

ЖИТОМИРСЬКИЙ ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТУ ІМЕНІ С.П.КОРОЛЬОВА
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ІНЖЕНЕРІЇ



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

здобувача вищої освіти ступеня «бакалавр» заочної форми навчання
за спеціальністю «Телекомунікації та радіотехніка»

Тема: «АВТОМАТИЗОВАНА УСТАНОВКА ВИМІРЮВАННЯ
АНТЕННИХ ПАРАМЕТРІВ»

Виконавець: Наталія КРУПСЬКА

м. Житомир

2026

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему: «Автоматизована установка вимірювання антенних параметрів» включає: включає: 73 сторінки, 29 ілюстрацій, 8 формул, 1 таблиця, 24 використаних джерел та 2 додатки.

Ключові слова: антена, діаграма спрямованості, автоматизована установка, ADF4351, Arduino Mega 2560, RTL-SDR, сервопривід DS3218 Pro, опорно-поворотний пристрій, вимірювання параметрів антен.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання параметрів антен та діаграм спрямованості.

Предмет дослідження – є автоматизована установка для вимірювання антенних параметрів на базі мікроконтролерної платформи Arduino Mega 2560, синтезатора частот ADF4351 та приймача RTL-SDR.

Мета дослідження є розробка автоматизованої установки для вимірювання параметрів антен, зокрема діаграми спрямованості, яка забезпечує автоматичне позиціонування антени, реєстрацію результатів вимірювань та їх подальшу комп'ютерну обробку.

Для досягнення поставленої мети виконано аналіз існуючих методів вимірювання діаграм спрямованості, обґрунтовано вибір автоматизованого методу вимірювання, розроблено структурну схему комплексу, опорно-поворотний пристрій та систему керування сервоприводом. Розроблено програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino Mega 2560 та виконано експериментальні дослідження.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої установки для навчальних, наукових та експериментальних досліджень антенних систем, а також для перевірки характеристик антен різного призначення.

Отримані результати підтвердили працездатність розробленої установки та можливість автоматизованого вимірювання діаграм спрямованості антен з достатньою точністю.

					<i>ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ</i>			
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизована установка вимірювання антенних параметрів	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Крупська Н.Ю.						
Керівник.		Колос Ю.О.					10	73
Реценз.		Чумакевич В.О.				<i>ЖВІ 323 з н.з.</i>		
Н. Контр.								
Затверд.		Соболенко С.О.						

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	13
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АНТЕН	15
1.1. Поняття діаграми спрямованості та умови її вимірювання	15
1.2. Огляд методів вимірювання діаграм спрямованості	16
1.3. Обґрунтування вибору автоматизованого методу вимірювання.....	21
Висновки до розділу 1.....	21
2. РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ УСТАНОВКИ	22
2.1. Розробка структурної схеми автоматизованої установки	23
2.2. Вибір генератора сигналів на базі синтезатора частот ADF4351.....	25
2.3. Використання мікроконтролера Arduino Mega 2560 для автоматизації вимірюван	28
2.4. Розробка опорно-поворотного пристрою.....	31
2.5. Вибір цифрового сервоприводу DS3218 Pro.....	36
2.6 Принцип роботи цифрового сервоприводу	37
2.7. Розробка схеми керування сервоприводом	39
2.8 Розрахунок параметрів вимірювальної установки	41
2.9 Розрахунок дальньої зони вимірювання.....	48
2.10 Досліджувальна антена	51
Висновки до розділу 2.....	51
3. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	53
3.1 Алгоритм роботи автоматизованої установки	53
3.2 Розробка програмного забезпечення Arduino Mega 2560.....	55
3.3 Передача даних до ПК.....	57
3.4 Обробка результатів у Microsoft Excel	59
3.5 Експериментальне вимірювання діаграми спрямованості.....	61
3.6 Аналіз отриманих результатів.....	63

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Висновки до розділу	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	69
ДОДАТОК А. Креслення конструкцій антен для дослідження	71
ДОДАТОК Б. Креслення структурної схеми установки.....	73

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АФП — антено-фідерний пристрій
БПЛА — безпілотний літальний апарат
ДС – діаграма спрямованості
ЕМП – електромагнітне поле
КЕП – коефіцієнт ефективної поверхні
ККД – коефіцієнт корисної дії
КРС – коефіцієнт розрізнення сигналів
МК – мікроконтролер
ПК – персональний комп'ютер
ПЗ – програмне забезпечення
РЕБ — радіоелектронна боротьба
РЕР—радіоелектронна розвідка
СВЧ – надвисокі частоти
СКЗ – середньоквадратичне значення
UART – універсальний асинхронний приймач-передавач
АЦП – аналого-цифровий перетворювач
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

ВСТУП

В умовах сучасних викликів значна кількість волонтерських та інженерних колективів самостійно розробляють і виготовляють засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ) та радіоелектронної розвідки (РЕР), системи керування безпілотними літальними апаратами та антенами. Причому ефективність застосування цих засобів в значній мірі залежить від характеристик та параметрів антено-фідерного пристрою. Наприклад, через провали в діаграмі спрямованості антени РЕБ буде відсутня дія перешкод ворожим засобам в певних секторах. Наявність провалів у діаграмі спрямованості, або недостатній коефіцієнт підсилення антен систем можуть призвести до зменшення ефективності роботи систем зв'язку, радіоелектронної боротьби та керування безпілотними апаратами.

В лабораторії антен для навчання та дослідження антен застосовуються застарілі установки, в яких здійснюється поворот антени руками, кут повороту антени встановлюється вручну, що знижує точність вимірювань та повторюваність результатів, процес вимірювання є трудомістким і потребує багато часу, не забезпечує повторюваність і стабільність експерименту та точність результатів.

Використання персонального комп'ютера у складі установки забезпечує цифрову обробку результатів вимірювань та їх автоматичне відображення. Це дозволяє автоматизувати обробку результатів вимірювань, скоротити час експерименту та підвищити точність побудови діаграм спрямованості.

Важливим напрямом розвитку сучасних випромінювальних комплексів є автоматизація процесів збору обробки та збереження експериментальних даних. Автоматизовані системи дозволяють мінімізувати вплив людського фактора на результати вимірювань, підвищити їх точність та забезпечити повторюваність експериментів. Крім того, використання мікроконтролерних платформ і програмних засобів обробки даних значно спрощує проведення досліджень характеристик антен та скорочує час виконання вимірювань. Це особливо

					<i>ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

актуально під час розроблення, налаштування та перевірки антен систем різного призначення

Таким чином, розробка автоматизованої установки для вимірювання параметрів антен є актуальним завданням, спрямованим на підвищення точності, швидкості та зручності проведення експериментальних досліджень.

					<i>ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
						15
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ АНТЕН

1.1 Поняття діаграми спрямованості та умови її вимірювання

Діаграмою спрямованості (ДС) антени, що випромінює, називається залежність амплітуди поля від кута полярної системи координат в одній із головних площин у рівновіддалених від антени точках за струму збудження антени 1 А, позначається $f(\theta, \phi)$. Однією головною площиною зазвичай є вертикальна, що проходить через напрямок максимального випромінювання, друга - перпендикулярна їй і також проходить через напрямок максимального випромінювання. Прийнято кут у вертикальній площині позначати θ , а у перпендикулярній їй - ϕ . Діаграмою спрямованості (ДС) антени, що приймає електромагнітну хвилю, називають залежність амплітуди електромагнітних коливань в узгодженому навантаженні приймальної антени від кута приходу хвилі θ або ϕ в одній із головних площин при однаковій відстані до джерела випромінювання. В режимі передавання і приймання діаграма спрямованості не відрізняються. Нормованою діаграмою спрямованості називається відношення ДС до її максимального значення, позначається $F(\theta, \phi)$.

Графічне зображення прикладів нормованих ДС у декартовій (рис. 1.1) та полярній системах координат (рис. 1.2).

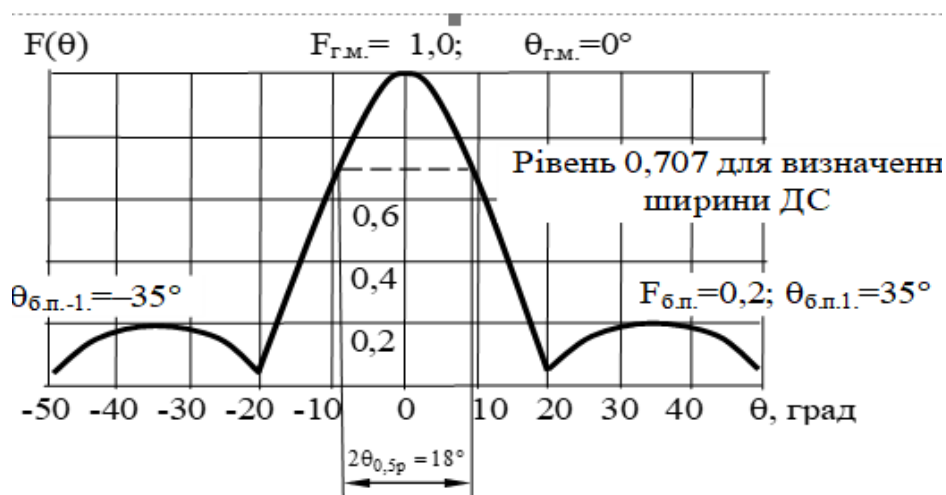


Рисунок 1.1 Приклад зображення нормованої ДС у декартовій системі координат



Рисунок 1.2 – Приклад ДС за полем у полярній системі координат

1.2 Огляд методів вимірювання діаграм спрямованості

Методи вимірювання діаграми спрямованості

1) Метод вимірювання дальнього поля антени.

Приклад складу установки показано на рис. 1.3 Крім антени, для якої вимірюється ДС, необхідна допоміжна антена (на рис. 1.3 показано рупорні антени). Одна з них є передавальною (ПА), живиться від генератора (G) через коаксіальний кабель, коаксіально-хвильовий перехід і хвильовід, інша приймальна (ПрА), хвильовий вихід якої через детекторну секцію (Д) і коаксіально-хвильовий перехід з'єднується з вимірювачем амплітуди (В). Вимірювання проводиться на відстані між антенами, яка більше межі дальньої зони

$$r \geq \frac{2L^2}{\lambda}, \quad (1.1)$$

де λ – довжина хвилі;

L – максимальний лінійний розмір досліджуваної антени.

Дотримання умови дальньої зони є необхідним для забезпечення формування плоского фронту хвилі в області розташування приймальної антени та отримання коректної діаграми спрямованості.

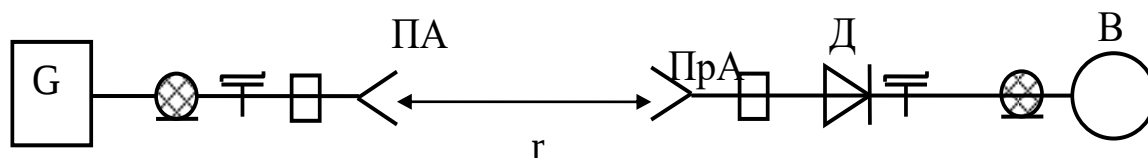


Рисунок 1.3 – Склад установки для вимірювання ДС антени

Вимірювання діаграми спрямованості в умовах дальньої зони може здійснюватися двома основними методами:

методом, в якому антена обертається;

методом, в якому здійснюється рух навколо антени.

Метод в якому антена обертається

Схема для вимірювання ДС методом, в якому антена обертається, наведена на рис. 1.4

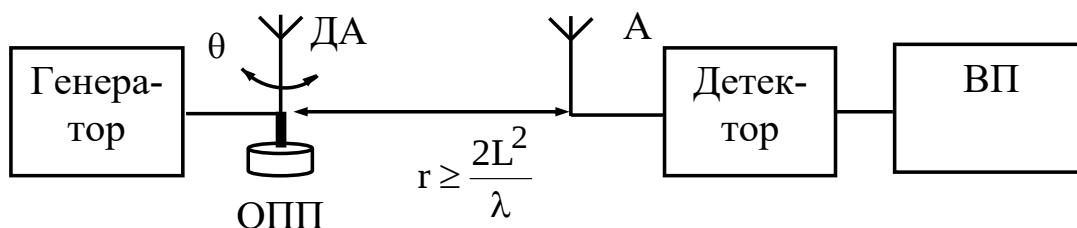


Рисунок 1.4 – Схема 1 установки для вимірювання ДС методом, в якому антена обертається

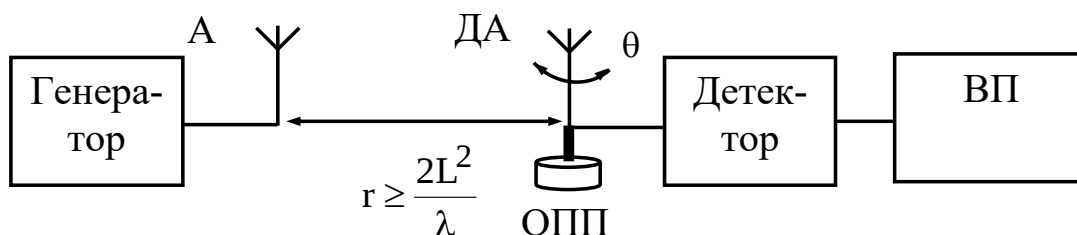


Рисунок 1.5 – Схема 2 установки для вимірювання ДС методом, в якому антена обертається

В схемі 1 антена, яка досліджується і розміщена на опорно-поворотному пристрої (ОПП) вмикається до генератора і випромінює електромагнітне поле з амплітудною модуляцією, зазвичай за меандровим законом. В лабораторіях для безпеки персоналу випромінення проводиться з низькими рівнями потужності

(одиниці, десятки міліват). Для спрощення вимірювання амплітуди ЕМП використовуються детектори з надвисокочастотними детекторними діодами, які працюють на квадратичній ділянці вольт-амперної характеристики. Тому показання вимірювального пристрою α будуть пропорційні квадрату амплітуди електромагнітної хвилі, що приймається.

Амплітудна діаграма спрямованості передавальної антени вимірюється як залежність показань вимірювального пристрою α_i на приймальному боці, піднесених до кореня квадратного, від кута повороту θ_i антени на передавальному боці.

Значення нормованої діаграми спрямованості розраховується за формулою

$$F(\theta) = \sqrt{\frac{\alpha(\theta)}{\alpha_{\max}}},$$

де $\alpha_{\max}$ – максимальне значення з усіх показань, що отримані в результаті повороту антени.

В схемі 2 антена, яка досліджується і розміщена на (ОПП), є приймальною, з'єднується через детектор з вимірювальним пристроєм, а додаткова нерухома антена вмикається до генератора і випромінює електромагнітне поле.

Амплітудна діаграма спрямованості приймальної антени вимірюється як залежність показів вимірювального пристрою α_i , піднесених до кореня квадратного, від кута повороту θ_i цієї антени.

Схема 2 легше реалізується ніж схема 1, тому що процеси обертання і вимірювання антени проводяться на одному боці.

Метод руху навколо антени

Схема для вимірювання ДС методом руху навколо антени наведена на рис. 1.6.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

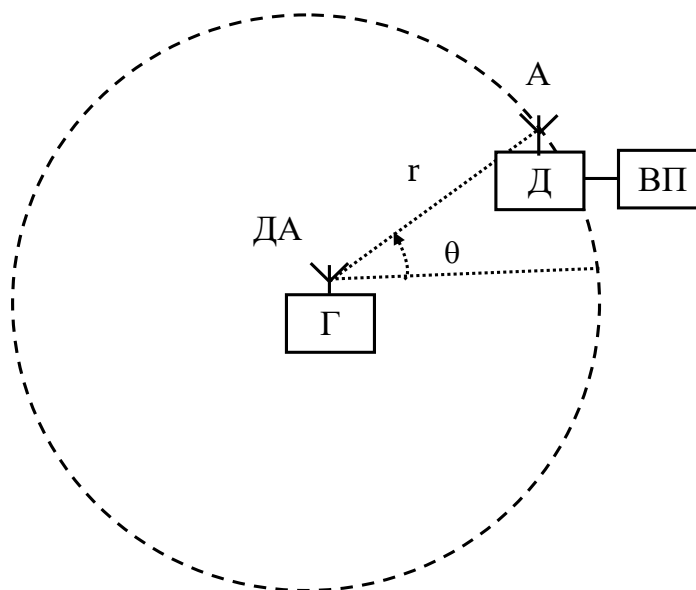


Рисунок 1.6 – Схема установки для вимірювання ДС методом руху навколо антени

В даному методі приймальну антену необхідно рухати навколо досліджуваної передавальної антени по колу з радіусом, який більший за межу дальньої зони і вимірювати для кожного кута θ амплітуду поля. Важливо орієнтувати головний максимум ДС приймальної антени в напрямку передавальної.

Переваги методів вимірювання дальнього поля: досить велика точність, достатньо вимірювати тільки амплітуду електромагнітного поля, вимірювання ДС виконується безпосередньо.

Недоліки методів вимірювання дальнього поля. Ці методи потребують значних розмірів лабораторії (найбільших розмірів потребує метод руху навколо антени), що впливає з розміщення передавальної і приймальної антен на відстані більшою за межу дальньої зони. Більша відстань між антенами приводить до збільшення впливу навколишніх предметів, так як збільшується ймовірність їх наявності в області суттєвій для поширення радіохвиль.

Метод ближнього поля з перетворенням у дальнє поле

Суть методу у вимірюванні амплітудно фазового розподілу електромагнітного поля безпосередньо у розкритті антени, що досліджується. За результатами вимірів знаходиться ДС шляхом розрахунків.

Переваги: можливість вимірювання у невеликих об'ємах простору безпосередньо біля антени.

Недоліки: великі вимоги до точності руху приймальної вимірювальної антени у розкритті досліджуваної антени, необхідність вимірювання як амплітуди, так і фази електромагнітного поля, зростання похибок в результаті розрахунків ДС (це непрямий метод вимірювання).

Коліматорний метод вимірювання параметрів антени

Схема для вимірювання параметрів антен коліматорним методом наведена на рис. 1.7. У даному методі використовується коліматор, який представляє собою дзеркальну антену. Коліматор перевипромінює плоску хвилю. Тому досліджувана антена може розташовуватись на опорно-поворотному пристрої безпосередньо перед коліматором, а не в дальній зоні.

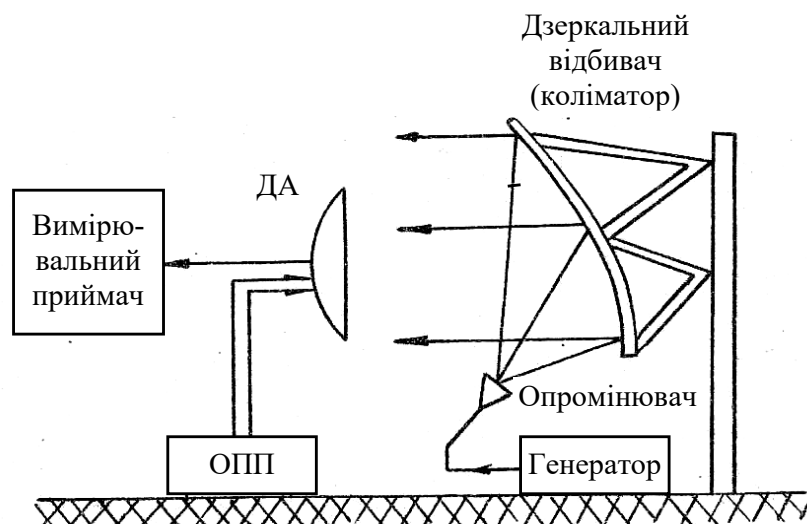


Рисунок 1.7 – Схема вимірювання параметрів антен коліматорним методом

Перевагою коліматорного методу є можливість проведення вимірювань на значно менших відстанях порівняно з методом дальнього поля.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

До недоліків коліматорного методу належить складність виготовлення коліматора, розміри якого визначаються габаритами досліджуваної антени.

Перевага: вимірювання ДС проводиться методом антени, яка обертається, але на скорочених відстанях.

До недоліків коліматорного методу належить складність реалізації коліматора, розміри якого визначаються габаритами досліджуваної антени.

1.3 Обґрунтування вибору автоматизованого методу вимірювання

Серед розглянутих методів вимірювання діаграм спрямованості найбільш доцільним для реалізації автоматизованої установки є метод антени, що обертається. Даний метод забезпечує достатню точність вимірювань, не потребує складних обчислювальних процедур та може бути реалізований із використанням доступних апаратних засобів.

Для побудови автоматизованої установки обрано схему, у якій досліджувана антена встановлюється на опорно-поворотному пристрої та здійснює покроковий поворот під керуванням мікроконтролера. Це дозволяє автоматизувати процес вимірювання, підвищити повторюваність результатів та зменшити вплив людського фактора.

Висновки до розділу 1

У першому розділі розглянуто основні параметри антен та методи вимірювання їх діаграм спрямованості. Проведено аналіз існуючих методів вимірювання та визначено особливості їх практичного застосування. Розглянуто умови проведення вимірювань у даній зоні та вимоги до побудови діаграм спрямованості антен.

Порівняння розглянутих методів за критеріями простоти реалізації, точності вимірювання показало, що для лабораторних досліджень ДС доцільно використовувати метод антени, що обертається. Для реалізації автоматизованої установки найбільш придатною є друга схема вимірювання, наведена на (рис. 1.5). При цьому необхідно враховувати обмеження, пов'язані з розмірами приміщення, габаритами антен та умовою дальньої зони вимірювання.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

2 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Розробка структурної схеми автоматизованої установки для вимірювання ДС методом антени, яка обертається

В даному розділі вирішується задача удосконалення загальної схеми, що реалізує вибраний метод вимірювання ДС (рис. 1.3) з метою автоматизації процесів вимірювання, обробки і відображення результатів. Тому спочатку розглядаються всі процеси для вимірювання ДС і пристрої, які їх можуть реалізувати.

1) Опромінення досліджуваної антени здійснюється допоміжною передавальною антеною, що живиться через фідерний тракт від генератора, який створює електромагнітні коливання в межах робочого частотного діапазону антени.

2) Покроковий поворот антен приймальної антени на кут $\Delta\theta$ в заданому секторі $0 \dots \theta_{\text{макс}}$. Даний кут визначає кількість точок вимірювання ДС

$$K = \theta_{\text{макс}} / \Delta\theta,$$

тобто впливає на точність вимірювання. Чим менше ширина ДС тим меншим необхідно брати кут $\Delta\theta$. Пропонується вибрати кут

$$\Delta\theta \leq 0,1 \cdot 2\theta_{0,5P}, \quad (2.1)$$

де $2\theta_{0,5P}$ - ширина ДС.

Тоді відносна похибка вимірювання ширини ДС буде не більше

$$\delta\theta \leq 0,5 \times 0,1 \times 100\% = 5\%. \quad (2.2)$$

Для повороту антени необхідно антену, що досліджується, встановлювати на опорно-поворотний пристрій з автоматизованими приводами та пристрій управління поворотом. Вимірювання поточного кута повороту антени. Значить має бути пристрій вимірювання кута повороту антени.

3) Аналого-цифрове перетворення значення кута повороту у цифровий код і передача в ПК для подальшої цифрової обробки. Необхідно мати аналого-цифровий перетворювач (АЦП).

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4) Детектування електромагнітної хвилі, що приймається, тобто виділення модулюючої низькочастотної напруги для спрощення вимірювання амплітуди. Для цього процесу використовується детектор.

5) Підсилення або послаблення отриманої низькочастотної напруги для забезпечення необхідного динамічного діапазону. Ці процес здійснюються підсилювачем або атенюатором.

6) Усереднення отриманої низькочастотної напруги для отримання постійної напруги, яка пропорційна амплітуді прийнятої радіохвилі. Це можна досягти застосуванням інтегруючого кола з постійною більше тривалості імпульсу.

7) Аналого-цифрове перетворення постійної напруги, отримання цифрового коду поточного значення амплітуди і передача в ПК для цифрової обробки результатів, використовується АЦП.

8) Формування і відображення таблиці і графіка залежності амплітуди прийнятого сигналу від кута повороту. Це здійснюється згідно програмі в ПК.

9) Для автоматизації всіх процесів необхідне відповідне програмне забезпечення.

Таким чином структурну схему автоматизованої установки для вимірювання ДС методом антени, яка обертається, можна подати у вигляді, як на рис. 2.1. До складу схеми на передавальній стороні входять генератор електромагнітних коливань та передавальний антено-фідерний пристрій в діапазоні частот досліджуваної антени, а на приймальній стороні – досліджувана антена на опорно-поворотному пристрої, антена фідером з'єднується з детектором, далі підсилювач та регульований атенюатор, аналого цифровий перетворювач (АЦП), персональний комп'ютер, також блок живлення, пристрій управління кутом повороту антени, пристрій вимірювання кутового положення антени, АЦП.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

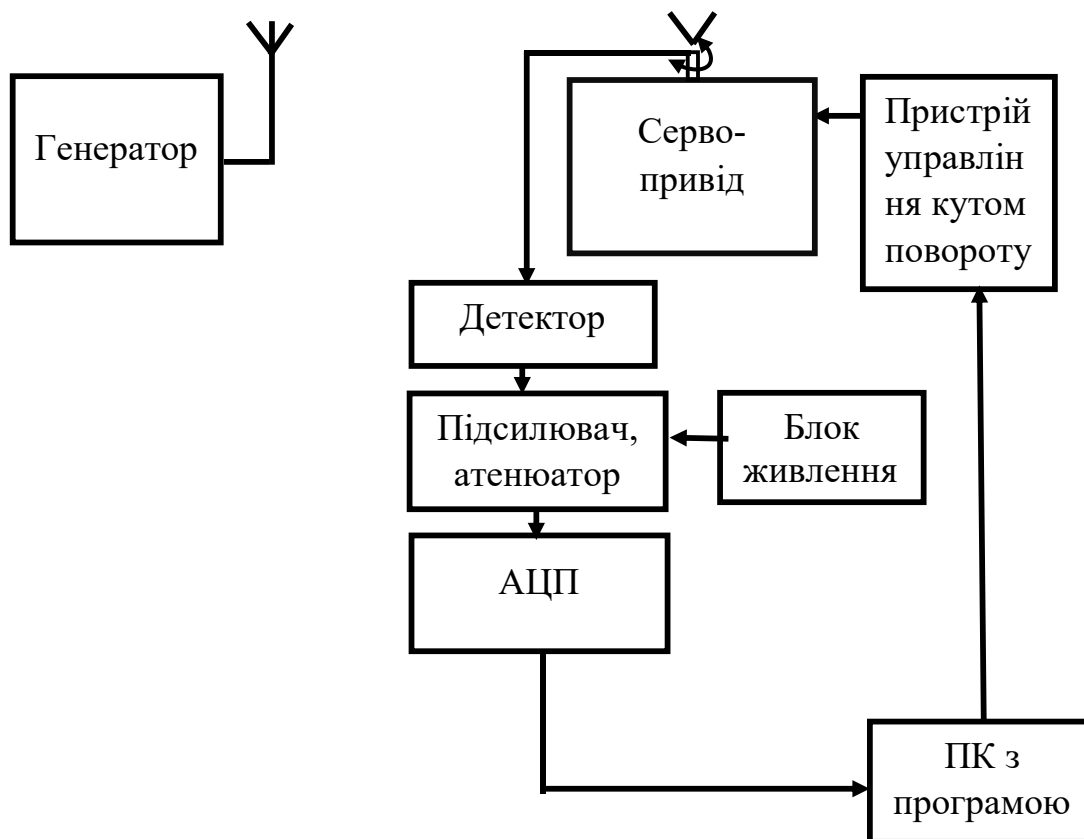


Рисунок 2.1 – Структурна схема автоматизованої установки для вимірювання ДС методом антени, яка обертається

У розробленій установці використовується дві антени: допоміжна передавальна антена та досліджувана антена. Передавальна антена встановлюється нерухомо та використовується для формування електромагнітного поля на робочій частоті. Досліджувана антена являє собою симетричний напівхвильовий вібратор з рефлектором, встановлений на опорно-поворотному пристрої, який здійснює покроковий поворот під час вимірювання діаграми спрямованості.

2.2 Вибір генератора сигналів на базі синтезатора частот ADF4351

Одним із основних елементів автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості антен є генератор високочастотного сигналу. Саме він забезпечує формування електромагнітних коливань необхідної частоти для опромінення досліджуваної антени. Від стабільності та точності генератора значною мірою залежить достовірність отриманих результатів вимірювання.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для реалізації автоматизованої установки в даній роботі обрано генератор сигналів на базі синтезатора частот ADF4351 виробництва компанії Analog Devices. Мікросхема ADF4351 є широкосмуговим цифровим синтезатором частоти з фазовою автопідстройкою частоти (PLL – Phase Locked Loop), який забезпечує генерацію гармонічних сигналів у широкому діапазоні частот.

Зовнішній вигляд генератора на базі ADF4351 наведений на рис. 2.2.

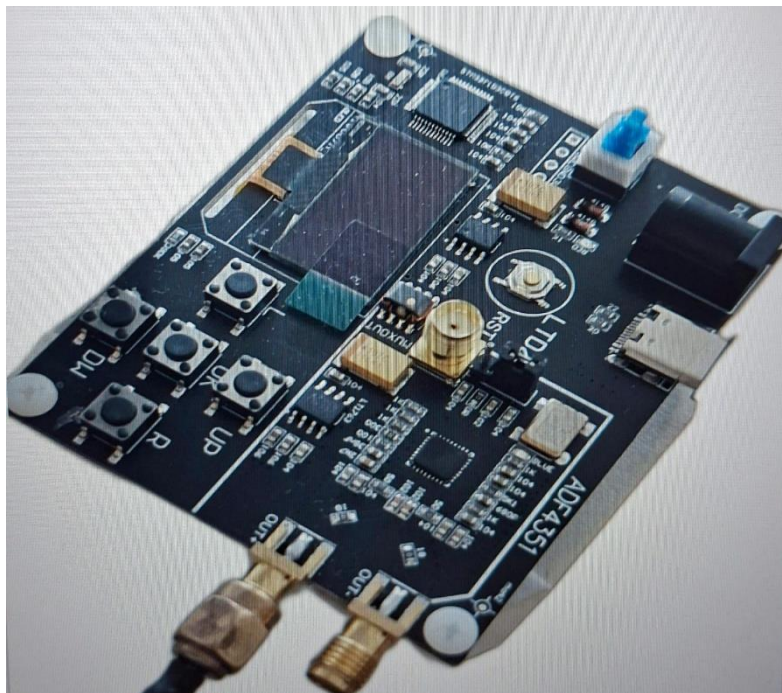


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд генератора сигналів на базі синтезатора частот ADF4351

Синтезатор ADF4351 дозволяє формувати високочастотний сигнал у діапазоні від 35 МГц до 4400 МГц, що значно перевищує робочий діапазон досліджуваних антен. Це дає можливість використовувати одну вимірювальну установку для дослідження різних типів антен без необхідності заміни генератора.

Принцип роботи синтезатора базується на використанні замкнутого контуру фазового автопідстроювання частоти. До складу мікросхеми входять:

генератор, керований напругою (VCO);

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

фазовий детектор;
програмовані ділянки частоти;
цифрові регістри керування;
вихідні підсилювачі сигналу.

Після встановлення необхідного значення частоти мікроконтролер записує параметри до регістрів синтезатора. Далі фазовий детектор порівнює частоту внутрішнього генератора з еталонним кварцовим генератором. У результаті роботи контуру PLL здійснюється автоматична стабілізація вихідної частоти.

Завдяки використанню технології Fractional-N PLL забезпечується висока точність встановлення частоти та малий крок перебудови. Це особливо важливо під час проведення лабораторних досліджень антен, де необхідно виконувати вимірювання на строго визначених частотах.

Основними технічними характеристиками синтезатора частот ADF4351 є широкий діапазон генерації частот від 35 МГц до 4400 МГц, що дозволяє використовувати його для дослідження різноманітних антенних систем. Пристрій працює від джерела живлення напругою 5 В та забезпечує крок перебудови частоти до 100 кГц. Похибка встановлення частоти не перевищує ± 1 кГц, що забезпечує високу точність проведення вимірювань.

Синтезатор має два високочастотних виходи OUTA та OUTB, максимальна вихідна потужність сигналу досягає +7 dBm. Для формування стабільного сигналу використовується система фазового автопідстроювання частоти типу Fractional-N PLL, яка забезпечує низький рівень фазових шумів та високу стабільність частоти.

Керування пристроєм може здійснюватися через інтерфейси USB та UART, що дозволяє інтегрувати синтезатор до складу автоматизованих вимірювальних комплексів. Завдяки широкому діапазону робочих частот та можливості програмного керування генератор ADF4351 є ефективним джерелом високочастотного сигналу для проведення досліджень антен у діапазоні частот 1000–1400 МГц.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Широкий діапазон робочих частот дозволяє використовувати генератор для дослідження антен систем зв'язку, телеметрії, безпілотних літальних апаратів, радіомоніторингу та засобів радіоелектронної боротьби.

Перевагою використання ADF4351 є можливість цифрового керування частотою. На відміну від традиційних генераторів сигналів, налаштування частоти може виконуватися програмно без участі оператора. Це дозволяє реалізувати повністю автоматизований режим роботи вимірювального комплексу.

Додатковою перевагою є компактні габарити пристрою та невелика споживана потужність. Завдяки цьому генератор легко інтегрується до складу лабораторної установки без необхідності використання окремих блоків живлення великої потужності.

Під час проведення вимірювань генератор формує високочастотний сигнал необхідної частоти, який через передавальну антену випромінюється у напрямку досліджуваної антени. Приймальна антена приймає електромагнітну хвилю, після чого виконується вимірювання рівня сигналу залежно від кута повороту антени.

Застосування синтезатора частот ADF4351 дозволило створити недорогу та функціональну автоматизовану установку для вимірювання діаграм спрямованості антен. За своїми технічними характеристиками даний пристрій повністю задовольняє вимоги до джерела сигналу для проведення лабораторних та експериментальних досліджень у діапазоні частот 1000–1400 МГц.

Таким чином, використання генератора на базі синтезатора частот ADF4351 є технічно обґрунтованим рішенням та забезпечує необхідні характеристики автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості антен.

2.3 Використання мікроконтролера Arduino Mega 2560 для автоматизації вимірювань

Автоматизація процесу вимірювання діаграми спрямованості антени потребує використання пристрою керування, який забезпечує координацію

					<i>ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи всіх елементів вимірювального комплексу. Для вирішення даного завдання у складі автоматизованої установки використано Arduino Mega 2560.

Arduino Mega 2560 є однією з найбільш поширених платформ для створення автоматизованих систем керування та збору даних. Вона побудована на базі мікроконтролера ATmega2560 виробництва компанії Microchip Technology та має достатню кількість входів і виходів для реалізації складних вимірювальних систем.

Зовнішній вигляд плати Arduino Mega 2560 наведений на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Мікроконтролерна плата Arduino Mega 2560

Основною функцією мікроконтролера в даній роботі є керування цифровим сервоприводом опорно-поворотного пристрою, збір вимірювальної інформації та передача отриманих даних до персонального комп'ютера для подальшої обробки.

До основних технічних характеристик Arduino Mega 2560 належать: тактова частота мікроконтролера 16 МГц, напруга живлення 5 В, наявність 54 цифрових входів-виходів, з яких 15 можуть використовуватися для формування широтно-імпульсної модуляції (PWM), а також 16 аналогових входів для підключення вимірювальних пристроїв та датчиків. Обсяг флеш-пам'яті програм складає

256 Кбайт, що дозволяє реалізовувати досить складні алгоритми автоматичного керування.

Вибір Arduino Mega 2560 для даної роботи обумовлений рядом переваг. Насамперед плата має достатню кількість портів введення-виведення для підключення сервоприводу, вимірювального тракту, індикаторів та інших периферійних пристроїв. Крім того, мікроконтролер підтримує стандартні інтерфейси обміну даними UART, SPI та I²C, що значно спрощує інтеграцію окремих модулів у єдину систему.

Особливістю даної платформи є наявність апаратної підтримки широтно-імпульсної модуляції. Саме за допомогою PWM-сигналу здійснюється керування цифровим сервоприводом DS3218 Pro. Зміна тривалості імпульсів дозволяє встановлювати необхідний кут повороту антени з високою точністю.

У розробленій установці Arduino Mega 2560 виконує такі функції:

- формування керуючих сигналів для сервоприводу;
- встановлення антени на заданий кут повороту;
- приймання результатів вимірювання;
- обробку отриманих даних;
- передачу інформації до персонального комп'ютера;
- забезпечення автоматичного режиму роботи установки.

Обмін інформацією між мікроконтролером та персональним комп'ютером здійснюється через USB-інтерфейс із використанням послідовного порту UART. Під час роботи програма на комп'ютері передає команди керування мікроконтролеру, а Arduino у відповідь надсилає значення поточного кута повороту та результати вимірювань.

Застосування мікроконтролера дозволяє повністю автоматизувати процес побудови діаграми спрямованості антени. Після запуску програми оператор задає параметри вимірювання, а всі подальші операції виконуються автоматично. Сервопривід повертає антену на необхідний кут, проводиться вимірювання рівня сигналу, після чого результати передаються до комп'ютера та записуються до таблиці.

					<i>ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки використанню Arduino Mega 2560 значно скорочується час проведення експерименту, підвищується точність вимірювань та усувається вплив людського фактора на результати досліджень. Крім того, програмна реалізація алгоритму керування дозволяє легко змінювати параметри роботи установки без внесення змін до її апаратної частини.

Таким чином, використання мікроконтролерної платформи Arduino Mega 2560 є доцільним та технічно обґрунтованим рішенням для створення автоматизованої установки вимірювання діаграми спрямованості антени. Плата забезпечує необхідні функції керування, має достатню обчислювальну потужність та дозволяє реалізувати автоматичний режим проведення вимірювань.

2.4 Розробка опорно-поворотного пристрою

Опорно-поворотний пристрій є одним з основних конструктивних елементів автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості антени. Його призначення полягає у забезпеченні точного повороту досліджуваної антени на заданий кут під час проведення вимірювань.

У ручних лабораторних установках поворот антени виконується оператором, що призводить до появи похибок, збільшення тривалості експерименту та зниження повторюваності результатів. Тому в даній роботі розроблено автоматизований опорно-поворотний пристрій, який дозволяє здійснювати поворот антени без участі оператора.

Конструкція опорно-поворотного пристрою складається з нерухомої основи, поворотної платформи, вузла кріплення антени, цифрового сервоприводу та елементів фіксації. Нерухома основа забезпечує стійкість усієї конструкції під час роботи. Поворотна частина призначена для встановлення досліджуваної антени та її переміщення у горизонтальній площині.

Загальний вигляд розробленого опорно-поворотного пристрою наведено на рис. 2.4.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

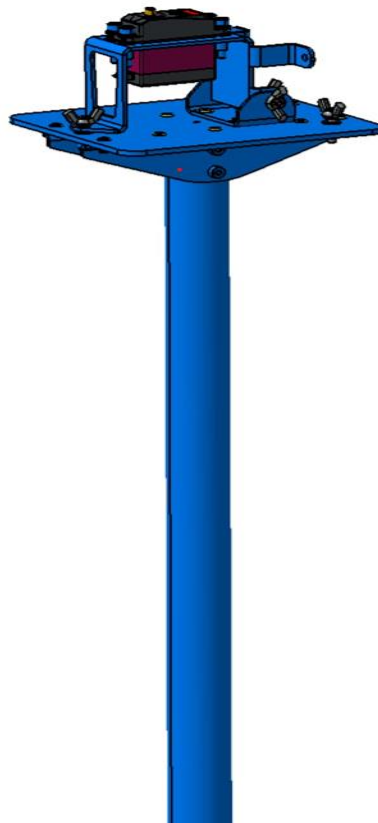


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд опорно-поворотного пристрою

Для повороту антени в автоматизованій вимірювальній установці розроблено опорно-поворотний пристрій, призначений для забезпечення обертання робочого вузла навколо вертикальної осі та його надійної фіксації у необхідному положенні. Конструкція забезпечує стійкість, плавність обертання та можливість регулювання положення виконавчого механізму (рис. 2.4).

Більш детально конструкцію опорно-поворотного пристрою можна подати у вигляді таких основних елементів:

- опорна стійка;
- поворотна платформа;
- вузол кріплення сервоприводу;
- підшипниковий вузол;
- система фіксації та регулювання.

Несучою частиною конструкції є вертикальна трубчаста стійка, яка забезпечує жорстке закріплення пристрою на основі. До верхньої частини стійки кріпиться поворотна платформа, виконана у вигляді металевої пластини складної

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

форми. Платформа служить основою для встановлення сервоприводу та допоміжних елементів конструкції.

Поворот платформи здійснюється навколо вертикальної осі за допомогою підшипникового вузла, який зменшує тертя та забезпечує плавність руху. Для фіксації положення використовуються гвинтові затискачі типу «баранчик», що дозволяють швидко регулювати положення механізму без застосування спеціального інструменту.

На верхній частині платформи встановлено сервопривід, закріплений за допомогою металевого кронштейна. Сервопривід забезпечує точне керування кутом повороту робочого органу. Конструкція кронштейна дозволяє надійно утримувати привід та зменшує вібрації під час роботи.

Платформа має отвори для монтажу та регулювання положення окремих вузлів, що забезпечує універсальність конструкції та можливість адаптації пристрою до різних типів обладнання.

До переваг розробленого опорно-поворотного пристрою належать:

- простота конструкції;
- компактність;
- надійність у роботі;
- можливість точного позиціонування;
- зручність регулювання та обслуговування.

Запропонований опорно-поворотний пристрій може використовуватися в робототехнічних системах, автоматизованих механізмах, системах наведення, навчальних стендах та інших технічних установках, де необхідне кероване обертання виконавчого механізму.

Поворот антени здійснюється за допомогою цифрового сервоприводу, встановленого на спеціальному кронштейні. Вал сервоприводу механічно з'єднаний із поворотною платформою, на якій закріплюється антена. Під час подачі керуючого сигналу сервопривід повертає платформу на заданий кут.

Вузол встановлення сервоприводу наведено на рис. 2.5.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

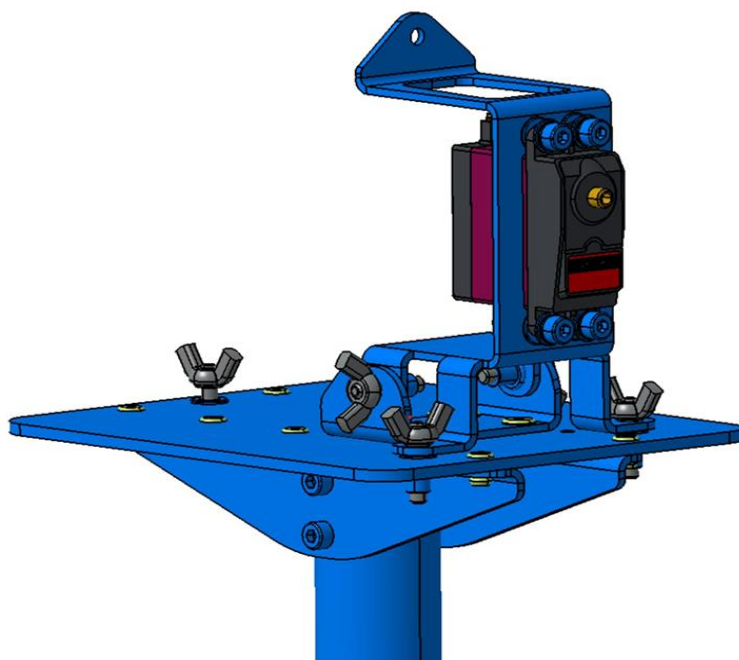


Рисунок 2.5 – Вузол кріплення цифрового сервоприводу в опорно-поворотному пристрої

Під час розробки конструкції враховувалися габарити та маса досліджуваної антени. Сервопривід повинен мати достатній крутний момент для повороту антени без ривків та прослизання. Також важливо забезпечити жорсткість кріплення, оскільки будь-який люфт у механізмі призводить до похибки встановлення кута.

Основними вимогами до опорно-поворотного пристрою є:

- забезпечення точного встановлення кута повороту антени;
- достатня механічна міцність конструкції;
- відсутність значного люфту у вузлах з'єднання;
- можливість автоматизованого керування;
- простота монтажу антени;
- надійність роботи під час багаторазових циклів вимірювання.

У розробленому пристрої використано цифровий сервопривід DS3218 Pro, який має достатній крутний момент для переміщення антени разом із кріпленням. Це дозволяє відмовитися від використання крокового двигуна та

окремого драйвера керування. Такий підхід спрощує електричну схему установки та підвищує її надійність.

Керування опорно-поворотним пристроєм здійснюється мікроконтролером Arduino Mega 2560. Мікроконтролер формує широтно-імпульсний сигнал, який надходить на керуючий вхід сервоприводу. Залежно від тривалості імпульсу сервопривід встановлює вал у відповідне кутове положення.

Принцип роботи опорно-поворотного пристрою полягає в наступному. Після запуску програми мікроконтролер встановлює антену у початкове положення. Потім антена послідовно повертається на заданий крок, наприклад 5° або 10° . У кожному положенні виконується вимірювання рівня прийнятого сигналу. Після завершення вимірювання в одній точці Arduino подає команду сервоприводу на перехід до наступного кута.

Таким чином, весь процес вимірювання діаграми спрямованості виконується автоматично. Оператор лише задає початкові параметри: діапазон кутів, крок повороту та частоту вимірювання. Далі система самостійно виконує поворот антени, зняття вимірювань та передачу даних до персонального комп'ютера.

Застосування опорно-поворотного пристрою дозволяє підвищити точність вимірювання діаграми спрямованості, зменшити вплив людського фактора та скоротити час проведення експерименту. Крім того, автоматизований поворот антени забезпечує однакові умови вимірювання для кожного кута, що позитивно впливає на достовірність результатів.

Розроблена конструкція є простою у виготовленні, не потребує складних механічних вузлів та може бути використана у лабораторних умовах для дослідження антен у діапазоні частот 1000–1400 МГц.

Таким чином, опорно-поворотний пристрій забезпечує необхідне позиціонування досліджуваної антени та є важливою складовою автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості.

					<i>ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Вибір цифрового сервоприводу DS3218 Pro

Для забезпечення автоматичного повороту антени в розробленій вимірювальній установці необхідно використовувати виконавчий механізм, який забезпечує точне позиціонування антени у просторі. Як виконавчий пристрій було обрано цифровий сервопривід DS3218 Pro.

Сервопривід являє собою електромеханічний пристрій, який складається з електродвигуна постійного струму, редуктора, датчика положення та електронної схеми керування. На відміну від звичайних електродвигунів, сервопривід дозволяє не лише здійснювати обертання вала, але й точно встановлювати його у визначене кутове положення.

Зовнішній вигляд цифрового сервоприводу DS3218 Pro наведений на рис 2.6.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд цифрового сервоприводу DS3218 Pro

Однією з основних причин вибору саме сервоприводу DS3218 Pro є його високий крутний момент. При напрузі живлення 6 В сервопривід розвиває крутний момент до 20 кг·см, що є достатнім для повороту антени разом із кріпленням та елементами опорно-поворотного пристрою.

Основними технічними характеристиками сервоприводу DS3218 Pro є робоча напруга живлення від 4,8 до 6,8 В, максимальний крутний момент до

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20 кг·см, кут повороту до 180°, цифровий принцип керування та висока точність позиціонування. Сервопривід забезпечує швидке встановлення необхідного кута та стабільно утримує його під час проведення вимірювань.

2.6 Принцип роботи цифрового сервоприводу

Важливою перевагою цифрового сервоприводу є наявність внутрішнього зворотного зв'язку. Вбудований датчик положення постійно контролює кут повороту вихідного вала. Це дозволяє автоматично коригувати положення механізму та мінімізувати похибку позиціонування.

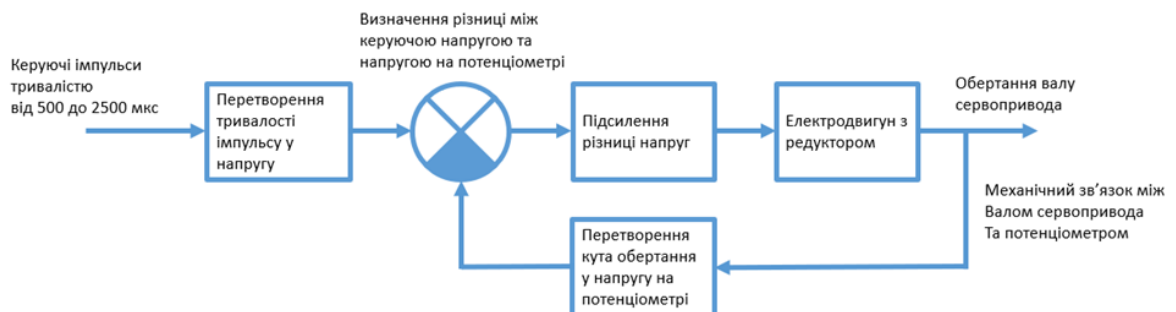


Рисунок 2.7 – Принцип роботи цифрового сервоприводу із зворотним зв'язком

Принцип роботи цифрового сервоприводу базується на використанні системи зворотного зв'язку, схема якої наведена на рис. 2.7. Керуючий сигнал від мікроконтролера перетворюється у відповідне значення напруги, яке визначає необхідне положення вихідного вала. Отримане значення порівнюється з сигналом, що надходить від потенціометра, механічно з'єднаного з валом сервоприводу. У разі виникнення різниці між заданим та фактичним положенням електронна схема керування формує сигнал керування електродвигуном. Після досягнення необхідного положення різниця сигналів зменшується до мінімуму, що забезпечує точне позиціонування вихідного вала сервоприводу.

Керування сервоприводом здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). На вхід сервоприводу подається імпульсний сигнал з періодом близько 20 мс, тривалість якого визначає необхідний кут повороту вихідного вала. Отриманий сигнал перетворюється електронною схемою керування у відповідне значення напруги та порівнюється із сигналом

зворотного зв'язку від потенціометра. У разі виникнення різниці між заданим і фактичним положенням формується керуючий сигнал для електродвигуна. Після досягнення необхідного положення різниця сигналів зменшується до нуля, двигун зупиняється, а вал сервоприводу фіксується у заданому положенні.

У процесі розробки автоматизованої установки також розглядався варіант використання крокового двигуна. Проте застосування крокового двигуна потребує використання додаткового драйвера керування, окремого блоку живлення та більш складного алгоритму програмного керування. Крім того, у випадку пропуску кроків можливе накопичення похибки позиціонування.

На відміну від крокового двигуна, сервопривід DS3218 Pro має низку переваг:

- просте підключення до мікроконтролера Arduino Mega 2560;
- відсутність необхідності використання окремого драйвера;
- висока точність позиціонування;
- наявність системи зворотного зв'язку;
- достатній крутний момент;
- компактні габарити конструкції;
- низька вартість реалізації системи.

Керування сервоприводом здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (PWM). Зміна тривалості керуючого імпульсу дозволяє задавати необхідний кут повороту вала сервоприводу. Таким чином, мікроконтролер Arduino може точно позиціонувати антену у необхідному напрямку без використання складних механічних передач.

Під час роботи автоматизованої установки сервопривід отримує команди від мікроконтролера та повертає антену на заданий кут. Після завершення повороту виконується вимірювання рівня сигналу. Далі система переходить до наступної точки вимірювання відповідно до заданого кроку сканування.

Використання цифрового сервоприводу DS3218 Pro дозволило значно спростити конструкцію автоматизованої установки та забезпечити необхідну точність позиціонування антени. Завдяки високому крутному моменту та

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

наявності системи зворотного зв'язку сервопривід повністю задовольняє вимоги, що висуваються до виконавчого механізму опорно-поворотного пристрою.

Таким чином, вибір цифрового сервоприводу DS3218 Pro є технічно обґрунтованим рішенням для реалізації автоматизованої установки вимірювання діаграми спрямованості антени та забезпечує надійне позиціонування антени під час проведення експериментальних досліджень.

2.7 Розробка схеми керування сервоприводом

Для автоматизації процесу вимірювання діаграми спрямованості антени було розроблено схему керування цифровим сервоприводом DS3218 Pro на базі мікроконтролерної плати Arduino Mega 2560.

Схема керування забезпечує передачу команд від мікроконтролера до сервоприводу та дозволяє здійснювати автоматичне позиціонування антени під час проведення вимірювань. Використання сервоприводу дозволяє реалізувати точне встановлення кута повороту антени без застосування складних механічних передач та додаткових драйверів керування.

Цифровий сервопривід DS3218 Pro має три дроти підключення. Червоний провід використовується для подачі напруги живлення +5 В. Коричневий провід підключається до загальної шини живлення GND. Помаранчевий провід є сигнальним та призначений для приймання керуючих імпульсів від мікроконтролера.

У розробленій системі сигнальний провід сервоприводу підключається до цифрового виводу D9 плати Arduino Mega 2560. Даний вивід підтримує формування широтно-імпульсної модуляції (PWM), яка використовується для керування кутом повороту сервоприводу.

Принцип керування сервоприводом базується на зміні тривалості керуючого імпульсу. При подачі імпульсу тривалістю близько 1 мс вал сервоприводу займає положення, що відповідає куту 0°. При тривалості імпульсу близько 1,5 мс вал встановлюється у середнє положення, яке відповідає куту 90°.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

При збільшенні тривалості імпульсу до 2 мс сервопривід повертається приблизно на 180°.

Таким чином, зміна параметрів ШІМ-сигналу дозволяє точно задавати необхідний кут повороту антени. Формування керуючих сигналів здійснюється програмними засобами Arduino IDE за допомогою стандартної бібліотеки Servo.h.

Під час роботи автоматизованої установки мікроконтролер отримує команду на встановлення певного кута повороту антени. Після обробки команди формується відповідний ШІМ-сигнал, який надходить на сервопривід. Сервопривід повертає антену на необхідний кут та утримує її в цьому положенні до отримання наступної команди.

Для забезпечення стабільної роботи сервоприводу використовується окреме джерело живлення напругою 5–6 В. При цьому загальний провід джерела живлення об'єднується із загальним проводом мікроконтролера. Таке рішення дозволяє уникнути перевантаження плати Arduino та забезпечити стабільну роботу виконавчого механізму.

Розроблена схема керування є простою у реалізації, не потребує використання додаткових драйверів та забезпечує високу точність позиціонування антени під час проведення вимірювань.

Таким чином, використання Arduino Mega 2560 спільно з цифровим сервоприводом DS3218 Pro дозволяє реалізувати надійну систему автоматичного керування опорно-поворотним пристроєм, що забезпечує необхідну точність вимірювання діаграми спрямованості антени.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

хема підключення сервоприводу DS3218 Pro до Arduino Mega 256

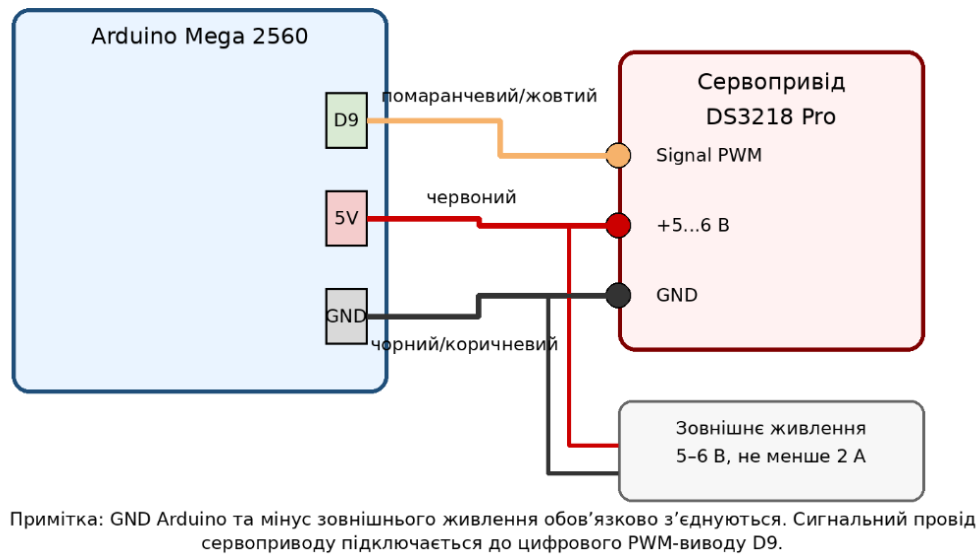


Рисунок 2.8 – Схема підключення сервоприводу DS3218 Pro до Arduino Mega 2560

2.8 Розрахунок параметрів вимірювальної установки

2.8.1 Розрахунок резонансної частоти та довжини хвилі антени

Одним із основних параметрів антени є довжина хвилі, яка визначається робочою частотою системи. У даній роботі вимірювання виконуються на частоті 1200 МГц.

Довжина хвилі визначається за формулою:

$$f_p = \frac{c}{2l} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2 \cdot 12,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 1,2 \cdot 10^9 \text{ Гц} = 1,2 \text{ ГГц},$$

а діапазон робочих частот приблизно дорівнює 10% від резонансної частоти, тобто

$$\Delta f_p = 0,1 \cdot 1,2 \text{ ГГц} = 120 \text{ МГц}.$$

2.8.2 Розрахунок геометричних параметрів симетричного вібратора

Використаємо напівхвильовий $2l = \frac{\lambda}{2}$ вібратор, який працює на такій же частоті, що і приймальний досліджуваний вібратор (рис. 2.9).

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

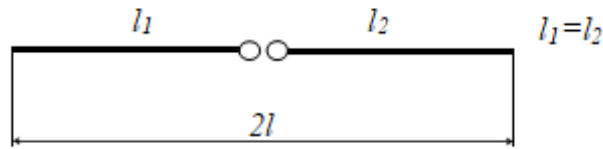


Рисунок 2.9 – Симетричний напівхвильовий вібратор

Довжина симетричного півхвильового вібратора

$$2l = 12,5 \text{ см.}$$

Для зручності у виготовленні вібратора вибираємо форму плеч у вигляді довгих пластин. Необхідно врахувати, що чим більша ширина пластин, тим більша смуга пропускання, але ширина має бути багато меншою довжини хвилі. Товщина має забезпечити механічну міцність. Вибираються ширина a і товщина b

$$a = 0,6 \text{ см, } b = 0,15 \text{ см.}$$

Напівхвильовий вібратор має реактивну складову вхідного опору $x_{\text{вх}} = 42,5 \text{ Ом}$, для її компенсації плечі укорочують на величину Δ :

$$\Delta = \frac{x_{\text{вх}} \cdot \lambda}{2\pi \cdot z_{\text{хе}}},$$

де $z_{\text{хе}}$ – еквівалентний хвильовий опір вібратора, що визначається формулою:

$$z_{\text{хе}} = 120 \left(\ln \frac{\lambda}{\pi a} - 0,577 \right).$$

З урахуванням параметрів еквівалентний опір антени дорівнює:

$$Z_{\text{хе}} = 120 \left(\ln \frac{25 \text{ см}}{3,14 \cdot 0,5 \text{ см}} - 0,577 \right) = 240,960 \text{ Ом} \approx 2410 \text{ м}$$

Укорочення вібратора буде

$$\Delta = \frac{42,5 \cdot 25}{2 \cdot 3,14 \cdot 240,96} = 0,703 \text{ см}$$

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Тоді довжина укороченого вібратора буде дорівнювати:

$$2l = \frac{\lambda}{2} - 2\Delta = \frac{25\text{см}}{2} - 2 \cdot 0,70\text{см} = 11,1\text{ см}$$

Активний вхідний опір для даного вібратора приблизно дорівнює

$$R_{\Sigma} = 73,1\text{ Ом.}$$

Симетричний вібратор має характеристику спрямованості в електричній площині Е у вигляді вісімки, а в магнітній площині Н – коло (рис. 2.10). Тобто диполь випромінює електромагнітне поле у дві сторони, тому необхідно використовувати плоский рефлектор (рис. 2.10).

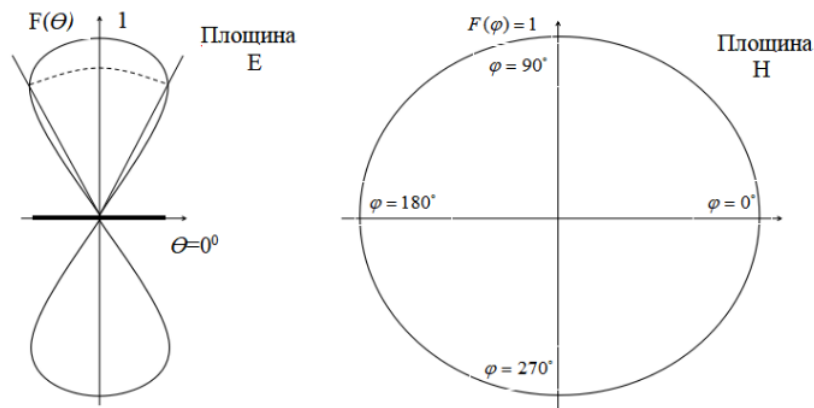


Рисунок 2.10 – ДС симетричного півхвильового вібратора в електричній (Е) та магнітній (Н) площинах

Рефлектор являє собою металевий диск з діаметром $d = 0,7 \dots 0,8 \lambda$.

Візьмемо

$$d = 0,7 \cdot 25 = 17,5\text{ см.}$$

товщина екрану 0,05 см, матеріал мідь. Висота екрану над рефлектором вибирається $h = 0,25 \cdot 25 = 6,25\text{ см.}$

Діаграма спрямованості вібратора розташованого на висоті h над рефлектором для випадку, коли кут θ відраховується від осі системи (рис. 2.7), визначається формулами: в електричній площині Е

$$f_E(\theta) = \frac{60 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \sin \theta\right)}{\cos \theta} \cdot 2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \sin \theta\right), \quad (2.7)$$

у магнітній площині Н

$$f_H = 120 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot h \cdot \sin \theta\right), \quad (2.8)$$

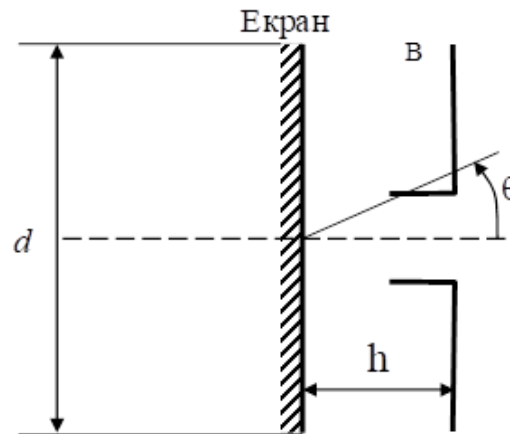


Рисунок 2.11 Активний вібратор над плоским

Проведено розрахунок діаграм спрямованості в програмному середовищі MATHCAD, графіки їх в полярній системі координат показані на рис. 2.12, 2.9.

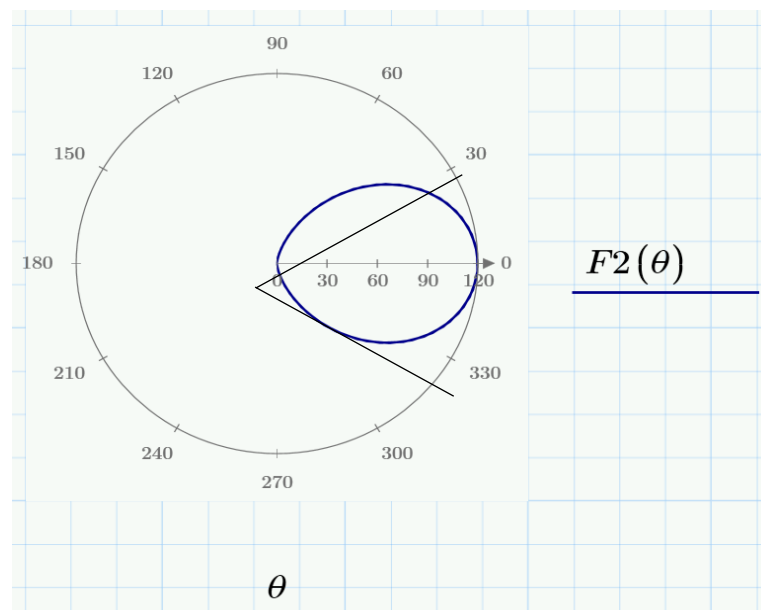


Рисунок 2.12 – Зображення ДС у електричній площині Е

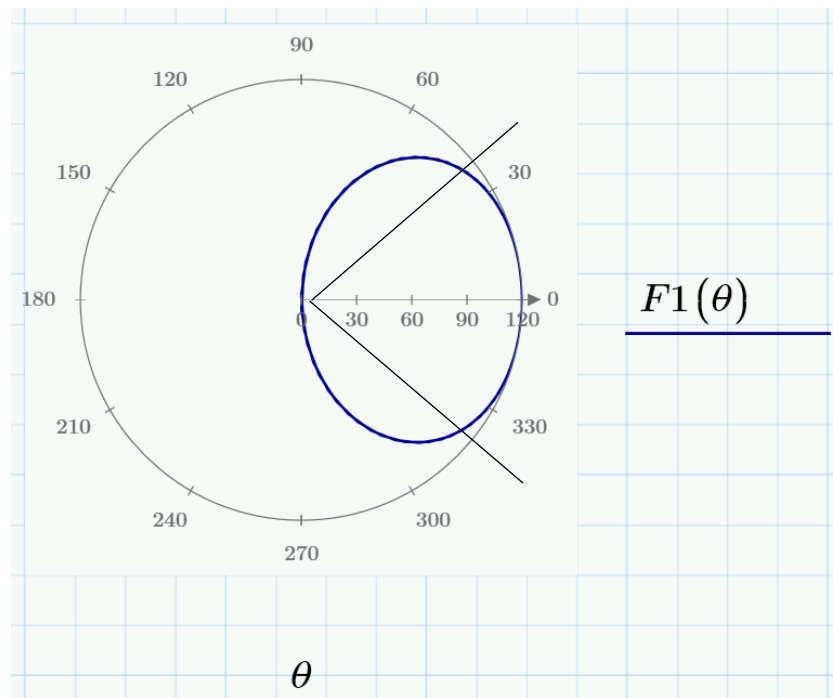


Рисунок 2.13 – Зображення ДС у електричній площині Н

Визначено, що ширина діаграми спрямованості в площині Е дорівнює $2\theta_{0,1p}^E \approx 120^\circ$, а площині Н $2\theta_{0,1p}^E \approx 150^\circ$.

Вибір та розрахунок елементів живлення антени

Півхвильовий вібратор з вхідним опором $R_{ex} = 73,1$ Ом доцільно живити коаксіальним кабелем з хвильовим опором $z_x = 75$ Ом.

Для з'єднань бажано використовувати розніми типу SMA, тому що вони є високочастотні.

Під'єднання симетричного вібратора до коаксіальної лінії викликає асиметрію струмів у плечах вібратора, тому що струм, який протікає по половині вібратора, що вмикається до центральної жили частково відгалужується на зовнішню оболонку провідника (рис. 2.14). Це може привести до відхилення максимуму характеристики спрямованості дзеркальної антени.

Вирівнювання струмів у плечах вібратора здійснюється пристроями симетрування. Серед таких пристроїв, як чвертьхвильові "стакани", щілинні пристрої симетрування, U-коліно, симетрувальні приставки більш технологічним в даному випадку є і вибирається симетрувальна приставка. Тоді

конструкцію вібратора з приставкою над екраном зручно виконати такою, як на рис. 2.15.

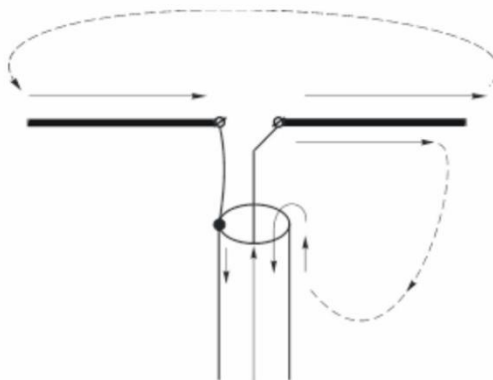


Рисунок 2.14 – Стікання струмів з вібратора

Довжина приставки дорівнює $\frac{\lambda_0}{4} = \frac{25\text{см}}{4} = 6,25\text{см}$

В центрі рефлектора виконується отвір, через який проходить коаксіальний кабель живлення .

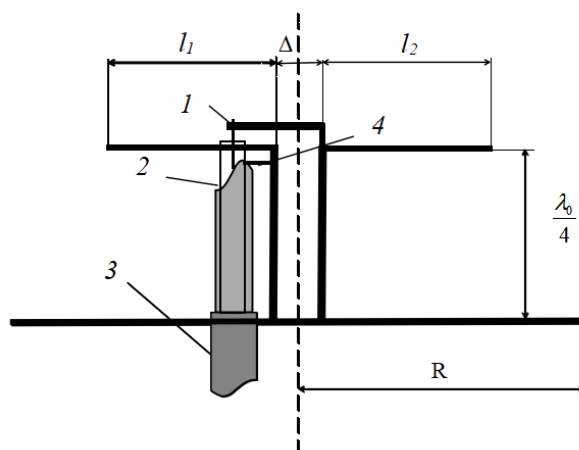


Рисунок 2.15 – Конструкція вібратора з приставкою над екраном: 1 – центральна жила коаксіалу з'єднується з правим плечем; 2 – діелектрик між центральною та зовнішньою жилою; 3 – зовнішня ізоляція; 4 – екранування коаксіального кабелю з'єднується з лівим плечем

Такий випромінювач показано на (рис. 2.16)

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

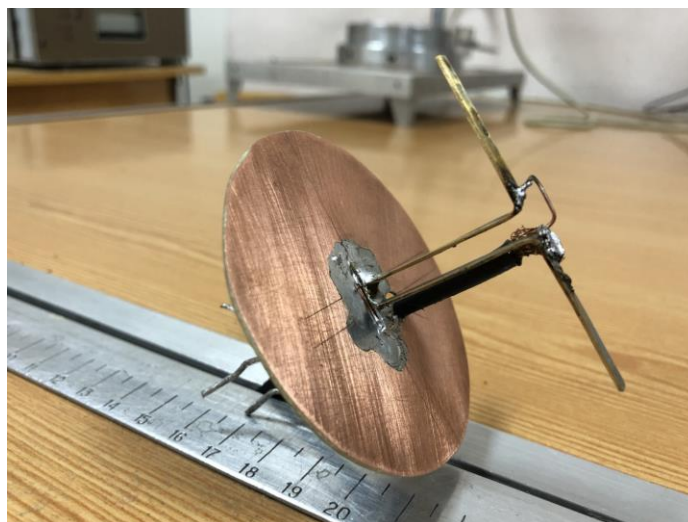


Рисунок 2.16 – Випромінювач у складі вібратора, плоского рефлектора, симетрувальної приставки

Виготовлений випромінювач показано на рис. 2.16. Він виконаний з латунної пластини шириною $d = 0,5$ см, довжина плечей вібратора $l_1 = l_2 = 2,7$ см, висота над екраном $h=6,25$ см. Такі геометричні розміри відповідають розрахованим параметрам антени для роботи на частоті 1200 МГц.

2.9 Розрахунок дальньої зони вимірювання

Оскільки вимірювання діаграми спрямованості повинні виконуватися в дальній зоні антени, необхідно визначити мінімальну відстань між передавальною та приймальною антенами. Якщо антени розташовані занадто близько, результати вимірювань будуть спотворені через вплив ближнього електромагнітного поля.

Мінімальна відстань дальньої зони визначається за формулою

$$R \geq 2D^2 / \lambda$$

де R — мінімальна відстань дальньої зони, м;

D — найбільший геометричний розмір антени, м;

λ — довжина хвилі, м.

Для розробленої антени найбільший розмір рефлектора становить

$$D = 17,5 \text{ см} = 0,175 \text{ м.}$$

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Довжина хвилі, визначена раніше для частоти 1200 МГц, становить

$$\lambda = 0,25 \text{ м.}$$

Підставимо значення у формулу:

$$R \geq (2 \cdot 0,175^2) / 0,25$$

$$R \geq 0,245 \text{ м.}$$

Отже, мінімальна відстань між передавальною та приймальною антенами повинна становити не менше 0,25 м.

З метою зменшення похибки вимірювання та забезпечення стабільних результатів у розробленій установці доцільно прийняти відстань між антенами не менше 1 м, що значно перевищує мінімальну розрахункову величину дальньої зони.

Таким чином, обрана відстань між антенами забезпечує виконання вимірювань у дальній зоні та дозволяє отримати достовірну діаграму спрямованості досліджуваної антени.

2.9.1 Вибір кроку повороту антени

Для побудови діаграми спрямованості досліджуваної антени необхідно визначити крок її повороту під час вимірювань. Від величини кроку залежить кількість вимірювальних точок, точність побудови діаграми спрямованості та тривалість проведення експерименту.

У розробленій автоматизованій установці прийнято крок повороту антени 10°. Таке значення забезпечує достатню деталізацію діаграми спрямованості та водночас дозволяє скоротити час проведення вимірювань.

Кількість точок вимірювання в секторі від 0° до 180° визначається за формулою

$$N = 180^\circ / 10^\circ + 1 = 19 \text{ точок.}$$

Таким чином, під час проведення вимірювань антена послідовно встановлюється в положення 0°, 10°, 20°, 30° та далі до 180°. У кожному положенні виконується вимірювання рівня прийнятого сигналу та запис результатів до таблиці.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обраний крок повороту забезпечує достатню точність побудови діаграми спрямованості для лабораторних досліджень і відповідає вимогам до автоматизованої вимірювальної установки.

2.9.2 Оцінка похибки вимірювань

Під час вимірювання діаграми спрямованості антени на точність отриманих результатів впливають похибки позиціонування антени, нестабільність рівня сигналу генератора та похибки вимірювального обладнання.

Основним джерелом похибки в розробленій установці є неточність встановлення кута повороту антени сервоприводом DS3218 Pro. Згідно з технічними характеристиками сервоприводу, похибка позиціонування не перевищує $\pm 1^\circ$.

Відносна похибка визначення кута повороту визначається за формулою

$$\delta = (\Delta\varphi / \varphi) \cdot 100 \%$$

де δ – відносна похибка вимірювання, %;

$\Delta\varphi$ – абсолютна похибка встановлення кута, град;

φ – кут повороту антени, град.

Для кута повороту 10° відносна похибка становить

$$\delta = (1 / 10) \cdot 100 \% = 10 \%$$

При збільшенні кута повороту відносна похибка зменшується. Для кута 90° вона становить

$$\delta = (1 / 90) \cdot 100 \% = 1,11 \%$$

Таким чином, похибка позиціонування сервоприводу не має суттєвого впливу на результати вимірювання діаграми спрямованості антени.

Додатковий вплив на точність вимірювань мають нестабільність рівня сигналу генератора ADF4351, похибки приймального тракту та зовнішні електромагнітні завади. Для зменшення впливу зазначених факторів вимірювання проводяться в однакових умовах та при фіксованій відстані між передавальною і приймальною антенами.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, сумарна похибка автоматизованої установки є допустимою для проведення лабораторних досліджень діаграм спрямованості антен у діапазоні частот 1200 МГц.

2.10 Досліджувальна антена

Для проведення експериментальних досліджень у роботі використано планарну спіральну антену, загальний вигляд якої наведено на рис. 2.17.



Рисунок 2.17 – Загальний вигляд досліджуваної планарної спіральної антени

Планарні спіральні антени належать до класу широкосмугових антен і характеризуються відносно стабільними параметрами в широкому діапазоні частот. Основною особливістю таких антен є спіральна форма провідників, розміщених на плоскій діелектричній основі.

Досліджувана антена використовується як приймальна антена в складі автоматизованої вимірювальної установки. Під час проведення експерименту антена встановлюється на опорно-поворотному пристрої та автоматично повертається за допомогою цифрового сервоприводу DS3218 Pro.

Застосування планарної спіральної антени дозволяє провести експериментальне дослідження залежності рівня прийнятого сигналу від кута її орієнтації у просторі та побудувати відповідну діаграму спрямованості.

Використання даної антени забезпечило можливість практичної перевірки працездатності розробленої автоматизованої установки та проведення експериментальних вимірювань у лабораторних умовах.

Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи виконано розробку та технічне обґрунтування автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості антен. Сформовано структуру вимірювального комплексу та визначено склад його основних функціональних вузлів.

Обґрунтовано вибір генератора сигналів на базі синтезатора частот ADF4351, мікроконтролерної платформи Arduino Mega 2560 та цифрового сервоприводу DS3218 Pro. Проведений аналіз показав, що обрані компоненти забезпечують необхідну стабільність роботи системи, точність позиціонування антени та можливість автоматизації процесу вимірювання.

Розроблено конструкцію опорно-поворотного пристрою та схему керування сервоприводом. Використання цифрового сервоприводу із системою зворотного зв'язку дозволило реалізувати точне позиціонування антени за заданим кутом повороту та забезпечити повторюваність результатів вимірювань.

Виконано розрахунок параметрів антенної системи для роботи на частоті 1200 МГц. Визначено резонансну частоту, довжину хвилі, геометричні розміри симетричного півхвильового вібратора та параметри рефлектора. Побудовано діаграми спрямованості антени та проаналізовано особливості її роботи в заданому частотному діапазоні.

Проведено розрахунок дальньої зони вимірювання, що дозволило визначити мінімально допустиму відстань між передавальною та приймальною антенами під час проведення експерименту. Також обґрунтовано вибір кроку

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

повороту антени, який забезпечує достатню деталізацію діаграми спрямованості при збереженні прийнятної тривалості вимірювань.

Отримані результати підтверджують можливість створення автоматизованої вимірювальної установки для дослідження параметрів антен та формують технічну основу для розроблення програмного забезпечення і проведення експериментальних досліджень, які розглядаються в наступному розділі роботи.

					<i>ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
						52
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Алгоритм роботи автоматизованої установки

Для автоматизації процесу вимірювання діаграми спрямованості антени було розроблено програмно-апаратний комплекс на базі мікроконтролера Arduino Mega 2560, синтезатора частот ADF4351 та цифрового сервоприводу DS3218 Pro.

Принцип роботи автоматизованої установки полягає у послідовному повороті досліджуваної антени на заданий кут з одночасним вимірюванням рівня прийнятого сигналу. Керування процесом вимірювання здійснюється мікроконтролером Arduino Mega 2560, який координує роботу сервоприводу та забезпечує передачу даних до персонального комп'ютера.

Після запуску програми виконується ініціалізація всіх елементів системи. Мікроконтролер встановлює сервопривід у початкове положення, після чого генератор ADF4351 формує високочастотний сигнал з частотою 1200 МГц. Передавальна антена випромінює сигнал у напрямку досліджуваної антени.

Під час проведення вимірювань сервопривід послідовно повертає антену з кроком 10° . У кожному положенні виконується вимірювання рівня прийнятого сигналу. Отримані результати передаються до персонального комп'ютера та записуються до таблиці для подальшої обробки.

Після завершення вимірювання у всіх точках формується масив експериментальних даних, на основі якого будується діаграма спрямованості антени в полярній системі координат.

Алгоритм роботи автоматизованої установки наведений на рис. 3.1.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

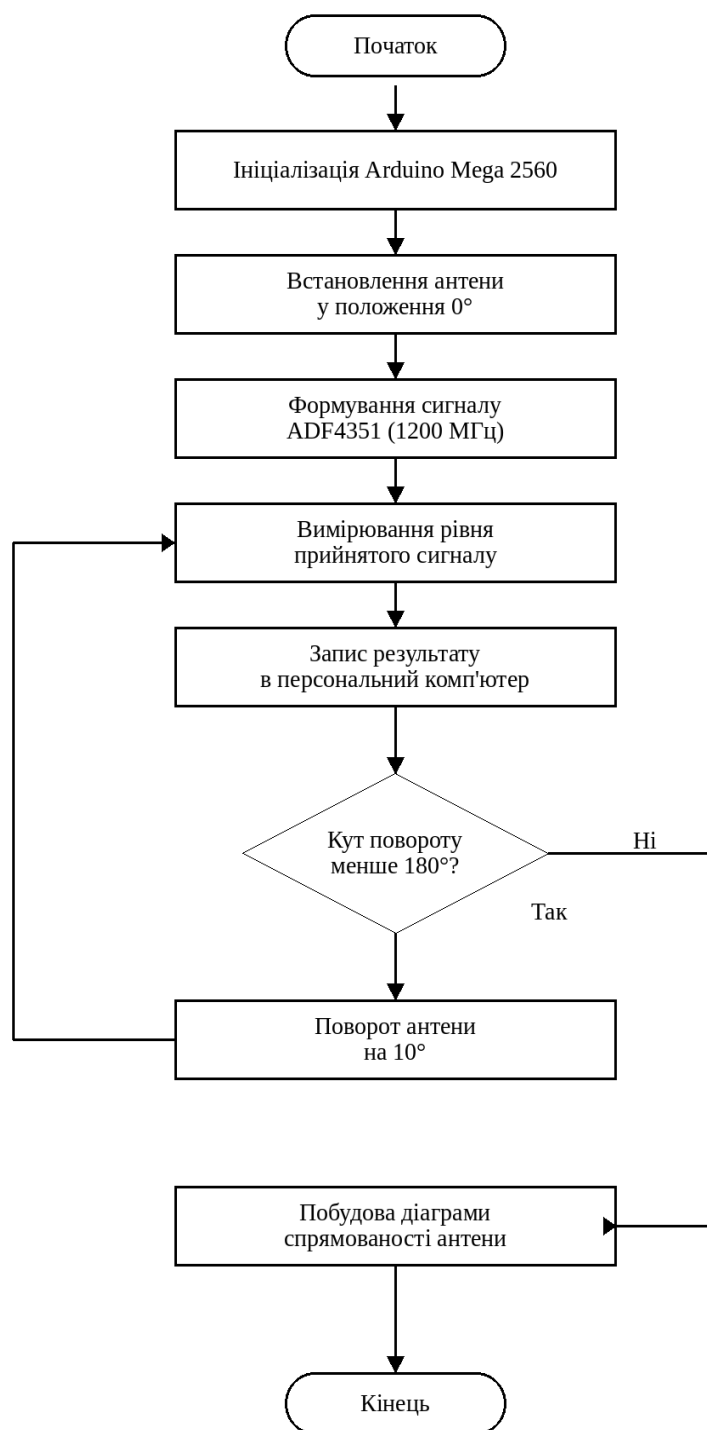


Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи автоматизованої установки вимірювання діаграми спрямованості антени

Основними етапами алгоритму є:

- запуск системи;
- встановлення початкового положення антени;
- генерація сигналу частотою 1200 МГц;

- поворот антени на заданий кут;
- вимірювання рівня сигналу;
- запис результатів вимірювання;
- перехід до наступного кута;
- побудова діаграми спрямованості;
- завершення роботи програми.

Застосування автоматизованого алгоритму дозволяє значно скоротити час проведення експерименту та зменшити вплив людського фактора на результати вимірювань.

3.2 Розробка програмного забезпечення Arduino Mega 2560

Керування опорно-поворотним пристроєм здійснюється за допомогою мікроконтролерної плати Arduino Mega 2560. Програмне забезпечення розроблено в середовищі Arduino IDE із використанням стандартної бібліотеки Servo.h, яка забезпечує керування цифровим сервоприводом DS3218 Pro.

Основним завданням програмного забезпечення є автоматичне позиціонування приймальної антени під час вимірювання діаграми спрямованості. Програма забезпечує послідовний поворот антени в межах від 0° до 180° з кроком 10° . У кожному положенні антени виконується пауза для проведення вимірювання рівня прийнятого сигналу та запису результатів.

Після завершення циклу вимірювань сервопривід автоматично повертає антену у вихідне положення, що забезпечує готовність установки до повторного проведення експерименту.

Лістинг 3.1 – Програма автоматичного позиціонування приймальної антени засобами Arduino Mega 2560.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

```

#include <Servo.h>

Servo antennaServo;

const int servoPin = 9;
const int startAngle = 0;
const int endAngle = 180;
const int stepAngle = 10;
const int measureDelay = 1000;

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    antennaServo.attach(servoPin);
    antennaServo.write(startAngle);

    delay(1000);
}

void loop() {
    for (int angle = startAngle; angle <= endAngle; angle += stepAngle) {
        antennaServo.write(angle);

        delay(measureDelay);

        Serial.print(angle);
        Serial.println(", ");

        delay(500);
    }

    antennaServo.write(startAngle);

    while (true) {

```

Представлена програма забезпечує автоматичний поворот антени із заданим кроком, формування керуючих сигналів для сервоприводу та передачу результатів вимірювань через послідовний інтерфейс до персонального комп'ютера для подальшої обробки.

У програмі використовується бібліотека Servo.h, яка забезпечує формування керуючих імпульсів для сервоприводу. Функція attach виконує підключення сервоприводу до цифрового виводу D9 плати Arduino Mega 2560. За допомогою функції write встановлюється необхідний кут повороту антени.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зміна кута виконується в циклі for з кроком 10° . Після кожного повороту антени виконується затримка тривалістю 1000 мс, що забезпечує стабілізацію механічної системи та створює умови для проведення вимірювання рівня сигналу.

Після завершення проходження всіх кутових положень сервопривід повертає антену у початкове положення 0° . Такий алгоритм забезпечує автоматизацію процесу вимірювання діаграми спрямованості та зменшує вплив людського фактора на результати експериментальних досліджень.

3.3 Передача даних до ПК

Для автоматизації процесу вимірювання діаграми спрямованості антени використовується персональний комп'ютер, який виконує функції приймання, збереження та подальшої обробки результатів вимірювань.

Для приймання та вимірювання рівня сигналу використовується програмно-визначуваний радіоприймач RTL-SDR. Пристрій побудований на базі мікросхеми RTL2832U та забезпечує приймання сигналів у широкому діапазоні частот. Основною перевагою RTL-SDR є можливість цифрового вимірювання рівня сигналу та інтеграції з програмним забезпеченням персонального комп'ютера.

Керування поворотом приймальної антени здійснюється мікроконтролером Arduino Mega 2560, який формує керуючі сигнали для сервоприводу DS3218 Pro. Одночасно з позиціонуванням антени виконується вимірювання рівня прийнятого сигналу за допомогою приймача RTL-SDR.

Передача даних до персонального комп'ютера здійснюється через USB-інтерфейс. Отримані дані обробляються програмним забезпеченням, розробленим мовою Python. Програма забезпечує синхронізацію процесу повороту антени та вимірювання рівня сигналу.

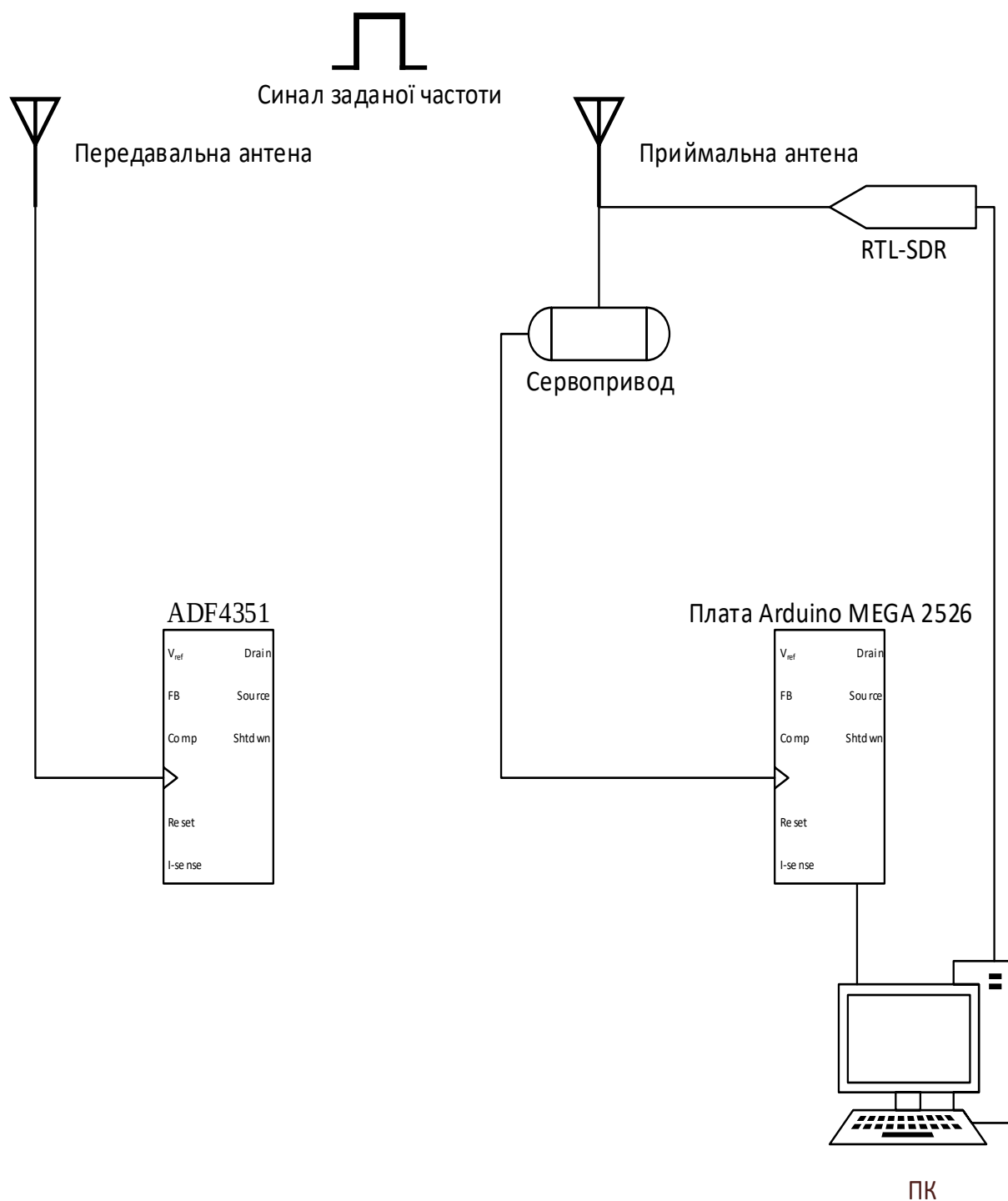


Рисунок 3.3 – Структурна схема передачі та обробки даних у лабораторній установці

У процесі роботи для кожного положення антени формується запис, який містить:

- час проведення вимірювання;
- кут повороту антени;
- рівень прийнятого сигналу в децибелах.

Результати вимірювань автоматично зберігаються у файл формату CSV. Використання такого формату забезпечує можливість подальшого відкриття та аналізу даних у табличному процесорі Microsoft Excel.

Структура запису результатів вимірювання має вигляд:

Time, Angle, Signal_dB

де:

Time – час проведення вимірювання;

Angle – кут повороту антени;

Signal_dB – рівень прийнятого сигналу в децибелах.

Передача результатів до ПК забезпечує автоматичне накопичення експериментальних даних без участі оператора та створює умови для подальшої статистичної обробки і побудови діаграми спрямованості антени.

3.4 Обробка результатів у Microsoft Excel

Після завершення циклу вимірювань результати автоматично зберігаються у файл формату CSV. Для подальшої обробки та аналізу отриманих даних використовується табличний процесор Microsoft Excel.

На першому етапі виконується відкриття файлу з результатами вимірювань та перевірка правильності відображення даних у стовпцях таблиці. Отриманий файл містить інформацію про час проведення вимірювання, кут повороту приймальної антени та рівень прийнятого сигналу.

Після імпорту даних у середовище Microsoft Excel виконується форматування числових значень та перевірка коректності запису результатів. Дані впорядковуються у вигляді таблиці, що дозволяє виконувати подальшу математичну обробку та аналіз.

Фрагмент результатів вимірювання наведено на рис. 3.4.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Connect using 'PLX-DAQ Simple Test'				
	0	-3,27	0	-3,27
	10	-3,58	10	-3,58
	20	-3,93	20	-3,93
	30	-3,63	30	-3,63
	40	-2,73	40	-2,73
	50	-0,40	50	-0,4
	60	0,29	60	0,29
	70	2,32	70	2,32
	80	4,59	80	4,59
	90	6,07	90	6,07
	100	7,38	100	7,38
	110	7,71	110	7,71
	120	9,67	120	9,67
	130	9,74	130	9,74
	140	9,48	140	9,48
	150	7,72	150	7,72
	160	6,59	160	6,59
	170	4,43	170	4,43
	180	1,00	180	1

Рисунок 3.4 – Фрагмент результатів вимірювання

Дані таблиці використовуються для побудови графіка залежності рівня прийнятого сигналу від кута повороту антени та подальшого аналізу діаграми спрямованості.

Для наочного представлення результатів у Microsoft Excel будується графік залежності рівня прийнятого сигналу від кута повороту антени. Отриманий графік дозволяє визначити напрямок максимального приймання сигналу та оцінити форму діаграми спрямованості антени.

Використання Microsoft Excel значно спрощує процес аналізу експериментальних даних та забезпечує можливість швидкого формування графічного представлення результатів вимірювань.

3.5 Експериментальне вимірювання діаграми спрямованості

Після завершення налаштування автоматизованої установки було проведено експериментальне вимірювання діаграми спрямованості досліджуваної антени.

Вимірювання виконувалися на частоті 1200 МГц із використанням синтезатора частот ADF4351 як джерела випромінюваного сигналу. Приймання сигналу здійснювалося за допомогою приймача RTL-SDR. Позиціонування приймальної антени виконувалося сервоприводом DS3218 Pro під керуванням мікроконтролера Arduino Mega 2560.

Під час проведення експерименту приймальна антена автоматично поверталася в межах від 0° до 180° з кроком 10° . У кожному положенні виконувалося вимірювання рівня прийнятого сигналу та запис результатів до файлу формату CSV.

Загальний вигляд розробленої автоматизованої установки наведено на рис. 3.5. До складу установки входять передавальна та приймальна антени, опорно-поворотний пристрій, сервопривід DS3218 Pro, мікроконтролер Arduino Mega 2560, приймач RTL-SDR та персональний комп'ютер для збереження і обробки результатів вимірювань. Усі складові установки працюють як єдина автоматизована вимірювальна система та забезпечують проведення експериментальних досліджень діаграм спрямованості антен.

На основі отриманих експериментальних даних побудовано графік залежності рівня прийнятого сигналу від кута повороту антени, який наведено на рис. 3.6.



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості антени

Отримана залежність дозволяє оцінити просторові характеристики досліджуваної антени та визначити напрямок максимального приймання сигналу. Використання автоматизованої установки забезпечило рівномірний крок вимірювання та підвищило точність проведення експерименту.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

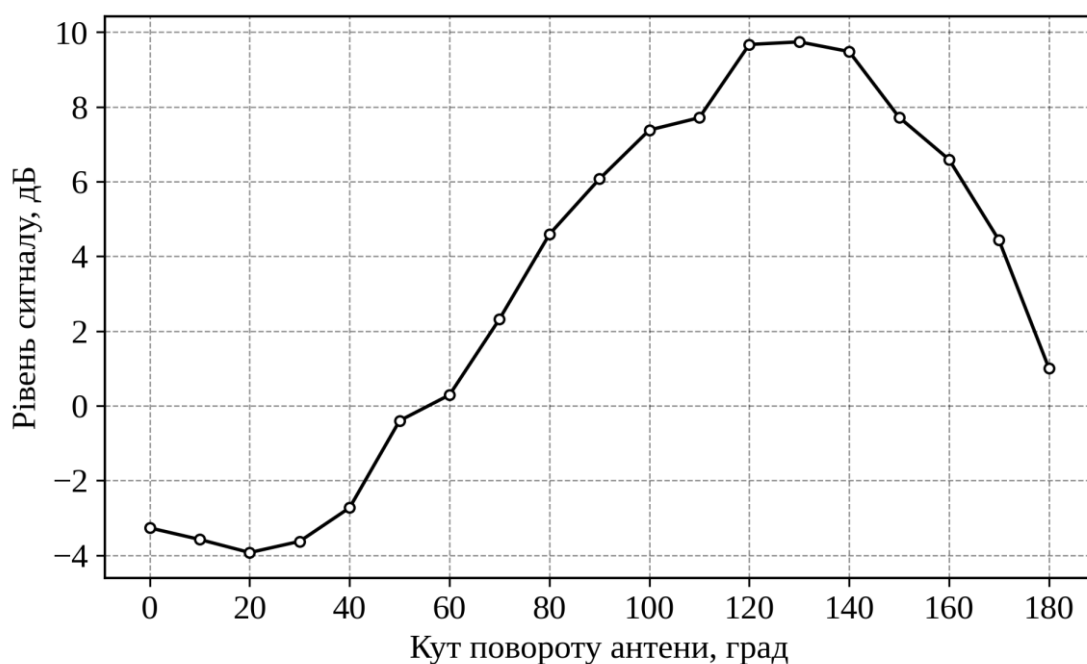


Рисунок 3.6 – Залежність рівня прийнятого сигналу від кута повороту антени

3.6 Аналіз отриманих результатів

Після проведення експериментальних досліджень та обробки отриманих результатів було виконано аналіз характеристик розробленої автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості антени.

На основі результатів вимірювань побудовано графік залежності рівня прийнятого сигналу від кута повороту приймальної антени. Аналіз графіка показав наявність чітко вираженого максимуму діаграми спрямованості, що свідчить про коректну роботу всіх складових вимірювальної системи.

Під час проведення експерименту вимірювання виконувалися в діапазоні кутів від 0° до 180° з кроком 10° . Такий крок вимірювання забезпечив достатню кількість точок для побудови діаграми спрямованості та дозволив отримати достовірне уявлення про просторовий розподіл електромагнітного поля досліджуваної антени.

За результатами експерименту встановлено, що максимальний рівень прийнятого сигналу становить 9,74 дБ при куті повороту антени 130° . Отримане значення відповідає напрямку головного максимуму діаграми спрямованості. У даному напрямку антена приймає найбільшу потужність електромагнітного

випромінювання, що підтверджує правильність її орієнтації відносно джерела сигналу.

Аналіз графіка показує, що в початковій частині діапазону вимірювання, від 0° до 40° , рівень сигналу залишається відносно низьким і змінюється в межах від $-3,93$ дБ до $-2,73$ дБ. Це свідчить про те, що антена в даному секторі орієнтована поза напрямком основного випромінювання передавальної антени.

Починаючи приблизно з кута 50° , спостерігається поступове збільшення рівня прийнятого сигналу. Зростання рівня сигналу є характерною ознакою наближення до головної пелюстки діаграми спрямованості. Найбільш інтенсивне зростання спостерігається в діапазоні від 70° до 120° , де рівень сигналу збільшується більш ніж на 7 дБ.

У діапазоні кутів від 120° до 140° формується область максимального приймання сигналу. Це підтверджується незначною зміною рівня сигналу поблизу максимуму, що характерно для вершини головної пелюстки діаграми спрямованості. Наявність плавного максимуму свідчить про стабільність процесу вимірювання та відсутність значних випадкових похибок.

Після проходження положення максимального приймання спостерігається поступове зменшення рівня сигналу. Така поведінка повністю відповідає теоретичним уявленням про характеристики спрямованих антен. При відхиленні від напрямку головного максимуму потужність прийнятого сигналу зменшується, що і відображено на експериментально отриманій залежності.

Отримана форма графіка підтверджує працездатність розробленого опорно-поворотного пристрою. Використання цифрового сервоприводу DS3218 Pro забезпечило достатню точність позиціонування приймальної антени та стабільність її положення під час проведення вимірювань. Завдяки автоматичному керуванню було забезпечено рівномірний крок повороту антени без участі оператора.

Важливу роль у роботі установки відіграв мікроконтролер Arduino Mega 2560, який забезпечував керування сервоприводом відповідно до заданого алгоритму. Використання мікроконтролера дозволило автоматизувати процес

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

позиціонування антени та виключити можливі помилки, пов'язані з ручним поворотом антени під час вимірювань.

Застосування синтезатора частот ADF4351 як генератора випробувального сигналу дозволило отримати стабільну частоту випромінювання 1200 МГц протягом усього циклу експерименту. Стабільність частоти є важливою умовою забезпечення достовірності результатів вимірювання діаграми спрямованості.

Для приймання та вимірювання рівня сигналу використовувався програмно-визначуваний радіоприймач RTL-SDR. Використання даного пристрою дозволило виконувати вимірювання рівня сигналу з достатньою точністю та забезпечило можливість автоматизованого збереження результатів у цифровому вигляді.

Передача результатів до персонального комп'ютера та їх автоматичне збереження у форматі CSV значно спростили подальшу обробку експериментальних даних. Використання програмного забезпечення Python та Microsoft Excel дозволило автоматизувати процес накопичення результатів вимірювання та побудову графічних залежностей.

Отримані результати підтверджують правильність обраних технічних рішень при розробленні автоматизованої установки. Установка забезпечує проведення вимірювань діаграм спрямованості антен у напівавтоматичному режимі, скорочує час проведення експерименту та підвищує точність отриманих результатів.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність розробленої автоматизованої установки, а також можливість її використання для виконання лабораторних робіт, навчальних досліджень та експериментальної оцінки характеристик антен у діапазоні надвисоких частот.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі кваліфікаційної роботи виконано розробку програмного забезпечення та проведено експериментальне дослідження автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості антени.

					<i>ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблено алгоритм роботи автоматизованої системи, який забезпечує послідовне позиціонування приймальної антени, вимірювання рівня прийнятого сигналу та передачу результатів до персонального комп'ютера. На основі розробленого алгоритму створено програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino Mega 2560, що реалізує автоматичне керування цифровим сервоприводом DS3218 Pro.

Організовано передачу результатів вимірювання до персонального комп'ютера та їх автоматичне збереження у форматі CSV. Для обробки отриманих даних використано програмне забезпечення Python та табличний процесор Microsoft Excel, що дозволило автоматизувати процес накопичення та аналізу результатів вимірювань.

Проведено експериментальне вимірювання діаграми спрямованості антени на частоті 1200 МГц. За результатами експерименту побудовано залежність рівня прийнятого сигналу від кута повороту антени та визначено напрямок максимального приймання сигналу.

Аналіз отриманих результатів показав працездатність розробленої автоматизованої установки та підтвердив правильність прийнятих технічних рішень. Використання автоматизованого позиціонування антени дозволило підвищити точність вимірювань, зменшити вплив людського фактора та скоротити час проведення експерименту.

Отримані результати підтверджують можливість використання розробленої установки для проведення навчальних і дослідницьких робіт, пов'язаних із вимірюванням діаграм спрямованості антен у діапазоні надвисоких частот.

					ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне завдання розроблення автоматизованої установки для вимірювання діаграми спрямованості антен у діапазоні надвисоких частот. Розроблена установка дозволяє автоматизувати процес позиціонування антени, зменшити вплив людського фактора на результати вимірювань та підвищити точність проведення експериментальних досліджень.

У ході виконання роботи проведено аналіз існуючих методів та засобів вимірювання діаграм спрямованості антен. Визначено основні вимоги до вимірювальної установки та обґрунтовано доцільність застосування автоматизованого підходу до проведення вимірювань.

Для формування високочастотного сигналу обрано синтезатор частот ADF4351, який забезпечує генерацію стабільного сигналу в широкому діапазоні частот. Як засіб керування виконавчими механізмами використано мікроконтролерну платформу Arduino Mega 2560, що забезпечує реалізацію алгоритмів автоматичного позиціонування антени та взаємодію з іншими вузлами системи.

Розроблено конструкцію опорно-поворотного пристрою та виконано вибір цифрового сервоприводу DS3218 Pro як виконавчого механізму. Завдяки наявності системи зворотного зв'язку сервопривід забезпечує точне встановлення антени у задане кутове положення та стабільне утримання її під час проведення вимірювань.

Виконано розрахунок параметрів антенної системи для роботи на частоті 1200 МГц. Визначено резонансну частоту, геометричні параметри симетричного півхвильового вібратора, параметри рефлектора та характеристики діаграми спрямованості. Також проведено розрахунок дальньої зони вимірювання та обґрунтовано вибір кроку повороту антени, що забезпечує необхідну точність побудови діаграми спрямованості.

					ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розроблено алгоритм роботи автоматизованої установки та програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino Mega 2560. Програмне забезпечення забезпечує автоматичне керування сервоприводом, послідовний поворот антени із заданим кроком, а також підтримує проведення вимірювань у напівавтоматичному режимі.

Організовано передачу результатів вимірювань до персонального комп'ютера та їх подальшу обробку з використанням програмного забезпечення Python і Microsoft Excel. Це дозволило автоматизувати процес накопичення експериментальних даних, їх збереження та візуалізацію результатів.

Проведено експериментальне вимірювання діаграми спрямованості антени на частоті 1200 МГц. За результатами експерименту побудовано залежність рівня прийнятого сигналу від кута повороту антени та визначено напрямок максимального приймання сигналу. Отримані результати підтвердили працездатність розробленої установки та правильність прийнятих технічних рішень.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленої установки для проведення лабораторних робіт, навчального процесу, а також експериментальних досліджень характеристик антен у діапазоні надвисоких частот. Використання автоматизованого позиціонування дозволяє підвищити точність вимірювань та скоротити час проведення експериментів порівняно з ручними методами вимірювання.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а всі завдання, визначені для розроблення автоматизованої установки вимірювання діаграми спрямованості антени, виконані у повному обсязі.

Результати роботи можуть бути використані під час навчального процесу, проведення лабораторних занять, дослідження характеристик антен та подальшого вдосконалення автоматизованих вимірювальних комплексів.

					<i>ЖВІ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакулев П. А. Радіотехнічні системи : підручник. Київ : Вища школа, 2018. 512 с.
2. Брауде З. І. Антени та пристрої НВЧ : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 356 с.
3. Arduino Mega 2560 Rev3. Technical Specifications. Arduino Documentation.
4. Arduino IDE Documentation. Arduino Software Development Environment.
5. Analog Devices. ADF4351 Wideband Synthesizer with Integrated VCO. Data Sheet.
6. RTL-SDR Blog. RTL2832U Software Defined Radio Receiver. Technical Documentation.
7. DS3218 Digital Servo Motor. Technical Specification and User Manual.
8. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd ed. New Jersey : Prentice Hall, 2017. 1104 p.
9. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2016. 1136 p.
10. Pozar D. M. Microwave Engineering. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2018. 756 p.
11. Haykin S. Communication Systems. 5th ed. New York : Wiley, 2019. 912 p.
12. Stallings W. Data and Computer Communications. 11th ed. Pearson, 2020. 896 p.
13. Microsoft Excel Documentation. Microsoft Corporation.
14. Python Software Foundation. Python Documentation.
15. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. 3rd ed. Cambridge University Press, 2015. 1225 p.
16. Кравченко В. І. Основи антенної техніки : навчальний посібник. Київ : Каравела, 2020. 304 с.
17. Слюсар В. І. Основи радіоелектроніки та телекомунікацій : навчальний посібник. Київ : НАУ, 2019. 420 с.
18. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання.

					<i>ЖВИ ТКР.172.018 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

19. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення.
20. Парфенюк В. Г. Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів денної та заочної форми навчання за напрямом «Радіотехніка». Житомир : ЖВІНАУ, 2012.
21. Колос Ю. О., Романчук В. М. Пристрої надвисоких частот та антени : навчальний посібник. Житомир : ЖВІНАУ, 2012.
22. Іванов В. О., Габрук Є. І., Сібрук Л. В. Електродинаміка та пристрої надвисоких частот : навчальний посібник / за ред. В. О. Іванова. Київ : НАУ-друк, 2009. 312 с.
23. Колос Ю. О., Каращук Н. Н. Основи електродинаміки та антени. Завдання на лабораторні роботи. Житомир : ЖВІ, 2019.
24. Основи електродинаміки та антени. Методичні рекомендації до курсового проєктування. Житомир : ЖВІ.

					НАЗВА ДОКУМЕНТУ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Креслення конструкції антени для дослідження

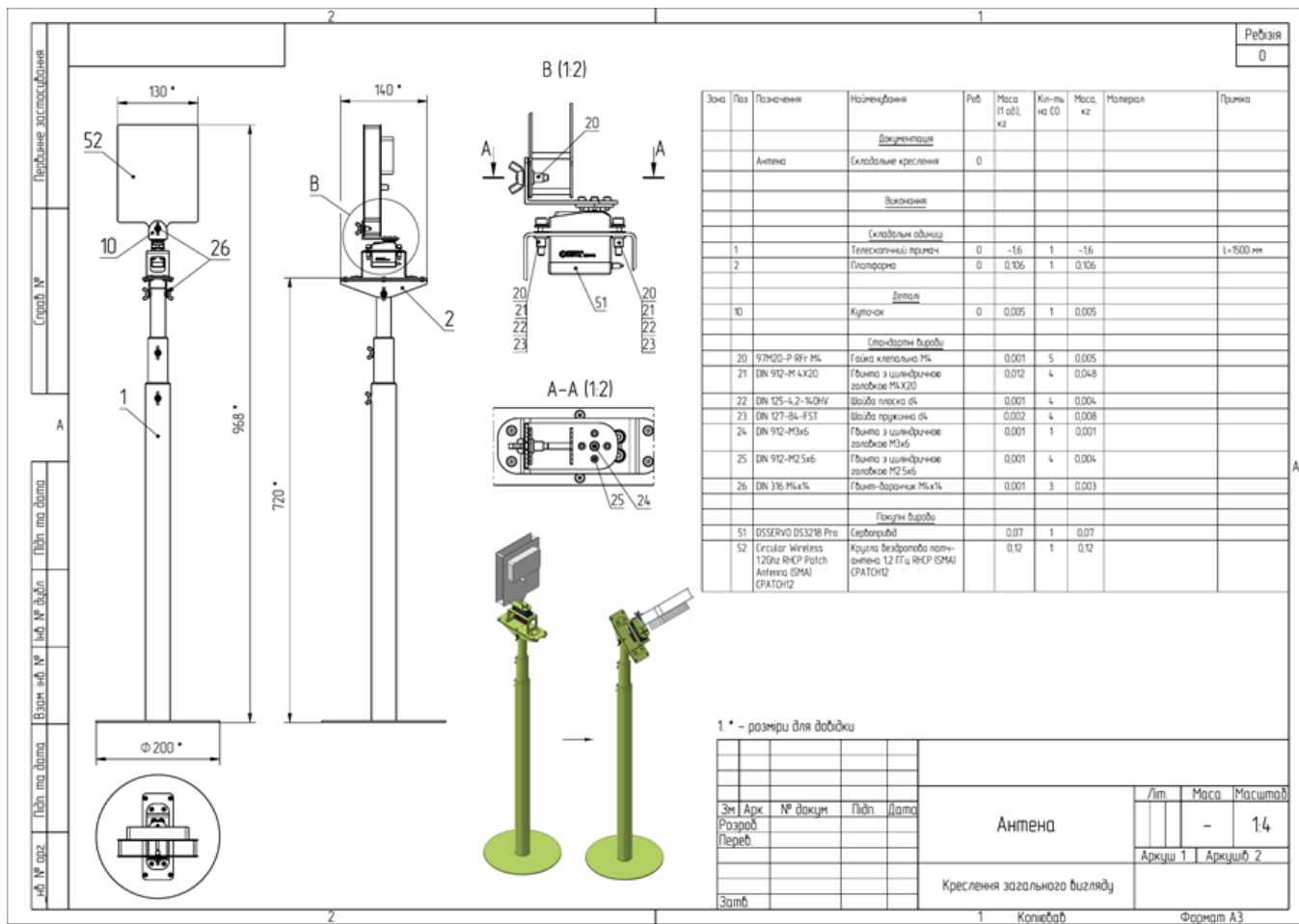


Рисунок А.1 – Конструкція антени для дослідження

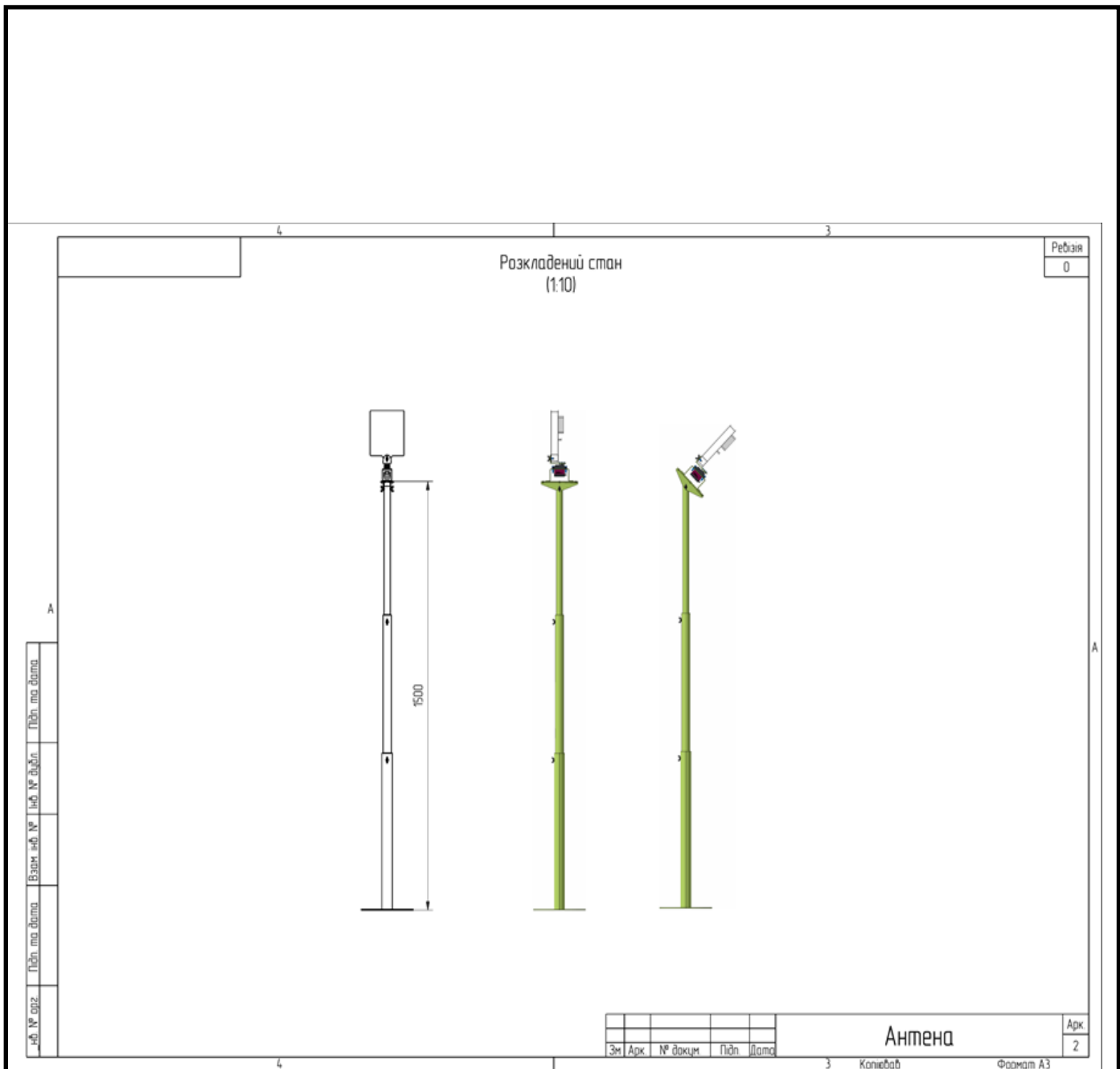


Рисунок А.2 – Загальний вигляд конструкції антени для дослідження

ДОДАТОК Б
Креслення структурної схеми установки

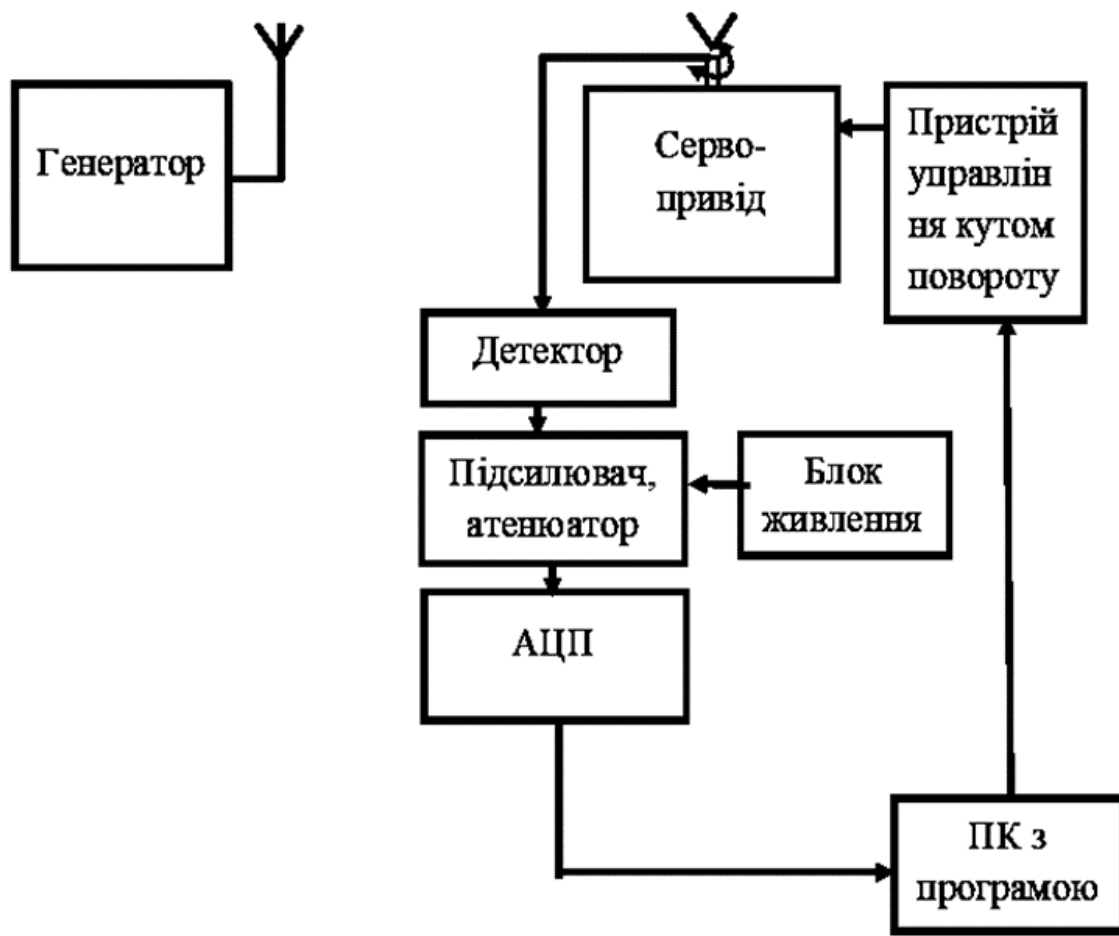


Рисунок Б.1 – Структурна схема автоматизованої установки для вимірювання антенних параметрів