

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра: 111 сторінок, 4 таблиць, 42 рисунків, 3 додатки, 36 джерел посилання.

КРОКОВИЙ ДВИГУН, ДРАЙВЕР КЕРУВАННЯ, ДАВАЧ КУТОВОГО ПОЛОЖЕННЯ, АНТЕННА СИСТЕМА, КОНТРОЛЕР КЕРУВАННЯ

Дана робота присвячена розробці та аналізу системи керування спрямованої антени "Айзберг", що забезпечує точне позиціонування у горизонтальній площині. Основою системи є інтеграція електромеханічних компонентів та системи зворотного зв'язку для досягнення високої точності наведення.

Система керування антени "Айзберг", що включає кроковий двигун NEMA 23 HS5628, магнітний давач кутового положення AS5600, драйвер керування АСТ DM542, та алгоритми забезпечення точного позиціонування в горизонтальній площині.

Актуальність даної роботи зумовлена зростаючою потребою у високоточних системах позиціонування в таких галузях, як телеметрія, аматорський супутниковий зв'язок та системи радіозв'язку з вузько спрямованими променями. Розробка та дослідження інтегрованих електромеханічних систем керування, подібних до "Айзберг", що поєднують сучасні виконавчі пристрої (як кроковий двигун NEMA 23 HS5628) і точні давачі зворотного зв'язку (як магнітний енкодер AS5600), сприяє підвищенню ефективності та надійності таких систем. Доцільність роботи полягає у практичному застосуванні та валідації методів керування з замкненим контуром та вдосконаленні підходів до сценарію створення обладнання для перевірки та налаштування давачів кутового положення що

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

є важливим для розвитку приладобудування та автоматизованих систем керування.

Метою роботи було розробити систему керування для точного позиціонування антени "Айзберг" у горизонтальній площині, що забезпечує надійний та ефективний контроль її кутового положення.

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 ЗАГАЛЬНО ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	
12	
1.1 Види опорно-поворотних пристроїв	
12	
1.2 Розгляд та оцінка методів реалізації азимутально-кутомісних ОПП	17
2 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	18
2.1 Вибір електродвигуна	18
2.1.1 Опис принципової схеми та принципу роботи кутомісного приводу.	18
2.1.2 Розрахунок максимального зусилля актуатора	20
2.1.3 Кінематичний розрахунок кутомісного приводу.	21
2.1.4 Кінематичний розрахунок редуктора.	23
2.2 Опис принципової схеми та принципу роботи азимутального приводу.	25
2.3 Розрахунок передач.	27
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	34
3.1 Опис складових електронного блоку керування наведення антени	34
3.2 Розгляд аналогів.	35
3.3 Розробка блоку керування для системи антенного пристрою	41
3.3.1 Вибір давача кутового положення	43
3.3.2 Вибір елементів керування виконавчими пристроями	52
3.3.3 Вибір крокового двигуна	58
3.4 Опис кріплення конструкцій	71
3.5 Побудова математичної моделі системи слідування	74

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .	94
4.1 Заходи з техніки безпеки при виготовленні деталей до антени “Айзберг”	94
4.2 Вимоги безпеки до робочих місць для виконня робіт. .	96
4.3 Оцінка майбутнього фізичного та психологічного навантаження на людину, яка обслуговує системи антенного керування . . .	100
4.4 Вплив електромагнітних хвиль на людину . . .	103
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	107
ДОДАТКИ	111

ВСТУП

Точне та надійне позиціонування антенних систем є критично важливим завданням у широкому спектрі сучасних технологічних застосувань, включаючи супутниковий зв'язок, радіоастрономію, телеметрію, системи моніторингу та оборони. Від здатності антени точно наводитись на об'єкт інтересу (супутник, літак, наземний об'єкт) залежить ефективність передачі та прийому сигналів, якість зв'язку та достовірність отриманих даних. У зв'язку зі зростаючими вимогами до швидкості передачі інформації, пропускної здатності каналів та використання вузьконаправлених антен, питання високоточного керування їхнім положенням набуває особливої актуальності. Існуючі системи керування антенами часто стикаються з такими проблемами, як вплив зовнішніх факторів (вітер, вібрації), люфти в механічних передачах, неточність давачів положення та обмеження класичних систем керування у відкритому циклі.

Сутність науково-прикладної задачі, що розглядається в даній роботі, полягає у розробці та реалізації ефективної системи керування кутовим положенням антени, яка здатна забезпечити високу точність та стабільність наведення в горизонтальній площині. Традиційні системи керування кроковими двигунами у відкритому циклі, хоча й є простими у реалізації, не гарантують збереження заданого положення при наявності зовнішніх збурень або пропуску кроків, що є неприйнятним для багатьох сучасних застосувань. Сервосистеми, що використовують колекторні двигуни та високоточні енкодери, забезпечують високі показники точності, але є значно складнішими та дорожчими [1].

Стан розробки задачі характеризується активним пошуком оптимальних рішень, що поєднують достатню точність, надійність, відносну простоту реалізації та прийнятну вартість. Одним із

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перспективних напрямків є застосування крокових двигунів у замкненому контурі (closed-loop stepper systems), які дозволяють отримати переваги обох типів систем: точність позиціонування крокових двигунів та корекцію положення за зворотним зв'язком від енкодера, подібно до сервосистем. Магнітні давачі абсолютного кута, такі як AS5600 [2,3] завдяки своїй безконтактності, стійкості до зовнішніх впливів та високій роздільній здатності, стають привабливим рішенням для систем зворотного зв'язку.

Значущість вирішення цієї задачі полягає у можливості створення доступних та ефективних систем точного наведення для широкого кола пристроїв, від аматорського радіообладнання до промислових автоматизованих комплексів та наукових інструментів. Розробка такої системи керування, як антена "Айзберг", сприятиме підвищенню надійності та точності роботи відповідних систем, розширенню їх функціональних можливостей та оптимізації використання ресурсів.

Підставою для розроблення даної теми стали зростаючі вимоги до точності наведення антен у сучасних системах зв'язку та моніторингу, а також наявність на ринку доступних та високотехнологічних компонентів, таких як крокові двигуни типу NEMA 23 HS5628 [4], із сумісними драйверами, що підтримують роботу в замкненому контурі, та магнітні абсолютні енкодери AS5600. Вихідними даними для дослідження слугували технічні характеристики обраних компонентів [5], теоретичні засади роботи систем автоматичного керування, принципи функціонування крокових двигунів та давачів кутового положення, а також інформація з наукових публікацій та технічної документації виробників.

Проведення даного дослідження є необхідним для практичної реалізації та експериментальної перевірки концепції побудови високоточної системи керування антеною на основі поєднання крокового двигуна у замкненому контурі та магнітного абсолютного енкодера.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Незважаючи на наявність окремих компонентів, їхня ефективна інтеграція у функціональну систему керування вимагає розробки відповідних алгоритмів, програмного забезпечення та електронного блоку керування, що враховуватимуть специфіку взаємодії двигуна, драйвера та давача. Обґрунтуванням необхідності дослідження є також потенційна можливість створення відносно бюджетного рішення для точного позиціонування порівняно з класичними сервосистемами, що розширює можливості його застосування в різних галузях.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

Літературний огляд практичних та теоретичних рішень за темою роботи.

1.1 Види опорно-поворотних пристроїв

Метою нашої роботи є спроектувати опорно-поворотний пристрій: привід азимутального наведення, що забезпечує поворот антенної установки навколо вертикальної осі та кутомісний привід наведення, що забезпечує поворот антенної установки по горизонтальній осі.

Для наведення антен на джерело радіовипромінювання використовуються опорно-поворотні пристрої (ОПП) з механізмами для обертання відносно обраних осей [6-10]. Як відомо, будь-який напрям в просторі може бути однозначно задано двома відповідними координатами. Тому наведення осі антени в заданому напрямку забезпечується наявністю двох степеней вільності: обертання конструкції антени відносно будь-яких двох (взаємно перпендикулярних) осей. При цьому одна з осей обертання нерухома відносно місця встановлення антени і орієнтується в просторі заданим чином. Інша вісь являється рухомою і разом з конструкцією антени обертається навколо першої осі.

Двохосні ОПП, побудовані по вище описаному принципі знайшли переважне розповсюдження на практиці за рахунок їх простоти.

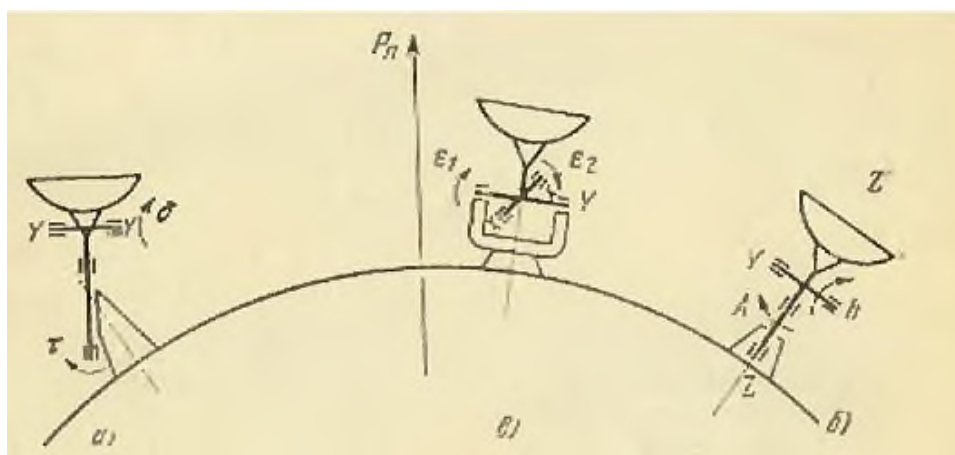
Двохосні ОПП наземних антен будуються по одній з наступних кінематичних схем:

- екваторіальна (полярна);
- азимутально-кутомісна;
- карданна (двокутомісна).

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Кінематична схема, зображена на рисунку 1.1а, називається екваторіальною підвіскою антени і широко застосовується для астрономічних інструментів невеликих розмірів, так як вона є зручною для супровіду дальніх космічних об'єктів (КО).

Перша вісь XX встановлюється паралельно осі Землі і називається віссю часового кута. Вісь антени або оптичного інструмента встановлюється на заданий кут шляхом повороту навколо другої осі YY , перпендикулярній першій. Друга вісь YY називається віссю відхилень. Супровід дальніх КО реалізується шляхом рівномірного обертання антени навколо першої осі зі швидкістю обертання Землі, рівної 15 град/год. Кут повороту відносно другої осі залишається незмінним. Це і є основною перевагою екваторіальних кінематичних схем ОПП. Вона зникає при необхідності супроводжувати КО із змінними нахилами та прямим сходженням. Виконання екваторіальної кінематичної схеми, особливо для великих антенних пристроїв, зв'язано з конструктивними та експлуатаційними труднощами, обумовленими наявністю осі обертання, значних рухомих незрівноважених мас.



- а) екваторіальна (полярна);
- б) азимутально-кутомісна;
- в) карданна (двокутомісна).

Рисунок 1.1 - Кінематична схема ОПП

При азимутально-кутомісній кінематичній схемі (рисунк 1.1,б) перша вісь ZZ вставляється вертикально. Кут повороту відносно цієї осі рівний азимуту КО. Друга вісь YY, перпендикулярна першій, при вимірі азимута обертання в горизонтальній площині. Поворот антени відносно другої осі відповідає зміні висоти КО або його кута місця, який відраховується від горизонту.

При карданній кінематичній схемі (рис. 1.1,в) перша вісь XX встановлюється горизонтально в розміщеному напрямку. Друга вісь YY, перпендикулярна першій, обертається в вертикальній площині. Наведення осі антени в заданому напрямку здійснюється поворотом антени відносно другої осі. Легко замітити, що карданна кінематична схема схожа на азимутально-кутомісну, відрізняється лише розміщенням першої осі [11,12].

Отже, наш пристрій відноситься до двовісних ОПП з азимутально-кутомісною кінематичною схемою.

Опорно-поворотні пристрої призначені для наведення дзеркала в задану точку простору і забезпечують жорстку просторову конструкцію, із двома осями: по куту місця і азимуту [13].

При азимутально-кутомірній підвісці дзеркало може обертатися відносно вертикальної і горизонтальної осей незалежно (рис. 1.2). В цьому випадку точна налаштування антени з одного супутника на інший – непроста двухкоординатна задача. Тому в індивідуальних супутникових системах така підвіска кріпиться жорстко, тобто переміщення антени не передбачено.

При полярній підвісці антена обертається навколо осі, співпадаючою з напрямком на Полярну зірку (рис.1.3).

Електропривід опорно-поворотного пристрою складається із електродвигуна і висувної штанги, переміщення якої забезпечує поворот антени навколо вертикальної осі [14].

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.2 - Азимутально-кутомісна підвіска

Позиціонер запам'ятовує положення антени у вигляді певного коду, а потім при наборі цього коду встановлює антену точно у відповідне положення. Крім можливості забезпечувати необхідну орієнтацію антени, ОПП повинен мати достатньо міцну конструкцію, тому що на антену відбуваються значні загрузки. Підвіска антени повинна бути такою, щоб відхилення осі антени, викликане тиском повітря, не перевищувало 0,1 частини ширини діаграми направленості головної пелюстки [15].

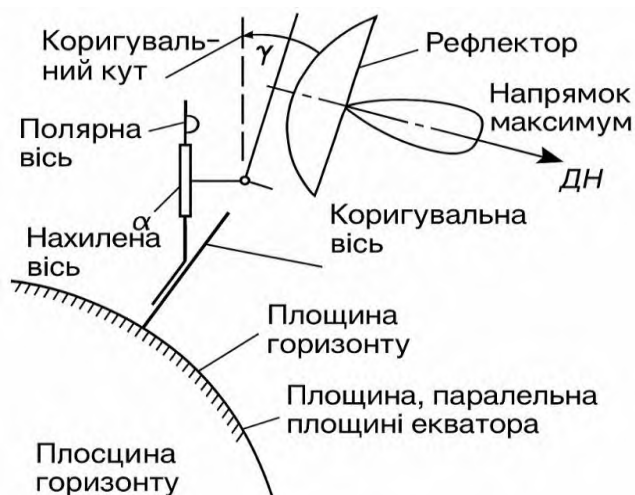


Рисунок 1.3 - Основна конструкція антени з полярною підвіскою

При встановленні і налаштуванні приймальної антени на будь-який геостаціонарний супутник-ретранслятор, потрібно провести розрахунок координат. Оскільки кожен супутник, що знаходиться на геостаціонарній орбіті постійно перебуває над певною точкою поверхні Землі, напрямлення положення цього супутника є сталим та залежить виключно від географічних координат місця прийому сигналу та розташування самого супутника.

Направлення характеризується двома параметрами: кутом місця і азимутом.

Вихідними для розрахунку даними являються наступні географічні координати:

В-широта місця прийому, в градусах (північна або південна);

L- довгота місця прийому, в градусах (західна або східна);

L-довгота супутника, в градуса.

Розглянутий метод орієнтації антени по напрямленню на штучний супутник Землі називається азимутально-кутомісний, відбувається по двох координатах: азимуту і куту місця. Відмінна особливість цього методу орієнтування полягає в тому, що для орієнтування по азимуту антена обертається навколо осі, розташованій вертикально відносно поверхні землі, котра називається азимутальною віссю опорно-поворотного пристрою антени. Тому налюбій широті точки прийому за виключенням північного і південного полюсів азимутальна вісь перетинає площину екватора і, відповідно площину геостаціонарної орбіти під певним гострим кутом, це приводить до того, що кожному супутнику відповідають для даної точки прийому персональні знання азимута і кута місця напрямлення антени.

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2 Розгляд та оцінка методів реалізації азимутально-кутомісних ОПП

Для реалізації азимутально-кутомісної підвіски антен дзеркального типу є два види методів побудови ОПП.

Для антен середніх розмірів використовують ООП з центральною баштою (рисунок 1.4). Антена монтується на конструкції, розміщеній в центральній частині башти. Азмутальний привід реалізується з допомогою зубчастої передачі, яка також знаходиться всередині башти.

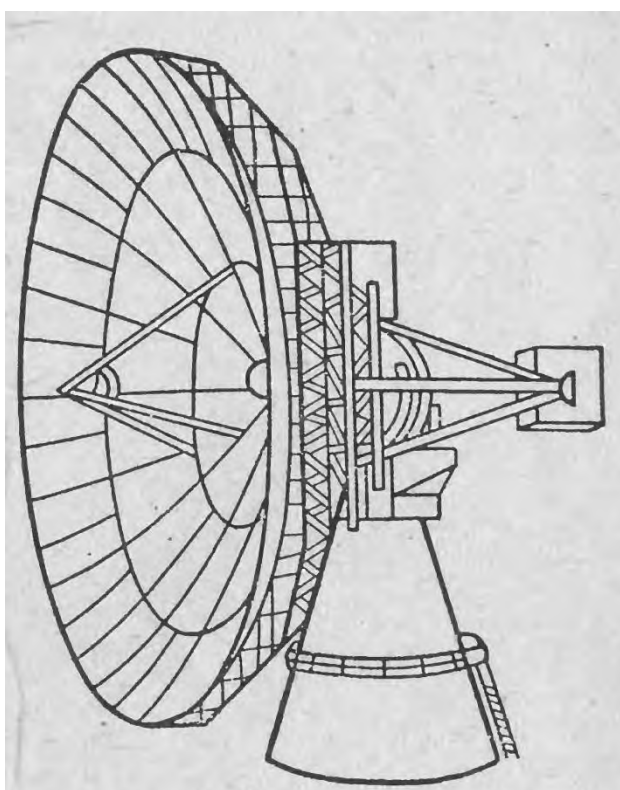


Рисунок 1.4 - Опорно-поворотний пристрій з азимутально-кутовою підвіскою

Кутомісний привід реалізується за допомогою зубчастої передачі, яка знаходиться поза баштою.

Інший метод, який використовується, для великих антен, оснований на використанні ООП карусельного типу, в якому на гратці великого діаметру встановлені каретки [16].

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

2 КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір електродвигуна

2.1.1 Опис принципової схеми та принципу роботи кутомісного приводу

Виходячи з технічного завдання та результатів огляду літератури приходимо до висновку, що даний привід реалізується за допомогою такої кінематичної схеми (рис. 2.1):

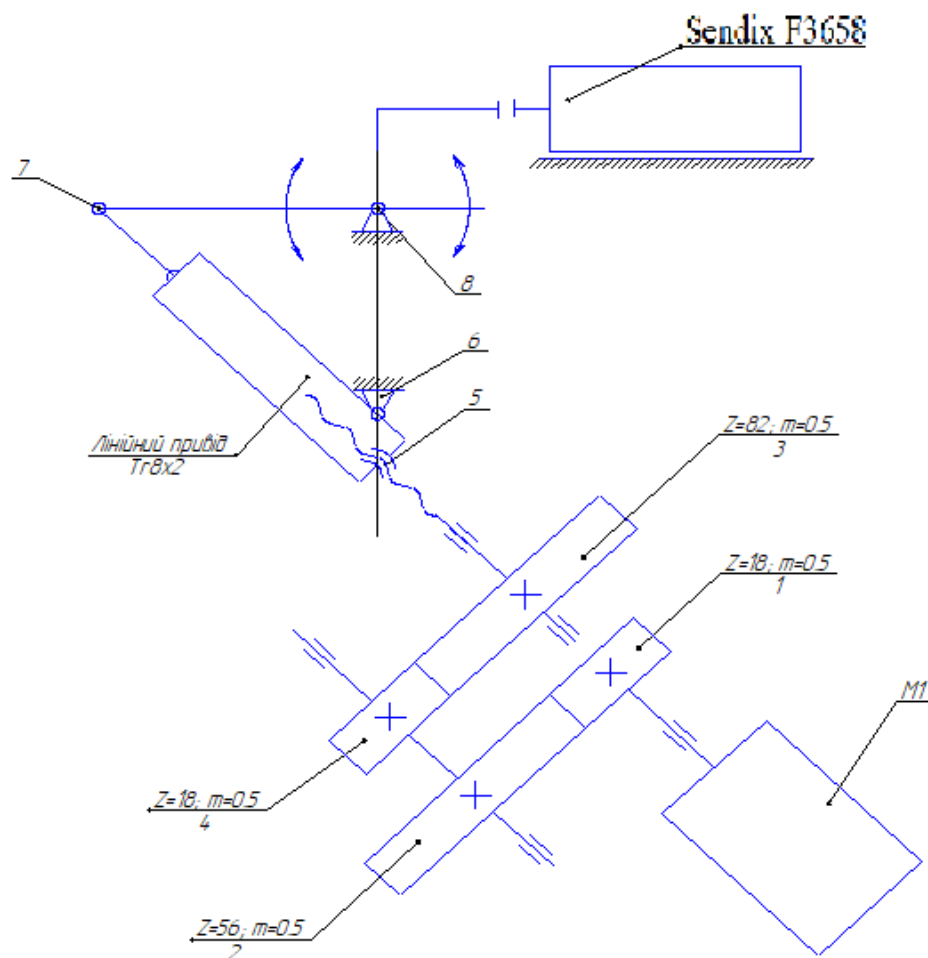


Рисунок 2.1 - Кінематична схема приводу кутомісного

Принцип роботи приводу в тому, що момент від двигуна через редуктор передається до рухомої пари гвинт-гайка, яка знаходиться в

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

трубі що закріплена за допомогою шарніра . Гвинт-гайка перетворює обертовий момент на зворотньо-поступальний рух, який через трубу і шарнір опускає платформу на 80° . Платформа в свою чергу закріплена шарніром, за допомогою якого платформа рухається від 0 до 80° .

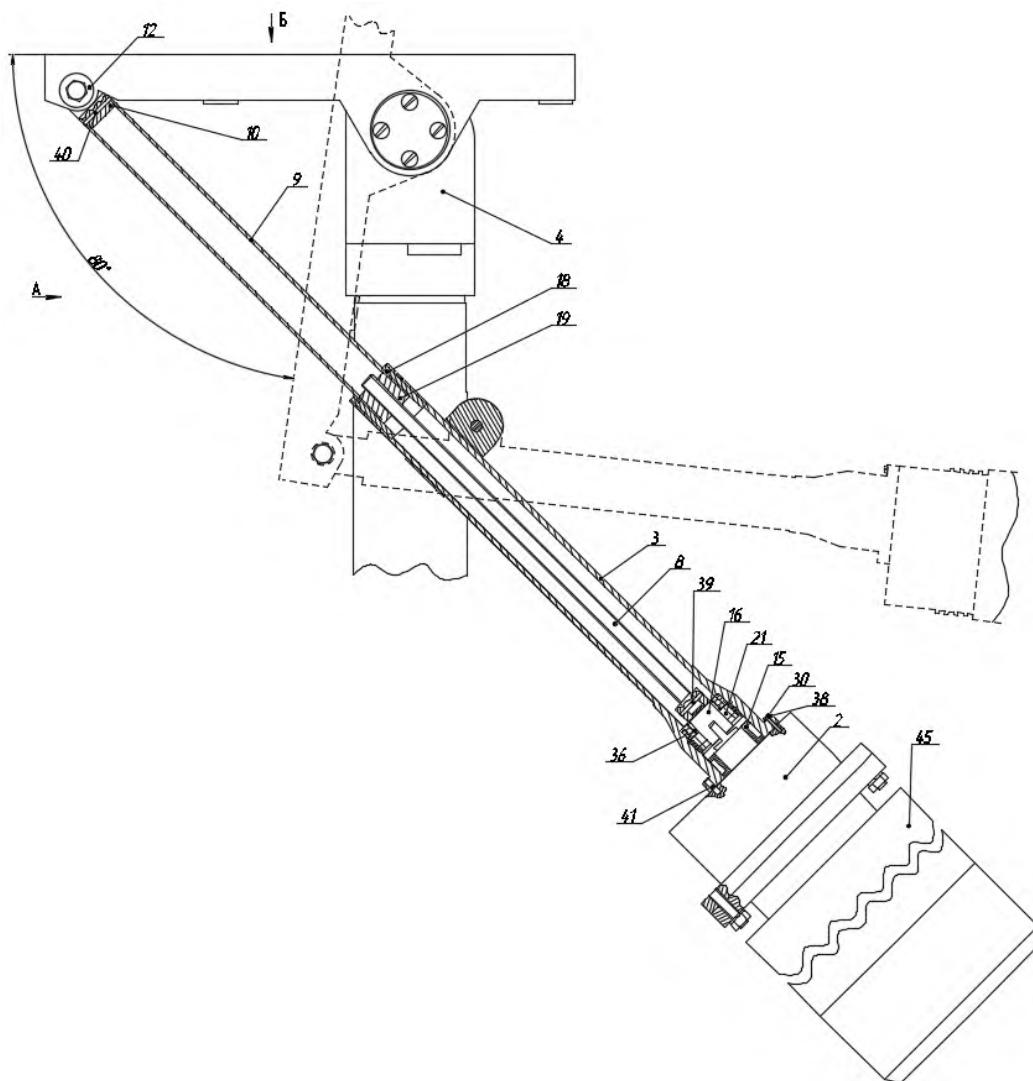


Рисунок 2.2 - Привід кутомісний

Привід кутомісний наведення (рисунок 1.6) складається з литого кожуха 3, стенький кріпиться до труби азимутального приводу з одної сторони, з іншої до нього кріпиться редуктор із двигуном за допомогою п'яти гвинтів 22. В середині кожуха знаходиться гвинт 9 (Тг8х4), який

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

обертається навколо своєї осі за допомогою редуктора і двигуна 2, через пів-муфту 20. Гвинт 9 передає обертовий рух гайці 19 глухо закріпленій у трубі 11. З іншої сторони труби 11 штифтом 44 закріплена деталь «обойма» 12, яка в свою чергу за допомогою болта кріпиться до платформи 1, що повертається від 0 до 80°. Платформа закріплюється до основи 4 за допомогою деталей «вісь» і «вісь закріплююча», посаджених на підшипники. В основі знаходиться без зазорна муфта до якої кріпиться вал і давач кутового переміщення 2.5 ВТ.

2.1.2 Розрахунок максимального зусилля актуатора

На рис. 2.3 показана схема приводу кутомісного в положенні на якому зусилля будуть максимальними.

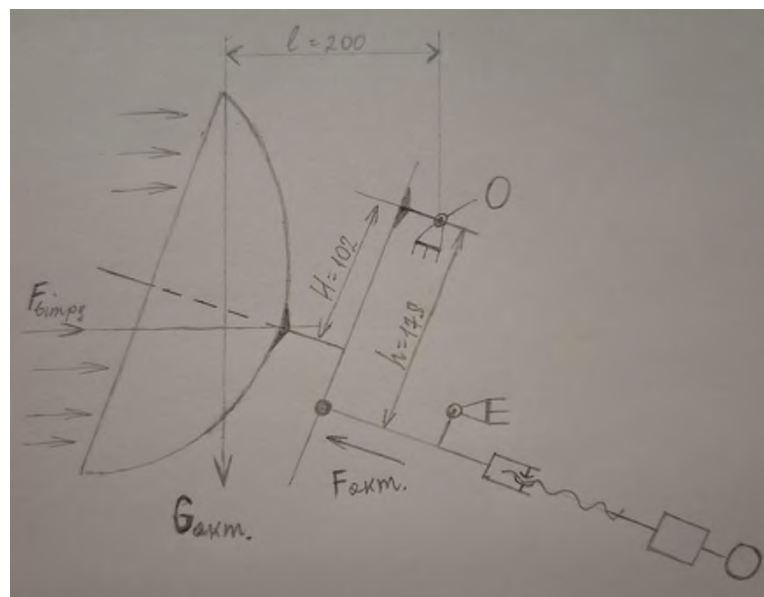


Рисунок 2.3 - Схема кутомісного приводу

Складаємо рівняння рівноваги зусиль відносно осі О (рис 3.1):

$$G \cdot l + F_{\text{вiтp},} \cdot H = F_{\text{акт},} \cdot h,$$

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{акт.} = \frac{G \cdot l + F_{вітр.} \cdot H}{h},$$

де G – максимальна вага антени, приймаємо, що $G = 800$ Н;

$F_{вітр.}$ – вітрове навантаження, з [17] приймаємо для швидкості вітру 25 м/с і діаметру дзеркала антени 2 м, $F_{вітр.} = 2500$ Н.

H, h, l – розміри антени взяті з склад. креслення, $H = 102$ мм, $h = 175$ мм, $l = 200$ мм.

$$F_{акт.} = \frac{800 \cdot 200 + 2500 \cdot 102}{175} = 2371 \text{ Н.}$$

2.1.3 Кінематичний розрахунок кутомісного приводу

Згідно з технічним завданням, швидкість кута повороту по осі КМ = $\omega_{ант.} = 0,4 \div 4$ °/с, кут повороту $\alpha_{км} = 10 \div 90$ °

Оскільки планується регулювати швидкість обертання двигунів з допомогою пристроїв частотного керування, то приймаємо, що при частоті струму 75 Гц максимальна швидкість повороту антени $\omega_{ант.} = 4$ °/с, тоді при 50 Гц $= \frac{50 \cdot 4}{75} = 2,6$ °/с.

Відпрацювання кута повороту $90 - 10 = 80$ °_{км} антена буде переміщуватись за час $\frac{80}{2,6} = 30,7$ с.

Хід актуатора при цьому виходячи з складального креслення буде рівний (розміри взяті з креслення, рис. 1.8):

$$275 - 82 = 193 \text{ мм}$$

Тоді середня швидкість актуатора:

$$V_{акт} = \frac{193}{30,7} = 6,28 \text{ мм/с}$$

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Приймаємо крок гвинта 4 мм (Тг8х4).

Тоді швидкість обертання гвинта:

$$n_{\text{ГВ}} = \frac{6,28}{4} = 1,58 \text{ об/с}$$

Приймаємо електродвигун МАС трифазний чотирьохполюсний зі швидкістю обертання:

$$n_{\text{ДВ}} = 1380 \text{ об/хв.} = \frac{1380}{60} = 23 \text{ об/с}$$

Тоді необхідне передатне відношення редуктора:

$$i_{\text{ред}} = \frac{n_{\text{дв.}}}{n_{\text{гв}}} = \frac{23}{1,57} = 14,64.$$

Знаходимо потужність ел. двигуна по формулі:

$$N_{\text{дв. min.}} = \frac{F_{\text{акт}} \cdot V_{\text{акт}}}{n_{\text{дв.}} \cdot n_{\text{ред}} \cdot n_{\text{акт}}}$$

Приймаємо ККД ел. двигуна $\eta_{\text{ДВ}} = 0,57$; ККД редуктора $= 0,8$; ККД актуатора $= \eta_{\text{акт}} = 0,5$.

$$\text{Тоді } N_{\text{дв. min}} = \frac{2371 \cdot 6,28 \cdot 10^{-3}}{0,57 \cdot 0,8 \cdot 0,5} = 65,3 \text{ Вт}$$

Для забезпечення заданого прискорення на вихідному валі, потрібно, щоб пусковий момент двигуна був більшим за $M_{\text{дв min}}$, отже

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вибираємо безконтактний моментний двигун марки МАС 56В-0,09-1380 з наступними параметрами (рис. 2.5):

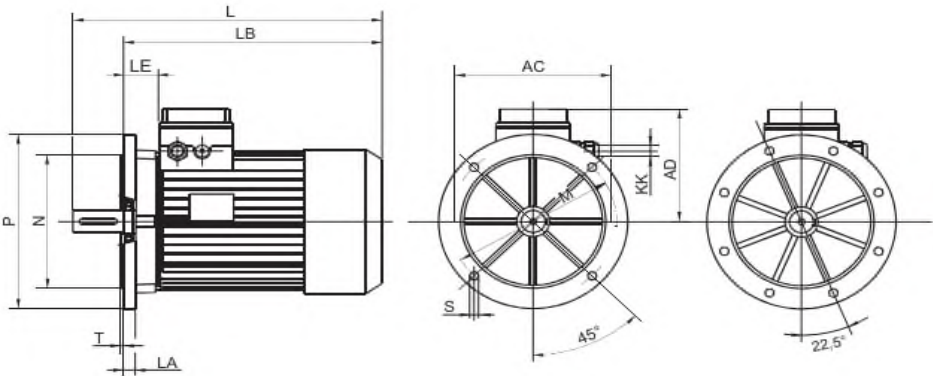


Рисунок 2.4 Технічні характеристики двигуна МАС 56В-0,09-1380

Motore / Motor		Ingombri / Overall dim.						Flangia / Flange B5						Albero / Shaft			
	Pol.	AC	AD	L	LB	LE	KK	M	N/6	P	LA	S	T	D	E	F	GA
												Ø		Ø			
56	2...8	115	90	195	175	22	M16x1,5	100	80	120		7	3	9 M4	20	3	10,2

Рисунок 2.5 - Характеристики двигуна МАС 56В-0,09-1380

2.1.4 Кінематичний розрахунок редуктора

Визначення загального передаточного відношення приводу кутомісного та розбиття загального передаточного відношення по ступенях

$$i_{заг.} = i_{ред.} \cdot i_{зв.} ;$$

$$i_{заг.} = 14,15 \cdot 314 = 4443$$

Оскільки для роботи кутомісного приводу використовують гвинтову передачу (гвинт Tr8x4), приймаємо :

$$i_{5,6(zв.)} = \frac{2\pi}{t_{зв.}}$$

де $t_{зв.}$ - крок гвинта;

$$i_{5,6(zв.)} = \frac{2 \cdot 3.14}{0.02} = 314$$

тоді на інші передачі залишається

$$i_{ред.} = \frac{i_{заг.}}{i_{5,6(zв.)}} = \frac{4443}{314} = 14,15.$$

Приймаємо дві циліндричні передачі з передаточним відношенням

$$i_{1,2}=3.11;$$

$$i_{3,4}=4.55;$$

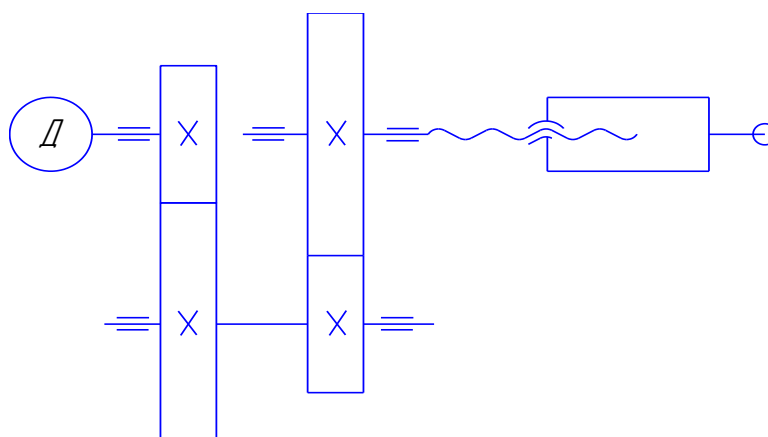


Рисунок 2.6 - Кінематична схема приводу кутомісного

2.2 Опис принципової схеми та принципу роботи азимутального приводу

Виходячи з технічного завдання та результатів огляду літератури приходимо до висновку, що даний привід реалізується за допомогою такої кінематичної схеми (рис. 2.7):

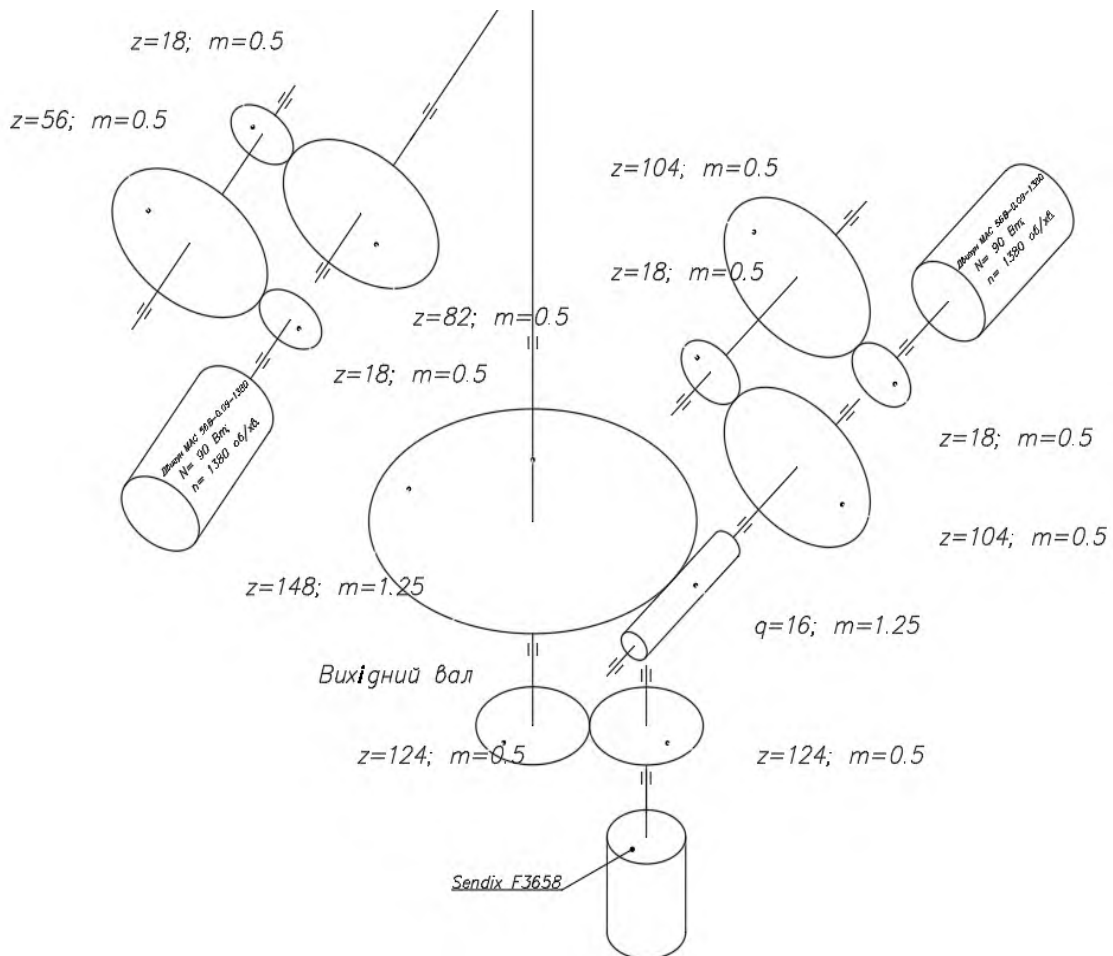


Рисунок 2.7 - Кінематична схема приводу кутомісного

Принцип роботи приводу в тому, що момент від двигуна через редуктор передається до рухомої пари гвинт-гайка, яка знаходиться в трубі що закріплена за допомогою шарніра. Гвинт-гайка перетворює обертовий момент на зворотно-поступальний рух, який через трубу і

шарнір опускає платформу на 80° . Платформа в свою чергу закріплена шарніром, за допомогою якого платформа рухається від 0 до 80° .

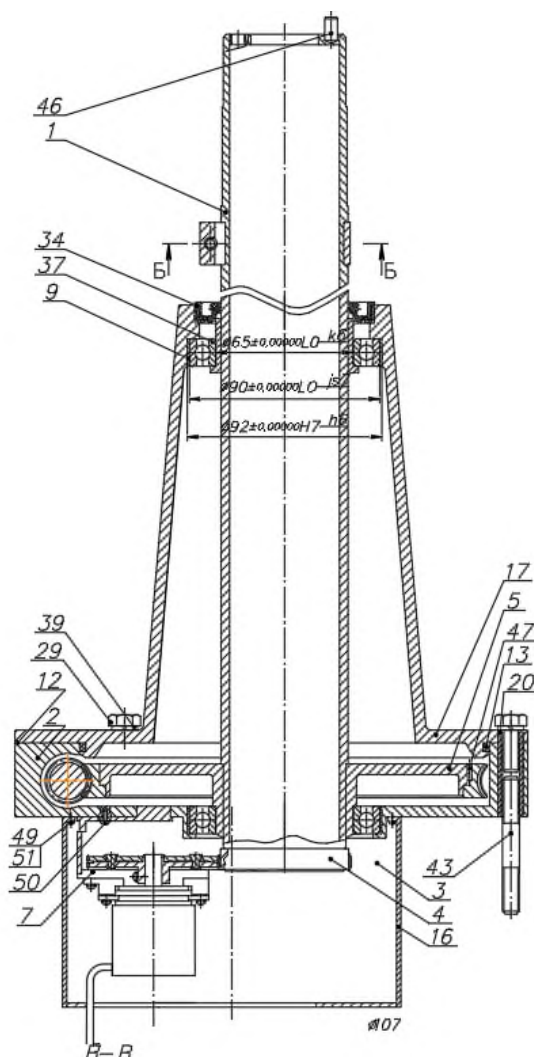


Рисунок 2.8 - Привід азимутальний

Привід азимутального наведення (рис. 2.8) складається з литого корпусу 2, кришки 17, яка кріпиться до корпусу за допомогою п'яти болтів 20. В корпусі та кришці за допомогою підшипників (осьовий зазор підшипників регулюється підбором кілець 12) 37 вертикально кріпиться труба 1. Труба обертається навколо вертикальної осі. До нижньої частини корпусу кріпиться коробка - командоапарат 3, в якій міститься зубчаста

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

передача (шестірня 4 закріплена на трубі) 16, давач кутового переміщення 2.5 ВТ, а також вузли управління приводом. В корпусі міститься співвісний редуктор, який призначений для передачі крутного моменту від двигуна до черв'яка.

В середині корпусу міститься черв'ячна передача : зубчате колесо 5 закріплено на трубі, черв'як за допомогою підшипників функціонує безпосередньо в корпусі. За допомогою черв'ячної передачі відбувається передача крутного моменту від редуктора до азимутальної осі – труби. За допомогою п'яти шпильок 43 привід кріпиться до нерухомої платформи. Манжет 34 призначений для запобігання потрапляння бруду в корпус установки, забезпечує герметичність приводу.

2.3 Розрахунок передач

Розрахунок черв'ячної передачі

Задаємо число заходів черв'яка.

Прийmemo число заходів черв'яка $Z_5 = 1$, тоді число зубів черв'ячного колеса $Z_6 = U_{5,6} \cdot Z_5 = 148 \cdot 1 = 148$.

Приймаємо $Z_6 = 148$.

Фактичне передаточне відношення: $U_{5,6} = \frac{148}{1} = 148$.

Задаємо коефіцієнт діаметра черв'яка $q=16$;

Приймаємо розрахункову міжцентрову віддаль зубчастої передачі:

$$a_{\omega \min} = 110 \text{ мм}.$$

Знаходимо модуль передачі:

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m = \frac{2 \cdot a_{\omega \min}}{q + z_6} = \frac{2 \cdot 110}{16 + 148} = 1,34 \text{ мм.}$$

Приймаємо стандартне значення модуля: $m = 1,25 \text{ мм.}$

Ділильні діаметри черв'яка і черв'ячного колеса будуть:

$$d_5 = m \cdot q = 1,25 \cdot 16 = 20 \text{ мм};$$

$$d_6 = m \cdot Z_6 = 1,25 \cdot 148 = 185 \text{ мм.}$$

Міжцентрова віддаль:

$$a_{\omega} = 0,5 \cdot m \cdot (q + z_6) = 0,5 \cdot 1,25 \cdot (16 + 148) = 102,5 \text{ мм.}$$

Розрахунок геометричних параметрів черв'ячної зубчастої передачі

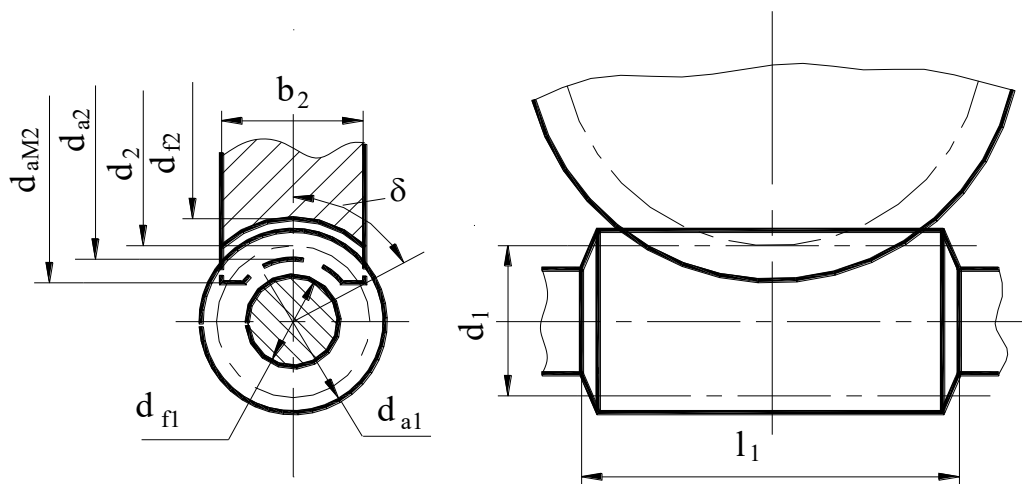


Рисунок 2.9 - Геометричні параметри черв'ячної зубчастої передачі

Розміри елементів зубців:

висота головки витка черв'яка

$$h_a = m = 1,25 \text{ мм} ;$$

висота ніжки витка черв'яка

$$h_f = (1 + C^*) \cdot m = (1 + 0,2) \cdot 1,25 = 1,5 \text{ мм} ,$$

де $C^* = 0,2$ - коефіцієнт радіального зазору зубчастого вінця;

Розміри вінців зубчастих коліс:

діаметри кіл вершин зубців

$$d_{a5} = d_5 + 2 \cdot m = 20 + 2 \cdot 1,25 = 22,5 \text{ мм} ;$$

$$d_{a6} = d_6 + 2 \cdot m = 185 + 2 \cdot 1,25 = 187,5 \text{ мм} ;$$

діаметри кіл впадин

$$d_{f5} = d_5 - 2 \cdot h_f = 20 - 2 \cdot 1,5 = 17 \text{ мм} ;$$

$$d_{f6} = d_6 - 2 \cdot h_f = 185 - 2 \cdot 1,5 = 182 \text{ мм} .$$

Розрахунок циліндричної передачі

Задаємо мінімальну міжцентрову віддачу зубчастої передачі:

$$a_{\omega \min} = 35 \text{ мм} ,$$

Задаємо число зубів шестерні.

Прийmemo число зубів шестірни $Z_1 = 18$, а число зубів колеса

$$Z_2 = U_{1,2} \cdot Z_1 = 5,78 \cdot 18 = 104 .$$

Приймаємо $Z_2 = 104$.

Фактичне передаточне відношення: $U_{1,2} = \frac{104}{18} = 5,78$.

Знаходимо модуль передачі:

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m = \frac{2 \cdot a_{\omega \min}}{z_1 + z_2} = \frac{2 \cdot 35}{18 + 104} = 0,57 \text{ мм.}$$

Приймаємо стандартне значення модуля: $m = 0,5 \text{ мм.}$

Попереднє значення деяких геометричних параметрів передачі

Ділильні діаметри шестерні і колеса будуть такі:

$$d_1 = m \cdot Z_1 = 0,5 \cdot 18 = 9 \text{ мм;} \\ d_2 = m \cdot Z_2 = 0,5 \cdot 104 = 52 \text{ мм.}$$

Міжцентрова віддаль:

$$a_{\omega} = 0,5 \cdot m \cdot (z_1 + z_2) = 0,5 \cdot 0,5 \cdot (18 + 104) = 30,5 \text{ мм.}$$

Ширина шестерні і зубчатого колеса:

Приймаємо $b_1 = 6 \text{ мм};$

$$b_2 = 5 \text{ мм};$$

Розрахунок геометричних параметрів циліндричної зубчастої передачі

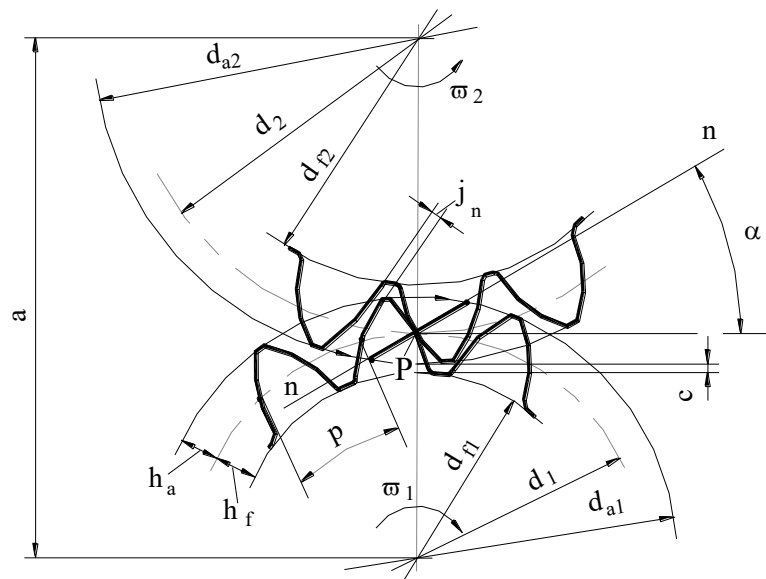


Рисунок 2.10 - Геометричні параметри циліндричної передачі.

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Розміри елементів зубців:

висота головки зубця

$$h_a = m = 0,5 \text{ мм} ;$$

висота ніжки

$$h_f = (1 + C^*) \cdot m = (1 + 0,35) \cdot 0,5 = 0,68 \text{ мм} ,$$

де $C^* = 0,35$ - коефіцієнт радіального зазору зубчастого вінця;

кут профілю зубців: $\alpha = 20^\circ$.

Розміри вінців зубчастих коліс:

діаметри кіл вершин зубців

$$d_{a1} = d_1 + 2 \cdot m = 9 + 2 \cdot 0,5 = 10 \text{ мм} ;$$

$$d_{a2} = d_2 + 2 \cdot m = 52 + 2 \cdot 0,5 = 53 \text{ мм} ;$$

діаметри кіл впадин

$$d_{f1} = d_1 - 2 \cdot h_f = 9 - 2 \cdot 0,68 = 7,64 \text{ мм} ;$$

$$d_{f2} = d_2 - 2 \cdot h_f = 52 - 2 \cdot 0,68 = 50,64 \text{ мм} .$$

Враховуючи те, що редуктор являється співвісний, ще одна зубчаста передача буде аналогічною цій.

Розрахунок циліндричної передачі

Задаємо мінімальну міжцентрову віддаля зубчастої передачі:

$$a_{\omega \min} = 22 \text{ мм} ,$$

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Задаємо число зубів шестерні.

Прийmemo число зубів шестерні $Z_1 = 18$, а число зубів колеса

$$Z_2 = U_{1,2} \cdot Z_1 = 3.11 \cdot 18 = 55.98.$$

Приймаємо $Z_2 = 56$.

Фактичне передаточне відношення: $U_{1,2} = \frac{56}{18} = 3.11$.

Знаходимо модуль передачі:

$$m = \frac{2 \cdot a_{\omega \min}}{z_1 + z_2} = \frac{2 \cdot 22}{18 + 56} = 0.59 \text{ мм.}$$

Приймаємо стандартне значення модуля: $m = 0.5 \text{ мм.}$

Ділильні діаметри шестерні і колеса будуть такі:

$$d_1 = m \cdot Z_1 = 0.5 \cdot 18 = 9 \text{ мм};$$

$$d_2 = m \cdot Z_2 = 0.5 \cdot 56 = 28 \text{ мм.}$$

Міжцентрова віддаль:

$$a_{\omega} = 0.5 \cdot m \cdot (z_1 + z_2) = 0.5 \cdot 0.5 \cdot (18 + 56) = 18.5 \text{ мм.}$$

Розрахунок циліндричної передачі

Задаємо мінімальну міжцентрову віддаль зубчастої передачі:

$$a_{\omega \min} = 29 \text{ мм,}$$

Задаємо число зубів шестерні.

Прийmemo число зубів шестірни $Z_3 = 18$, а число зубів колеса

$$Z_4 = U_{3,4} \cdot Z_3 = 4,55 \cdot 18 = 82.$$

Приймаємо $Z_4 = 82$.

Фактичне передаточне відношення: $U_{3,4} = \frac{82}{18} = 4,55$.

Знаходимо модуль передачі:

$$m = \frac{2 \cdot a_{\omega \min}}{z_3 + z_4} = \frac{2 \cdot 29}{18 + 82} = 0,58 \text{ мм.}$$

Приймаємо стандартне значення модуля: $m = 0,5 \text{ мм}$.

Ділильні діаметри шестерні і колеса будуть такі:

$$d_3 = m \cdot Z_3 = 0,5 \cdot 18 = 9 \text{ мм};$$

$$d_4 = m \cdot Z_4 = 0,5 \cdot 82 = 41 \text{ мм}.$$

Міжцентрова віддаль:

$$a_{\omega} = 0,5 \cdot m \cdot (z_1 + z_2) = 0,5 \cdot 0,5 \cdot (18 + 100) = 25 \text{ мм.}$$

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Опис складових електронного блоку керування наведення антени

Давач кута повороту (ДКП) – це ключовий функціональний компонент сучасних автоматизованих систем керування різними об'єктами. Вони широко використовуються в верстатобудуванні, суднобудуванні, робототехніці, авіації, навігаційному обладнанні. Тому виникає потреба контролю таких давачів.

Для контролю даного типу давачів було розроблено та сконструйовано стенд.

Стенд складається з металевої пластини, на якій закріпленні на кронштейнах кроковий двигун NEMA 23 HS5628 з енкодером та досліджуваним давачем кута повороту Papperl+Fuchs GmbH серії також блок системи керування драйвером АСТ DM542, який встановлений на платі MKS Gen V1.4 і .

Досліджуваний та зразковий давач кута повороту розміщені на загальній осі, що приводиться в рух кроковим двигуном через редуктор. За допомогою персонального комп'ютера прводиться керування роботою стенда по спеціально розробленій програмі. Команди надходять до блоку системи керування і обробляються мікропроцесорним пристроєм, що входить до складу блоку керування.

Система керування стендом повинна забезпечувати: живлення давачів кута повороту та крокового двигуна; керування кроковим двигуном; вимірювання сигналів, що надходять від обох давачів кута повороту; перетворення отриманої інформації у цифровий код; видачу інформації в лінію зв'язку в стандарті інтерфейсу RS-232. Цифровий код

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

від двох датчиків обробляється мікропроцесорним пристроєм і передається на персональний комп'ютер для подальшої обробки.

Основні принципи роботи даного стану для перевірки ДКП можна побачити на функціональній схемі та на рисунку 3.1.

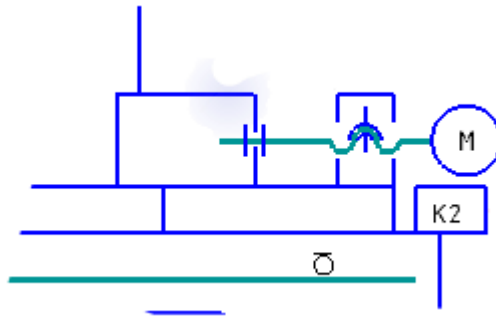


Рисунок 3.1 – Будова розробленого стану.

Для даного стану основними виконавчими пристроями є кроковий двигун, драйвер і плата на якій будуть розміщені всі компоненти.

3.2 Розгляд аналогів

У сучасній промисловості використовується різні блоки керування та контролю, які забезпечують автоматизацію процесів та виконують подібні функції, але відрізняються за конструкцією, функціональністю, гнучкістю налаштування та вартістю. Розглянемо найпоширеніші аналогічні засоби керування, які використовуються у системах автоматизованого контролю.

Програмовані логічні контролери (ПЛК, англ. PLC)

Програмовані логічні контролери (ПЛК) — це спеціалізовані електронні пристрої, що використовуються для автоматизації технологічних процесів у промисловості. Вони прийшли на зміну релейно-

контактним схемам, забезпечуючи простоту обслуговування, високу надійність та гнучкість у конфігурації та програмуванні [18].

Аналоги:

- Siemens S7-1200, S7-1500;
- Schneider Electric Modicon M221/M241;
- Mitsubishi FX5U;
- Omron CP1E/CP2E;
- Delta DVP-серія;



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.2 - а – Siemens S7-1200, б – Schneider Electric Modicon M221, в – Mitsubishi FX5U, г – Omron CP1E, д – Delta DVP-EX2.

Призначення:

ПЛК виконують логіку керування, зчитують сигнали з датчиків, керують приводами, клапанами, реле тощо. Їх широко використовують у промисловості завдяки надійності та можливості програмування.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікроконтролерні платформи

Аналоги:

- Arduino (Uno, Mega, Nano);
- STM32 (STMicroelectronics);
- ESP32/ESP8266 (Espressif);
- Raspberry Pi Pico (на базі RP2040);
- TI MSP430.

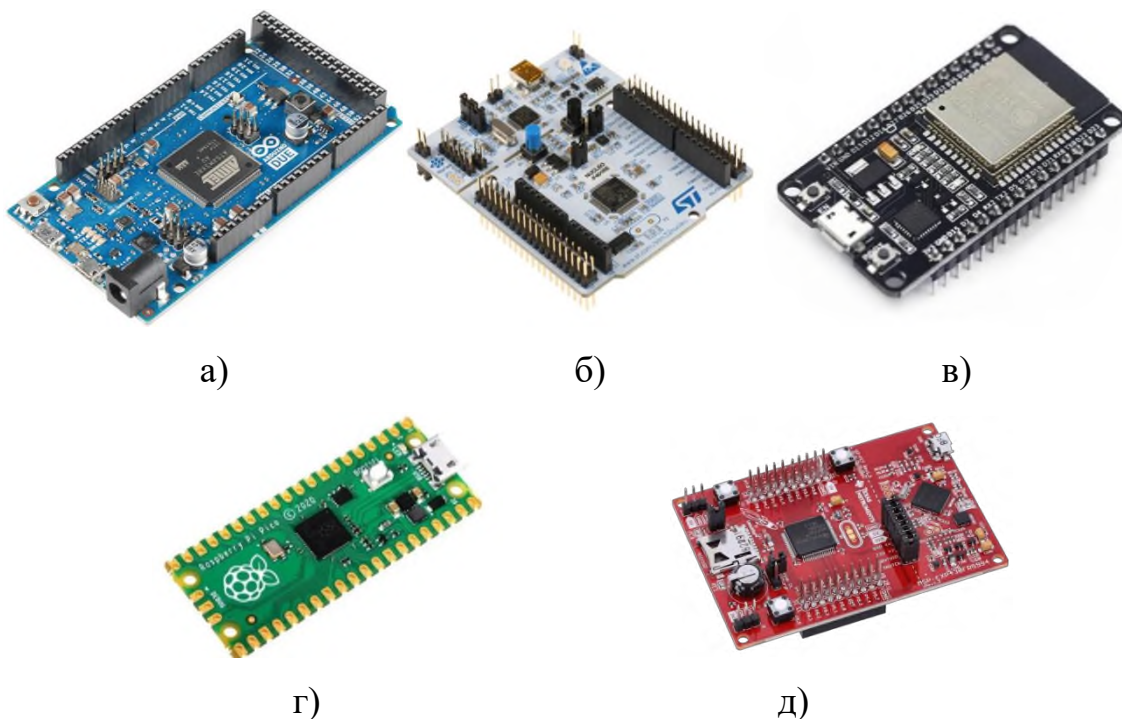


Рисунок 3.3 - а – Arduino Mega 2560 R3, б – STM32 NUCLEO-F401RE, в – ESP-WROOM-32 ESP32 30 PIN (WIFI+Bluetooth), г – Raspberry Pi Pico RP2040, д – MSP-EXP430FR5994.

Призначення:

Ці платформи застосовуються переважно в навчанні, прототипуванні, малих автоматизованих системах. Вони мають широкі можливості підключення сенсорів і акторів, підтримують цифрову й аналогову обробку сигналів.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

SCADA-контролери та панелі оператора

Аналоги:

- Siemens SIMATIC HMI KTP-серія;
- Weintek MT8021iE, cMT-серія;
- Schneider Electric Magelis;
- Delta DOP-серія;
- Pro-Face панелі.



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.4 - а – Панель оператора KTP700 PN Basic, б – Weintek MT8021iE, в – Schneider Electric Magelis XBTGT 5,7", г – Delta DOP-107WV, д – Панель Pro-face PFXPP172CD4.

Призначення:

Ці пристрої забезпечують взаємодію оператора з автоматизованою системою: відображають параметри, дають змогу змінювати уставки, керувати режимами роботи.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Системи збору даних (DAQ)

Аналоги:

- National Instruments NI USB-6009, myDAQ, CompactDAQ;
- Advantech USB-4716, PCI-1750;
- LabJack U3/U6;
- MCC DAQ (Measurement Computing).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.5 - а – NI USB-6009, б – Advantech USB-4716 AE,
в – LabJack U6, г – DAQ USB-201.

Призначення:

DAQ-системи збирають аналогові й цифрові сигнали з різних джерел, обробляють їх та передають у комп'ютер або контролер. Часто застосовуються в лабораторних і наукових дослідженнях, а також у промисловості.

Модулі контролю для IoT-систем

Аналоги:

- ESP32 з Wi-Fi та Bluetooth;
- Raspberry Pi 3/4 з Linux;
- BeagleBone Black;
- Arduino MKR1000/1010 (Wi-Fi, LoRa, GSM);
- Industrial Shields – Arduino сумісні модулі в корпусах для DIN-рейки.



а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 3.6 – а – ESP32, б – Raspberry Pi 3 Model B, в – BeagleBone Black Rev C, г – Arduino MKR WIFI 1010, д – Arduino NANO Shild без корпуса.

Призначення:

Забезпечують контроль і моніторинг процесів з можливістю дистанційного доступу через Інтернет або локальні мережі. Підтримують MQTT, HTTP, Modbus TCP/IP [19-21].

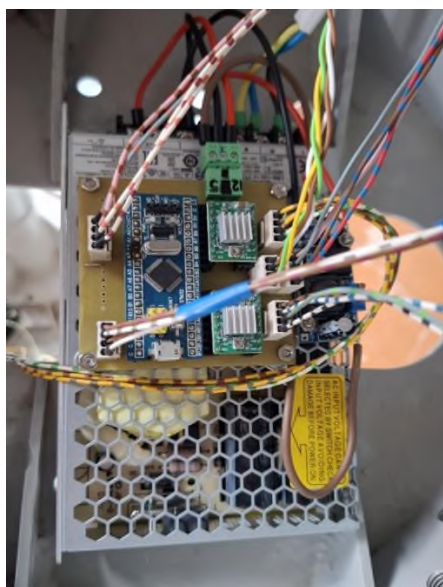
На ринку існує багато аналогів блоків автоматизованого контролю, які можна підібрати залежно від:

- складності системи;
- вимог до надійності;
- масштабу виробництва;
- бюджету;
- вимог до з'єднання з іншими пристроями.

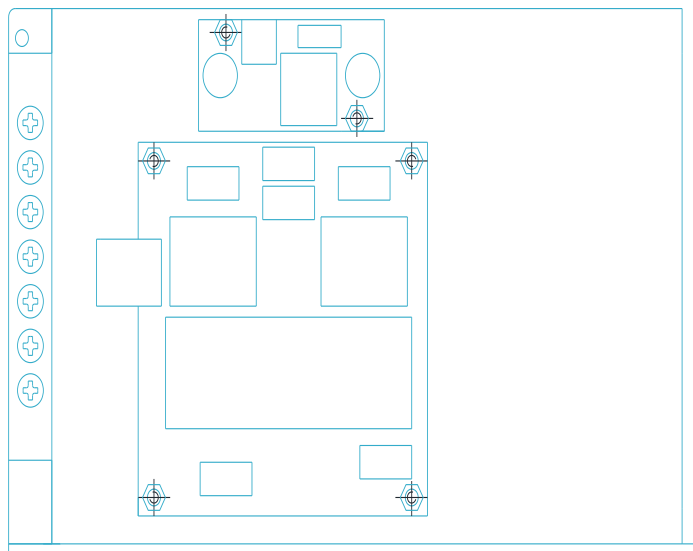
Обираючи блок керування, важливо враховувати сумісність з сенсорами, підтримувані протоколи, можливість програмування та технічну підтримку.

3.3 Розробка блоку керування для системи антенного пристрою

Для забезпечення стабільної та надійної роботи системи керування антенного пристрою нами було розроблено спеціалізований блок керування, який виконує багато важливих функцій.



а)



б)

Рисунок 3.7 – а – Блок керування розміщений на антені, б – креслення блоку керування.

Основними завданнями цього блоку є:

Забезпечення живлення для драйверів керування електродвигунами, які відповідають за орієнтацію антени в просторі;

Живлення давачів кутового положення (енкодерів або потенціометрів), які передають до системи керування інформацію про поточне положення антени;

Забезпечення необхідних рівнів напруги для роботи електронних компонентів системи.

Вибір елементної бази та формування живлення

Для живлення всієї системи було обрано стандартне джерело живлення з напругою 12 В, оскільки воно є поширеним, зручним для інтеграції в мобільні та стаціонарні пристрої, а також забезпечує достатній запас потужності для більшості споживачів.

Однак не всі компоненти можуть працювати безпосередньо від 12 В. Наприклад, мікроконтролери, логічні схеми, сенсори та інші елементи вимагають знижену напругу — зазвичай 5 В. Тому в схемі передбачено встановлення понижуючого перетворювача (DC-DC конвертера)

Застосування понижуючого перетворювача

Понижуючий перетворювач виконує функцію стабілізації та пониження напруги з 12 В до 5 В. Це дозволяє жити такі компоненти:

Мікроконтролер (наприклад, STM32, Arduino, ESP32 або інші);

- Електронні енкодери або потенціометри, які мають обмеження по вхідній напрузі;
- Інтерфейси зв'язку (UART, I2C, SPI), які також потребують 5 В;
- Додаткові сенсори чи модуляторні схеми, якщо передбачено в конструкції.

Типові модулі для пониження напруги: LM2596, MP1584, або більш енергоефективні синхронні перетворювачі [22-25].

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

3.3.1 Вибір давача кутового положення

Сучасні технології автоматизації та робототехніки вимагають високої точності вимірювань, зокрема при визначенні кутового положення різних механізмів. Одним із найефективніших пристроїв для таких завдань є магнітний давач AS5600. Це безконтактний енкодер, який дозволяє визначати абсолютний кут повороту, що робить його ідеальним вибором для застосувань, де потрібна висока точність і надійність

Загальний опис AS5600

AS5600 — це магнітний давач, який визначає кутове положення магніту, розташованого над ним. Він працює на основі ефекту Холла, що дозволяє безконтактно визначати кут повороту в діапазоні 0–360°. Головними перевагами цього пристрою є висока точність, енергоефективність і простота використання завдяки підтримці різних інтерфейсів підключення.

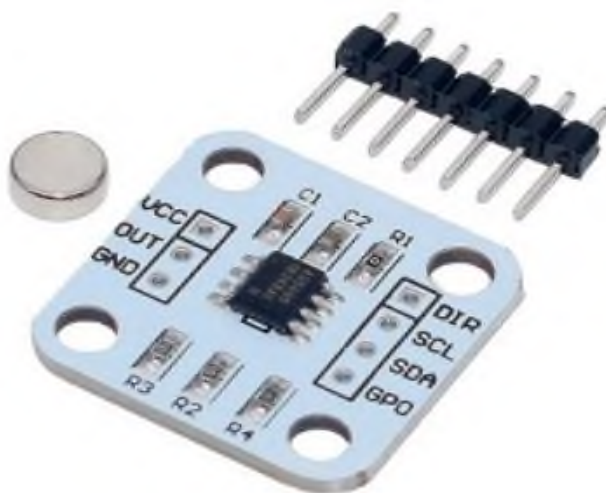


Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд давача кутового положення AS5600

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 088.00.00.000 ПЗ

Арк.

43

Основні технічні характеристики [26]:

- Діапазон вимірювання: 0° – 360° (повний оберт);
- Роздільна здатність: 12-біт (4096 дискретних кроків на оберт);
- Інтерфейси зв'язку: I²C, PWM або аналоговий вихід;
- Напруга живлення: 4,5 - 5V;
- Споживання струму: близько 6 мА в активному режимі;
- Точність: до $0,0879^{\circ}$;
- Стійкість до зовнішніх впливів: пилу, бруду та вібрацій.

Давач працює на основі вимірювання зміни магнітного поля. Постійний магніт, розташований над чутливим елементом AS5600, створює магнітне поле, яке аналізується мікросхемою. Вбудований аналого-цифровий перетворювач перетворює ці дані у цифровий кутовий сигнал, який потім передається через один із підтримуваних інтерфейсів. Підтримує кілька способів підключення, серед яких найбільш зручним є I²C. Це дозволяє зчитувати кут повороту через два дроти (SDA та SCL).

Завдяки своїм характеристикам AS5600 використовується у багатьох сферах:

- Робототехніка – для вимірювання положення механічних елементів;
- Антенні системи – точне визначення кута повороту антен, що особливо важливо у супутниковому зв'язку;
- Електричні транспортні засоби – для управління педалями та рульовими механізмами;
- Автоматизовані заслінки та клапани – точне регулювання положення в промислових системах.

Магнітний давач AS5600 є ефективним рішенням для вимірювання кутового положення, що забезпечує високу точність, безконтактний принцип роботи та простоту інтеграції.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Завдяки своїй надійності він знаходить широке застосування в сучасних технологічних системах, таких як робототехніка, автоматизація та антенні системи.

Види давачів кутового положення

Давачі кутового положення поділяються на кілька основних груп за принципом дії та способом отримання даних. Вони можуть бути абсолютними або інкрементальними, а також розрізнятися за технологією вимірювання кута.

1. Абсолютні давачі



Рисунок 3.9 – Абсолютний давач кута повороту.

Абсолютні давачі видають унікальне значення кута для кожного положення, тобто при кожному включенні вони знають своє точне розташування без необхідності калібрування.

Вони використовуються в системах, де важлива висока точність і стабільність показників незалежно від збоїв у живленні.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Основні типи абсолютних датчиків:

- Оптичні абсолютні енкодери – використовують диск з нанесеними унікальними кодами, що зчитуються світлодіодом і фотодетектором.
- Магнітні абсолютні енкодери – базуються на ефекті Холла або магніторезистивному ефекті, що дозволяє точно визначати положення без механічного контакту.
- Резистивні потенціометри – найпростіший тип абсолютних датчиків, де кут визначається зміною опору змінного резистора.

1. Інкрементальні датчики



Рисунок 3.10 – Інкрементальний датчик кута повороту.

Інкрементальні датчики працюють за принципом підрахунку імпульсів при зміні положення. Вони не зберігають абсолютного значення кута, тому при ввімкненні необхідно виконати калібрування.

Основні типи інкрементальних датчиків:

- Оптичні інкрементальні енкодери – використовують диск із прозорими та непрозорими секторами, світлодіод та фотодетектор для зчитування змін положення.
- Магнітні інкрементальні енкодери – використовують зміну магнітного поля для генерації імпульсів, є менш чутливими до забруднень порівняно з оптичними.

2. Давачі на основі MEMS-технологій

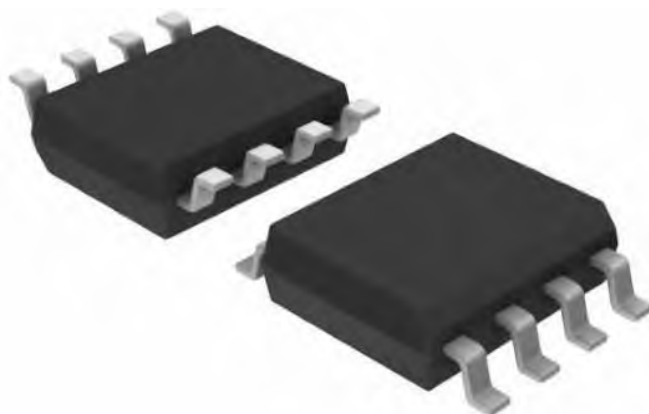


Рисунок 3.11 – Давачі на основі MEMS-технологій

MEMS-давачі (мікроелектромеханічні системи) застосовують мікроскопічні механічні структури для визначення кута на основі змін ємності або інерційних властивостей. Вони широко використовуються в мобільних пристроях, системах стабілізації та автономних механізмах.

3. Гіроскопічні та інерційні давачі



Рисунок 3.12 – Гіроскопічний давач кутового положення.

Ці давачі вимірюють зміну кута за допомогою гіроскопів або акселерометрів. Вони використовуються в аерокосмічній техніці, робототехніці та транспортних системах. Високоточні лазерні та

Змін.	Арх.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 088.00.00.000 ПЗ

Арх.
467

волоконно-оптичні гіроскопи застосовуються у високотехнологічних навігаційних системах.

Вибір способу підключення датчиків кутового положення

Вимірювання кутового положення є важливим завданням у системах автоматизації, управління механізмами та робототехніці. Вибір способу підключення датчиків кутового положення залежить від необхідної точності, швидкості оновлення даних, довжини з'єднання та типу керуючого мікроконтролера. Сучасні датчики можуть мати аналоговий, інкрементальний або цифровий вихідний сигнал, що визначає спосіб їх інтеграції в систему.



Рисунок 3.13 – Підключення датчика у антени “Айзберг”.

Підключення датчика AS5600 до мікроконтролера

Одним із сучасних магнітних датчиків кутового положення є AS5600, який працює на основі ефекту Холла та забезпечує високу точність вимірювань. Він підтримує два основних способи передачі даних: аналоговий (через зміну напруги) та цифровий через інтерфейс I²C.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

При підключенні AS5600 до мікроконтролера через I²C необхідно підключити наступні контакти:

- VCC – живлення (+3,3 В або +5 В)
- GND – загальний провід
- SDA – лінія даних I²C
- SCL – тактова лінія I²C

У випадку використання аналогового виходу підключення здійснюється через вхід аналогово-цифрового перетворювача (ADC) мікроконтролера.

Мікроконтролер для опрацювання даних

Для отримання та обробки даних від AS5600 можна використовувати різні мікроконтролери, такі як Arduino, STM32 або ESP32. Вибір залежить від обчислювальних вимог і комунікаційних можливостей.

- Arduino Uno – підходить для базових задач, має простий інтерфейс для роботи з I²C.
- STM32 – використовується для високошвидкісної обробки даних, підтримує розширені функції енергозбереження.
- ESP32 – має Wi-Fi і Bluetooth, що дозволяє передавати дані дистанційно.

Отримання кутового положення

Щоб отримати кутове положення, необхідно:

1. Ініціалізувати інтерфейс I²C на мікроконтролері.

Відправити запит до AS5600 для отримання поточного значення кута.

2. Прочитати відповідь з давача та перетворити її у градуси або радіани.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

3. Відобразити значення на дисплеї або передати в систему керування.

На практиці для реалізації цієї задачі використовується бібліотека AS5600 для Arduino, яка значно спрощує процес зчитування даних та перетворення їх у коректні одиниці виміру.

Способи кріплення давачів кутового положення

Правильний вибір способу кріплення давачів кутового положення (енкодерів) є критично важливим для точної та стабільної роботи системи автоматизованого керування. Від типу давача, особливостей конструкції механізму та умов експлуатації залежить, який метод монтажу буде оптимальним.

Розглянемо основні способи кріплення таких давачів.

Співвісьне кріплення на вал

- Найпоширеніший метод для еncoderів з обертовим валом.
- Давач встановлюється безпосередньо на вал механізму (двигуна або передавального елемента).
 - Для з'єднання використовуються:
 - Жорсткі муфти — забезпечують пряме передавання обертання;
 - Гнучкі муфти — компенсують незначні осьові або кутові зсуви, зменшують навантаження на підшипники еncoderа.
 - Корпус давача фіксується на жорсткому кронштейні, що виключає його обертання разом із валом.

Безконтактне магнітне кріплення

- Застосовується для давачів, що використовують магнітний принцип роботи (наприклад, AS5600, AS5048, TLE5012).
- Конструктивно складається з двох елементів:
 - Сенсор, змонтований на платі.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

- Постійний магніт, закріплений на обертовому елементі (валу або осі).
- Важливо дотримати відстань між магнітом і сенсором — зазвичай від 0.5 до 2 мм, залежно від моделі.
- Вісь обертання магніта повинна бути перпендикулярною до площини сенсора і точно вирівняна по центру.

Монтаж через адаптер або кронштейн

- У разі неможливості прямого встановлення давача на вісь — використовується механічний перехідник (адаптер).
- Кронштейни виготовляються індивідуально для забезпечення:
 - Вирівнювання осей обертання;
 - Фіксації корпусу давача;
 - Забезпечення стабільного положення у вібраційних або складних умовах.
- Можливе встановлення в горизонтальному або вертикальному положенні.

Вбудоване кріплення в корпус пристрою

- Давач монтується в спеціально передбачену частину корпусу конструкції (наприклад, в отвір або посадочне місце).
- Кріплення здійснюється через різьбові з'єднання або фіксуючі кліпси.

Перевага: захист від механічних пошкоджень, вібрацій та пилу.

Клейове кріплення магніта

- У деяких випадках (особливо в прототипах) магніт кріпиться до вала або осі за допомогою високоякісного клею або епоксидної смоли.
- Забезпечує швидке та міцне кріплення, але потребує точної фіксації під час полімеризації клею.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Не рекомендується для розбірних конструкцій або систем із підвищеним навантаженням.

Вимоги до правильного монтажу

- Точне співвісне вирівнювання давача і обертової частини;
- Забезпечення надійної фіксації без люфтів і зсувів;
- Уникнення механічного перенавантаження на вал або корпус сенсора;
- За потреби — використання прокладок для регулювання висоти/зазору;
- При зовнішньому монтажі — захист від пилу, вологи, магнітних завад.

Правильний вибір способу кріплення давачів кутового положення гарантує точність вимірювання, зменшує зношення компонентів та забезпечує довговічну і безпечну роботу системи. На етапі проєктування варто передбачити регулювання положення давача, щоб мати можливість точно налаштувати його після монтажу.

3.3.2 Вибір елементів керування виконавчими пристроями.

Драйвер для крокового двигуна NEMA 23 HS5628 з енкодером — це пристрій, який керує мотором, забезпечуючи точність позиціонування завдяки зворотному зв'язку від енкодера. Це відрізняє такі двигуни від звичайних крокових, які працюють у відкритому циклі без перевірки реального положення.

Основні особливості драйвера для NEMA 23 HS5628 з енкодером

- Закритий контур керування (Closed Loop):

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Драйвер отримує дані від енкодера і коригує положення двигуна в разі втрати кроків.

- Виключає перегрів і зайве навантаження, бо мотор отримує рівно стільки струму, скільки потрібно для руху.

- Висока ефективність:

- Менше шуму та вібрацій у порівнянні зі стандартними кроковими двигунами.

- Краща швидкодія та стабільність руху.

- Автоматична корекція помилок:

- Якщо через навантаження мотор пропустив кроки, драйвер відстежує це і компенсує помилку.

- Інтерфейси керування:

- Більшість драйверів підтримують Step/Dir інтерфейс (як у стандартних крокових драйверах).

- Деякі можуть мати підтримку Modbus, CAN, UART, що зручно для складних систем.

- Живлення і струм:

- Напруга зазвичай 24–60 В.

- Струм може бути від 3 до 8 А залежно від моделі.

Популярні моделі драйверів для NEMA 23 HS5628 з енкодером

- Leadshine HBS57 (24–50 В, 6 А)

- DMA860H (40–80 В, 7.2 А, підтримує енкодер)

- JMC iHSS57-36 (інтегрований драйвер і мотор)

Такий драйвер добре підходить для застосувань, де критично важлива точність руху — ЧПУ, 3D-принтери, автоматизовані системи.

Кроковий двигун NEMA 23 HS5628 з енкодером працює в системі замкненого контуру (Closed Loop), де драйвер керує мотором на основі зворотного зв'язку. Це дозволяє усунути проблеми, характерні для

відкритих систем керування, зокрема втрату кроків, перегрів і нестабільність руху.

Принцип роботи драйвера для NEMA 23 HS5628 з енкодером.

Драйвер приймає керуючі імпульси та формує відповідний струм у фазних обмотках двигуна. Основна відмінність від звичайного драйвера — наявність зворотного зв'язку від енкодера.

Алгоритм роботи:

1. Контролер передає команди (імпульси Step/Dir або через інтерфейси RS485, CAN, Modbus).
2. Драйвер подає струм на обмотки двигуна, створюючи електромагнітне поле для руху ротора.
3. Енкодер зчитує реальне положення ротора та передає дані в драйвер.
4. Драйвер аналізує різницю між запланованим і фактичним положенням ротора.
5. Якщо є відхилення, драйвер коригує струм для компенсації помилки.

Це робить систему значно стабільнішою, ніж традиційні крокові двигуни у відкритому контурі.

Архітектура системи

Типова система з NEMA 23 HS5628 з енкодером містить:

- Контролер (ЧПУ, Arduino, STM32, PLC)
- Драйвер крокового двигуна з підтримкою енкодера
- Сам двигун NEMA 23 HS5628
- Енкодер (оптичний або магнітний) з роздільною здатністю 1000–

2500

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

PPR

Ключові модулі драйвера

- Силова частина (Н-мости або MOSFET-ключі, які подають струм на обмотки)
- Мікроконтролер (обробляє зворотний зв'язок, коригує помилки, реалізує алгоритми керування)
- Алгоритм PID-регулювання (відповідає за точність позиціонування)
- Комунікаційні інтерфейси (Step/Dir, RS485, CAN, UART)

Переваги замкненого контуру керування

1. Автоматична компенсація помилок.
2. При великих навантаженнях стандартний кроковий двигун може втратити кроки. Драйвер із закритим контуром контролює позицію та коригує її, усуваючи неточності.
3. Вища ефективність енергоспоживання.
4. Відкриті системи завжди подають максимальний струм, тоді як драйвер закритого контуру регулює струм залежно від реального навантаження.
5. Зменшення нагріву і вібрацій.
6. Оптимізація струму дозволяє уникати перегріву, а алгоритми згладжування забезпечують плавність руху без різких стрибків.
7. Вища швидкість і точність.
8. У відкритих системах крокові двигуни втрачають потужність на високих швидкостях. Закритий контур підтримує крутний момент навіть при швидкому обертанні.

Приклади драйверів для NEMA 23 HS5628 з енкодером

Leadshine HBS57:

- Напруга: 24–50 В

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Струм: 6 А макс.
- Інтерфейс: Step/Dir
- PID-регулятор для усунення помилок
- Висока швидкість реакції

JMC iHSS57:

- Інтегрований драйвер + мотор
- Напруга: 24–36 В
- Струм: 4.5 А
- Вбудований алгоритм компенсації помилок

DM860H (аналог Leadshine):

- Напруга: 40–80 В
- Струм: 7.2 А
- Підтримка енкодера, microstepping

Застосування

- ЧПК-фрезери та верстати
- Робототехніка
- 3D-принтери з високою точністю
- Автоматизовані системи позиціювання
- Системи керування антенами

Виробництво крокового двигуна NEMA 23 HS5628 з енкодером — це складний і високоточний процес, що поєднує в собі електротехнічну, механічну та електронну інженерію. Все починається з виготовлення статора — нерухомої частини двигуна, яка містить мідні обмотки. Спочатку з тонких листів електротехнічної сталі вирізають спеціальні пластини, які після цього складають у пакет, формуючи магнітопровід. Ці пластини пресують разом, щоб зменшити втрати енергії та підвищити ефективність.

Після цього на спеціальних верстатах намотують мідний дріт, формуючи котушки, які стануть основою електромагнітного поля двигуна.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Вони проходять імпрегнацію — покриття лаком або епоксидною смолою, що не тільки захищає від перегріву та вологи, а й додає жорсткості всій конструкції.

Паралельно відбувається виготовлення ротора — рухомої частини двигуна. Для цього беруть вісь із загартованої сталі, на яку монтують магнітну систему. Магніти, зазвичай неодимові, розміщують у шаховому порядку, що дозволяє рівномірно розподілити магнітне поле. Для міцності їх приклеюють епоксидним клеєм і додатково фіксують пресуванням. Готовий ротор піддають балансуванню, щоб уникнути вібрацій при роботі.

Далі двигун збирають у корпусі. Його зазвичай виготовляють із легкого, але міцного алюмінієвого сплаву, що забезпечує добру теплопровідність. Вісь ротора встановлюють у підшипники з мінімальним коефіцієнтом тертя, щоб гарантувати плавність обертання та довговічність роботи двигуна.

Особливо відповідальний етап — встановлення енкодера. В залежності від конструкції, це може бути оптичний або магнітний енкодер. Оптичні варіанти працюють за допомогою світлодіода та фотодетектора, які зчитують положення крізь кодований диск.

Магнітні ж використовують холівські давачі, що реєструють зміну магнітного поля. Незалежно від типу, енкодер ретельно калібрують, перевіряючи його точність і коригуючи можливі похибки.

Останнім кроком двигун піддають комплексному тестуванню. Його підключають до тестової системи, перевіряючи точність позиціонування, рівень шуму, максимальні навантаження та нагрівання під час роботи. Тільки після проходження всіх випробувань двигун маркують, упаковують та готують до відправлення замовникам.

Таким чином, кожен двигун NEMA 23 HS5628 з енкодером проходить складний шлях від сировини до високотехнологічного

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пристрою, який забезпечує точне й стабільне керування в ЧПУ-станках, робототехніці, 3D-принтерах та інших системах автоматизації.

Вибір схеми драйвера АСТ DM542



Рисунок 3.14 – Драйвер крокового двигуна.

DM542(Див рис.3.14) належить до 2-фазних гібридних драйверів крокових двигунів. Робоча напруга становить від 18 до 50 В постійного струму. DM542 призначений для всіх типів 2-фазних гібридних крокових двигунів, які мають зовнішній діаметр від 42 до 86 мм і потребують фазового струму менше 4,0 А. DM542 призначений для використання з усіма типами 2- фазного гібридного крокового кроку мотори. Структура схожа на схему сервоуправління і дозволяє двигуну працювати безперебійно і з низьким рівнем шуму і вібрацій [27].

Якщо привід працює з більшою швидкістю, крутний момент утримування та точність положення збільшуються. Драйвер DM542 використовується в середніх і великих цифрових пристроях управління, таких як машини для згинання та ЧПУ, пакувальні машини та в'язальні машини, керовані комп'ютером.

DM542 належить до 2-фазних гібридних драйверів крокових двигунів. Робоча напруга – це від 18 до 50 В постійного струму. DM542 був розроблений для всіх типів 2-фазних гібридних крокових двигунів

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

розроблені, які мають зовнішній діаметр від 42 до 86 мм і фазовий струми потрібно менше 4,0 А. Схема аналогічна схемі сервоуправління та дозволяє його двигун працює безперебійно і з низьким рівнем шуму і вібрації. Якщо диск з вищим Робота зі швидкістю збільшує крутний момент утримування та точність положення. Драйвер DM542 використовується в середніх і великих цифрових пристроях управління, як от. Машини для згинання та ЧПУ, пакувальні машини та комп'ютерне керування.

3.3.3 Вибір крокового двигуна



Рисунок 3.15 – Кроковий двигун (NEMA 23 HS5628).

Кроковий двигун — це тип електричного двигуна, в якому ротор не обертається безперервно, а здійснює обертання на фіксований кут у відповідь на кожен імпульс електричного струму. Таким чином, величина повороту ротора прямо пропорційна кількості поданих імпульсів, а його кутова швидкість визначається частотою імпульсів, помноженою на кут одного кроку.

Кут, на який повертається ротор за один імпульс, залежить від конструкції двигуна і зазвичай становить від кількох до кількох десятків градусів. Залежно від призначення, крокові двигуни можуть працювати як на дуже низьких швидкостях (менше оберту за хвилину), так і на високих — до кількох тисяч обертів за хвилину.

З конструктивної точки зору, кроковий двигун має статор з обмотками збудження та ротор, виготовлений з феромагнітного або постійно магнітного матеріалу. Ротори з магнітного матеріалу забезпечують вищий крутний момент і можуть фіксувати положення навіть при відключеному живленні.

Для точної роботи крокових двигунів використовуються кодуючі пристрої, які повинні функціонувати тривалий час без необхідності технічного обслуговування. Один із таких пристроїв — кодовий давач положення вала (рис. 3.2), що встановлюється на вал двигуна і з'єднується з електронікою частотного перетворювача серводвигуна через дроти. Цей елемент надає точні дані про положення вала, необхідні для високоточного керування. Принцип його роботи базується на фіксації магнітних або оптичних сигналів. Існують два основні типи таких давачів: абсолютні та інкрементальні. Обидва типи застосовують спеціальну електроніку для перетворення механічного кута в електричний сигнал.

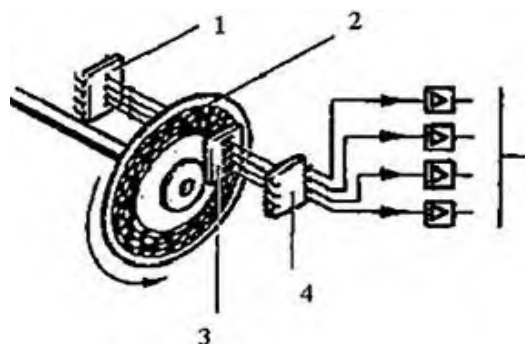


Рисунок 3.16 – Принципова схема енкодера (шифратора):

1. джерело світла; 2. диск шифратора; 3. маска; 4. фото-сенсор.

Переваги

- Кут обертання двигуна прямо залежить від кількості вхідних імпульсів.
- У стані нерухомості двигун зберігає повний крутний момент (за умови живлення обмоток).
- Висока точність позиціонування та повторюваність кроків — якісні моделі мають похибку лише 3–5% на крок, причому ці відхилення не накопичуються.
- Здатність швидко прискорюватися, гальмувати та змінювати напрям обертання.
- Надійність у роботі завдяки відсутності щіток — ресурс двигуна обмежений переважно зносом підшипників.
- Можливість стабільної роботи на дуже низьких швидкостях навіть із безпосереднім навантаженням на вал.
- Широкий робочий діапазон швидкостей завдяки залежності частоти обертання від частоти імпульсів.

Недоліки

- За неправильного керування можливий механічний резонанс.
- Складно забезпечити стабільну роботу на дуже високих обертах.
- Відсутність зворотного зв'язку може призвести до втрати точності позиціонування.
- Споживання електроенергії залишається високим навіть без навантаження.
- Відносно низьке значення питомої потужності.
- Необхідність використання складної системи керування.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В даному стенді для повірки давачів кута повороту використовується кроковий двигун NEMA 23 HS5628 з енкодером (рис 3.17).

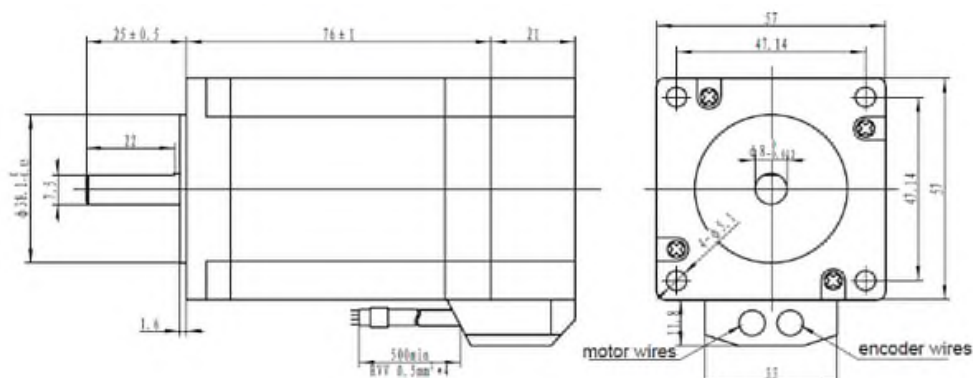


Рисунок 3.17 – Кроковий двигун NEMA 23 HS5628 з енкодером.

Основні параметри крокового двигуна представленні в таблиці (див табл.3.1) [28]

Таблиця 3.1 – Основні параметри крокового двигуна

Ступінчастий кут (deg)	Довжина двигуна (mm)	Номінальний струм (A)	Фазовий опір(ohm)	Фазова індуктивність (mH)
1.8	56	3.0	0.8	2.4
Мінімальний крутний момент (N. cm Min)	Максимальний крутний момент (N. cm Max)	Інерція ротора (H * m/cm ³)	К-сть дротів (№)	Вага мотора(g)
110	3.5	280	4	680

Схема керування біполярним кроковим двигуном

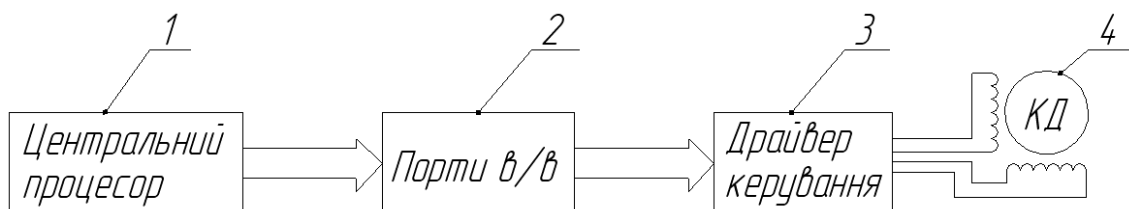


Рисунок 3.18 – Функціональна схема керування біполярним кроковим двигуном.

Опис роботи: центральний процесор (1) формує керуючі сигнали, які передаються через вихідний порт мікроконтролера (2) на драйвер керування (3). Драйвер, у свою чергу, генерує сигнали для керування виконавчим механізмом (4).

Розрахунок крокового двигуна

Згідно з технічним завданням потрібно замінити штатні електродвигуни ДБН приводів по осі АЗ такм сучасними кроковими, застосувати сучасні давачі кутових переміщень, спроектувати систему керування антенною системою .

Кінематична схема модернізованої АС показана на рис. 3.19

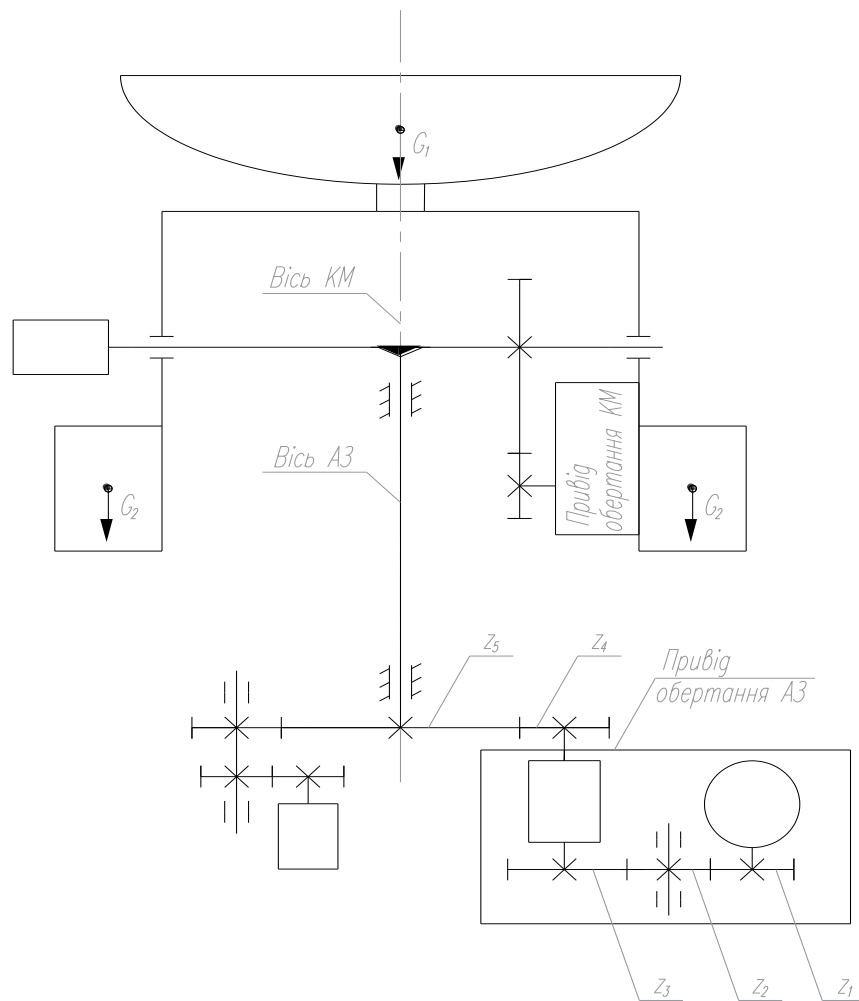


Рисунок 3.19 – кінематична схема АС «Айсберг»

Привід кутомісний (КМ).

Кінематичний розрахунок.

Вихідні дані для проектування приведені в табл. 3.2

Таблиця 3.2 – Вихідні дані для проектування

Номінальна швидкість обертання по осі АЗ	n_{AZ}	$1^\circ/c$
-//- по осі КМ	n_{KM}	$1^\circ/c$
Прискорення по осі АЗ	E_{AZ}	$1^\circ/c^2$
-//- по осі КМ	E_{KM}	$1^\circ/c^2$
Вага рефлектора разом з арматурою кріплення	G_1	100Н
Вага одного балансира	G_2	57,5Н
Діаметри зубчастих коліс	z_1	9,5 мм
	z_2	24 мм
	z_3	43 мм
	z_4	38 мм
	z_5	230 мм

Розрахунок загального передатного відношення приводу обертання $i_{\Sigma KM}$ (рис.1.1)

$$i_{\Sigma KM} = \frac{z_3}{z_1} * i_{ред} * \frac{z_5}{z_4} = \frac{43}{9,5} * 80 * \frac{230}{38} = 2191.$$

Тоді мінімальна швидкість обертання крокового електродвигуна привода $n_{дв}$.

$$\eta_{KM} = \frac{n_{дв}}{i_{\Sigma KM}} \Rightarrow n_{дв} = n_{KM} * i_{\Sigma KM} = 0,166 * 2191 = 363 \text{ } ^\circ/\text{хв}.$$

$$\text{Тут } n_{KM} = 1^\circ/c = \frac{1 * 60}{360} = 0,1666 \text{ } ^\circ/\text{хв}.$$

Прискорення крокового двигуна:

$$E_{дв KM} = E_{KM} * i_{\Sigma KM} = \frac{1 * 2\pi * 2191}{360} = 38 \text{ рад}/c^2$$

Попередньо вибираємо кроковий двигун NEMA 23 HS5628 з наступними технічними характеристиками:

- Момент інерції ротора 9 г*см^2
- Крок $1,8^\circ$;
- Момент $0,06 \text{ Н*м}$;
- Діаметр вихідного вала 5 мм ;
- Висота 32 мм .

Силовий розрахунок приводу (КМ)

Розрахункова схема показана на рис. 3.20.

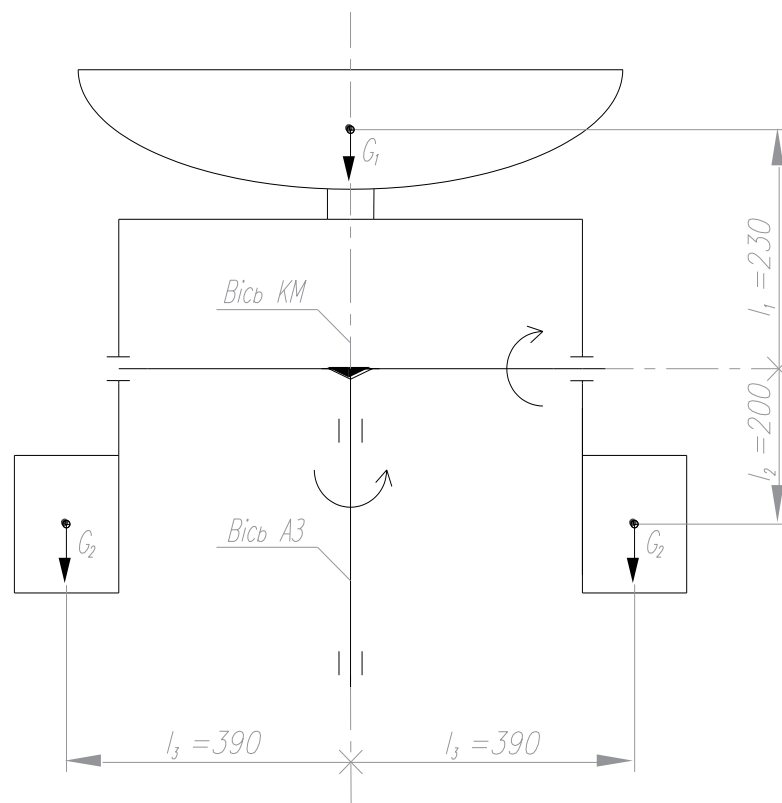


Рисунок 3.20 – Розрахункова схема приводу КМ.

Необхідний крутний момент на валу крокового двигуна приводу КМ розраховується по формулі:

$$M_{\text{дв. км min}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}} + M_{\text{ваг}} + M_{\text{аер}}.$$

Тут $M_{\text{дв. км min}}$ – мінімальний момент навантаження приведений до валу двигуна.

$M_{\text{ст}}$ – статичний момент приведений до валу двигуна, який залежить від моментів тертя в опорах приводу. В даному розрахунку враховується сумарним коефіцієнтом корисної дії опор приводу $\eta_{\text{опор}} = 0,5$.

$M_{\text{ваг}}$ – ваговий момент, який залежить від параметрів антени. Поскільки антена повністю збалансована, то $M_{\text{ваг}} = 0$.

$M_{\text{аер}}$ – аеродинамічний момент, виходячи з того що антену планується експлуатувати під захисним ковпаком, або в приміщенні, то $M_{\text{аер}} = 0$.

$M_{\text{дин}}$ – динамічний момент. Динамічні навантаження потрібно враховувати, коли тривалість перехідних процесів співрозмірна з тривалістю робочого циклу. Динамічний момент, приведений до валу двигуна, при обертовому русі розраховується по формулі:

$$M_{\text{дин}} = i_{\Sigma \text{ км}} * E_{\text{дв. км}}$$

Тут $E_{\text{дв. км}} = 38 \text{ рад/с}^2$ – прискорення валу двигуна.

$i_{\Sigma \text{ км}}$ – сумарний момент інерції всіх рухомих мас, приведений до валу двигуна.

$$i_{\Sigma \text{ км}} = i_{\text{рот. дв.}} + \frac{i_{\text{рефл}}}{i_{\Sigma^2 \text{ км}}} + \frac{i_{\text{баланс.}}}{i_{\Sigma^2 \text{ км}}}.$$

Тут $i_{\text{рот. дв.}} = 9_{\Gamma^* \text{ см}}^2 = 9 * 10^{-7} \text{ кг*м}^2$ – момент інерції попередньо вибраного крокового двигуна.

$I_{\text{рефл.}}$ – момент інерції рефлектора антени відносно осі КМ. В розрахунку рефлектор разом з арматурою кріплення прийнятий у вигляді

матеріальної точки масою $\frac{G_1}{g} = \frac{100}{10} = 10$ кг, розміщеної на відстані $l_1 = 230$ мм від осі КМ, тоді:

$$I_{\text{рефл.}} = \frac{G_1}{g} * l_1^2 = 10 * 0,230^2 = 0,53 \text{ кг*м}^2.$$

$I_{\text{баланс.}}$ – момент інерції одного балансира відносно осі КМ.

Прийmemo балансир у вигляді матеріальної точки масою $\frac{G_2}{g} = \frac{57,5}{10} = 5,75$ кг., що обертається навколо осі КМ на відстані $l_2 = 0,2$ м. Тоді

$$I_{\text{баланс.}} = \frac{G_2}{g} * l_2^2 = 5,75 * 0,2^2 = 0,23 \text{ кг*м}^2.$$

Приведений до валу двигуна сумарний момент інерції всіх рухомих мас:

$$i_{\Sigma \text{ КМ}} = 9 * 10^{-7} + \frac{0,53}{2191^2} + 2 * \frac{0,23}{2191^2} = 58,1 * 10^{-7} \text{ кг*м}^2.$$

Динамічний момент, приведений до валу двигуна:

$$M_{\text{дин}} = 58,1 * 10^{-7} * 38 = 22,08 * 10^{-6} \text{ Н*м.}$$

Мінімальний необхідний крутний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{дв. км min}} = \frac{1}{\eta_{\text{опор}}} * M_{\text{дин}} = \frac{1}{0,5} * 22,08 * 10^{-6} = 44,16 * 10^{-6} \text{ Н*м.}$$

Тут $\eta_{\text{опор}} = 0,5$ – коефіцієнт, що враховує збільшення крутного моменту крокового двигуна обумовленого тертям в опорах приводу.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Вмходячи з того, що номінальний момент попередньо вибраного крокового двигуна $M_{\text{двиг}} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ Н*м} > M_{\text{дв. км min}} = 44,16 \cdot 10^{-6} \text{ Н*м.}$, він може бути застосований в приводі КМ.

Привід азимутальний (АЗ)

Кінематичний розрахунок.

Вихідні дані для розрахунку приведені в табл. 3.2.

Конструкція і вихідні дані приводу обертання по осі АЗ повністю аналогічні кутомірному приводу, тому кінематичні карти приводу АЗ також будуть аналогічними:

- Загальне передатне відношення $i_{\Sigma \text{ АЗ}} = 2191$;
- Номінальна швидкість обертання крокового двигуна по осі АЗ $n_{\text{дв}} = 365 \text{ }^{\circ}\text{б}/\text{хв.};$
- Прискорення осі АЗ $E_{\text{АЗ}} = 0,017 \text{ рад/с}^2.$

Силовий розрахунок.

Розрахункова схема для силового розрахунку азимутального приводу приведена на рис.3.21.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

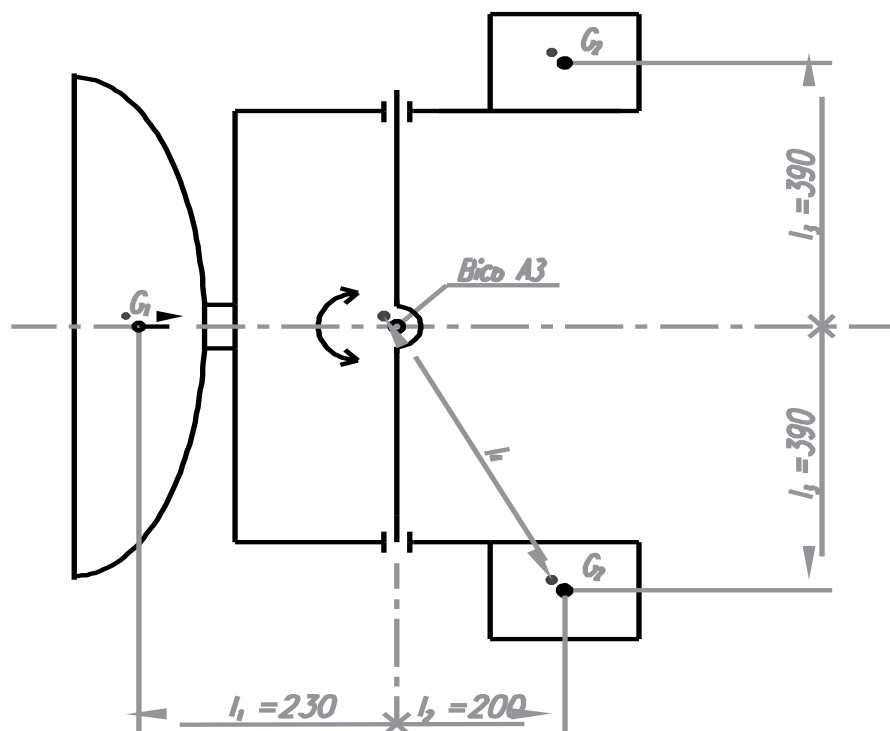


Рисунок 3.21 – Розрахункова схема приводу АЗ.

Мінімальний крутний момент на валу двигуна розраховується по формулі:

$$M_{\text{дв. АЗ min}} = M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}} + M_{\text{ваг}} + M_{\text{аер.}}$$

Враховуючи, що антена збалансована аналогічно з кутомірним приводом враховуємо тільки динамічні навантаження $M_{\text{дин}}$ від інерційних мас.

$$M_{\text{дин}} = I_{\Sigma \text{ АЗ}} * E_{\text{дв. АЗ}}$$

Тут $E_{\text{дв. АЗ}} = 38 \text{ рад/с}^2$ – прискорення по осі АЗ, $I_{\Sigma \text{ АЗ}}$ – сумарний момент інерції всіх рухомих мас, приведений до валу двигуна.

$$I_{\Sigma \text{ АЗ}} = I_{\text{рот. дв}} + \frac{i_{\text{рефл}}}{i_{\Sigma^2 \text{ АЗ}}} + \frac{i_{\text{баланс.}}}{i_{\Sigma^2 \text{ АЗ}}}$$

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$i_{\text{рот. дв.}} = 9_{\Gamma * \text{см}}^2 = 9 * 10^{-7} \text{ кг} * \text{м}^2$ – момент інерції попередньо вибраного крокового двигуна.

$I_{\text{рефл.}}$ – момент інерції рефлектора відносно осі АЗ.

$$I_{\text{рефл.}} = \frac{G_1}{g} * l_1^2 = \frac{100}{10} * 0,230^2 = 0,53 \text{ кг} * \text{м}^2.$$

$I_{\text{баланс.}}$ – момент інерції балансира відносно осі АЗ. Приймаємо балансир у вигляді матеріальної точки розміщеної на відстані $l_4 = \sqrt{390^2 + 200^2} = 438 \text{ мм}$ (рис.3.21.)

$$I_{\text{баланс.}} = \frac{G_2}{g} * l_4^2 = \frac{57,5}{10} * 0,438^2 = 1,1 \text{ кг} * \text{м}^2.$$

Приведений до валу двигуна сумарний момент інерції всіх рухомих мас:

$$i_{\Sigma \text{ АЗ}} = 9 * 10^{-7} + \frac{0,53}{2191^2} + 2 * \frac{1,1}{2191^2} = 12,39 * 10^{-7} \text{ кг} * \text{м}^2.$$

Динамічний момент, приведений до валу двигуна:

$$M_{\text{дин}} = 12,39 * 10^{-7} * 38 = 470,82 * 10^{-7} \text{ Н} * \text{м}.$$

Мінімальний необхідний крутний момент на валу двигуна:

$$M_{\text{дв. АЗ min}} = \frac{1}{\eta_{\text{опор}}} * M_{\text{дин}} = \frac{1}{0,5} * 470,82 * 10^{-7} = 94,16 * 10^{-7} \text{ Н} * \text{м}.$$

Тут $\eta_{\text{опор}} = 0,5$ – коефіцієнт, що враховує втрати та тертя в опорах приводу.

Оскільки , крутний момент крокового двигуна, прийнятого для кутомісного приводу $M_{\text{двиг}} = 6 * 10^{-2} \text{ Н} * \text{м} > M_{\text{дв. АЗ min}} = 94,16 * 10^{-7} \text{ Н} * \text{м}.$,

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

то такий двигун може бути застосований і для азимутального приводу.

3.4 Опис кріплення конструкцій

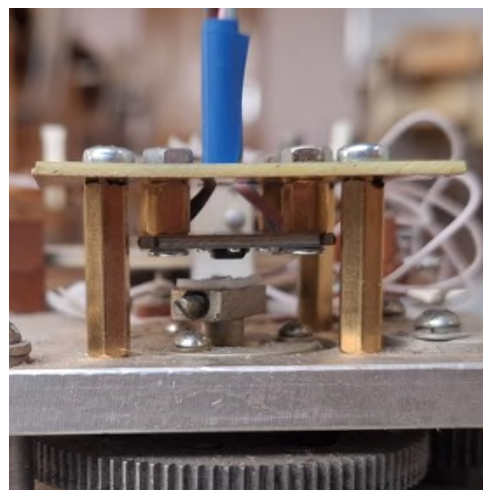
Конструкція системи керування антенною установкою включає декілька функціональних елементів, серед яких: блок керування, датчі кутового положення, привід (кроковий двигун), а також виносний пульт керування. Кожен з компонентів потребує ретельного проєктування та надійного закріплення для забезпечення стабільної роботи всієї системи.

Кріплення датчів кутового положення

Для зчитування кута повороту антени використовуються датчі кутового положення. В нашому випадку ми використали магнітний датч AS5600 який змонтували на друковану плату і встановили співвісно з магнітом, який було закріплено за допомогою високоякісного клею на обертаючому валі. Також важливо дотримати зазор між магнітом і сенсором в межах, рекомендованих виробником (як правило, від 0.5 до 2 мм). Відхилення від цього діапазону може спричинити похибки в показах.



а)

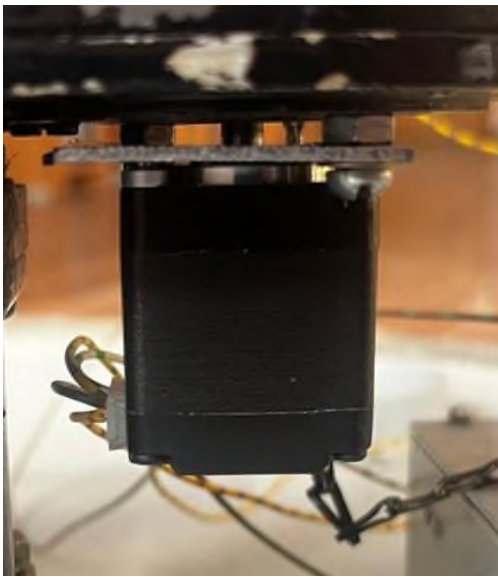


б)

Рисунок 3.22 а,б – Датчі кутового положення AS5600 прикріплені до антени

Кріплення крокового двигуна

Кроковий двигун виконує функцію приводу для точного позиціонування антени. Його монтаж здійснюється на жорсткій пластиковій панелі, виготовленій згідно з отвором фланця двигуна. Кріплення проводиться за допомогою гвинтів та шайб із дотриманням осевого центрування, щоб уникнути дисбалансу або перекосів під час роботи.



а)



б)

Рисунок 3.23 а,б – Двигуни NEMA 23 HS5628 прикріплені до антени

Кріплення контролера керування

Контролер керування розміщується зверху над блоком керування і закріплюється на спеціальних монтажних стійках. Ці стійки закріплюються за допомогою гвинтів з відповідними шайбами для забезпечення надійності, вібраційної стійкості та електричної ізоляції плати від металевих частин корпусу.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

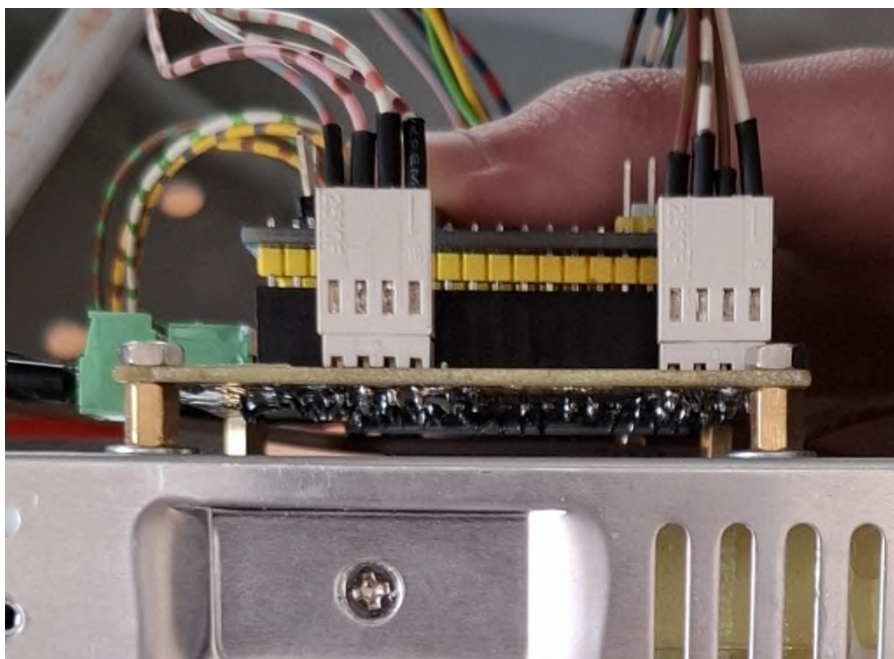


Рисунок 3.24 – Контроллер керування закріплений на блокові керування

Конструкція виносного пульта керування

У системі передбачено виносний пульт, який дає змогу здійснювати ручне керування антенною установкою.



Рисунок 3.25 – Виносний пульт керування

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 088.00.00.000 ПЗ

Арк.

73

Конструктивно пульт являє собою компактний корпус, у якому розміщено такі основні елементи:

- OLED Дисплей, який відображає поточне кутове положення антени, напрям руху, а також задану або поточну швидкість обертання;
- Двохосьовий аналоговий джойстик, який забезпечує керування переміщенням антени у горизонтальній і вертикальній площинах;
- Кнопки або енкодери — за потреби — для додаткових функцій (наприклад, зупинка, калібрування, зміна режиму керування).

Живлення пульта здійснюється через дротове підключення до основного блоку керування.

Конструкція всіх елементів системи розроблена з урахуванням зручності монтажу, надійності в експлуатації та ергономіки користування. Правильний вибір способів кріплення давачів і виконавчих механізмів є критичним для досягнення високої точності позиціонування антени та стабільної роботи всієї системи в реальному часі.

3.5 Побудова математичної моделі системи слідування

Завдання, які вирішує система, котра контролює дотримання певної робочої характеристики технічного об'єкта на визначеному рівні, полягають у забезпеченні зміни регульованої координати згідно з керуючим впливом, який надходить на вхід системи. У найпростішому варіанті слідууючу систему можна розглядати як підсилювач потужності, якість функціонування котрого визначається точністю відтворення регульованою координатою керуючого впливу.

Нехай передавання руху від виконавчого механізму до навантаження відбувається через механічні пристрої. У системах стеження з невеликою потужністю, у переважній більшості випадків, можна припустити, що вали та зубчасті колеса володіють надзвичайно великою

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

твердістю, а застосування спеціальних механізмів, таких як розрізні шестерні, повністю унеможлиблює появу люфтів. В механічних передачах потужних систем, виникнення пружних деформацій та зазорів у зубчастих зачепленнях є неминучим. Пристрої для усунення люфтів іноді використовують і в системах з низькою потужністю. Проте це незмінно пов'язано зі значним ускладненням конструкції та збільшенням статичних моментів.

Вплив люфтів та пружних деформацій на функціонування системи зростає пропорційно до величини моменту інерції навантаження. Окрім цього, в багатьох слідуючих системах, зокрема, в системах радіотехнічних пристроїв (антенні системи), маніпуляторів, механізмах стрічкопротягувальних пристроїв та інших подібних, момент інерції робочого інструменту є величиною змінною. Вона залежить або від значення власної регульованої координати, або від координати системи, яка переміщує навантаження відносно інших осей.

Суттєвий вплив на динамічні характеристики системи також здатні справляти наступні чинники:

- момент сухого тертя у підшипниках валів, сальникових ущільненнях, зубчастих зачепленнях;

- момент в'язкого тертя, викликаний, скажімо, опором переміщенню зубчастих коліс у масляному середовищі;

- аеродинамічний момент, що виникає внаслідок протидії повітряного середовища руху робочого інструменту.

Як правило, зазначені аспекти мають розкиданий характер.

У більшості практичних завдань доцільно використовувати декілька виконавчих двигунів, що працюють безпосередньо на єдиний вал або за посередництвом механічного диференціалу. Це значно ускладнює кінематичну схему механічної трансмісії. Відтак, механічна передача та

навантаження постають складною нелінійною динамічною системою з розподіленими і мінливими параметрами.

Загальні поради при аналізі та синтезі слідкуючих систем, а також у процесі визначення їх енергетичних характеристик:

доцільно виокремити механічну передачу та навантаження в окремий елемент – об'єкт регулювання;

у ході визначення енергетичних параметрів системи момент інерції обертових деталей виконавчого механізму доцільно віднести до моменту інерції обертових частин механічної передачі.

Відтак, надалі під об'єктом регулювання розумітиметься сукупність навантаження та механічної передачі.

У більшості практичних сценаріїв розподілений характер моментів сухого та в'язкого тертя, а також моментів інерції об'єкта регулювання не справляє істотного впливу на показники якості регулювання. За таких обставин зазначені параметри дозволяється замінити еквівалентними, що мають зосереджений характер. Відтак, якщо не зазначено інакше, допускається припущення, що на об'єкт регулювання діють зосереджені моменти опору та збурюючі впливи. Моменти, що впливають на об'єкт регулювання, можуть бути класифіковані на окремі групи згідно їх зв'язку зі зміною регульованої координати.

До першої групи слід зарахувати динамічні моменти, величина яких перебуває у прямо пропорційній залежності від прискорення та моментів інерції мас, що рухаються.

До другої групи належать моменти опору, дія яких постійно спрямована проти швидкості переміщення об'єкта регулювання, а також моменти, що виникають внаслідок сухого і в'язкого тертя.

У третю групу входять моменти, напрям дії яких не залежить від напрямку зміни координат об'єкта регулювання. Цю групу моментів

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прийнято називати збурюючими моментами (наприклад, момент від впливу вітру – вітровий момент – і т.п.).

Розглянемо визначальні властивості згаданих вище ситуацій.

При дослідженні точності віддпраювання механізмів спроектованої системи були враховані наступні параметри:

Динамічний момент антени прямо в залежності від прискорення та моменту інерції мас.

$$M(t) = Jp^2\alpha_n(t)$$

де $p^2\alpha_n(t)$ — прискорення об'єкта регулювання ($p \rightarrow \frac{d}{dt}$) ;

J — момент інерції об'єкта регулювання.

Момент інерції відносно осі обертання тіла, що проходить через його центр тяжіння, обчислюється як сума добутків мас окремих елементів тіла на квадрат відстані від центрів їх тяжіння до осі обертання, отже:

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2$$

Момент інерції тіла з хитрою формою обчислюється як сума моментів інерції всіх його складових частин, відносно тієї самої осі обертання. Для цього, перш за все, знаходимо моменти інерції кожної частини, взявши за вісь ту, що проходить крізь її центр ваги та паралельна загальній осі обертання, а вже потім, застосовуючи формулу,

$$J = \sum_{i=1}^n J_i + m_i r a_i^2 \quad (3.1)$$

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначаємо момент інерції цілої конструкції.

У цьому випадку J_i — це момент інерції окремого складника тіла відносно осі, що проходить крізь його центр ваги; a_i — це дистанція між віссю обертання окремого складника, котра перетинає його центр мас, і загальною віссю обертання. Остання вісь паралельна попередній.

Під час визначення енергетичних характеристик системи стеження, а також при її проектуванні, необхідно брати до уваги моменти інерції всіх складових об'єкта регулювання. Для цього моменти інерції приводять до одного валу. Зазвичай це вал двигуна або вал об'єкта регулювання.

На рис. 3.26, а представлено схематичне зображення об'єкта регулювання слідової системи (рис. 3.26, а) - опорно-поворотні пристрої радіотехнічних систем, які мають азимутальну компоновку (рис. 3.26, б) та компоновку типу карданового підвісу (рис. 3.26, в).

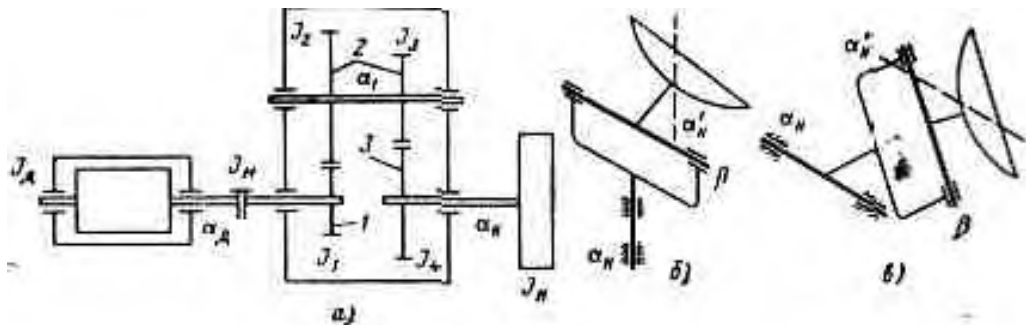


Рисунок 3.26 – Об'єкт керування

Зневажаючи моменти інерції валів, визначимо кінетичну енергію механічної системи:

$$A = \frac{1}{2}J_d(pa_d)^2 + \frac{1}{2}J_m(pa_d)^2 + \frac{1}{2}J_1(pa_d)^2 + \frac{1}{2}J_2(pa_1)^2 + \frac{1}{2}J_3(pa_1)^2 +$$

$$+ \frac{1}{2} J_4 (pa_n)^2 + \frac{1}{2} J_n (pa_n)^2, \quad (3.2)$$

де $J_1, J_2, \dots$ — моменти інерції окремих елементів механічної системи; $pa_1, pa_n, \dots$ — кутові швидкості окремих елементів механічної системи;

J_d, J_m, J_n — моменти інерції відповідно виконавчого двигуна, муфти і робочого інструмента (навантаження);

pa_d — кутова швидкість виконавчого двигуна, $(p \rightarrow \frac{d}{dt})$.

Розглянуту механічну конструкцію можливо замінити маховим колесом, що має таку ж кінетичну енергію. Прискорення цього колеса дорівнює прискоренню кожного з валів системи, наприклад, вала двигуна, отже:

$$A = \frac{1}{2} J'_\Sigma (pa_d)^2 \quad (3.3)$$

З рівностей (3.2) і (3.3) випливає, що

$$J'_\Sigma (pa_d)^2 = (J_d + J_m + J_1) (pa_d)^2 + (J_2 + J_3) (pa_1)^2 + (J_4 + J_n) (pa_n)^2$$

звідси отримуємо:

$$J'_\Sigma = J_d + J_m + J_1 + \frac{1}{i_1^2} (J_2 + J_3) + \frac{1}{i_2^2} (J_4 + J_n), \quad (3.4)$$

де $i_1 = \frac{pa_d}{pa_1}, i_2 = \frac{pa_d}{pa_n}$, — передавальні числа між валом двигуна і відповідними валами механічної системи.

Момент інерції J , що в подальшому будемо іменувати зведеним моментом інерції, можливо розглядати як момент інерції уявного маховика

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

на валу виконавчого двигуна, котрий володіє тією ж кінетичною енергією, що й уся механічна система. За таких обставин допустимо вести мову про зведення інерційних мас системи до валу двигуна.

У схожий спосіб можливо здійснити зведення моментів інерції окремих складових системи до кожної з її осей обертання. Під час зведення моменту інерції повільного вала до швидкісного, величину моменту інерції ділять на квадрат передавального числа від швидкісного вала до повільного. А при зведенні моменту інерції швидкісного вала до повільного, значення моменту інерції множать на квадрат передавального числа.

Можна визначити певну категорію систем стеження, для яких момент інерції демонструє мінливість: або з плином часу, або в залежності від значення регульованих координат (наприклад, момент інерції вантажу в стрічкопротягувальних механізмах).

Більш комплексну залежність моменту інерції навантаження спостерігаємо у маніпуляторів та радіотехнічних засобів спостереження, які мають два та більше ступені вільності.

Зрозуміло, що якщо момент інерції робочих інструментів щодо осей β залишається незмінним, моменти інерції стосовно осей α_n будуть варіюватися, враховуючи значення кутів β . Більше того, коливається момент інерції відносно осей α_n складним нелінійним чином, адже, по-перше, момент інерції робочого інструменту стосовно осі α_n' , паралельної осі α_n та не проходить крізь центр тяжіння навантаження змінюється нелінійно (у випадку, коли робочий інструмент не кулеподібний та щільність в його об'ємі не постійна), і по-друге, з формули (3.1) видно, що момент інерції системи залежить від квадрата відстані між осями. Коливання моменту інерції J_n , які є суттєвими, вимагають врахування цієї зміни і при визначенні енергетичних показників системи, і при проектуванні коригуючих пристроїв.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Момент в'язкого тертя прямо пропорційний кутовій швидкості вала та протилежний їй за напрямком. Формула для визначення моменту в'язкого тертя:

$$M_{\text{в.т}}(t) = k_{\text{в.т}} \rho a_{\text{н}}(t) \quad (3.5)$$

де $k_{\text{в.т}}$ — коефіцієнт в'язкого тертя.

Коефіцієнт в'язкого тертя зумовлюється двома чинниками: в'язкістю рідини, що оточує компоненти пристрою, та конструкцією самих цих компонентів. Необхідно пам'ятати, що показник $k_{\text{в.т}}$ зазнає змін під впливом температури робочого середовища, адже температура безпосередньо впливає на в'язкість.

Відтак, у ситуаціях, коли момент в'язкого тертя співмірний з показниками інших моментів, що впливають на об'єкт, рекомендовано вибір мастильного матеріалу, коефіцієнт в'язкості котрого демонструє незначну залежність від температури. У разі неможливості реалізувати це, здійснюють нагрівання змазки, підтримуючи її температуру у досить вузькому діапазоні. Момент в'язкого тертя набуває значущості переважно в редукторах, що заповнені мастилом. В інших компонентах об'єкта регулювання, як правило, можна нехтувати впливом моментів в'язкого тертя. За своєю сутністю до моменту в'язкого тертя наближені аеродинамічні моменти, обумовлені власним переміщенням об'єкта регулювання за відсутності вітру.

При проведенні обчислень, доцільно звести всі моменти в'язкого тертя до єдиного валу, зокрема, валу двигуна. Припускаючи відсутність втрат у механізмі, то

$$M'_{\text{в.т}}(t) \rho a_{\text{д}}(t) = \sum_{i=1}^n M_{\text{в.т}i}(t) \rho a_i(t),$$

де $M_{\text{вті}}(t)$ — момент в'язкого тертя в i -й ланці механізму; $M'_{\text{вті}}(t)$ — еквівалентний момент в'язкого тертя, приведений до вала двигуна.

За умови, що коефіцієнт в'язкого тертя однаковий для всіх елементів механізму, можна записати

$$M'_{\text{вті}}(t) = \sum_{i=1}^n M_{\text{вті}}(t) \frac{pa_i(t)}{pa_d(t)} = \sum_{i=1}^n k_{\text{вті}} \frac{pa_d(t)}{i_i^2}$$

Момент сухого тертя, здебільшого, приймається як такий, що не залежить від швидкості, та направлений у протилежний бік. Втім, це припущення працює лише для однорідних матеріалів, за умови специфічної обробки поверхонь. У широкому сенсі, момент сухого тертя є складною залежністю від швидкості. Якщо прийняти, що момент сухого тертя не залежить від швидкості, то

$$M_{\text{ст}} = |M_{\text{ст}}| \text{sign}(pa_n(t)) \quad (3.6)$$

У початковій точці координат можуть з'являтися пікові величини моменту сухого тертя, спровоковані тертям спокою. Під час розрахунку енергетичних характеристик системи, ними нехтують. Досліджуючи динаміку слідкуючих систем, зокрема плавність їх функціонування в системах, де домінують статичні моменти, є сенс враховувати ці піки. Найбільш ефективним способом є використання аналогових моделей.

В об'єктах регулювання слідкуючих систем, момент сухого тертя досягає найбільшого значення у сальниках редуктора, особливо за умови наявності мастила, а також в опорах навантаження об'єкта регулювання. Ці моменти зазвичай становлять 90–95% від сумарного значення моменту сухого тертя.

При зведенні статичних моментів до визначеної осі регулювання об'єкта, припускають, що втрати в передавальному механізмі відсутні.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

Таким чином,

$$M'_{c\tau}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i_i} M_{c\tau i}(t) pa_i(t)$$

Враховуючи, що $\frac{pa_d(t)}{pa_i(t)} = i_i$, отримаємо

$$M'_{c\tau}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i_i} M_{c\tau i}(t)$$

Момент незбалансованості зумовлений відмінністю центру ваги рухомих складових вантажу та центру його обертання (розгойдування). Коли відстань від центру ваги вантажу до центру його обертання залишається незмінною, момент незбалансованості визначається лише його позицією. Зазвичай, зміни моменту незбалансованості $M_{нр}$ мають косинусоїдальний вигляд (3, а), тобто

$$M_{нр}(t) = Pl \cos a_n(t), \quad (3.7)$$

де P — вага рухомих компонентів робочого блоку; l — віддаль центру ваги рухливих частин робочого блоку від центру хитання.

Виокремлюється конкретний клас об'єктів регулювання, у яких відстань від центру ваги навантаження до центру обертання варіюється відповідно до його поточного положення. До таких систем можливо віднести маніпулятори, радіотехнічні спостережні пристрої, що мають два та більше ступені свободи. У даних системах зміна моменту незбалансованості має складніший характер та визначається добутком тригонометричних функцій від кутів повороту навантаження. Як

ілюстрацію можна навести двовісні системи, представлені при розгляді моментів інерції об'єктів регулювання.

У потужних системах стеження, дисбаланс здатен сягати значних величин. Для його послаблення передбачають систему противаг. Але в цьому випадку зростає момент інерції об'єкта регулювання, отже, при виборі противаг важливо враховувати величину моменту інерції системи.

До наближення нерівноваги, існує так званий *шарнірний момент* $M_{\text{ш}}(t)$, величина якого визначається кутом повороту навантаження: $M_{\text{ш}}(t) = k_{\text{ш}} a_{\text{н}}(t)$, де $k_{\text{ш}}$ — коефіцієнт шарнірного моменту. Шарнірний момент виникає, скажімо, в кермових механізмах, а також у кривошипно-шатунних механізмах різних типів. Окрім вищезазначених моментів, на об'єкт управління здатні впливати моменти специфічного характеру, як-от, наприклад, вітровий момент.

Вітровий момент визначається площею парусності об'єкта, відстанню до центру крену та відносною швидкістю вітру. Вітровий потік формується з постійної швидкості географічного вітру, змін щодо середнього географічного вітру (математичного сподівання) та вітру, спричиненого переміщенням об'єкта.

Зміна середньої швидкості географічного вітру в залежності від висоти підкоряється логарифмічному закону:

$$U_h = U_{h_0} \frac{\ln \frac{h}{a}}{\frac{h_0}{a}}$$

де U_{h_0} — швидкість вітру на висоті h_0 ; a — параметр «шорсткості» (висота, де середня швидкість вітру близька до нуля).

Зміна швидкісного напору Q по висоті підкоряється квадратичному закону, тобто

$$Q = Q_0 \frac{\ln^2 \frac{h}{a}}{\ln^2 \frac{h_0}{a}}$$

де $Q = c \frac{\rho}{2} U_{h_0}^2$ — швидкісний напір на висоті h_0 ; ρ — щільність повітря; c — коефіцієнт аеродинамічної сили.

Останній параметр залежить від форми та розмірів дзеркала і визначається шляхом експериментальних випробувань. Наприклад, в [29] наведено оцінки значення аеродинамічного коефіцієнта, отримані в аеродинамічній трубі, з урахуванням різного взаємного розташування дзеркала антени та напрямку горизонтального вітрового потоку.

Важливою характеристикою вітрового потоку є його поривчастість. *Коефіцієнт поривчастості* визначається відношенням максимальної швидкості вітрового потоку в пориві до середньої швидкості за «характерний проміжок», тобто $k = U_{h \max} / U_{h \text{ сер.}}$.

За типовий період часу на морі, для прикладу, беруть напівперіод розгойдування судна. Зі зростанням швидкості вітру цей показник зменшується. Скажімо, за сили вітру 6 балів коефіцієнт поривчастості $k = 1,6$, при силі вітру 12 балів $k = 1,3$. З підвищенням висоти коефіцієнт поривчастості знижується, однак важливо пам'ятати, що цей коефіцієнт визначає відносну величину, а не абсолютну.

Можна припустити, що пориви вітру підлягають нормальному закону розподілу, а випадкова компонента динамічного тиску Q_n обчислюється за формулою:

$$Q_n = m Q_i$$

де $m = \alpha \frac{a}{Q}$ — коефіцієнт пульсацій вітрового тиску;

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

Q — середній динамічний тиск; σ — стандартне відхилення кривої розподілу пульсацій вітрового тиску; α — кратність стандартного відхилення, зазвичай береться в межах 2-3.

За вказаних параметрах а коефіцієнт пульсацій $m = 0,25 + 0,35$ і випадкова складова динамічного тиску

$$Q_n = (0,25 + 0,35)Q \quad (3.8)$$

Сумарний момент від вітрового потоку визначиться рівністю

$$M_b(t) = kSl(Q + Q_n + Q_d) \quad (3.9)$$

де k — коефіцієнт потокозчеплення; S — площа об'єкта управління; l — відстань від геометричного центру об'єкта управління до центру обертання; Q_d — швидкісний тиск від власного руху об'єкта управління.

Таким чином, **математичну модель системи** можна зобразити як умову рівноваги моментів -- моменту приводу, з одного боку, та суми моментів, спрямованих на виконання цільової дії та на подолання небажаних впливів. Як вже згадувалось, загалом до них відносяться:

- моменти інерції (приведений момент інерції),
- моменти в'язкого тертя (приведений момент в'язкого тертя),
- моменти сухого тертя (приведений момент сухого тертя),
- момент незбалансованості,
- шарнірний момент,
- вітряний момент.

Вплив люфтів у зубчастих передачах на управління антеною. Специфічною рисою електроприводів, у яких є зубчасті передачі (ЗП), є присутність люфтів. Зокрема, це викликано технологічними відхиленнями

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

під час виготовлення складових зубчастої передачі. З плином часу, внаслідок зношення, ці люфти здатні збільшуватися, що, зазвичай, веде до посилення їхнього негативного впливу на роботу приводу. Особливо негативно люфти впливають на характеристики електромеханічних систем, коли поєднуються з пружними складовими.

Оскільки в механічних передачах сукупний момент інерції складників передачі, приведений до валу об'єкта, здебільшого не перебільшує 8...10% від моменту інерції об'єкта [30], ним нерідко нехтують. У першому наближенні подібні передачі розглядають як єдину найпростішу ланку, що складається з безінерційного пружного елемента та інерційних мас, сполучених між собою через люфтовий елемент.

Щодо конкретної ситуації, при створенні математичної моделі системи спочатку необхідно з'ясувати наступне:

1. Які з перелічених чинників значно впливають на процеси, що в ній відбуваються (вагомість впливу оцінюється точністю відтворення моделлю характеристик системи, попередньо заданих користувачем);
2. Які параметри системи необхідні для опису цих факторів (вони можуть бути отримані з вимірювань, табличних даних або обчислень, точність виконання яких також потрібно враховувати);
3. Враховуючи п.1, записати формули для розглянутих моментів, від яких залежать процеси в системі;
4. Записати рівняння рівноваги між приводними моментами та моментами опору;
5. Перевірити відповідність розмірностей членів, що увійшли до записаного рівняння.
6. Перетворити отримане рівняння до канонічного вигляду (звичайного диференціального рівняння n -го порядку, або рівняння стану - системи диференціальних рівнянь).

Методи вивчення розробленої математичної моделі системи визначаються метою, задля якої здійснювалось моделювання. описують математичну модель.

Важливим фактором у забезпеченні адекватного функціонування слідкуючої системи є налаштування зворотнього зв'язку для корекції керуючого вхідного сигналу. А важливим елементом ланки зворотнього зв'язку є давач кутового переміщення. В розглянутій системі в ролі такого давача використано 12-бітний безконтактний потенціометер AS5600 (рис.3.27 а, функціональна схема якого показана на рис. 3.27 б)

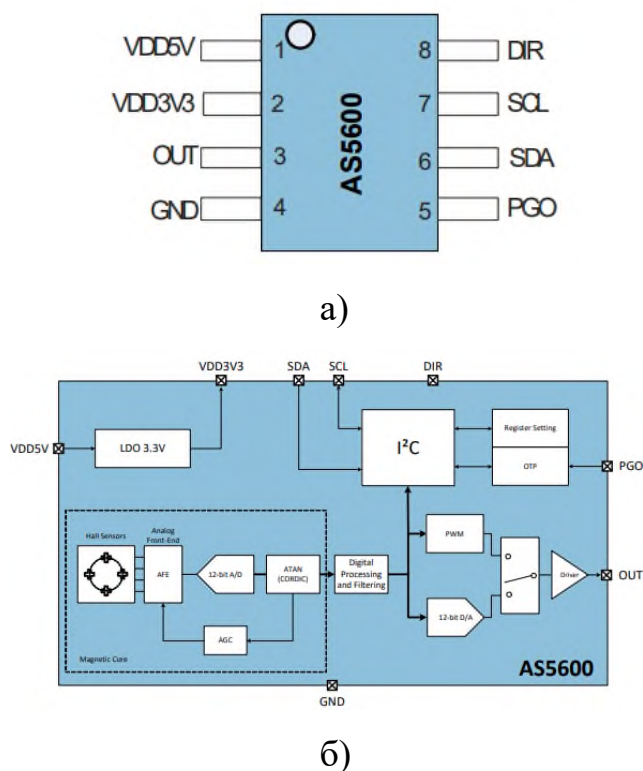


Рисунок 3.27 – AS5600 (а) і його функціональна схема (б)

При закріпленні давача на поворотному пристрої зміна кутового положення фіксується за зміною вихідного потенціалу в результаті ефекту Холла:

$$E = \frac{RBI}{\delta} \cos \alpha$$

де E – вимірювана напруга, B – індукція створеного магнітного поля, I – робочий струм, δ – товщина індикаторної пластини, R – фізична константа.

При виконанні обчислень в подібних цифрових системах, яким властива обмеження ресурсів пам'яті і можливості виконання арифметичних операцій з плаваючою комою, надають перевагу алгоритмам, які можна реалізувати в двійковій системі числення виключно через операції додавання і зсуву регістрів – що відповідає діленню або множенню на 2 в цілій степені. Такі дії можна реалізувати за допомогою алгоритмів групи CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) [31] – ітераційних схем послідовного наближення при обчисленні складних функцій простими операціями, що надаються для застосування у системах із відносно невеликими обчислювальними ресурсами, а також для апаратної реалізації. В нашому випадку для знаходження величини кута слід апаратно обчислити значення функції арккосинуса. Ітераційна процедура реалізована за основі алгоритму CORDIC за схемою:

$$\begin{aligned}\delta_i &= 1, \text{ якщо } X_i < T_0 \text{ і } \delta_i = -1, \text{ якщо } X_i \geq T_i \\ X_{i+1} &= X_i - \delta_i Y_i 2^{-i} \\ Y_{i+1} &= Y_i + \delta_i X_i 2^{-i} \\ Z_{i+1} &= Z_i - \delta_i \tan^{-1}(2^{-i}) \\ T_{i+1} &= T_i + T_i 2^{-i}\end{aligned}\tag{3.10}$$

при початкових умовах:

$$T_0 = \cos \alpha, X_0 = 1, Y_0 = 0, Z_0 = 0$$

Для забезпечення оптимального режиму роботи пристрою важливим є налаштування мікроконтролера на мінімальну кількість

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ітераційних операцій за якої дотримується задана точність в обчисленні кута повороту.

Дослідження обчислювальних характеристик імплементованого в давачі алгоритму за ітераційною схемою (3.26) показує, що потрібної точності можна досягти в межах семи ітераційних процедур, однак лише в обмеженому діапазоні вимірювання кута, як показано на рис. 3.28.

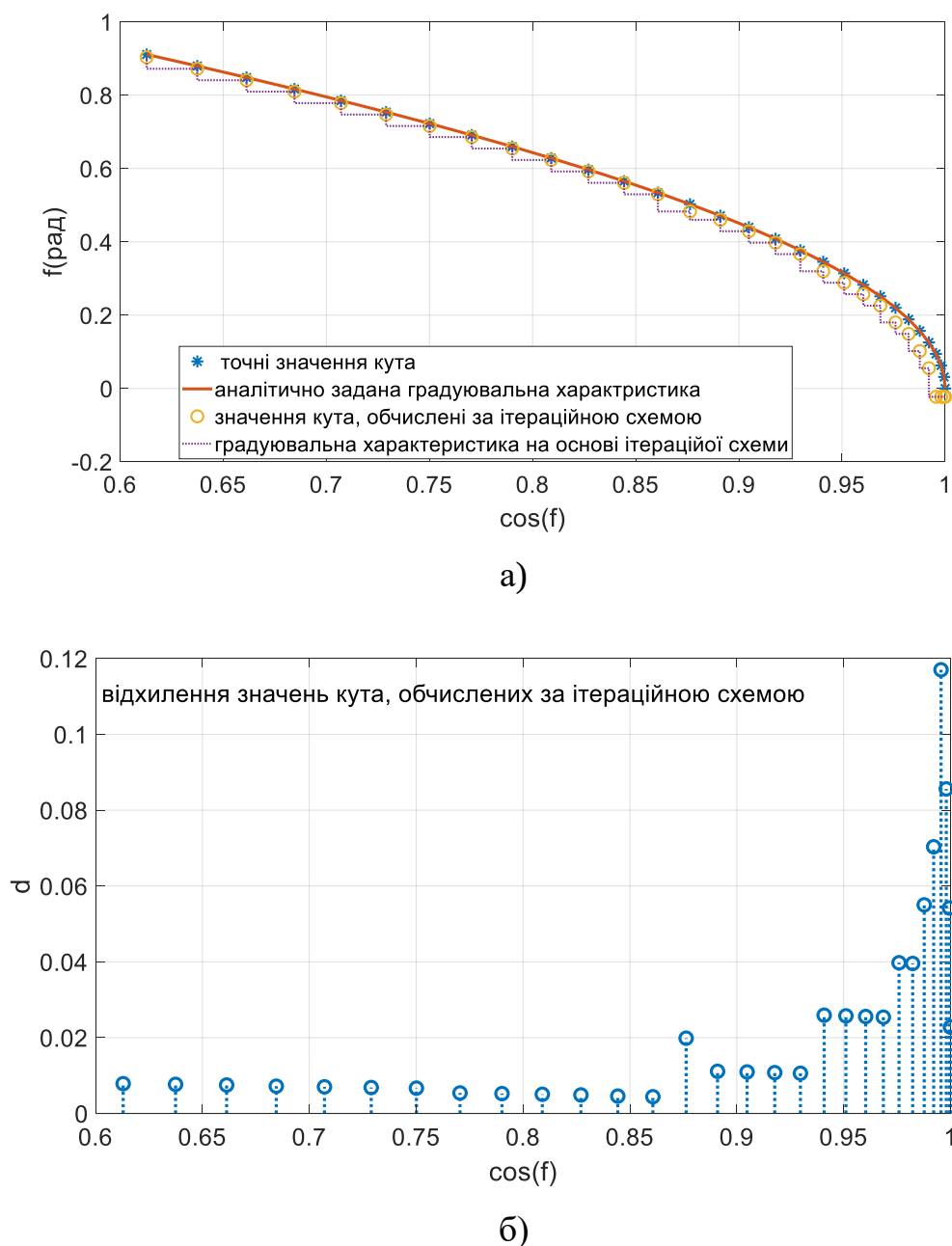


Рисунок 3.28 – Крива $\arccos(\alpha)$ і значення α , отримані за імплементованим алгоритмом (а) і похибки обчислення (б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

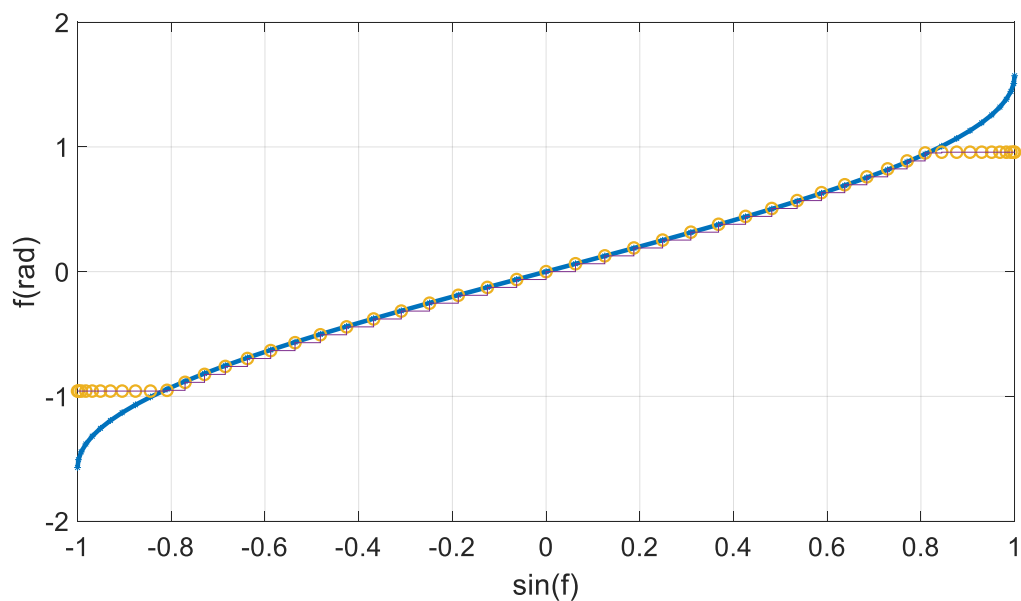
Тоді як при обчислення функції $\arcsin(\alpha)$ за подібною ітераційною схемою:

$$\begin{aligned}\delta_i &= 1, \text{ якщо } Y_i < T_0 \text{ і } \delta_i = -1, \text{ якщо } Y_i \geq T_i \\ X_{I+1} &= X_i - \delta_I Y_i 2^{-i} \\ Y_{I+1} &= Y_i + \delta_I X_i 2^{-i} \\ Z_{I+1} &= Z_i - \delta_I \tan^{-1}(2^{-i}) \\ T_{i+1} &= T_i + T_i 2^{-i}\end{aligned}\tag{3.11}$$

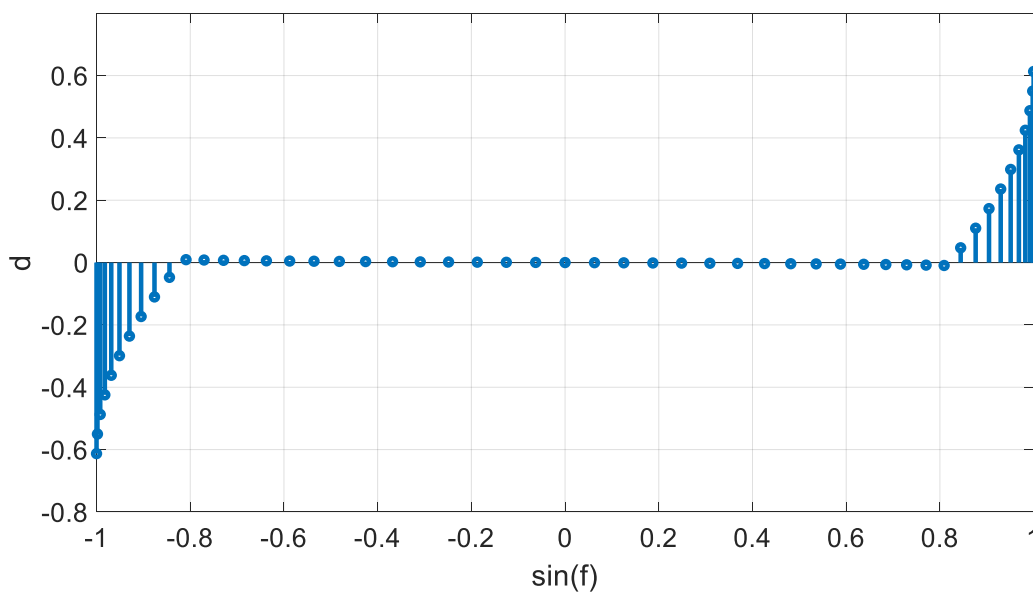
при початкових умовах:

$$T_0 = \sin \alpha, X_0 = 0, Y_0 = 1, Z_0 = 0$$

отримуємо аналогічні результати з порівнюваними результатами і похибками обчислення, приведеними на рис. 3.29 а), б).



а)



б)

Рисунок 3.29 – Крива $\arcsin(\alpha)$ і значення α , отримані за імплементованим алгоритмом (а) і похибки обчислення (б)

Розглянуто способи врахування впливу механічних особливостей, експлуатаційних умов і вимірювальних засобів на функціонування опорноповоротного пристрою. Встановлено області адекватності застосування безконтактного потенціометера AS5600 при обчисленні кутових переміщень за однією із модифікацій CORDIC-алгоритму.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ 088.00.00.000 ПЗ

Арк.

93

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Заходи з техніки безпеки при виготовленні деталей до антени “Айзберг”

Процес виготовлення деталей на виробництві або в умовах навчального цеху супроводжується переліком небезпек, пов'язаних з роботою обладнання, ручними операціями, а також впливом зовнішніх факторів (шум, вібрація, пил, гострі елементи, напруга тощо). Тому організація безпечних умов праці є ключовим завданням керівництва і відповідальних осіб за охорону праці.

Організаційні заходи безпеки мають на меті забезпечення належних умов праці, контроль за дотриманням інструкцій, а також профілактику аварійних ситуацій. До основних організаційних заходів належать:

- інструктажі з охорони праці
- допуск до роботи тільки навченого персоналу, який пройшов перевірку знань з охорони праці.
- підготовка та оновлення технологічної документації, в якій передбачені заходи безпеки на кожному етапі виробництва.
- регулярні перевірки технічного стану обладнання, проведення ППР (планово-попереджувальних ремонтів).
- контроль з боку посадових осіб за дотриманням працівниками правил безпеки.

Техніка безпеки при роботі з обладнанням, оскільки виготовлення деталей часто передбачає механічну обробку (різання, шліфування, свердління), а також можливу термічну або електричну обробку, необхідно дотримуватись таких вимог:

- працювати дозволяється тільки зі справним інструментом — затуплений або пошкоджений інструмент може спричинити аварію.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- при закріпленні заготовок на верстатах слід використовувати лише штатні пристрої (тиски, патрони, магнітні плити).
- заборонено доторкатися до обертових частин верстата або заготівки під час роботи.
- обробка проводиться лише при наявності захисного огороження, особливо на абразивних та ріжучих верстатах.
- при аварійному зупиненні верстата необхідно вимкнути живлення, викликати відповідального за ремонт та доповісти керівнику.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), усі працівники повинні бути забезпечені та зобов'язані використовувати такі ЗІЗ залежно від характеру виконуваних робіт:

- захисні окуляри або щитки – при обробці матеріалів, що супроводжується утворенням стружки, іскор або пилу.
- навушники або антишумові вкладиші – при тривалій роботі з шумогенеруючим обладнанням (допустимий рівень шуму на робочому місці не має перевищувати 80 дБ) [32].
- рукавиці – при переміщенні заготовок, загострених деталей (за виключенням точних операцій біля обертових частин).
- комбінезони з вогнестійкої тканини – при роботі з термічним або зварювальним обладнанням.
- захисне взуття з металевим носком – для запобігання травм ніг при падінні інструменту чи заготовок.
- індивідуальні респіратори або витяжки – при роботі з пилогенеруючими або токсичними матеріалами (наприклад, при шліфуванні або паянні).

Електробезпека у процесі виготовлення деталей можуть використовуватись електричні інструменти, верстати або паяльне обладнання.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						95
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні правила електробезпеки:

- заборонено працювати з електроінструментом за високої вологості або з мокрими руками.
- усі пристрої повинні мати заземлення та захист від короткого замикання.
- розетки, подовжувачі та електропроводка повинні бути справними, без пошкоджень ізоляції.
- паяння та робота з електронними компонентами виконуються тільки на ізольованому робочому столі з витяжкою.
- не допускається самостійне втручання у внутрішню схему живлення обладнання.

Пожежна безпека у приміщеннях, де здійснюється виготовлення деталей, необхідно:

- забезпечити вільний доступ до евакуаційних виходів і протипожежного обладнання.
- тримати у справному стані вогнегасники (вуглекислотні, порошкові), ящики з піском.
- не допускати куріння або відкритого вогню в зонах зберігання ЛЗР (легкозаймистих рідин), розчинників.
- робоче місце після паяння або зварювання повинно бути ретельно очищене від горючих матеріалів.

4.2 Вимоги безпеки до робочих місць для виконання робіт

Одним із ключових елементів системи управління охороною праці є створення безпечних і здорових умов праці на робочих місцях. Робоче місце – це простір, у якому працівник постійно або тимчасово виконує свої трудові обов’язки. Від правильності організації робочого місця залежать не лише ефективність праці, а й безпека, рівень ризику виникнення нещасних

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випадків, професійних захворювань або інших шкідливих наслідків.

Відповідно до положень Законів України «Про охорону праці», «Про працю», а також до ДСТУ 2293-99, ДБН А.3.2-2-2009 та інших нормативних документів, до робочих місць висуваються певні обов'язкові вимоги, спрямовані на захист життя і здоров'я працівників. Ці вимоги включають як загальні норми безпеки, так і спеціалізовані вимоги, що залежать від характеру виконуваних робіт.

Загальні вимоги до організації робочого місця забезпечують:

- зручність та раціональність розташування робочого обладнання;
- мінімізацію фізичних зусиль працівника;
- можливість вільного переміщення;
- відповідність санітарним та гігієнічним нормам;
- відсутність небезпечних та шкідливих факторів, або їх ефективну

нейтралізацію.

Кожне робоче місце повинно мати достатню площу і об'єм для виконання технологічного процесу. Згідно з нормами[33]:

площа на одного працівника в адміністративно-виробничих приміщеннях повинна бути не менше 4,5 м²;

- об'єм повітря – не менше 15 м³;
- ширина проходів – не менше 1,0 м, а в зонах з рухомим обладнанням – 1,5 м і більше.

- Правильне освітлення робочого місця є критично важливим.

Рівень освітлення залежить від точності виконуваних робіт:

- загальне освітлення: не менше 300 лк;
- локальне освітлення: до 500–1000 лк, залежно від типу завдань;
- використання ламп з природним спектром світла знижує втому

очей.

У зонах з вибухонебезпечною атмосферою слід використовувати вибухозахищені світильники згідно з ДСТУ EN 60079.

					КРБ 088.00.00.000 ПЗ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптимальні мікрокліматичні умови повинні забезпечувати комфортну температуру, вологість і швидкість повітря. (Табл. 4.1):

Таблиця 4.1 Оптимальні мікрокліматичні умови

Пора року	Температура повітря	Відносна вологість	Швидкість руху повітря
Зима	18-22 °С	40-60 %	до 0,2 м/с
Літо	22-25 °С	40-60 %	до 0,3 м/с

Для підтримки параметрів застосовується припливно-витяжна вентиляція, кондиціонери, зволожувачі повітря. Відповідно до Державних санітарних норм ДСН 3.3.6.037-99, рівень шуму не повинен перевищувати [33]: до 80 дБ – на постійних робочих місцях, до 65 дБ – в

офісних приміщеннях, при підвищеному рівні – обов’язкове застосування ЗІЗ (антишумові навушники тощо).

Вібрація нормується відповідно до ДСН 3.3.6.039-99, особливо на робочих місцях з використанням ручного механізованого інструменту.

Устаткування, яке використовується на робочому місці, відповідає вимогам: технічної справності (регулярне технічне обслуговування); безпеки конструкції (наявність кожухів, захист від випадкового включення); ергономічності (висота пультів, положення кнопок тощо); електробезпеки (заземлення, ізоляція, наявність аварійного вимикача).

Особлива увага приділяється захисту від:

- ураження електричним струмом;
- механічних травм при контакті з рухомими частинами;
- термічних та хімічних опіків;
- небезпечних випромінювань (лазерів, УФ-випромінювання).

На робочому місці обов'язково передбачені засоби індивідуального та колективного захисту, передбачені та доступні:

- засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):
 - захисний одяг, спецвзуття;
 - рукавиці, захисні окуляри, респіратори;
 - страхувальні пояси (при роботі на висоті);
- засоби колективного захисту:
 - огороження небезпечних зон;
 - вентиляційні системи;
 - засоби пожежогасіння;
 - пристрої автоматичного вимкнення.

Всі зобов'язані проходити інструктажі з правил користування ЗІЗ та дотримуватись встановленого порядку їх експлуатації.

Пожежна безпека та евакуація. На кожному робочому місці мають бути забезпечені:

- вогнегасники відповідного типу (вуглекислотні, порошкові, пінні);
- плани евакуації при пожежі або аварійній ситуації;
- справна система оповіщення;
- регулярне навчання персоналу правилам пожежної безпеки.

Розташування вогнегасників має бути таким, щоб до них можна було дістатись за не більше 20 м з будь-якої точки робочої зони [34].

Вимоги до електробезпеки. На робочих місцях з електроустановками діють особливі правила:

- проведення робіт дозволяється лише працівникам з відповідною групою електробезпеки;
- обладнання повинно бути заземлене та ізольоване;
- електрощити – замкнені, з попереджувальними написами;
- використання інструменту з діелектричним покриттям.

Контроль та обслуговування електрообладнання проводиться згідно з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Безпечне робоче місце – це результат комплексного підходу до організації праці, який охоплює як технічні, так і організаційні аспекти.

4.3 Оцінка майбутнього фізичного та психологічного навантаження на людину, яка обслуговує системи антенного керування

У сучасних умовах автоматизації та цифрової промисловості людина все ще залишається ключовим елементом в обслуговуванні та експлуатації технічних пристроїв. Незважаючи на стрімкий розвиток технологій, взаємодія працівника з машинами та обладнанням створює низку ризиків, зокрема пов'язаних із фізичним та психологічним навантаженням. Нерівномірне або надмірне навантаження може не тільки призводити до професійного вигорання чи травматизму, а й значно знижувати загальну ефективність роботи.

У цьому питанні розглянемо основні типи навантажень, критерії їх оцінювання, методи прогнозування та шляхи зниження ризиків для персоналу.

Фізичне навантаження — це сукупність енерговитрат та м'язового напруження, що виникає у людини в процесі виконання певних дій. У сфері експлуатації пристроїв це можуть бути:

- ручні операції з елементами обладнання;
- підключення кабелів або змінних модулів;
- технічне обслуговування вузлів, що розташовані у важкодоступних місцях;
- тривале стояння або сидіння у фіксованій позі.

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тривале фізичне навантаження без належних перерв чи підтримки ергономічних умов праці призводить до:

- перевтоми;
- м'язово-скелетних захворювань;
- зниження уваги;
- підвищеного ризику травм при неочікуваній зміні умов роботи.

З метою профілактики важливо організовувати регулярні перерви, змінювати положення тіла, використовувати ергономічне обладнання та дотримуватись режиму праці й відпочинку

Класифікація рівнів фізичного навантаження наведені у таблиці 4.2:

Таблиця 4.2 Класифікація рівнів фізичного навантаження

Категорія навантаження	Приклади дій	Вплив на організм
Легке	Робота сидячи, натиск кнопок	Помірні енерговитрати
Середнє	Робота стоячи, переміщення легких компонентів	Помітна втома в кінці зміни
Важке	Переміщення вантажів, тривалі згини, утримання інструментів	Високий ризик травм та перевантажень

Психологічне або когнітивне навантаження — це напруга, яка виникає внаслідок необхідності зосередженої роботи, відповідальності, інтелектуальної напруги чи стресу. Високе психологічне навантаження часто фіксується у таких умовах:

- робота з великою кількістю сигналів або інформаційних дисплеїв;

- необхідність швидкого прийняття рішень;
- робота у режимі "нон-стоп";
- постійний контроль за параметрами або візуальне

спостереження.

При тривалому впливі таких факторів можуть розвиватися:

- хронічна втома;
- порушення сну та уваги;
- вигорання;
- зниження мотивації до роботи;
- зростання ймовірності помилок у критичних ситуаціях.

Для якісного аналізу майбутнього навантаження використовуються як кількісні, так і якісні методики.

Оцінка фізичного навантаження:

- метод ЕМГ (електроміографії) — аналіз м'язової активності;
- опитувальники та щоденники навантаження;
- спостереження та відеоаналіз дій оператора;
- тестування за шкалами Борга або RPE (Rating of Perceived

Exertion).

Оцінка психологічного навантаження:

- NASA TLX (Task Load Index) — багатофакторна оцінка (ментальне, фізичне, тимчасове навантаження, рівень стресу);
- анкетування за методиками SAN, Спілбергера-Ханіна, Люшера;
- HRV-аналіз (аналіз варіабельності серцевого ритму);
- моніторинг помилок, швидкості реакції, фокусування уваги.

Проектні рішення для зменшення навантаження. Щоб зменшити як фізичне, так і психологічне навантаження на оператора, варто ще на етапі проєктування пристрою дотримуватись таких принципів:

- ергономіка: усі робочі елементи розташовуються в зоні досяжності (в межах 50–70 см від торсу);

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- автоматизація рутинних операцій (наприклад, автоматичне обнулення, калібрування або самодіагностика);
- візуальна стандартизація інтерфейсу: кольори, піктограми, попереджувальні індикатори;
- використання адаптивних пультів керування, які враховують біометрику оператора (висота, зір, навички).

Окрім технічного удосконалення самого пристрою, важливо також врахувати організаційні та гігієнічні аспекти:

- раціональний режим праці та відпочинку: через кожні 2 години – коротка перерва 10–15 хвилин.
- ротація завдань: змінюваність монотонних і активних дій;
- психологічна підтримка персоналу: консультації, навчання керуванню стресом;
- контроль мікроклімату: температура 18–24 °С, вологість 40–60%, рівень шуму < 70 дБ [35];
- введення систем зворотного зв'язку: оператор має бачити результат своїх дій.

4.4 Вплив електромагнітних хвиль на людину

Електромагнітні хвилі (ЕМХ) — це коливання електричних і магнітних полів, які поширюються в просторі зі швидкістю світла. Їх джерелами у виробничому середовищі можуть бути електроустановки, лінії електропередач, трансформаторні підстанції, електрозварювальні установки, комп'ютерна техніка, засоби зв'язку (радіопередавачі, мобільні телефони), радіолокаційні системи та інші пристрої.

ЕМХ класифікуються за частотою на кілька діапазонів [36]:

- низькочастотні (НЧ): 0–300 Гц. Джерела — силові мережі, генератори, трансформатори.

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- радіочастотні (РЧ): 300 кГц – 300 ГГц. Джерела — радіопередавачі, мобільні телефони, Wi-Fi.

- інфрачервоні, видиме світло та ультрафіолетові хвилі, які також належать до ЕМХ, але мають специфічний характер впливу.

- іонізуюче випромінювання: рентгенівські та гамма-промені, які викликають іонізацію речовин і можуть призвести до глибоких біологічних змін.

У контексті охорони праці найбільшу увагу приділяють неіонізуючому випромінюванню (до 300 ГГц), яке хоча й не має здатності іонізувати атоми, але все одно може справляти негативний вплив на організм людини.

Фізіологічний вплив ЕМХ на людину. Тепловий вплив. Електромагнітні хвилі високої частоти можуть спричиняти нагрівання тканин організму через поглинання енергії випромінювання. Основні органи-мішені:

- голова (мозок, очі) — підвищення температури може викликати тимчасові або хронічні порушення зору, головний біль, шум у вухах, втому.

- репродуктивні органи — чутливі до впливу ЕМХ, особливо у чоловіків, де зафіксовано зниження рухливості сперматозоїдів при тривалому впливі.

- шкіра та поверхневі тканини — можуть виникати локальні опіки при роботі з високочастотним устаткуванням.

Нетепловий вплив. Навіть при рівнях нижчих за поріг теплового впливу ЕМХ можуть:

- впливати на центральну нервову систему, викликаючи зміни електроенцефалограми (ЕЕГ), порушення сну, зниження концентрації уваги.

- викликати зниження імунітету, зміни гормонального фону (особливо щитоподібної залози).

- порушувати серцево-судинну діяльність — фіксуються зміни частоти серцевих скорочень, артеріального тиску.

Багато досліджень підтверджують існування синдрому хронічної втоми серед людей, які тривалий час працюють з джерелами ЕМХ.

Психоемоційні та поведінкові ефекти. Наукові дослідження вказують на можливий зв'язок між впливом електромагнітного поля та:

- зростанням рівня тривожності;
- дратівливістю;
- схильністю до депресивних станів;
- суб'єктивним відчуттям зниження якості життя.

Такі ефекти важко оцінити за допомогою суто фізіологічних методів, проте їх наявність визнається багатьма міжнародними експертами.

Нормативна база та гранично допустимі рівні. У законодавстві України діють такі основні документи, що регламентують безпечні рівні електромагнітного випромінювання:

- ДСанПіН 3.3.6.096–2002: Встановлює допустимі рівні електромагнітних полів на робочих місцях та в житлових приміщеннях.
- НПАОП 0.00-1.28-10: Загальні вимоги до електробезпеки на підприємствах.

Допустимі рівні випромінювання [4]:

- для частот від 30 кГц до 300 МГц: ЩПЕ не повинна перевищувати 10 мкВт/см² при щоденному впливі.
- для частот від 300 МГц до 300 ГГц: межа — 1 мкВт/см² для тривалого перебування та до 1000 мкВт/см² — для короткочасного.
- напруженість електричного поля (Е): не більше 5–10 В/м у діапазоні від 3 МГц до 30 МГц.

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						105
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Усі робочі місця з постійним перебуванням персоналу повинні проходити періодичний контроль рівня ЕМП з фіксацією результатів у журналі вимірювань.

Заходи захисту від електромагнітного випромінювання. Технічні заходи:

- екранування джерел: використання металевих сіток, заземлених оболонок або спеціальних матеріалів для зменшення інтенсивності ЕМХ.
- оптимізація відстані: розміщення робочих місць на безпечній відстані від потужних джерел ЕМВ.
- ізоляція і герметизація обладнання: щоб зменшити витoki випромінювання.

Організаційні заходи:

- чітке зонування робочих приміщень за рівнем ЕМХ.
- обов'язковий інструктаж з охорони праці при роботі з високочастотним або потужним обладнанням.
- проведення медичних оглядів для раннього виявлення змін у здоров'ї працівників.

Індивідуальні засоби захисту:

- одяг з відбивними або екрануючими елементами;
- електромагнітно-екрановані кабінки або щити;
- захисні окуляри при роботі з лазерними або мікрохвильовими установками.

Вплив електромагнітного випромінювання на людину — складне та багатофакторне явище. В умовах інженерної діяльності ризики можуть бути як явними (тепловий вплив), так і відстроченими (нейрофізіологічні, ендокринні зміни). Для забезпечення безпеки необхідно поєднувати нормативний контроль, технічні заходи захисту та належну організацію праці.

					КРБ 079.00.00.000 ПЗ	Арк.
						106
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розуміння природи електромагнітних полів і дотримання вимог охорони праці — запорука збереження здоров'я персоналу та ефективної роботи підприємства.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Петренко В. І., Сидоренко Ю. М. Багатоканальні антени : підручник. – Київ : Вища школа, 2004. – 320 с.
2. ams AG. AS5600 – 12-bit programmable contactless potentiometer : Datasheet DS000365, Version 5.0 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ams.com/AS5600>
3. Tillaart R. AS5600 Arduino Library [GitHub репозиторій]. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://github.com/RobTillaart/AS5600>
4. OMC-Stepperonline. NEMA 23 HS5628 Stepper Motor Specifications [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.omc-stepperonline.com>
5. ams AG. AS5600 Application Note – Magnetic Rotary Position Sensor : AN500106 Version 1.00 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ams.com>
6. Олександр Н. М. Антени і пристрої СВЧ. – Київ : Техніка, 2001. – 512 с.
7. Кравчук І. В., Лазаренко П. С. Основи антенної техніки : навч. посіб. – Львів : Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2008. – 276 с.
8. Коваленко П. І., Бойко М. О. Антени та пристрої СВЧ : практикум. – Харків : ХНУРЕ, 2010. – 198 с.
9. Гончарук О. М. Теорія та практика антен : навч. посіб. – Одеса : ОНПУ, 2006. – 350 с.
10. Іваненко В. С. Антенні системи : підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2012. – 410 с.
11. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – Hoboken : Wiley, 2016. – 1104 p.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Hansen R. C. Small Antennas: Miniaturization Techniques & Applications. – New York : Wiley, 2006. – 512 p.
13. Антени і пристрої СВЧ : у 2 ч. / за ред. Ю. А. Макарова, В. М. Чернухи. – Київ : Техніка, 2009. – 448 с.
14. Основи теорії антен / за ред. В. І. Кліщенка. – Харків : ХНУРЕ, 2011. – 390 с.
15. Макаров Ю. А. Антени: теорія і практика. – Київ : Наук. думка, 2010. – 368 с.
16. Шарапов О. М. Проектування та моделювання антенних систем. – Львів : Видавництво Львів. політехніки, 2015. – 285 с.
17. Антенні системи і пристрої НВЧ / за ред. В. І. Кліщенка. – Київ : Наук. думка, 2014. – 420 с.
18. Паламар М.І. Особливості конструювання елементів приладів та мехатронних систем: навчальний посібник / Паламар М.І., Наконечний Ю.І., Стрембіцький М.О., Апостол Ю.О. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. – 203с.
19. Пащенко В. М., Кліщенко В. І. Основи радіотехніки. – Київ : Техніка, 2005. – 384 с.
20. Іванов С. М. Методи і засоби автоматизованого контролю : навч. посіб. – Київ : Вид-во НАУ, 2017. – 276 с.
21. Клименко А. В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 330 с.
22. Губарєв В. І., Ковальов С. В. Теоретичні основи автоматизованого контролю. – Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2016. – 250 с.
23. Козаченко О. О., Боярчук А. В. Методи і засоби технічного контролю та діагностики : підручник. – Київ : КНУТД, 2016. – 264 с.

					<i>КРБ 088.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						108
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Гордієнко В. В. Автоматизація технологічних процесів : навч. посіб. – Харків : НТУ «ХП», 2018. – 320 с.
25. Bolton W. Programmable Logic Controllers. – 4th ed. – Amsterdam : Elsevier, 2007. – 312 p.
26. Ripka P., Tipek A. Magnetic Sensors and Their Applications. – Norwood : Artech House, 2001. – 342 p. – ISBN 978-1580530573.
27. Allegro Microsystems. A4988: DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection : Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.allegromicro.com>
28. Hughes A. Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications. – 4th ed. – Oxford : Newnes, 2013. – 432 p. – ISBN 978-0-08-098333-7.
29. Одарич А., Яворська М., Паламар М. До оцінки статичного навантаження горизонтального вітрового потоку на дзеркало антени // Інформ. моделі, системи та технології : матеріали конф., 8–9 грудня 2021 р., Тернопіль. – Тернопіль : ТНТУ, 2021. – С. 45–48.
30. Palamar M., Chaikovskiy A., Pasternak V., Shevchuk V., Yavorska M. The Influence of Antenna Installation Accuracy on Quality of Signal Reception // Proc. of the 5th IEEE Int. Symp. on Smart and Wireless Systems within the Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems. – Dortmund, Germany, 17–18 Sept. 2020. – P. 210–215.
31. Paz P., Garrido M. CORDIC-Based Computation of Arcsine and Arccosine Functions on FPGA // IEEE Trans. on Circuits and Systems—II. – Accepted for publication.
32. Гандзюк М. П., Желібо Є. П., Халімовський М. О. Основи охорони праці. – Київ : Каравела, 2007. – 408 с.
33. Гогіташвілі Г. Г., Лапін В. М. Основи охорони праці : навч. посіб. – 4-те вид., випр. і доп. – Київ : Знання, 2018. – 302 с.

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		109

34. ДСТУ ISO 6309:2007. Протипожежний захист. Знаки безпеки. – [Чинний документ].

35. ДСН 3.3.6.042–99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – [Чинний документ].

36. Негода О. І. Радіохвилі та їх класифікація за частотними діапазонами / Вісник ТНТУ. – 2021. – №2 (102). – С. 50–54.

					<i>КРБ 079.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		110

ДОДАТКИ

Керівник:	Наконечний Ю.І.
Консультант:	Стрембіцький М. О
Н. контроль:	Наконечний Ю.І.
Зав. Кафедри:	Паламар М.І.
Рецензент:	

ДОДАТОК А

ПЗ для дослідження обчислювальних характеристик алгоритму для арккосинуса.

```
clear all
N=30;
F=(0:pi/100:pi/3);
L=length(F);
ACF(1:L)=0;

for k=1:L
    t0=cos(F(k));
    x0=1;
    y0=0;
    z0=0;

    for i=1:N
        d=-1
        if x0<t0
            d=1
        end

        X(i)=x0-y0*d*2^(-i);
        Y(i)=y0+x0*d*2^(-i);
        Z(i)=z0+d*atan(2^(-i));
        T(i)=t0*(1+2^(-2*i-1))

        x0=X(i);
        y0=Y(i);
        t0=T(i);
        z0=Z(i);
    end
    ACF(k)=-Z(N);
end
plot(cos(F),F,'*',cos(F),F),grid
hold on
plot(cos(F),ACF,'o')
stairs(cos(F),ACF)
figure
stem(cos(F),F-ACF),grid
```

ДОДАТОК Б

ПЗ для дослідження обчислювальних характеристик алгоритму для арксинуса

```
clear all
N=15;
F=(-pi/2:pi/50:pi/2);
ASF(1:length(F))=0;
for k=1:length(F)
    t0=sin(F(k));
    y0=0;
x0=1;
z0=0;

for i=1:N
    if y0<t0
        d=1
    else d=-1
end
    X(i)=x0-y0*d*2^(-i)
    Y(i)=y0+x0*d*2^(-i)
    Z(i)=z0+d*atan(2^(-i))
    T(i)=t0*(1+2^(-2*i-1))
% X(i)=x0*(1+d*2^(-2*i))-y0*d*2^(1-i);
% Y(i)=y0*(1+d*2^(-2*i))+x0*d*2^(1-i);
% Z(i)=z0+2*d*atan(2^(-i));
% T(i)=t0*(1+2^(-2*i));

    x0=X(i);
    y0=Y(i);
    z0=Z(i);
    t0=T(i);
end
ASF(k)=Z(N);
end
plot(sin(F),F,'*',sin(F),F),grid
hold on
plot(sin(F),ASF,'o')
stairs(sin(F),ASF)
figure
stem(sin(F),F-ASF),grid
```

ДОДАТОК В

ТЕЗИ КОНФЕРЕНЦІЇ

УДК 621.326

Автори Васишин О. - гр. РН-41, Стасишин Т. - гр. РВ-41, Яцків Г. - ст. гр. РВ-41

Заголовок **CORDIC** алгортм для обчислення функції арккосинуса на ПКВМ

Науковий керівник к.т.н. Яворська М.І.

Англ. автори Vasylyshyn O. Stasyshyn T. Yatskiv G.

Англ. заголовок **CORDIC-Based Computation of Arccosine Functions on FPGA**

Англ. наук. Керівник Ph.D. Yavorska M.I.

Ключові слова: CORDIC-алгоритм, мікроконтролер, обчислення arccos.

При виконанні обчислень в цифрових системах, яким властива обмеження ресурсів пам'яті і можливості виконання арифметичних операцій з плаваючою комою, надають перевагу алгоритмам, які можна реалізувати в двійковій системі числення виключно через операції додавання і зсуву регістрів – що відповідає діленню або множенню на 2 в цілій степені. Такі дії можна реалізувати за допомогою алгоритмів групи CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) - ітераційних схем послідовного наближення при обчисленні складних функцій простими операціями, що надаються для застосування у системах із відносно невеликими обчислювальними ресурсами, а також для апаратної реалізації.

Так при визначенні робочого положення поворотного пристрою з використанням давача кута, реалізованого на основі ефекту Холла за принципом

$$E = \frac{RBI}{\delta} \cos \alpha$$

де E – вимірювана напруга, B – індукція створеного магнітного поля, I – робочий струм, δ – товщина індикаторної пластини, R – фізична константа,

для знаходження величини кута слід апаратно обчислити значення функції арккосинуса. Ітераційна процедура реалізована за основі алгоритму CORDIC [1] за схемою:

$$\begin{aligned}\delta_i &= 1, \text{ якщо } X_i < T_0 \text{ і } \delta_i = -1, \text{ якщо } X_i \geq T_i \\ X_{I+1} &= X_i - \delta_i Y_i 2^{-i} \\ Y_{I+1} &= Y_i + \delta_i X_i 2^{-i} \\ Z_{I+1} &= Z_i - \delta_i \tan^{-1}(2^{-i}) \\ T_{i+1} &= T_i + T_i 2^{-i}\end{aligned}\tag{1}$$

при початкових умовах:

$$T_0 = \cos \alpha, X_0 = 1, Y_0 = 0, Z_0 = 0$$

Для забезпечення оптимального режиму роботи пристрою важливим є налаштування мікроконтролера на мінімальну кількість ітераційних операцій за якої дотримується задана точність в обчисленні кута повороту. З цією метою розроблено програмне забезпечення і проведено дослідження обчислювальних характеристик імплементованого в давачі алгоритму за ітераційною схемою (1).

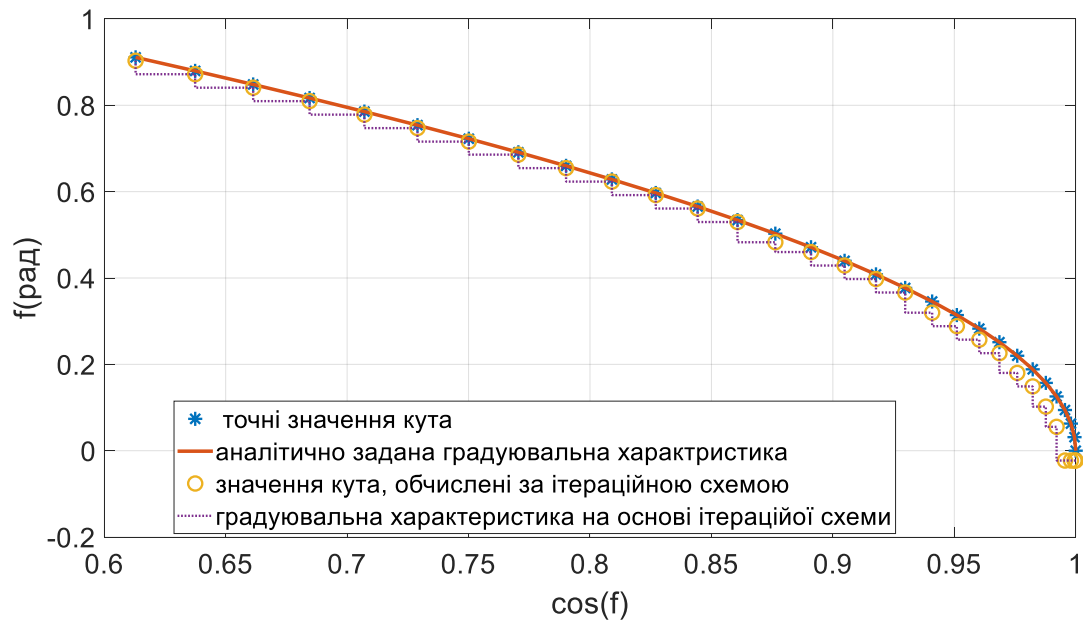


Рисунок 1 Крива $\arccos(\alpha)$ і значення α , отримані за імплементованим алгоритмом.



Література

1. P. Paz and M. Garrido, "CORDIC-Based Computation of Arcsine and Arccosine Functions on FPGA," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 70, no. 9, pp. 3684-3688, Sept. 2023.

ПЗ для дослідження обчислювальних характеристик алгоритму.

```
clear all
```

```
N=30;
```

```
F=(0:pi/100:pi/3);
```

```
L=length(F);
```

```
ACF(1:L)=0;
```

```
for k=1:L
```

```
    t0=cos(F(k));
```

```
    x0=1;
```

```
    y0=0;
```

```
    z0=0;
```

```
for i=1:N
```

```
    d=-1
```

```
        if x0<t0
```

```
            d=1
```

```
        end
```

```
        X(i)=x0-y0*d*2^(-i);
```

```
        Y(i)=y0+x0*d*2^(-i);
```

```
        Z(i)=z0+d*atan(2^(-i));
```

```
        T(i)=t0*(1+2^(-2*i-1))
```

```
        x0=X(i);
```

```
        y0=Y(i);
```

```
        t0=T(i);
```

```
        z0=Z(i);
```

```
end
```

```
ACF(k)=-Z(N);
```

```
end
```

```
plot(cos(F),F, '*',cos(F),F),grid
```

```
hold on
```

```
plot(cos(F),ACF,'o')
```

```
stairs(cos(F),ACF)
```

```
figure
```

```
stem(cos(F),F-ACF),grid
```

