної операції	грн./кВт	4,22	3,83	+0,39
7. Річний економічний ефект	грн.	x	5264,48	x
8. Строк окупності капітальних вкладень	років	x	3,42	x

ВИСНОВКИ

Для підвищення енергетичної ефективності виробництва електричної енергії в АФЕУ розроблена АСК спостереження СБ за Сонцем з безперервно-дискретним принципом спостереження, що дозволяє створювати нові фотоелектричні енергоустановки, що реалізують максимальну ефективність виробництва енергії за рахунок забезпечення заданої точності спостереження при мінімізації витрат електричної енергії при спостереженні за Сонцем.

Розроблено спосіб і алгоритм керування електромеханічним виконавчим механізмом, що працює в режимі позиціонування, що забезпечує максимальну швидкість при обмеженні похідних в задається траєкторії переміщення і мають нелінійні параметри режиму позиціонування, що змінюються під час переміщення, що забезпечують зменшення споживання енергії електромеханічним виконавчим механізмом в режимі стеження сонячних батарей за Сонцем.

Розроблено структуру контуру керування амплітудою струму в електромеханічному виконавчому механізмі і розраховані його параметри, керовані в функції від непрямої помилки спостереження і її похідної, що забезпечують збільшення плавності і безперервності руху АФЕУ в процесі спостереження при дії зовнішніх впливів, що обурюють, в тому числі вітрового і випадкового навантаження.

Для мінімізації енергоспоживання електромеханічним виконавчим механізмом з КД при безперервно-дискретного спостереження СБ за Сонцем запропоновано після здійснення циклу переміщення СБ вимикати силові драйвери КД, використовувати черв'ячний редуктор в механічній системі переміщення та забезпечити розташування центру мас рами з СБ співвісно з віссю обертання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аржанов, К.В. Следящий шаговый электропривод солнечных электростанций / К.В. Аржанов // Труды XV Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». МКЭЭЭ-2014. – Крым, Алушта, 21 сентября – 27 сентября, 2014. – С. 156-158.
2. Будько В. І. Сучасні технологічні процеси, обладнання та устаткування фотоелектричного перетворення сонячної енергії / В. І. Будько – серія навчально-методичних матеріалів – Київ: ЮНІДО, 2015. – 49 с.
3. Бітченко О.М. Електроніка і мікросхемотехніка. Мікропроцесори і мі- кроконтролери: підручник для техн. та інж.-пед. вищих навч. закладів / О.М. Біт- ченко, О.І. Цопа. – Х.: Фінарт, 2015. - 434 с.
4. Бітченко О.М. Електроніка і мікросхемотехніка. Проектування і програмування мік ропроекторних пристроїв: підручник для техн. та інж.- пед. вищих навч. закладів / О. М. Бітченко, О. І. Цопа, Д. Г. Ганшин. – Х.: Фінарт, 2016. - 354 с.
5. Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник / Є. С. Поліщук, В. М. Ванько, В. О. Яцук, М. М. Дорожовець, Ю. В. Яцук // – Вид-во Нац. ун- ту «Львів. Політехніка», 2015. – 584 с.
6. Горбань А.П. Сучасні проблеми імітації сонячного випромінювання для випробувань фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії [тези] / А.П. Горбань, В.П. Костильов, В.В. Черненко, С.П. Андрос, Л.А. Назаренко // Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми світлотехніки». – Харків: ХНАМГ, 2009. – С. 9 – 12.
7. Дробишева В. П. Сучасний стан використання відновлювальних джерел енергії в Україні [Електронний ресурс] / В. П. Дробишева, К. П. Токар, Г. А. Федоренко // Науковий вісник будівництва. - 2014. - № 1. - С. 165-168. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2014_1_44.

8. Зорін В. В. Електричні мережі та системи (окремі розділи) : навчальний посібник для студентів вищ. техн. навч. закл. / В. В. Зорін, Є. А. Штогрин, Р. О. Буйний. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 248 с.

9. Китаева, М.В. Аппаратно-программный комплекс для контроля оптимальной ориентации фотоэлектрических модулей на максимальный поток солнечного излучения: дис. канд. техн. наук: 05.11.13 / Китаева Мария Валерьевна. – Томск, 2014. – 139 с.

10. Кожем'яко В.П. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики / В.П. Кожем'яко, О.Г. Домбровський, В.Ф. Жердецький, В.І. Маліновський, Г.В. Притуляк // Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях – 2011 – С. 141-157.

11. Коржик М. В. Моделювання об'єктів та систем керування засобами MatLab: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Коржик. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 174 с.

12. Лазарев Ю. Ф. MATLAB і моделювання динамічних систем. Навчальний посібник. Глава 3. Пакет програм Simulink. – Київ: НТУУ "КПІ", 2009. – 79 с.

13. Малєєв В.О. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні / В.О. Малєєв, В.М. Безпальченко, Д.С. Макарчук // Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали II-ої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. – Херсон : ХНТУ, 2017. – С.74–70.

14. Минимизация энергопотребления электроприводами в фотоэлектрической энергетической установке / В.В. Аржанов, Ю.А. Шурыгин, Ю.А. Шиняков, К.В. Аржанов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 146-150.

15. Розодюк М. П., Козак М. О. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи з дисципліни "Дослідження крокового двигуна". – Вінниця: ВНТУ, 37 с.

16. Серкез Х.В. Покращення характеристик приймачів сонячного випромінення з електричним заміщенням / Х.В. Серкез // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», 22-24 травня 2013 р. – Львів : НУ «ЛП», 2013. – С. 252-254.

17. Столярчук П. Г. Розробка математичної моделі ефективності сонячних перетворювачів / Столярчук П.Г.// Східно-європейський журнал передових технологій. –5/8 (71), 2014. – С. 30-36.

18. Системы слежения за солнцем с применением ФЭД / А.В. Охорзина, М.В. Китаева, А.В Юрченко, А.В. Скороходов // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С. 213-217.

19. Тарасенко А.Б. Техніко-економічні аспекти мережевої сонячної енергетики в Україні. / А.Б. Тарасенко, В.Л Кочаков, Е.Е.Терукова // Журнал технічної фізики. – 2014. – К. – 85-92 с.

20. Захарченко Р.В., Воробйов Ю.В. Оптимізація будови фотоелектричної панелі для гібридної ФЕ/термічної системи. [Електронний ресурс]. Режим доступа: URL: http://www.rusnauka.com/11_NPE_2014-/Phisica/2_165910-.doc.htm.

21. Коваленко І. О. Кроковий електропривод з векторним керуванням [Електронний ресурс] / І. О. Коваленко, М. О. Остапець, Т. О. Остапець – Режим доступу до ресурсу: <http://epa.kpi.ua/wp-content/uploads/2016/02/15-KROKOVIIJ-ELEKTROPRIVOD-Z-VEKTORNIM-KERUVANNYAM.pdf>.

22. Сарсикеев Е.Ж., Ляпунов Д.Ю., Бобихов Р.С., Петрусёв А.С. Визуальное моделирование ветровой нагрузки рефлектора параболической антенны связи в программном пакете Comsol Multiphysics // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – С. 1–8. – URL: <http://www.science-education.ru/117-r13668>.

Додатки

Додаток А

SECTION 1 ANALYTICAL PART

1.1 Photovoltaic power plants with solar monitoring

The creation and use of a two-coordinate AFEU solar tracking system, which increases energy efficiency by up to 50% compared to power plants without solar tracking systems, is the main direction of improving the energy efficiency of ASKTP by generating APEU electricity.

Today, solar-powered photovoltaic power plants are manufactured by domestic (DITRAS, Seltek, AF Joffe FTI RAS, Astrophysics NGO, etc.) and foreign companies: USA – Sunpower, Merlin Power Systems, SUNPOWER20 TRACKER, First Solar, Konza Portable Solar Tratable; China – Gintech, Yingli Green Energy; Canada – Canadian Solar; Taiwan – Motech; Spain – Titan tracker, Czech Republic – TRAXLE, etc.

Figure 1.1 shows the power plants developed at the FTI RAS. A.F. Joffe.

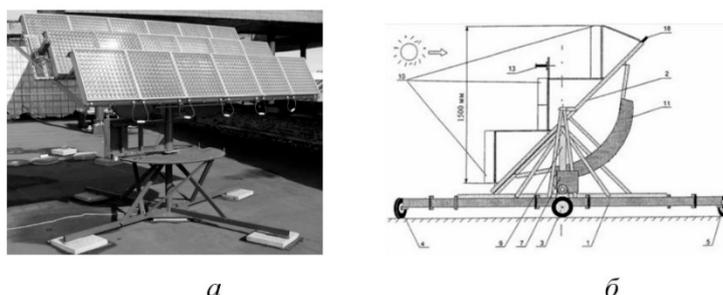


Figure 1.1 – Power plants FTI RAS. A.F. Joffe

The above installation is equipped with a special sensor of the Sun's position, which monitors it with an accuracy of 0.1 degrees. The area of panels in this installation is 5.54 m². For the power plant FTI RAS. A.F. Joffe individually designed solar hub modules with Sun-tracking devices equipped with Fresnel lenses and cascading photoconverters in the focus of each lens. As can be seen from Figure 1.1 a, the solar cells are located in the focus of the Fresnel lenses and are mounted on a copper heat-dissipating stand mounted on the rear glass plate. The modules are

arranged in steps on the electronic-mechanical system by tracking in the middle of the photovoltaic system.

The American company Konza Portable Solar Trackers produces transportable (for example, transported by trailer) solar power plants. A photo of such a power plant can be seen in Figure 1.2. It is monitored with the help of the Sun position sensor.



Figure 1.2 – Konza Portable Solar Trackers power plant

I mentioned above, Seltek manufactures power plants. Examples of such installations are given in the form of photographs in Figure 1.3. It can accommodate solar panels up to 6 m². The tracking system itself uses DC electric drives, solar position sensors and a tracking controller. The Celtek power plant has a tracking accuracy of up to one degree. If the weight solar panel 50 kg, you need to install counterweights. The presence of counterweights in the system increases the energy consumption for monitoring.



Figure 1.3 – Seltek power plants

Power plant GEU-1.5 company NGO Astrophysics is shown in the form of a photograph in Figure 1.4. Optoelectronic sensors of the Sun's position are continuously monitored with an accuracy of up to two degrees. These sensors are located on the faceted frame-base and the frame of the support-rotary device. Photoelectric modules MS-40 in combination with flat mirror concentrators of solar radiation are used in GEU-1,5. The GEU-1.5 power plant is equipped with a Stirling engine and has a capacity of 1.5 kW.



Figure 1.4 – Power plant of Astrophysics NGO (GEU-1,5)

A photo of the DITRAS power plant is shown in Figure 1.5. It is equipped with a sun position sensor and provides tracking accuracy up to one degree. DITRAS company actively produces its power plants on domestic and foreign markets.

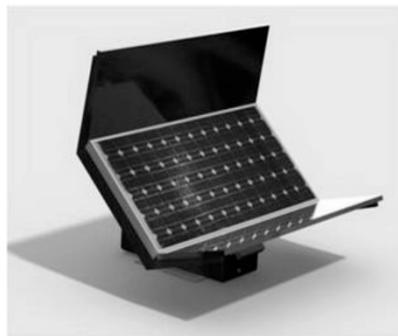


Figure 1.5 – DITRAS power plant

The Spanish company Titan tracker produces power plants, which are shown in Figure 1.6 in the form of a photograph. The Titan tracker installation includes a large number of solar panels with a total area of more than 200 m². What type of engine is used in this installation is not disclosed, as far as possible to minimize

power consumption during monitoring is not reported. It is known that the monitoring is conducted on two axes.



Figure 1.6 – Titan tracker power plant (Spain)

Figure 1.7 shows a photograph of the power plant of the American company SUNPOWER20 TRACKER.

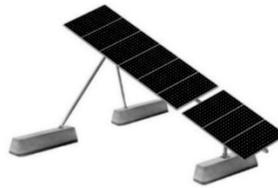


Figure 1.7 – SUNPOWER20 TRACKER power plant

A photovoltaic power plant is installed at an angle or horizontally. The position of the Sun is traced along one axis. Variation is possible when 9 modules consisting of 128 cells or 12 modules consisting of 96 cells are placed on one horizontal axis.

Technical characteristics of solar power plants of some domestic and foreign companies are given in tables 1.1 and 1.2. It should be noted that the technical documentation of foreign companies does not specify some important technical characteristics of solar power plants. Different types of two-coordinate electromechanical actuators are used in the creation of AFEU. The power plant can be with DC or AC motors, with synchronous jet or stepper motors, as well as with linear motors. Thyristor and transistor converters are used as power converters, including pulse width modulation (PWM) converters on field or IGBT transistors. The following conclusions were drawn from the analysis of the technical characteristics of AFEU, which are given in tables 1.1 and 1.2

Table 1.1 – Technical characteristics of solar power plants

Features	Installation of Seltek	Installation of FTI. A.F. Joffe	Installation of NGO Astrophysics (GEU-1,5)	Installation of DITRAS firm	Installing Titan tracker
Angles of movement on azimuth and on a corner of a place, hail	In azimuth - 180 degrees, in the corner - 70 degrees	In azimuth - 360 degrees, in the corner - 90 degrees.	In azimuth - 360 degrees, in the corner - 90 degrees.	In azimuth - 360 degrees, in the corner - 90 degrees.	In azimuth - 360 degrees, in the corner - 75 degrees.
Type of executive engine	DC	Not specified	Stirling	Not specified	Not specified
Accuracy tracking, deg.	1	0,1	2	1	0,01
Output power, kW; area of FP, m ²	Area up to 6 m ²	Concentrator modules, area 5.54 m ²	Power 1.5 kW, area 25 m ²	Power 0.3 kW, area 2m ²	Area up to 216 m ²
Sun tracking system	Continuous, according to the position sensor of the Sun.	Continuous, according to the FEP sensor	Continuous, on the optoelectronic sensor	Continuous, according to the position sensor of the Sun.	Not specified

Table 1.2 – Technical characteristics of solar power plants

Features	Installation of the company Ltd. electromechanical systems	Installation of LM Burkova	Installation of FTI. A.F. Joffe	Installation SPE servomechanisms	Installation on TRAXLE
Corners Azimuth movement and angle places, hail.	Azimuth - 180 degrees, at the corner of the place - 70 degrees.	Azimuth - 360 degrees, at the corner of the place - 90 degrees.	On azimuth - 360 degrees, on a corner of a place - 90 degrees	Azimuth - 360 degrees, at the corner of the place - 90 degrees.	In azimuth - 360 degrees, in the corner places - 90 degrees.
Type of executive engine	Electromechanical module	DC	DC	DC, stepper	DC
Tracking accuracy, hail.	Not specified	1	2	Not specified	Not specified
Output power, kW; area of FP, m ²	Area up to 2.5 m ²	Power 1.5 kW, area 5.54 m ²	Sat, area up to 25 m ²	Area from 40 to 300 m ²	Area up to 45 m ²
Sun tracking system	On a predetermined trajectory	Continuous, according to the position sensor of the Sun.	Continuous, behind the optoelectronic sensor	On a predetermined trajectory	Area up to 2.5 m ²

Multi-circuit control systems with various position, speed and current regulators are used to obtain high-quality static and dynamic characteristics. Multi-bit sensors position, high-precision solar position sensors, as well as multi-motor systems to compensate for gearbox backlash are used to ensure high tracking accuracy.

1.2 Structure of ASA by AFEU tracking of the Sun and technical characteristics of solar tracking schemes

In Figure 1.8. in general view is a functional diagram of ASKTP.

The composition of the ACTP of electricity production AFEU includes:

- 1) ASC by tracking solar panels on the Sun;
- 2) automatic control system (ACS)
- 3) charge of battery panels with the function of maximum energy production by solar panels, taking into account the capabilities of the battery.

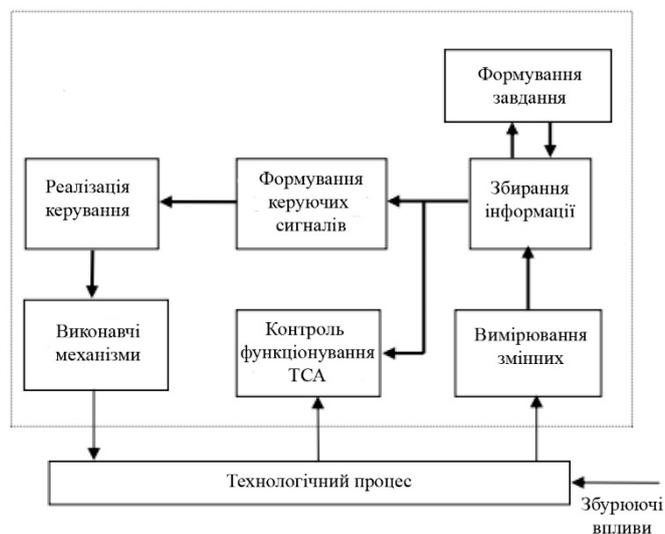


Figure 1.8 – Functional diagram of ASKTP in General

In Figure 1.9. In general, the ASC is shown by tracking solar panels on the Sun, using the following notation:

- PZO – communication device with the object;
- VP – measuring transducer: contains the sensor of position of the Sun, sensors of current and temperature of the engine, and also limit switches;
- OU – control object: is a two-coordinate actuator for moving the frame with a solar panel;
- RO – regulating device: contains controllers and drivers for controlling electromechanical actuators;
- VM – executive mechanism: includes controllers and control drivers;

- REG - regulator: implemented on the microcontroller and process control monitoring and diagnostics of the AFEU system;
- ZP – master device: contains the device for setting the operating mode, the input-output device to an external computer.

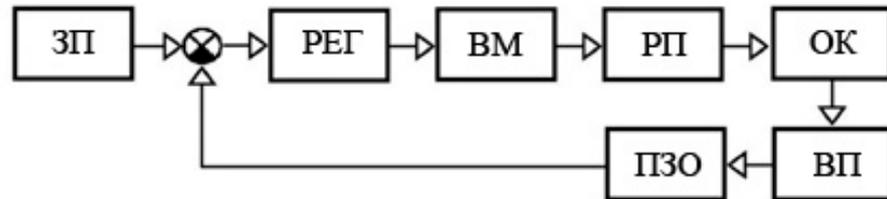


Figure 1.9 – Functional diagram of the ASC

Control of the AFEU system is fully automatic. However, in debug mode and in emergency conditions, control is transferred to the operator. That is why ASK represents the human-machine system by following the AFEU by the Sun.

There are several ways to track the Sun in the ASC by tracking AFEU, including software, finding the maximum energy, and using solar position sensors.

Software control involves tracking from the microcontroller at predetermined azimuth and angle coordinates. Regime Continuous monitoring of the Sun is provided using solar position sensors.

The functional diagram of the system by tracing AFEU on a predetermined trajectory for one coordinate is shown in Figure 1.10.

The solar tracking system uses a three-circuit system with subordinate adjustment of parameters, ie the observing DC electric drive, and the following notations are used:

- KN – guidance controller;
- RP – position regulator;
- RSh – speed regulator;
- RS – current regulator;
- M – engine;
- TG – tachogenerator;
- P – reducer;

- VM with SB – actuator with solar panel;
- α_{rear} – the angle of the position of the mechanism with the solar panel;
- α_{oc} – the actual angle of the mechanism with the solar panel;
- SHIP – pulse-width converter;
- LH – speed sensor;
- DP – solar panel position sensor;
- DS – current sensor.

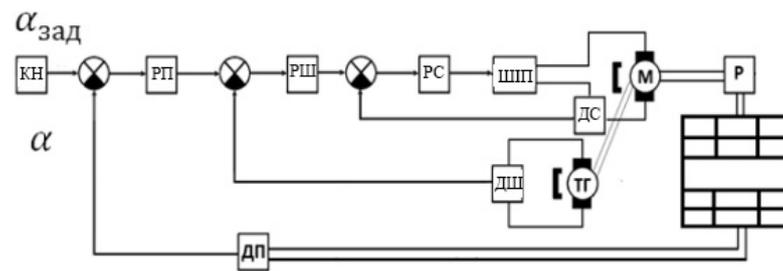


Figure 1.10 – Functional diagram of the tracking system

According to the predicted position of the Sun in the sky, ie according to a predetermined position, AFEU is monitored using tracking DC electric drives. Note that when the clouds are very dense, there is still movement. In this case, the AFEU tracking the Sun does not benefit from energy production, because there is an additional consumption of electrical energy in electric drives to move directly AFEU.

It was found that it makes sense to predominantly use a stepper motor with worm gearboxes and power drivers to control the stepper motor in the AFEU with a capacity of 3-5 kW. This choice will lead to a reduction in electricity consumption by two-coordinate electromechanical actuators with continuous discrete tracking of the Sun.

1.3 Sun position sensors of autonomous photovoltaic power plants

Today, there are a large number of different solar position sensors for ASA. The operation of these sensors is based on different principles of determining the

position of the Sun. Sun position sensors are slotted or based on the Sagnac effect. Also, it can be heliotrackers or other original devices and designs.

Silicon photodiodes are used as sensitive slotted solar cell sensors. Such sensors compare the signals received from each photodiode, which is located in its slot. The sensor then detects the maximum signal as shown in Figure 1.11.

When the Sun moves along the ecliptic, one of the photodiodes is illuminated, and the others, through the created partitions, are in the shadows in parallel. This is achieved by a special location of the sensor. Accordingly, the signal from the brightest photodiode will be maximum. Maximum signal is detected by the control system and the command of the rotation of the solar panel is given at an angle corresponding to the position of this photodiode. That is, in the given fields of view sensors generate relay signals of the presence of the Sun.

Along with the above advantages of slit sensors, there are disadvantages. These include the complexity of the design, complex control and management system, as well as their high cost.

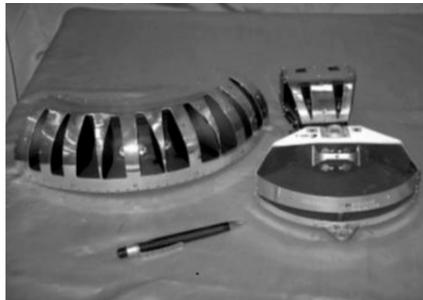


Figure 1.11 – Slotted solar sensors

If the light propagates in two opposite directions along the circular optical path, thanks to a beam splitter, then we are talking about the application of the principle of operation of an optical gyroscope based on the Sagnac effect. Both light rays propagate counterclockwise along the optical path of equal length if the plane of the solar cell is perpendicular to the sun's rays. There is no phase shift when adding rays to the release at the end of the path. There is a phase difference between light waves if the Sun moves at an angular velocity. This difference is called the Sagnac effect.

«Tracker of the Sun» such a definition is actually suitable for the definition of a heliotracker, which is constantly aimed at the Sun. One of the variants of the heliotracker [28] is schematically shown in Figure 1.12.

The heliotracker includes:

- photodetector;
- controller;
- actuator in the form of two motors with gearboxes that rotate solar panels.

The photodetector is mounted on the actuator and is a small board with four photodetectors separated by a cross partition. All four photo sensors are illuminated during sun orientation. The sun, when moving across the sky, changes the brightness of the photodetector, so 2 or 3 photosensors are in the shadows. Depending on the position of the photodetector, the sensor algorithm only accepts nine commands. In Figure 1.12, each photo sensor is marked with a corresponding letter.

Tables 1.3 and 1.4 present all possible options for sensor illumination and the following notations are accepted: 1 – the sensor is illuminated; 0 - sensor in the shadow of the partition.

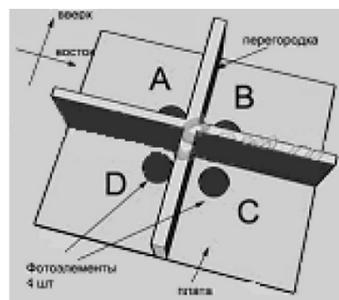


Figure 1.12 – Heliotracker

Table 1.3 – Possible options for illumination of sensors for two-coordinate tracking system

Sensor A	1	0	1	1	0
Sensor B	0	1	1	0	0
Sensor C	0	0	0	0	1
Sensor D	0	0	0	1	0

Note	The sun is rising and setting	The sun is higher and to the east	The sun is higher	The sun is setting	The sun is below and to the east
Vertical movement	Above	Above	Above	Stand	Down
Horizontal movement	To the west	East	Stand	To the west	East

Table 1.4 – Possible options for sensor illumination for two-coordinate tracking system

Sensor A	0	0	0	1
Sensor B	1	0	0	1
Sensor C	1	1	0	1
Sensor D	0	1	1	1
Note	The sun to the east	The sun is lower	The sun is below and setting	Right on the Sun.
Vertical movement	Stand	Down	Down	Stand
Horizontal movement	The sun to the east	Stand	To the west	Stand

An interesting sensor of the Sun's position was developed by a group of scientists from the UNIMAS University in Malaysia [29]. Its feature is the use of photoresistors as a sensitive element. It is similar in design to the classic solar tracker we discussed above.

Four LDRs photoresistors are attached to the pyramidal blocks of the sensor. Photoresistors receive the same amount of light and have the same resistance when the sun shines in the center of the system. When the Sun shifts, the partition between

the photoresistors forms a shadow that changes the intensity of the light measured by the LDR sensors. Figure 1.13 shows the photo sensor.

The tracking system has a 10-bit ADC.

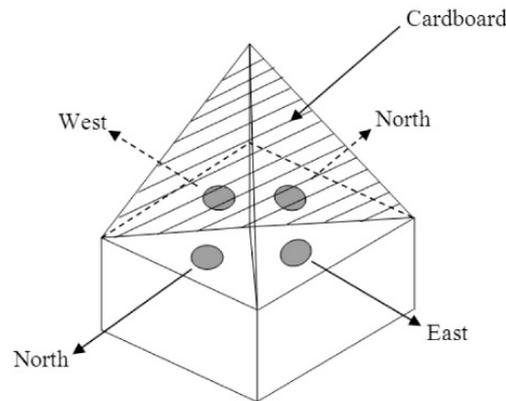


Figure 1.13 – Sun position sensor

The development of a new two-coordinate photosensor of the Sun's position with high measurement accuracy in a given range of changes in illumination will be promising for the further development of environmentally friendly energy production. Such a photo sensor must have a metal base to equalize the temperature in all photocells.

1.4 Influence of wind load on autonomous photovoltaic power plant, features of structures of monitoring systems that take into account the influence of wind load

The load torque applied to the shaft of the electromechanical actuator AFEU is significantly affected by wind load. It may not be possible to follow the frame of the solar panel with the Sun due to high wind loads. A hurricane of more than 25 m / s can disable the actuator by monitoring the photovoltaic power plant.

It is difficult to calculate the wind load for a specific installation. Many external factors must be taken into account in this calculation.

Factors influencing the calculation of wind load of a photovoltaic power plant:

- meteorological features of the area where the installation will be built;
- features of the installation site (for example, buildings, structures, artificial and natural obstacles in the vicinity of the installation);

– the influence of details and structural elements of the photovoltaic power plant on the distribution of wind flow.

Therefore, it is necessary to find a generalized option for the calculation of wind loads under the selected conditions, which will greatly simplify the calculations without resorting to the specifics of the installation site and the method of installation.

The calculation of the impact of wind on buildings and structures is regulated by the normative document «Loads and impacts». The normative value of the average component of wind exposure is determined by the formula:

$$W_m = W_n kc; \quad (1.1)$$

where: W_0 – normalized value of wind pressure;

k – is the coefficient that takes into account the change in wind pressure in height;

C – is the aerodynamic coefficient.

The normative value of wind pressure W_0 , which is determined for a particular area by using these weather stations, should be determined by the formula:

$$W_{шт(р)} = \frac{e^{-p\tau}}{T_{10}T_{11}p^2 + T_{10}p + 1}; \quad (1.2)$$

where: V_0 – wind speed (m / s).

If the technical conditions do not regulate other periods of recurrence of wind speeds, the wind speed at 10 m above the ground for type A terrain, corresponding to a 10-minute averaging interval and exceeds an average of 5 years.

The normative value of wind pressure W_0 is chosen depending on the wind area according to table 1.5. The coefficient k , taking into account the change in wind pressure in height (z), is determined from table 1.6 depending on the type of terrain.

It is determined that the calculation of wind load is influenced by the type of terrain. Consider what types of terrain determine:

A – deserts, steppes, forest-steppes, tundra, open coasts of seas, lakes and reservoirs;

The peculiarities of wind load calculations for two-coordinate system by tracking are determined and a detailed calculation of the value of the additional moment from the wind load on the frame with the solar battery is carried out.

It is necessary to increase the maximum moment of the engine, ie to establish the engine with bigger power and the moment, or to enter an additional control circuit with communication on sensors. The sensor determines the moment from the action of wind load to compensate for the influence of this moment, if the engine power in the ACC allows monitoring in the AFEU in the electromechanical part under the action of wind load. Compensation for the moment of wind load can be provided by installing strain gauges on the AFEU, changing the algorithm of the controller by tracking the Sun and the control unit of electromechanical actuators.

An additional feedback circuit is introduced into the control system via a special wind load sensor in the power plant developed at the MEI, where the traffic police is used in the electromechanical part. The functional diagram of the system by monitoring taking into account the wind load is shown in Figure 1.14, which adopted the following notation:

- RR – relay position regulator;
- M – engine;
- P – reducer;
- VM – executive mechanism;
- α – angle of inconsistency;
- PP - conversion device;
- DN – mismatch sensor;
- BP – conversion unit;
- DVN – wind load sensor.

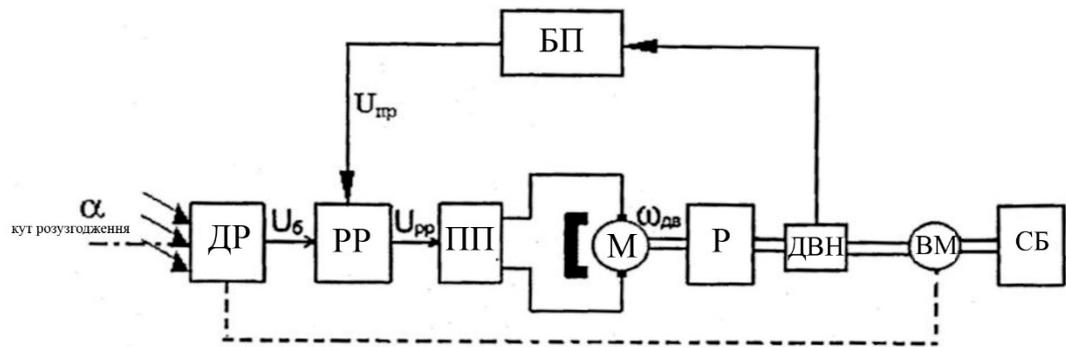


Figure 1.14 – Functional diagram of the system monitoring the wind load

By increasing the set torque on the traffic police with the help of current regulator and wind load sensor, there is compensation for wind load in this system with a complex pressure sensor.

Given the above data, it is proposed to monitor wind speed and move the solar panel to a horizontal position if necessary to protect the solar power plant from high wind loads. The wind protection system includes a wind sensor and a control controller. Real-time sensor interrogation takes place and the monitoring controller evaluates the data additionally in the ASC. When the wind speed exceeds 46 km / h, the solar battery moves to a horizontal position. The controller moves the solar power plant to a horizontal position in case of failure, because it constantly performs self-diagnostics of the entire system.

The wind sensor includes an additional integrated heater for continuous operation of the monitoring system at low temperatures and is shown in Figure 1.15.



Figure 1.15 – Wind sensor

The American company Merlin Power Systems uses wind sensors in its solar installations, which automatically use a controller and actuators to move the panels to a horizontal position at high wind speeds to avoid damage to the installation.

Summarizing the above, we note that for AFEU it is necessary to calculate the amount of additional torque in the electromechanical part of the CD from the action of wind load. To ensure the reduction of the influence of wind load on the electromechanical part of the CD during the implementation of the mode of tracking the Sun, it is necessary to develop a control algorithm in the ASC. When preventing a storm from the MOE services, a control algorithm is also required in the ASC.

1.5 Requirements for systems by monitoring autonomous photovoltaic power plants as an object of ASKTP and the main areas of research

There is a need to create ACS by tracking the sun while minimizing the cost of electricity for control and monitoring, as shown by the analysis of technical solutions in the field of AFEU for the most efficient production of electricity using a solar panel.

It is necessary to set basic requirements for ACS by AFEU tracking the Sun to further create an energy-efficient terrestrial autonomous AFEU system with a capacity of 3-5 kW.

Such requirements are set to the required accuracy by AFEU tracking on the Sun, to solar position sensors, to a two-coordinate mechanical displacement system and to a microprocessor control system of a two-coordinate electromechanical tracking actuator.

To ensure the minimum loss of energy produced by the solar panel, the required accuracy of AFEU monitoring of the Sun has been determined. The relative magnitude of energy losses ΔE depending on the errors of tracking azimuth and angle is determined by the following formula:

$$\Delta E = 1 - \Delta \cos \alpha \cdot \Delta \cos \beta; \quad (1.3)$$

where: $\Delta \alpha$ – azimuth tracking error;

$\Delta\beta$ – is the error of tracking the angle of the place.

The energy losses from the solar battery at different accuracy by tracking the solar panels on the Sun are shown in Table 1.7.

Table 1.7 – Energy losses from WB at different accuracy tracking

Error while tracking the Sun on the Sun, degrees	0,5	1	2	3	4	5
Energy losses from WB during monitoring, %	0,0076	0,03	0,12	0,27	0,48	0,76

The graph of energy loss from tracking error is shown in Figure 1.16. There is no need to reduce the error or increase the accuracy of less than / more than one degree when tracking the solar panel on the Sun, because increasing the accuracy to 0.5 degrees provides insignificant reduction of power loss due to tracking error (reduction of energy loss from the solar battery by 0, 0224%) as shown in table 1.7.

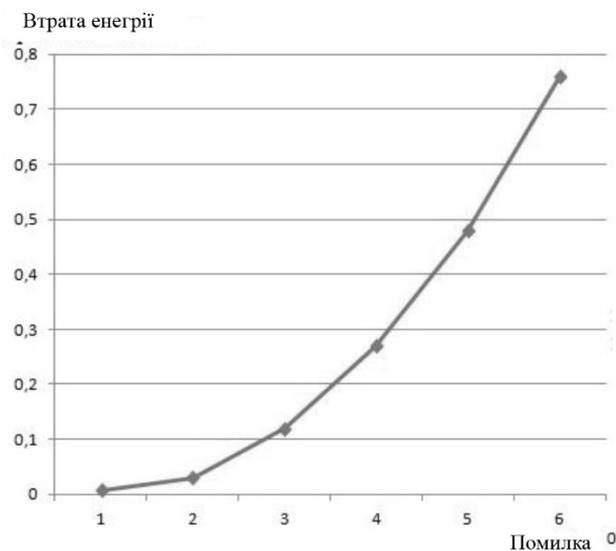


Figure 1.16 – Graph of energy loss from error tracking

The AFEU system imposes certain technical requirements on the solar position sensor. These include:

- to be able to monitor the solar panel on the Sun when the illumination is reduced by 10 times requires a mode of measuring the illuminance of the sensor when changing the interval of illumination of not less than 1:10;

- two-coordinate design of the sensor in azimuth and angle, to eliminate errors in the coordinates when installing the system by monitoring and ensuring the same temperature in the measuring photocells of the sensor;

- to ensure the specified accuracy of tracking, it is necessary to determine the sensitivity of the sensor and the range of changes in the illuminance of the specified bit ADC of the specialized controller by tracking;

- the sensitivity of the sensor must be at least 0.25 degrees in azimuth position at both coordinates to ensure accuracy of tracking at 1 degree;

- the installation must be oversized, easy to use and with a minimum cost of the sensor.

The following technical requirements are imposed directly on the design of the AFEU, the microprocessor control system of the electromechanical actuator and the automated passport control system:

- ASK monitoring must have continuous self-diagnostics, ie diagnostics of the entire system, the power driver of the stepper motor and the engine itself, the battery charge controller; there must also be a continuous interrogation of the limit switches and the transmission of information to the operator in the event of a system emergency;

- according to the financial situation, the specified accuracy of tracking the solar panel on the Sun should be less than one degree;

- microprocessor ASK monitoring should be multi-mode and functional. The ASC modes include the Sun Tracking Control mode from an external computer, the Automatic Sun Tracking mode and the Manual Sun Guidance mode during commissioning;

- mechanical design and automated control of the AFEU system must ensure the rotation of the frame with the solar panel by 270 degrees in azimuth and 90 degrees at an angle;

- the external computer must control the parameters of movement in azimuth and angle, set the parameters of speed limits, acceleration and jerk in the trajectory, set the parameters of nonlinear current in the motor and the parameters in tracking control algorithm when using a solar position sensor;

- ensuring the minimization of energy consumption by the electromechanical actuator of the installation during the AFEU monitoring of the Sun;

- ensuring the speed and bit rate of the microcontroller, the bit rate of the input ADC of the microcontroller, providing the required number of inputs - outputs of the controller; control on two coordinates at the same time with the set accuracy of tracking and possibility of connection of the external computer and the communication unit with GPRS should be provided;

- two-coordinate electromechanical actuator AFEU must provide the specified modes of movement in both coordinates, including the action of significant wind loads;

- the possibility of transferring the frame with the solar panel to a horizontal protective position in case of hurricane winds should be provided in the ASC by surveillance, and the communication in the controller should be monitored by GPRS from the Ministry of Emergencies or other emergency information disseminator;

- motors, sensors, limit switches, reducers, ie all equipment mounted on the frame of the photovoltaic power plant must be protected from external influences and withstand significant temperature changes.

To achieve the goal of the master's thesis, the following areas of research are identified. The need to analyze the structures of terrestrial AFEU, ASC by monitoring the solar panel, solar position sensors to create energy efficient production of AFEU electricity, as well as the need for clearly defined and reasonable requirements for ASC by AFEU solar tracking to two-coordinate electromechanical electromechanical.

Develop and thoroughly investigate the functional scheme and algorithm of ASC by tracking solar panels on the Sun, which includes a relay controller tracking with nonlinear characteristics of the insensitivity zone, which varies depending on

current light, and correction of the positioning trajectory in ensure the maintenance of the specified accuracy by monitoring when changing the current lighting and external factors.

Investigate and develop the structure and algorithm of control of the solar panel tracking system on the Sun with continuous-discrete tracking with adjustable discrete displacement step during tracking in the function of current illumination, which provide the specified accuracy by tracking and improving the energy characteristics of AF.

To minimize energy consumption by electromechanical actuators in the solar panel tracking mode, it is necessary to develop and investigate the method and algorithm of control of two-coordinate electromechanical actuator in positioning mode, which have nonlinear contours of stepper motor amplitude control.

To increase the smoothness and continuity of the solar frame in the process of monitoring under external factors, random loads, including wind, you need to develop and carefully investigate the structure and parameters of the control circuit current amplitude in the electromechanical actuator controlled by indirect error monitoring and its derivative.

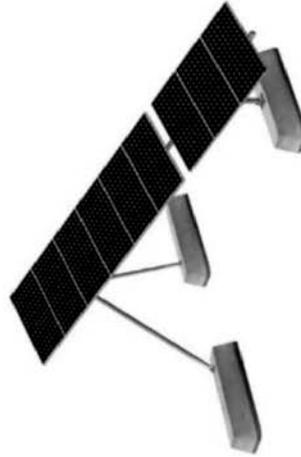
Develop and research digital models of elements of systems by tracking with electromechanical actuators. Conduct research on digital models of algorithms for tracking solar panels on the Sun, nonlinear laws of current circuit control by electromechanical actuator, optimization of parameters of the tracking-positional system by tracking the solar panel on the Sun.

Додаток Б

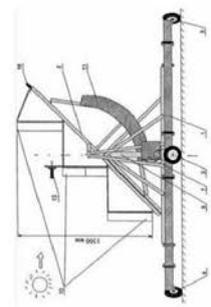
Аналіз існуючих систем автоматичного керування положенням сонячних панелей



Енергетична установка фірми Kopza Portable Solar



Енергетична установка фірми SUNPOWER20



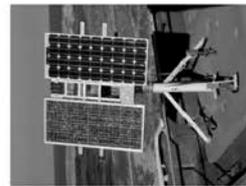
б

Енергетичні установки ФТИ РАН ім. А.Ф. Йоффе



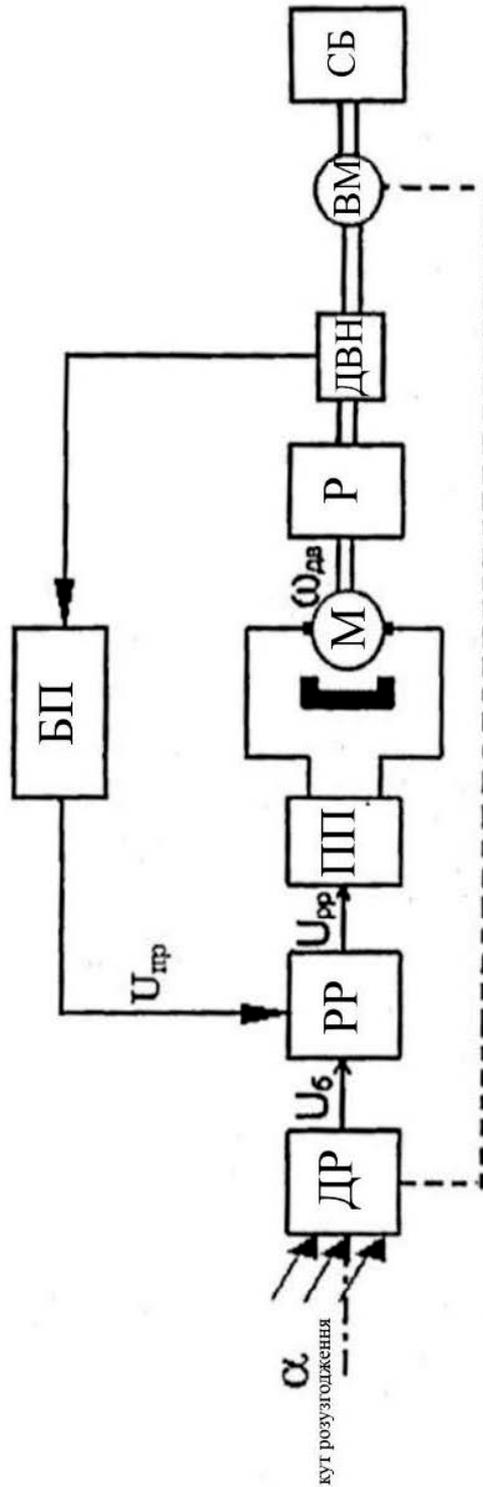
а

Енергетичні установки фірми Селтек



Додаток В

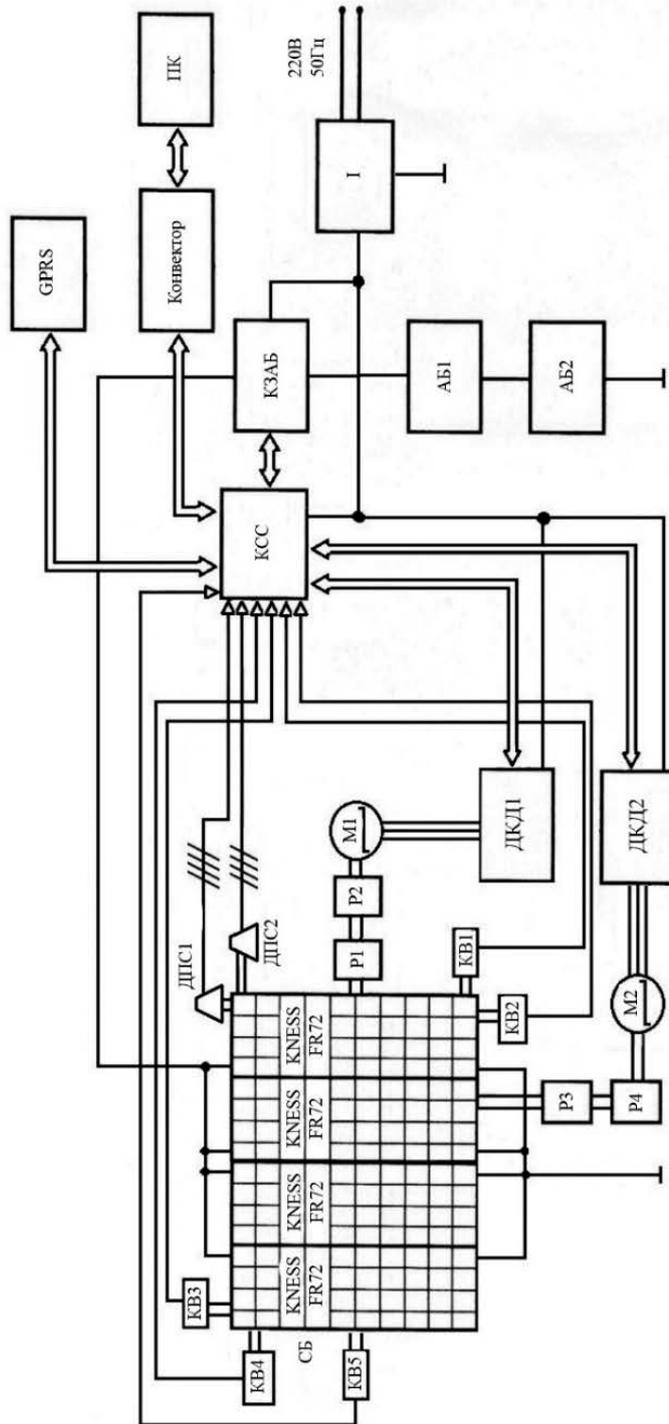
Функціональна схема системи слідкування з урахуванням вітрового навантаження



РР – релейний регулятор положення, М – двигун, Р – редуктор; ВМ – виконавчий механізм, α – кут неузгодженості;
 ПП – пристрій перетворення, ДН – датчик неузгодженості; БП – блок перетворення, ДВН – датчик вітрового навантаження

Додаток Г

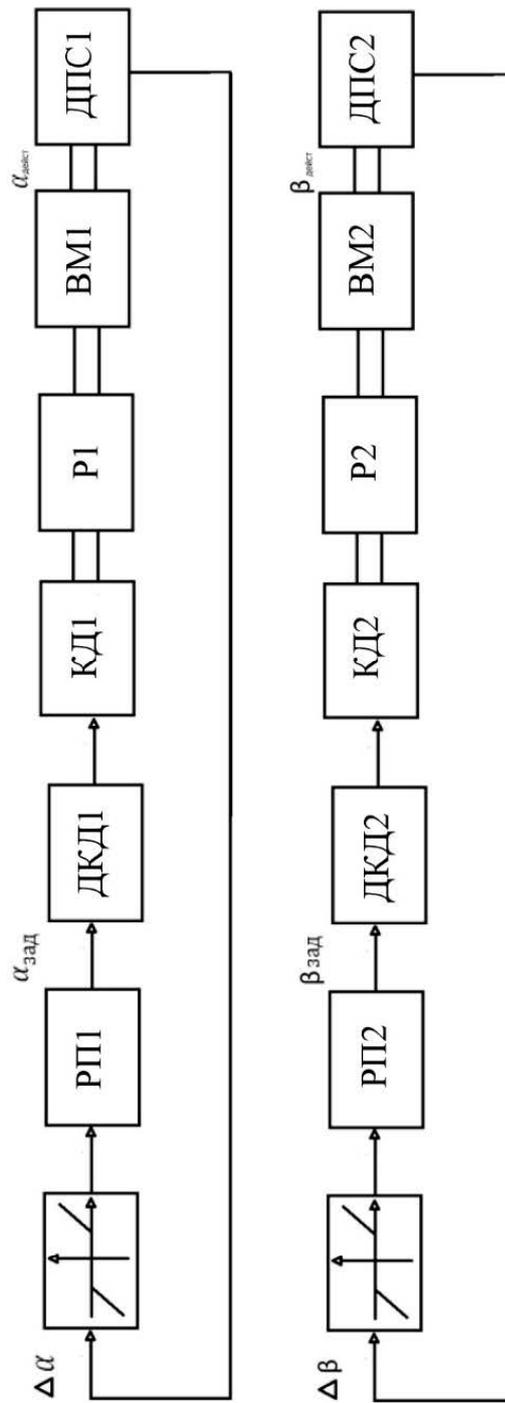
Функціональна схема АСКТП виробництва електричної енергії АФЕУ



КСС – контролер спостереження за Сонцем; ДКД1, ДКД2 – драйвери керування кроковими двигунами; ДПС1, ДПС2 – датчики положення Сонця по азимуту та куту місця; КВ1-КВ5 – кінцеві вимикачі; М1, М2 – крокові двигуни; Р1-Р4 – редуктори; КЗАБ – контролер заряду акумуляторної батареї; І – інвертор; АБ1, АБ2 – акумуляторні батареї

Додаток Г

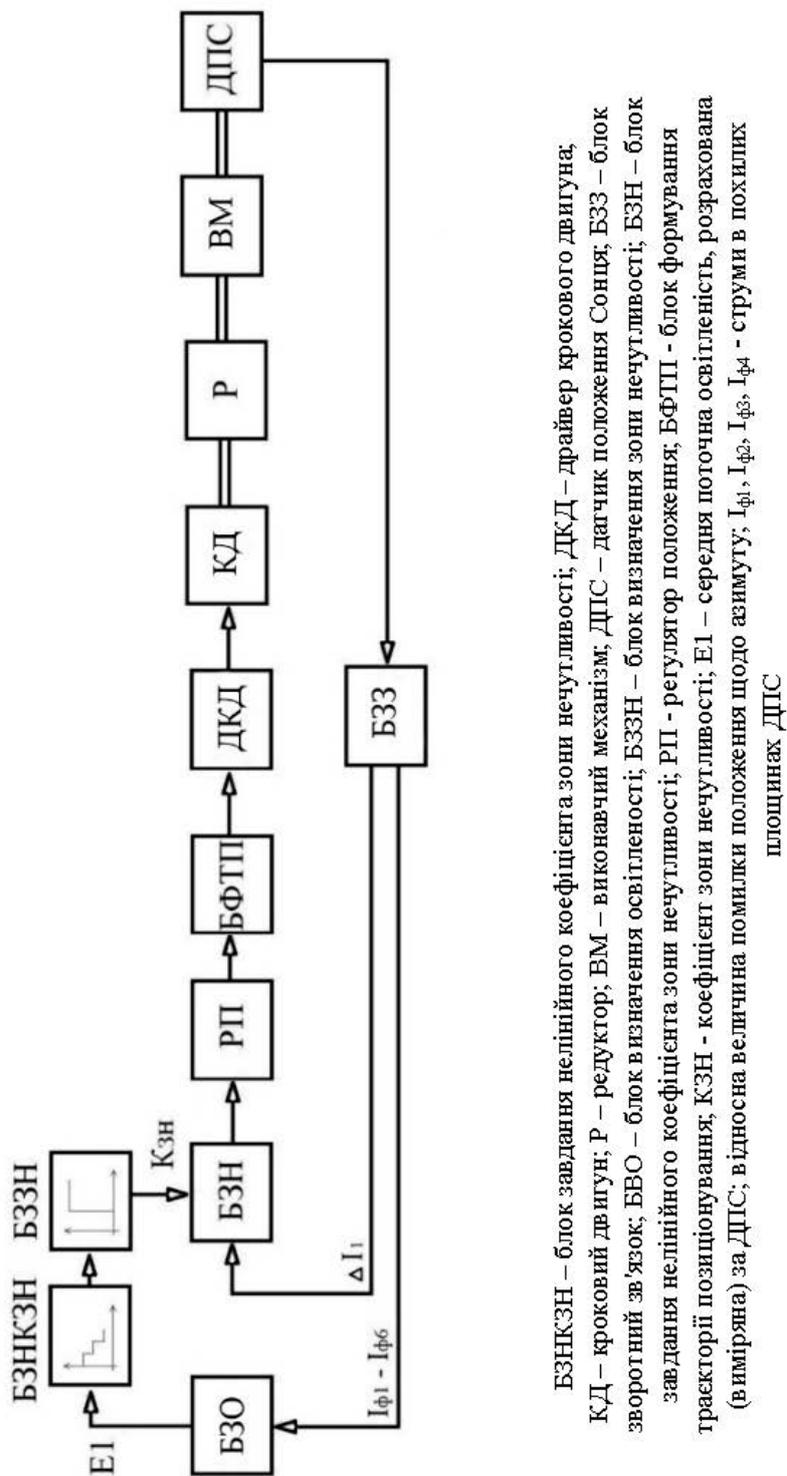
Функціональна схема системи спостереження з КД



НЗ1, НЗ2 – нелінійні ланки; РП1, РП2 – регулятори положення; ДКД1, ДКД2 – драйвери крокового двигуна; КД1, КД2 – крокові двигуни; Р1, Р2 – редуктори; ВМ1, ВМ2 – виконавчі механізми; $\alpha_{\text{зад}}$ – задане (необхідне в даний момент часу) положення механізму по азимуту; $\beta_{\text{зад}}$ – задане (необхідне в даний момент часу) положення механізму по куту місця; ДПС1, ДПС2 – датчики положення Сонця; $\Delta\alpha$ – помилка по куту спостереження (по азимуту); $\alpha_{\text{диск}}$ – дійсний стан механізму по азимуту; $\Delta\beta$ – помилка по куту спостереження (куту місця); $\beta_{\text{диск}}$ – дійсний стан механізму по куту місця

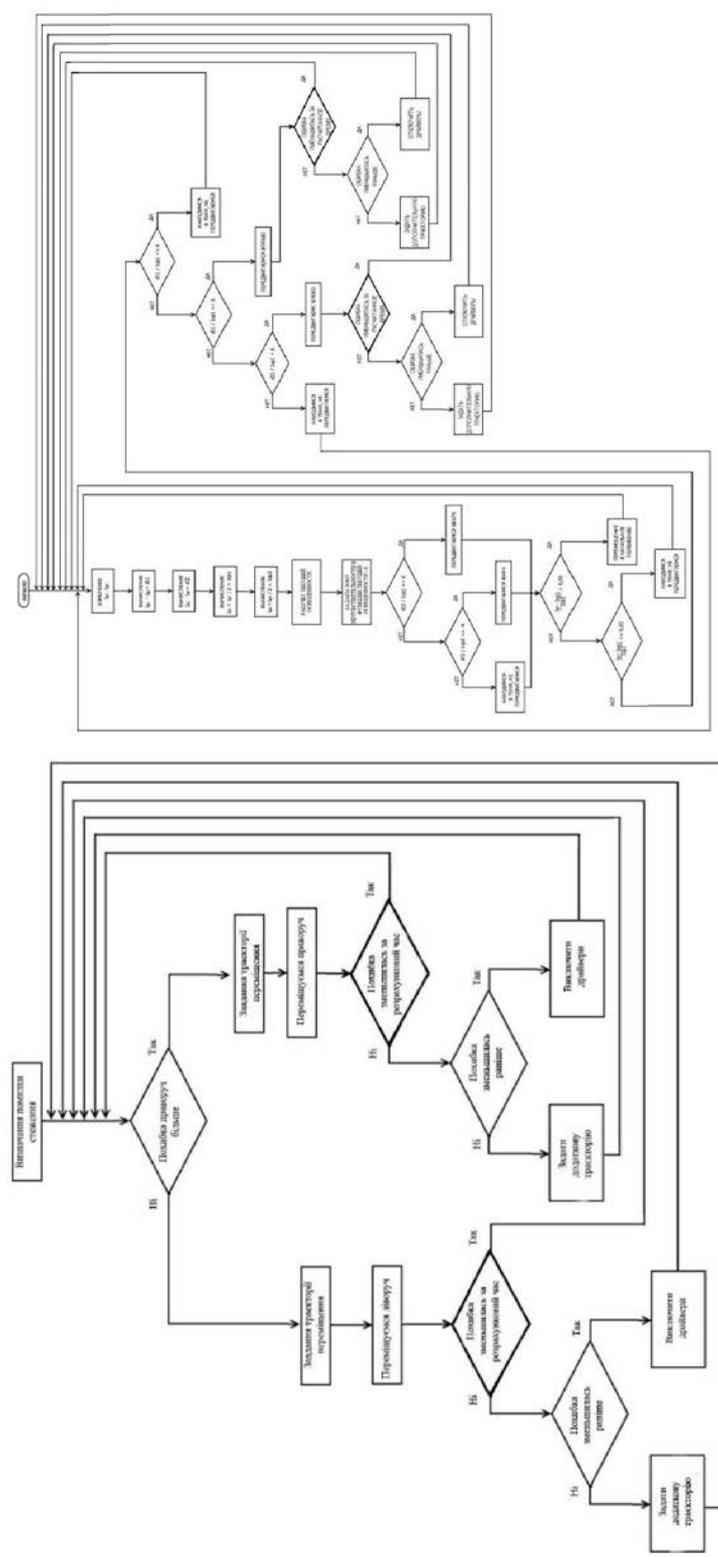
Додаток Д

Функціональна схема системи стеження з урахуванням зміни коефіцієнта зони нечутливості



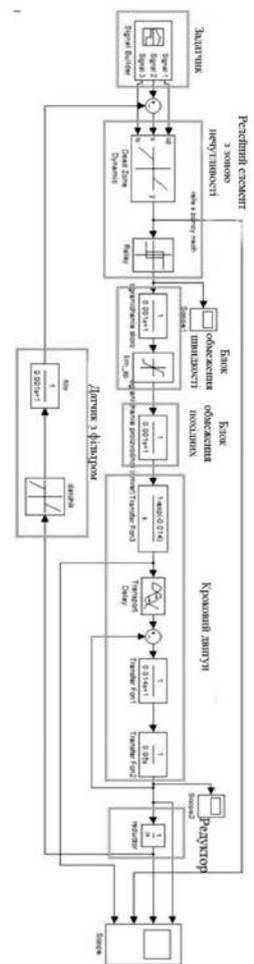
Додаток Е

Алгоритми керування сонячними панелями

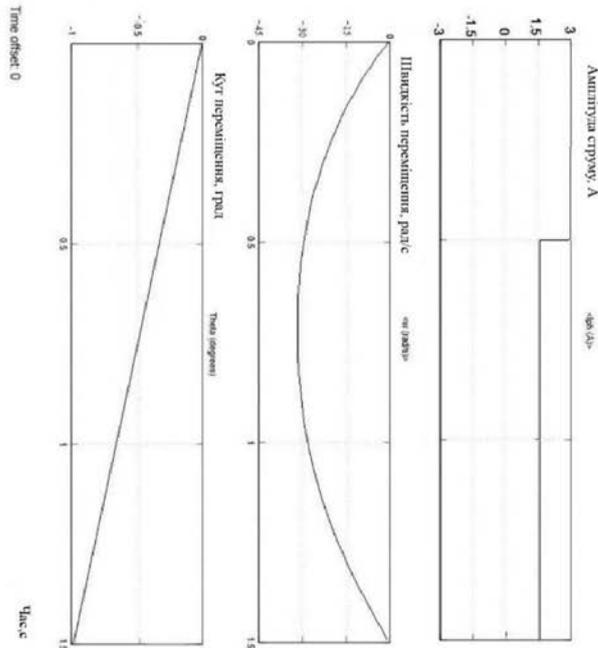


Додаток Є

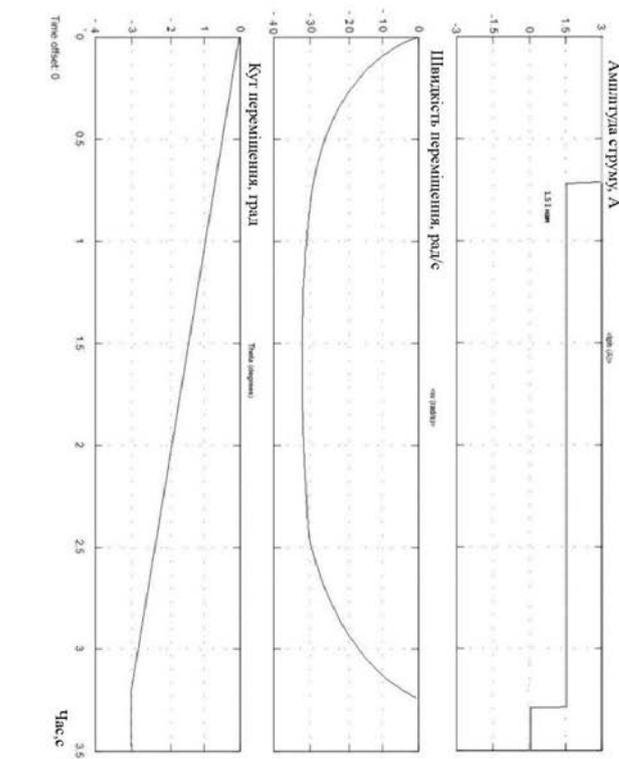
Дослідження системи спостереження за Сонцем



Структура моделі слідуючої системи



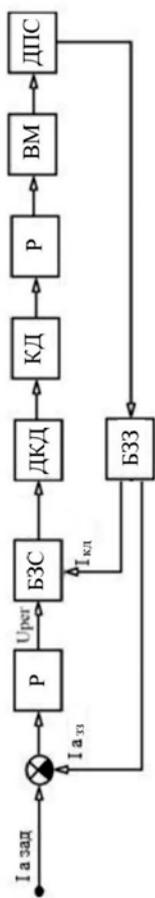
Динамічні характеристики



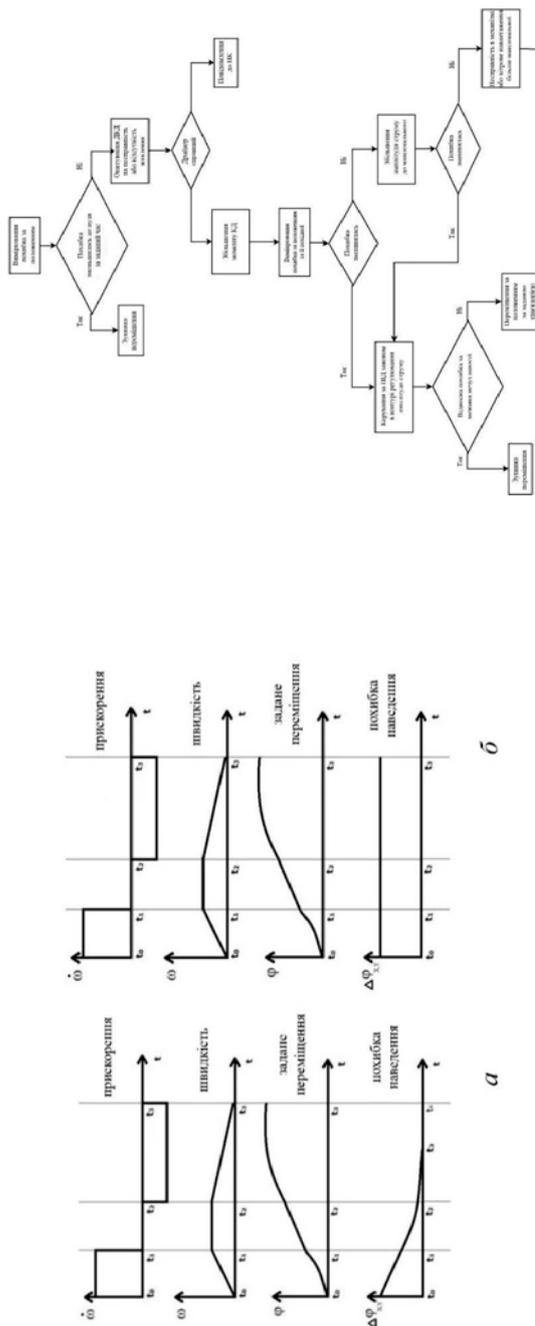
Динамічні характеристики

Додаток Ж

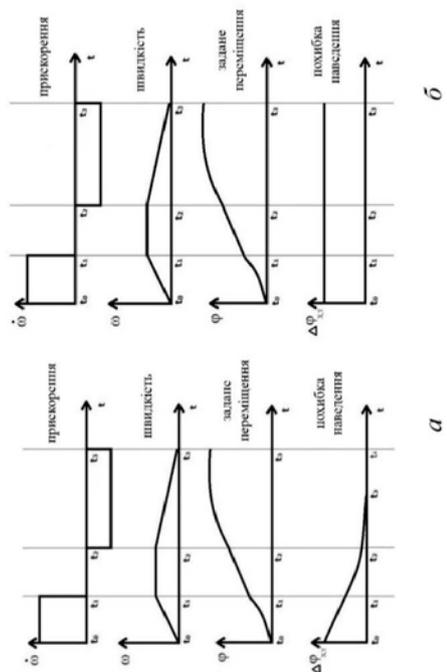
Дослідження та розробка алгоритму керування електромеханічною системою спостереження при дії вітрового навантаження



БЗС – блок завдання струму; Рег – регулятор; ДКД – драйвер КД; Р – редуктор; ВМ – виконавчий механізм; ДПС – датчик положення Соцня; БЗЗ – блок зворотного зв'язку; I_{зад} – завдання на амплітуду струму КД; I_{вкл} – величина зворотного зв'язку по амплітуді струму КД; U_{рег} – вихідний сигнал регулятора; I_{вкл} – амплітуда струму завдання для КД; I_{вкл} – максимальне значення амплітуди струму для КД



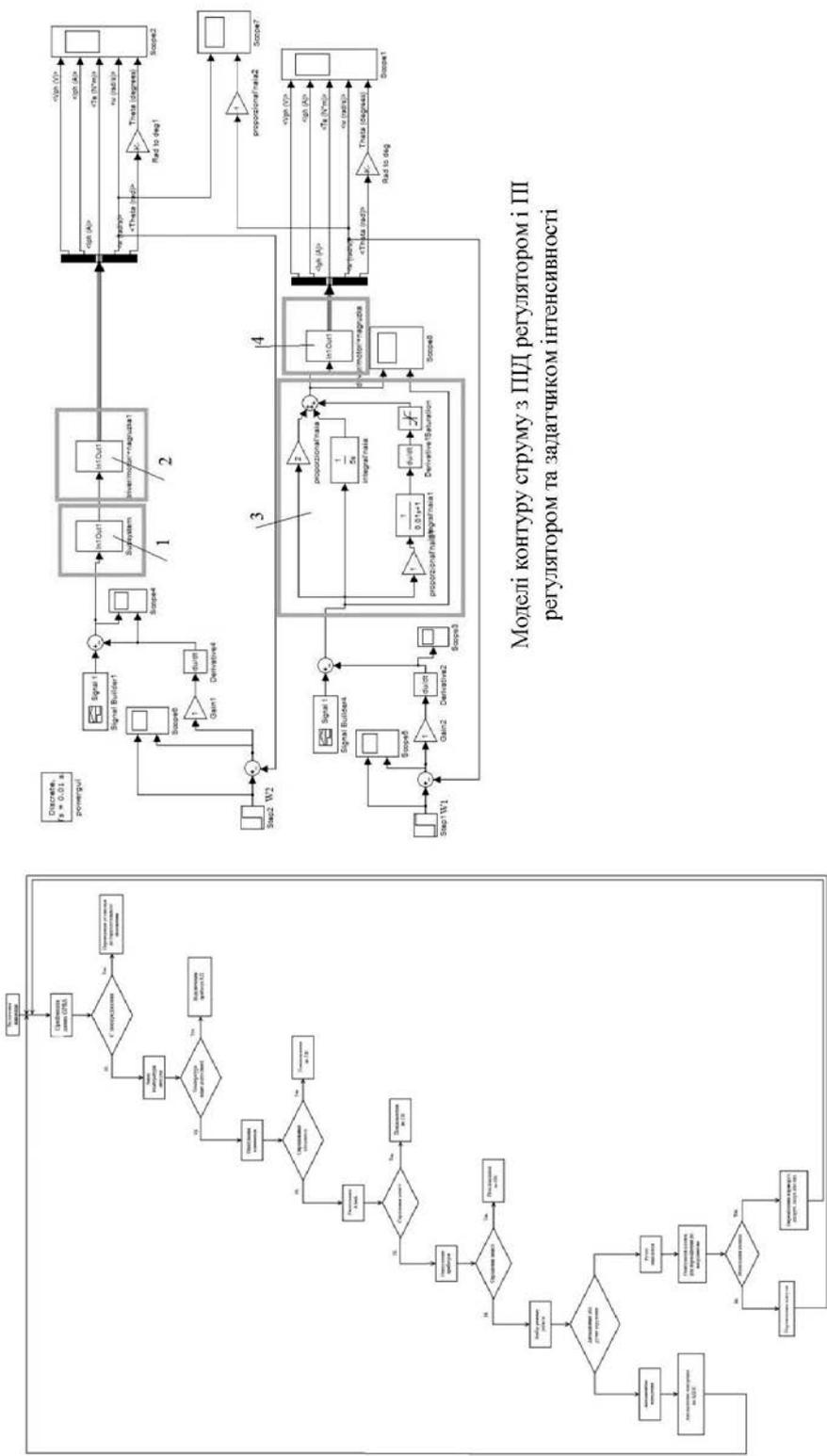
Алгоритм керування контуром струму



Діаграма переміщення рами з сонячними батареями

Додаток 3

Дослідження на цифровій моделі динамічних характеристик електромеханічної системи спостереження при дії вітрового навантаження



Модель контуру струму з ПІД регулятором і ПІ регулятором та датчиком інтенсивності

Алгоритм роботи АСК спостереження СБ за Сонцем

Додаток И

Таблиця техніко-економічних показників

Показники	Одиниці виміру	Значення		
		до модернізації	після модернізації	абсолютне відхилення
1. Капітальні витрати на модернізацію	грн.	x	18003,71	x
2. Річний фонд часу роботи	год.	1943,65	1960,59	-16,94
3. Річна експлуатаційна продуктивність	кВт	13119,64	13498,66	-379,02
4. Річні експлуатаційні витрати, усього:	грн.	55320,33	51655,81	+3664,52
у тому числі:				
витрати на оплату праці	грн.	48493,61	48916,25	-422,64
витрати на ТО та ТР	грн.	6520,98	2502,33	+4018,65
витрати на електроенергію	грн.	305,74	237,23	+68,51
5. Вартість однієї машино-години роботи	грн./год.	28,46	26,35	+2,11
6. Вартість технологічної операції	грн./кВт	4,22	3,83	+0,39
7. Річний економічний ефект	грн.	x	5264,48	x
8. Строк окупності капітальних вкладень	років	x	3,42	x