

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет Інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до бакалаврської дипломної роботи на тему:

«ЛІНІЙНА ЕКВІДИСТАНТНА ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШІТКА»

Виконав: студент 2 (4)-го курсу, групи ТКР-22мс,
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Дехтярук С.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС

Семенов А.О.
(прізвище та ініціали)

« 12 » 08 2024 р.

Рецензент: д.т.н., доц., професор каф. ІКСТ

Михалевський Д.В.
(прізвище та ініціали)

« 12 » 06 2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

« 13 » 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ - 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Інформаційних електронних систем
Кафедра Інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІРТС

Олександр ОСАДЧУК

2024 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Дехтяруку Сергію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Лінійна еквідистантна фазована антенна решітка»
керівник роботи Семенов Андрій Олександрович, д.т.н., проф., проф. каф. ІРТС

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “11” 03 2024 року № 80

2. Строк подання студентом роботи 07 06 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: діапазон робочих частот 9,65 ГГц 9,95 ГГц; нестабільність частоти 5 МГц; максимальна потужність 25 Вт; коефіцієнт стоячої хвилі не більше 1,7; рівень зворотних втрат не більше 11,7 дБ; коефіцієнт корисної дії 93%; рупорні прямокутні пірамідальні; кількість антен у складі решітки 4.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Аналіз фізичних основ побудови логічних елементів. Розроблення і моделювання пасивних логічних елементів на основі мікросмужкових ліній передачі. Розробка конструкцій імітансних логічних елементів. Надійність та теплове моделювання. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки..

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Антенні решітки. Плоска прямокутна і гексагональна решітки. Багатопроменева антенна решітка. Діаграма направленості. Функціональна схема АФАР з фазуванням на основній частоті в режимі передачі. Схема N-канальної передавальної АФАР. Моделювання діаграм направленості симетричної АФАР на частотах. Моделювання діаграм направленості АФАР при куту сканування 30°. Схема з'єднання приладів для створення електромагнітного поля антени із заданою густиною потоку потужності випромінення. Схема з'єднання приладів при вимірюванні ефективної поверхні антени. Схема з'єднання приладів при вимірюванні електромагнітного поля антени.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор, професор каф. ІРТС Семенов А.О.		
Охорона праці	професор кафедри БЖДПБ, професор, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 17.08. 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	При-мітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження теми БДР	14.02.2024-28.02.2024	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	01.03.2024-10.03.2024	
3.	Затвердження теми. Розробка завдання на БДР.	11.03.2024-31.03.2024	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	01.04.2024-06.05.2024	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки . Експериментальне дослідження.	07.05.2024-18.05.2024	
6.	Розробка графічної частини БДР	19.05.2024-22.05.2024	
7.	Охорона праці (ОП)	23.05.2024-28.05.2024	
8.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	29.05.2024-05.06.2024	
9.	Нормоконтроль	06.06.2024-07.06.2024	
10.	Попередній захист БДР, доопрацювання, рецензування БДР	08.06.2024-10.06.2024	
11.	Захист БДР ЕК	11.06.2024-17.06.2024	

Студент  Дехтярук С.О.
(підпис)

Керівник роботи  Семенов А.О.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Дехтярук С.О. Лінійна еквідистантна фазована антенна решітка. Бакалаврська дипломна робота. – Вінниця: ВНТУ, 2024. – 80 с. Українською мовою. Бібліогр.: 43 . назв; Рис.: 21.

У бакалаврській дипломній роботі проведено аналіз сучасного стану в області антенних решіток, наведено класифікацію антенних решіток, розглянуто основні недоліки та переваги, основні параметри та характеристики, а також формування діаграми направленості. Проведено опис математичної моделі активних фазованих антенних решіток, як в узагальненому вигляді, так і з врахуванням функціональних вузлів; проведено математичний опис основних параметрів активних фазованих антенних решіток. Виконано комп'ютерне моделювання діаграми направленості в антенних решітках. Також розглянуто умови безпеки життєдіяльності та виконані необхідні розрахунки.

Ключові слова: фазована антенна решітка, електромагнітне випромінювання, діаграма випромінювання, спрямовані властивості.

ABSTRACT

Dekhtyaruk S.O. Linear equidistant phased array antenna. Bachelor's thesis. - Vinnytsia: VNTU, 2024. 80 p. In Ukrainian. Bibliography: 43. titles; Figures: 21.

The bachelor's thesis analyses the current state of the art in the field of antenna arrays, provides a classification of antenna arrays, considers the main disadvantages and advantages, the main parameters and characteristics, and the formation of a radiation pattern. A description of the mathematical model of active phased array antennas, both in generalised form and with consideration of functional units, is given; a mathematical description of the main parameters of active phased array antennas is carried out. The computer modelling of the radiation pattern in the antenna arrays is performed. The conditions of life safety are also considered and the necessary calculations are performed.

Ключові слова: фазована антенна решітка, електромагнітне випромінювання, діаграма випромінювання, спрямовані властивості.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК	9
1.1 Основні визначення та класифікація антенних решіток	9
1.2 Основні параметри та характеристики антенних решіток	17
1.3 Формування випромінювання в антенних решітках.....	20
2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АНТЕННИХ РЕШІТОК	24
2.1 Узагальнена математична модель АФАР	24
2.2 Математична модель АФАР з врахуванням функціональних вузлів	30
2.3 Математичний опис основних технічних характеристик АФАР ...	24
3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКА	37
3.1 Математичне моделювання лінійної фазованої антенної решітка.....	37
3.2 Методика експериментального дослідження характеристик випро- мінювання антен за допомогою вимірювальних антен.....	39
3.3 Результати експериментального дослідження лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки.....	49
4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	55
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	55
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	57
4.3 Пожежна безпека.....	63
ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	67
Додаток А (обов'язковий) Ілюстративний матеріал.....	72
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (бакалаврської) дипломної роботи.....	81

ВСТУП

Актуальність теми. У теперішній час розвиток таких галузей науки і техніки як радіолокація, зв'язок, радіоастрономія та навігація неможливо уявити без впровадження нових досягнень у антенній техніці [1, 2].

Потреба у підвищенні коефіцієнта підсилення антени призвела до необхідності використання антенних решіток. Подальший розвиток цього виду антен був спрямований на забезпечення можливості електричного сканування променем у просторі і формування багатопроменевої діаграми спрямованості у рамках єдиної антенної системи [3, 4].

Метою даної роботи є аналіз технологічних параметрів антенних решіток, опис математичної моделі та проведення комп'ютерного моделювання [5, 6].

Застосування антенних решіток обумовлено наступними причинами. Решітки з N елементів дозволяють збільшити приблизно в N раз коефіцієнт направленої дії (КНД) [4] (і відповідно підсилення) антени в порівнянні з одиночним випромінювачем, а також звужити промінь для підвищення точності визначення кутових координат джерела випромінювання в навігації, радіолокації й інших радіосистемах. За допомогою решіток вдається підвищити електричну міцність антени і збільшити рівень випромінюваної (прийнятої) потужності шляхом розміщення в каналах решіток незалежних підсилювачів високочастотної енергії.

Останні дослідження за тематикою дослідження. Однією з важливих переваг антенних решіток є [1] можливість швидкого (безінерційного) огляду простору за рахунок коливання променю антени електричними методами (електричного сканування).

Іншою перевагою є завадозахищеність радіосистеми, яка залежить від рівня бічних пелюсток (РБП) антени і можливості адаптації його по завадозахищувальній обстановці. Антена решітки є необхідною ланкою для зменшення РБП.

Однією з найважливіших задач сучасної бортової радіоелектроніки є створення комплексної системи, що сполучає кілька функцій, наприклад радіонавігації, РЛС, зв'язку і т.д. Виникає необхідність створення антенної решітки з електричним скануванням з декількома променями (багатопроменевої, моноімпульсної і т.д.), що працює на різних частотах (сполученої) і яка має різні характеристики.

Присутній ряд конструктивно-технологічних переваг антенних решіток для бортових і наземних пристроїв у порівнянні з іншими класами антен. Так, наприклад, поліпшення габаритних характеристик бортової апаратури відбувається за рахунок використання друкованих антенних решіток. Зниження вартості великих радіоастрономічних телескопів досягається завдяки застосуванню дзеркальних антенних решіток [7].

Метою роботи є розроблення та дослідження лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки.

Об'єктом дослідження є процес перетворення енергії в процесі збудження електромагнітних хвиль лінійною еквідистантною фазованою антенною решіткою.

Предмет дослідження – просторові та хвильові параметри і характеристики лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки.

Для досягнення поставленої мети в бакалаврській дипломній роботі розв'язуються наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану розвитку антенної техніки;
- обґрунтувати структури побудови лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки;
- розробити конструкцію лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки;
- здійснити аналіз математичної моделі лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки;
- здійснити моделювання просторових і хвильових параметрів і характеристик лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки;

- виконати розділ безпеки життєдіяльності.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: математичні методи макроскопічної електродинаміки; основні положення теорії функції комплексної змінної; теорії комп'ютерного моделювання; теорія оброблення результатів в експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів

Отримав подальший розвиток метод побудови лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки.

Практичне значення одержаних результатів

Нові конструкція лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки.

Нові результати модельних і експериментальних досліджень лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки.

Структура і обсяг роботи. Бакалаврська дипломна робота складається зі вступу, 4 розділи, висновків, додатків та списку використаних джерел.

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ФАЗОВАНИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

1.1 Основні визначення та класифікація антенних решіток

Антенною називають пристрій, який призначений для випромінювання в вільний простір та прийому з вільного простору енергії електромагнітних хвиль.

Першоджерелом електромагнітного випромінювання (електромагнітних хвиль) є рухомі заряди (змінні струми провідності), тому випромінювати електромагнітну енергію в вільний простір при визначених умовах може будь-який провідник.

Система "передавальна антена – вільний простір – приймальна антена" є взаємною системою, а основні параметри в режимі передачі та прийому є одними і тими ж.

В техніці НВЧ для прийому та передачі сигналів застосовуються однакові антени. Часто в приймально-передавальному пристрої використовується одна й та ж антена. Необхідно підкреслити, що антена не тільки виконує функції випромінювання та прийому електромагнітної енергії, але й забезпечує розподіл густини випромінювання в просторі (направленість), розв'язуючи при цьому ряд технічних задач, пов'язаних з збільшенням дальності дії, забезпеченням електромагнітної сумісності, збільшенням інформаційної здатності та покращенням інших важливих характеристик радіосистем.

Направленість дії найпростішої антени – симетричного вібратора – невисока. Для збільшення направленості дії вже на перших етапах розвитку антенної техніки стали застосовувати систему вібраторів – антенні решітки. В даний час антенні решітки – найбільш розповсюджений клас антен, елементами яких можуть бути як слабонаправлені випромінювачі (металеві і щілинні вібратори, хвилеводи, діелектричні стрижні, спіралі і т.д.), так і гостронаправлені антени (дзеркальні, рупорні та ін.).

Антенна решітка [2] – система випромінювачів одного типу, які розташовані певним чином і збуджуються одним генератором або декількома когерент-

ними генераторами. Типовими антенними решітками є директорна антена, щілинна антена, поверхневі антени з напівхвильових симетричних вібраторів та ін.

Антенні решітки можуть бути класифіковані по наступним основним ознакам: геометрії розташування випромінювачів у просторі, способу їхнього збудження, закономірності розміщення випромінюючих елементів у самих решітках, способу обробки сигналу в решітці, амплітудно-фазовому розподілу струмів (поля) по решітці та типу випромінювачів. Залежно від геометрії розташування випромінювачів АР підрозділяються на лінійні, дугові, кільцеві, плоскі, опуклі (циліндричні, конічні, сферичні та ін.) і просторові (тривимірні) (рис. 1.1). Просторова решітка в простому випадку являє собою систему з двох плоских решіток, паралельно розташованих в просторі.

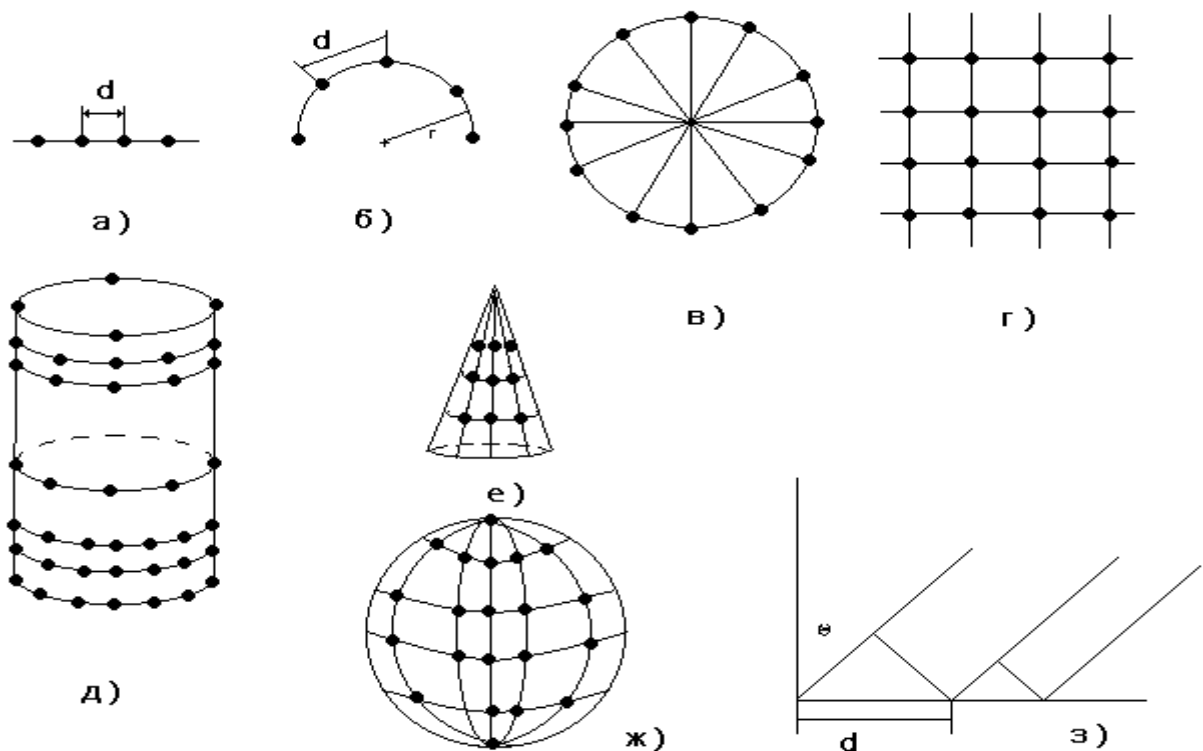


Рисунок 1.1 – Антенні решітки: а) – лінійні решітки; б) – дугові решітки; в) – кільцеві решітки; г) – плоскі решітки; д) – циліндричні решітки; е) – конічні решітки; ж) – сферичні решітки; з) – нееквідистантна решітка

Розміщення випромінювачів в самій решітці може бути еквідистантне, в якого крок (відстань між випромінювачами) – величина постійна (рис. 1.1, а-д), і нееквідистантне, у якого крок змінюється за певним законом або випадковим чином (рис. 1.1, з). У плоскій АР випромінювачі можуть бути розташовані в вузлах прямокутної (рис. 1.2, а) або косокутної координатної системи.

Якщо косокутна сітка складається з рівносторонніх трикутників, то така структура утворює правильні шестикутники і називається гексагональною (рис. 1.2, б).

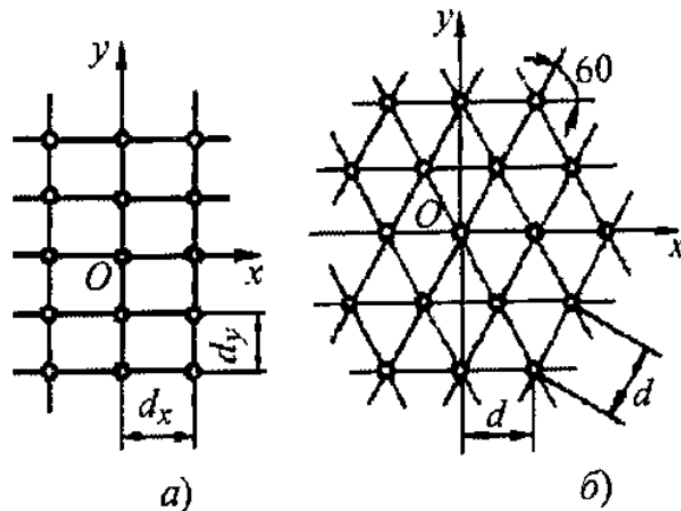


Рисунок 1.2 – Плоска прямокутна (а) і гексагональна (б) решітки

Для зменшення рівня бокових пелюсток використовують еквідистантні решітки, в яких центральні вібратори мають великі струми, а периферійні менші чи рівні амплітуді решіток, в яких відстань між вібраторами по мірі їх віддаленості від центра антени збільшується. При заданні лінійних розмірів антени найбільший КНД мають рівно-амплітудні еквідистантні решітки. Відповідно зменшення рівня бокових пелюсток досягається зменшенням КНД чи збільшенням розмірів антени.

По способу збудження (живлення) випромінювачів розрізняють решітки з послідовним і паралельним живленням.

Можливий також просторовий спосіб збудження, який називають іноді оптичним чи "ефірним" (рис. 1.3, г).

У великих антенних решітках застосовують комбінації послідовно-паралельного живлення випромінювачів, особливо у випадку поділу всієї антенної решітки на підрешітки (модулі) менших розмірів. При послідовному живленні елементи решітки збуджуються падаючою хвилею послідовно одна за одною (рис. 1.3, а), а при паралельному – незалежно (рис. 1.3, б).

Окремим випадком паралельного живлення є схема типу "ялинка", що утворюється за рахунок каскадного розподілу під'єднаної потужності на дві частини (рис. 1.3, в). У випадку просторового збудження елементи решітки збуджуються падаючою хвилею від первинного опромінювача.

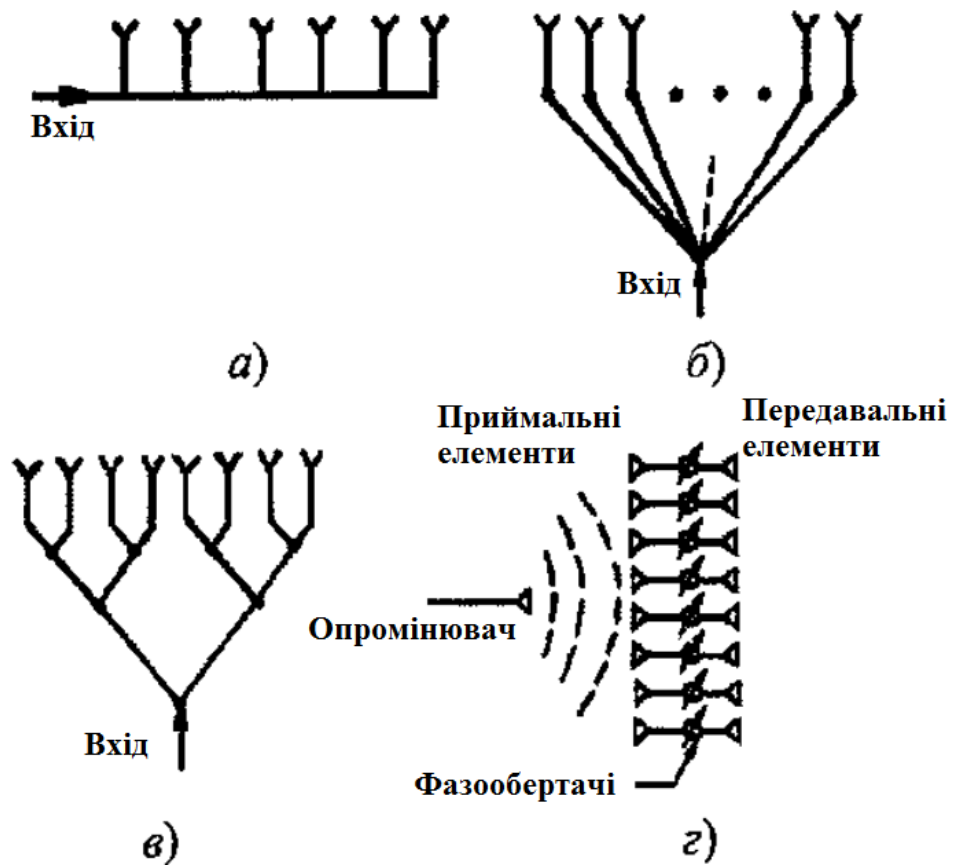


Рисунок 1.3 – Збудження випромінювачів в решітці: а) – послідовна схема; б) – паралельна схема; в) – схема живлення типу «ялинка»; г) – просторове збудження

У живильному тракті антенних решіток (фідері) можлива різна просторово-часова обробка сигналу. Зміна фазового розподілу в решітках за допомогою системи фазообертачів у живильному тракті (див. рис. 1.3, г) дозволяє керувати максимумом діаграми направленості. Такі решітки називаються фазованими антенними решітками (ФАР). Якщо до кожного випромінювача ФАР [9] чи до їхньої групи підключається підсилювач потужності, генератор або перетворювач частоти, то такі решітки називаються активними фазованими антенними решітками (АФАР) (рис. 1.4, а, б). Приймальні АР із саморегульованим амплітудно-фазовим розподілом у залежності від завадової обстановки називаються адаптивними. Приймальні АР з обробкою сигналу методами когерентної оптики називаються радіооптичними. Приймальні АР, у яких вся обробка ведеться цифровими процесами, називаються цифровими АР. Сполучені антенні решітки мають у своєму випромінюючому розкритті два (чи більш) типи випромінювачів, кожний з яких працює у своєму робочому діапазоні.

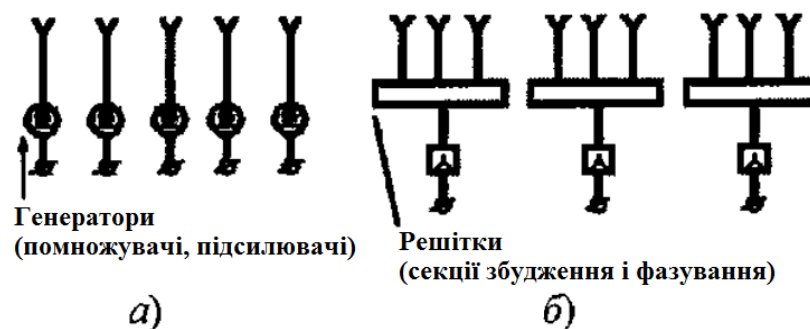


Рисунок 1.4 – Активні фазовані решітки: а) – активний елемент в кожному випромінювачі; б) – активний елемент на групу випромінювачів (модульна конструкція)

Антенні решітки, що формують з одного випромінюючого розкриття декілька незалежних (ортогональних) променів і які мають відповідне число виходів, називаються багатопробіжними.

У залежності від співвідношення амплітуд струмів збудження розрізняють решітки з рівномірним, експонентним і симетрично спадаючими амплітудними розподілами щодо центра решітки. Якщо фази струмів випромінювачів змінюються уздовж лінії їхнього розміщення по лінійному законі, то такі решітки називають решітки з лінійним фазовим розподілом.

Окремим випадком таких решіток є синфазні решітки, у яких фази струму всіх елементів однакові.

Синфазні решітки широко використовуються в якості направлених антен радіозв'язку, звукового і телевізійного мовлення.

Змінно-фазові решітки в порівнянні з синфазними мають ряд переваг до яких відноситься можливість узгодження антени з фідером в більш широкому діапазоні частот.

Фазовані антенні решітки відрізняються від інших АР включенням в антенний тракт системи фазообертача чи комутаторів, що дозволяє здійснювати керування фазовим чи амплітудно-фазовим розподілом для електричного сканування.

Знайшли застосування різні схеми побудови ФАР у залежності від вимог до системи. Просторовий спосіб збудження (називаний ще розподільником оптичного типу) допускає два варіанти антен: відбивну ФАР і прохідну ФАР.

Фідерний спосіб збудження (розподільник закритого типу) допускає послідовне, паралельне, двійково-поверхове (ялинки) живлення випромінювачів і фазообертачів і їхньої комбінації.

Знаходять застосування гібридні антени – спільне використання ФАР і антен оптичного типу.

Сполучення радіолінзи з ФАР та застосування спрямованих випромінюючих елементів ФАР (дзеркал, підрешіток і т.д.) дозволяє одержати ті ж результати: зменшення числа керованих фазообертачів при обмеженому секторі сканування. Сполучення лінзи з ФАР розширює сектор сканування плоскої ФАР. Одночасно з цим відбувається погіршення інших характеристик антенної системи.

Циліндричні решітки випромінювачів, що підключаються комутаторами (з фазообертачами чи без них) для збудження систем полоскових ліній, хвилеводів, радіальних хвилеводів і інших елементів, дозволяють сканувати в широкому секторі кутів.

Антенні решітки, що формують з одного випромінюючого розкриву декілька незалежних (ортогональних) променів і що мають відповідне число виходів, називаються багатопроменевими.

Структурна схема багатопроменевої антенної решітки зображена на рисунку 2,а. Антена складається з решітки випромінювачів і діаграмоутворювальної схеми, яка має певну кількість розв'язаних входів. Діаграмоутворювальну схему називають матрицею.

Нехай ДУС має m незамкнених входів і забезпечує приблизно рівне амплітудне живлення для n випромінювачів антенної решітки.

Фазовий розподіл має бути лінійним і змінюватися при перемиканні передавача від одного входу до іншого.

Тоді кожному входу буде відповідати свій зсув фаз збудження суміжних випромінювачів і свій напрям максимального випромінювання (рис. 2,б).

При скануванні певного простору антену використовують так, щоб головні пелюстки перетиналися на рівні не нижчому від значення половинної потужності.

Оскільки окремі входи антени незалежні і розв'язані один від одного, то це дає можливість використовувати антену і для одночасної роботи в різних напрямках декількох передавачів або приймачів.

По способу побудови ДУС багатопроменеві антенні решітки поділяються на антени з послідовним і паралельним живленням. Кільцева решітка представляє собою систему випромінювачів, розміщених по колу.

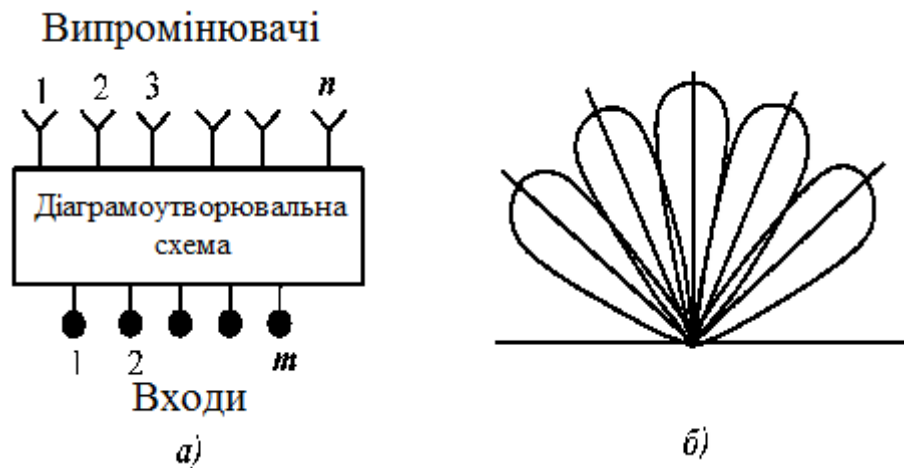


Рисунок 1.5 – Багатопроменева антенна решітка: а) – структурна схема; б) – діаграма направленості

Для передачі телебачення широко використовують кільцеві решітки (рисунок 1.6) з синфазним чи змінно-фазовим живленням, формуючи ненаправлені характеристики випромінювача в горизонтальній площині.

Характеристика направленості такої решітки

$$F(\varphi) = \sum_{n=1}^N F_n(\varphi) \exp\{-i[\psi_n k R \cos(\varphi - \Phi_n)]\} \quad (1.1)$$

де Φ_n – кут розташування;

ψ_n – фаза струму;

$F_n(\varphi)$ – множник характеристики направленості n-го випромінювача;

N – число випромінювачів;

R – радіус решітки.

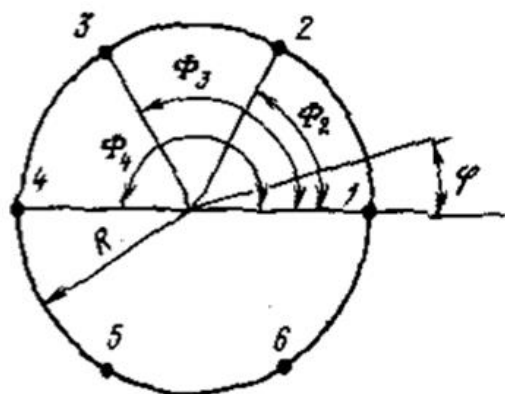


Рисунок 1.6 – Кільцева решітка

1.2 Основні параметри та характеристики антенних решіток

Під діаграмою направленості (ДН) будемо розуміти залежність амплітуди напруженості електричного поля E , яке створюється антеною в точці спостереження, від напрямку на цю точку (кутових координат φ, ψ) при постійній відстані точки спостереження до антени ($r = \text{const}$). Для наглядності та простоти графічного спостереження ДН частіше всього зображають у вигляді двох плоских кривих в полярній системі координат. Одна з цих кривих – діаграма направленості в горизонтальній площині – представляє собою розподіл напруженостей електричного поля випромінювання на описаному в горизонтальній площині навколо антени кола та є функцією кута (азимута) в горизонтальній площині E_φ . Інша крива – діаграма направленості в вертикальній площині – представляє собою розподіл напруженостей електричного поля випромінювання на описаному в вертикальній площині навколо антени кола та є функцією кута в вертикальній площині (кута місця) E_θ .

На рисунку 1.7 приведені найбільш розповсюджені форми діаграми направленості: голкова, яка застосовується в радіорелейних лініях, в радіолокації, радіокеруванні та віялова, яка має добру направленість в горизонтальній площині та малу в вертикальній, що полегшує пошук цілей в радіолокаційних системах.

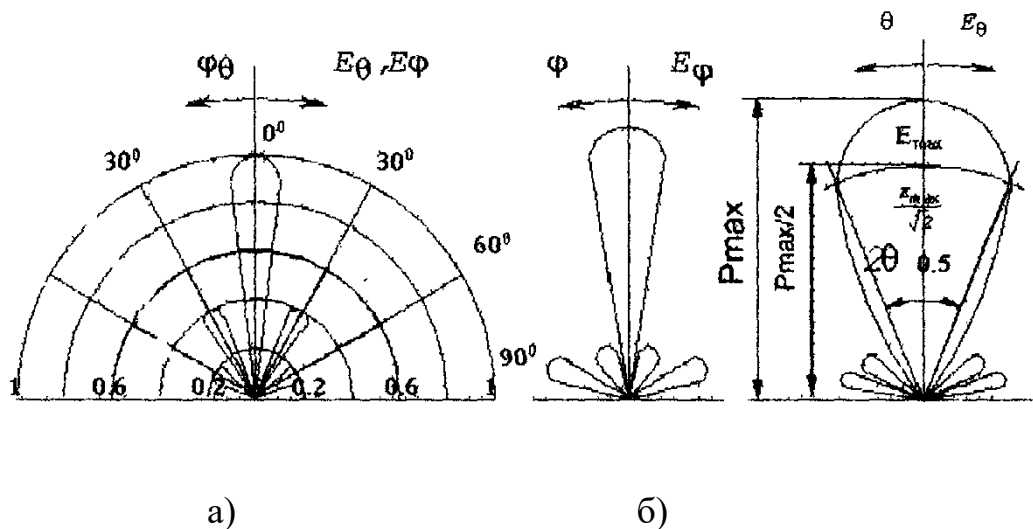


Рисунок 1.7 – Діаграма направленості: а) – голкоподібна в горизонтальній і вертикальній площинах; б) – віялоподібна в вертикальній площині

Ширина головної пелюстки діаграми направленості може мати декілька напрямків максимального випромінювання (декілька пелюсток). Один з них, який має найбільшу величину, називається головним. Ширина головної пелюстки, яка є робочою, характеризує ширину діаграми направленості. Ширина головної пелюстки визначається як кутова величина $2\psi_{0,5}$, $2\phi_{0,5}$ по точках половинного ($E_{\max} / \sqrt{2}$) спадання потужності відносно вершини $E_{\max}$ (див. рис. 1.7).

У направлених антен ширина головної пелюстки складає від декількох десятків градусів до одиниць хвилин (наприклад у радіоастрономічних антен).

Ефективна площа характеризує розмір площі, через яку приймальна антена збирає енергію

$$S_q = K_p S, \quad (1.2)$$

де $K_p < 1$ – коефіцієнт використання поверхні розкриву;

S – поверхня розкриву антени.

Коефіцієнт направленої дії (КНД) - відношення потужностей випромінювання направленої та ненаправленої антени, які створюють в даному напрямі на одній і тій ж відстані однакову напруженість поля. Таким чином, КНД показує, який енергетичний виграш дає застосування направленої антени порівняно з ненаправленою. Взагалі КНД визначається в напрямку максимуму діаграми направленості антени. Обчислюють КНД антени за формулою

$$\text{КНД} = 4S_q / \lambda^2 \quad (1.3)$$

Оцінюють КНД по формулі

$$\text{КНД} \approx 41253 / \psi_{0,5} \phi_{0,5}, \quad (1.4)$$

де $\psi_{0,5}$ та $\phi_{0,5}$ – ширина головної пелюстки по точках нульової потужності.

Іноді замість КНД краще використовувати коефіцієнт підсилення (КП) антени, який визначає собою добуток КНД на ККД антени. Так як ККД антени близький до одиниці, то без великої помилки можна вважати, що КНД та КП рівні між собою.

Поляризаційна характеристика – це залежність амплітуди сигналу в антені з лінійною поляризацією, яка приймає електромагнітні хвилі з передавальної антени, від кута повороту цієї антени в площині, перпендикулярній випромінюванню. Поляризаційна характеристика визначається видом поляризації хвилі. При цьому розрізняють лінійну, кругову і еліптичну поляризації.

Вхідний опір антени (Z_a) є еквівалентною величиною, яка визначає узгодження антени з НВЧ трактом. В загальному випадку

$$Z = R_a + iX_a, \quad (1.5)$$

де $R_a = R_n + R_t$ – активна складова;

R_n – опір, який характеризує теплові втрати;

R_t – опір, який характеризує ефект випромінювання;

X_a – реактивна складова, яка характеризує відбиття від антени.

Взагалі, коефіцієнт стоячої хвилі антени $KСХ < 1,5$. При цій умові $X_a \ll R_a$ і вхідний опір антени приблизно дорівнює хвильовому опору тракту живлення $Z_a \approx Z_b$.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) обчислюють як відношення потужності випромінювання P_t до повної потужності, яка підводиться до антени $P_a = P_t + P_n$

$$\eta = \frac{P_t}{P_t + P_n} = \frac{R_t}{R_t + R_r}, \quad (1.6)$$

де P_n – потужність теплових втрат в антені.

Робочий діапазон частот антени характеризується інтервалом частот від $f_{\max}$ до $f_{\min}$, в якому значення всіх параметрів антени не виходять за межі заданих. Частіше всього критерієм для визначення смуги частот є вхідний опір.

Характеристики керування променем антени виходять з вимог до характеристик сканування (сектор огляду, швидкість огляду, безперервний або дискретний огляд і т.д.) і характеризується допустимим значенням КНД в різних режимах роботи (пошук або супроводження), часом перемикавання з одного променя на інший, часом перемикавання з передачі на прийом. В антені з механічним

скануванням променя задані характеристики керування променем визначають необхідні механізми обертання антени. Вони не зв'язані безпосередньо з розрахунком антени.

До енергетичних характеристик відносяться максимально допустима без пробою і перегріву антени потужність випромінювання, а також потужність керування положенням променя (при механічному скануванні ця потужність визначається конструкцією антени і її електроприводом, а при електричному – затратами потужності на керування фазообертачами в колі окремих випромінювачів антени).

Кліматичні та механічні характеристики визначаються місцем їх встановлення на космічних кораблях, ракетах, літаках, морських та річних судах, автотранспорті, наземних РЛС і станціях радіоліній, переносних РЛС і т.д.

До експлуатаційних характеристик відносяться маса, габаритні розміри, зручність та простота обслуговування, періодичність регламентних робіт антен. Вимоги до них залежать від призначення НВЧ пристроїв та умов їх застосування.

1.3 Формування випромінювання в антенних решітках

Як елементарні випромінювачі в АР можуть використовуватися різні антени як малої, так і великої спрямованості. Наприклад в найпростіших решітках як елементарні антени можуть бути встановлені симетричні і несиметричні вібратори, хвилеводні щілини, друковані випромінювачі і т.д. В радіоастрономії використовуються системи з декількох великих дзеркальних антен з вузькою діаграмою направленості, зорієнтованих в одному напрямку. Це дозволяє збільшити в N раз коефіцієнт підсилення системи і приймати сигнал з простору при малому співвідношенні сигнал / шум.

Антенні елементи в АР можуть бути розташовані різним способом. Якщо фазові центри випромінювачів розташовані по одній осі, то решітка називається лінійною, якщо в площині – плоскою. Існують і більш складні варіанти розміщення антенних елементів в просторі. Найчастіше такі системи називають кон-

формними, тому що вони повторюють форму поверхні, на якій розміщені випромінювачі. Наприклад це може бути поверхня літального апарату, супутника землі, або складний рельєф місцевості. Найбільш поширені антенні решітки, випромінюючі елементи яких розташовані в одній площині.

Для того, щоб отримати прийнятий з простору сигнал на виході АР, необхідно провести когерентне складання сигналів від усіх елементів антенної решітки. За це відповідає розподільча система, побудована на елементах НВЧ тракту, що включає лінії передачі, системи управління і пристрої сполучення сигналів. Діаграма направленості формується амплітудним і фазовим розподілом по апертурі антени.

Амплітудний розподіл – це залежність коефіцієнта передачі в конкретно-му випромінюючому елементі в АР. Зазвичай для формування вузькоспрямованого випромінювання використовується рівномірний, або спадаючий до країв апертури амплітудний розподіл.

Фазовий розподіл – залежність різниці фаз між сусідніми випромінювачами. У загальному випадку визначає часову затримку сигналу падаючої хвилі, пов'язану з різницею ходу хвиль між сусідніми випромінювачами. На практиці найчастіше застосовуються два типи фазових розподілів: синфазний та лінійний.

Ширина ДН синфазної решітки (рис. 1.8) стискується з зменшенням довжини хвилі, збільшенням числа вібраторів і збільшенням відстані між ними. Коли в синфазній решітці зменшити число вібраторів то ширина головного пелюстка залишиться незмінною, але при цьому збільшаться рівні бокових. При $d \leq 0.5\lambda$ рівні бокових пелюстків практично залишаються незмінними, але стане складнішою система живлення. Тому відстань d між центрами ненаправлених чи напівхвильових вібраторів зазвичай вибирають рівною 0.5, а однохвильових – λ .

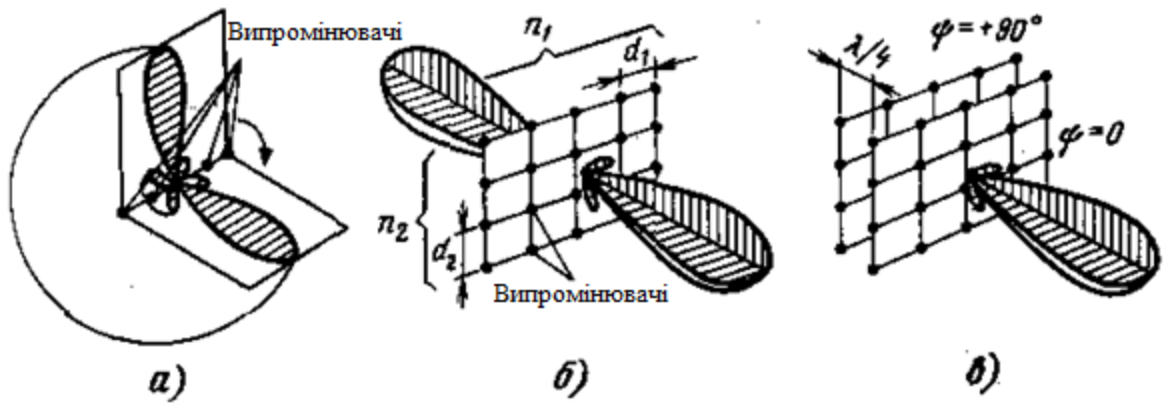


Рисунок 1.8 – Діаграми направленості синфазних решіток із ненаправлених випромінювачів: а) – лінійна; б) – плоска; в) – плоска з рефлектором

Розглянемо систему вібраторів, які живляться лінією яка розміщена вздовж осі решітки. Швидкість зміни фази вздовж лінії визначається фазовою швидкістю v_ϕ , яка для повітряних ліній $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Коли лінія, наприклад коаксіального кабелю, заповнена діелектриком з $\epsilon > \epsilon_0$ то $v_\phi < c$. Відповідно зміниться і довжина хвилі в лінії

$$V_{\text{Л}} = \frac{v_\phi}{f}. \quad (1.7)$$

Для одержання режиму бігучої хвилі (рис. 1.9) вібратори зв'язують слабким зв'язком з лінією, напруженою на узгодження опорів. В цьому випадку зсув по фазі Φ між сусідніми вібраторами за рахунок живлення і коефіцієнт укороченої хвилі в лінії ξ відповідно будуть рівні

$$\Phi = \kappa_{\text{Л}} \cdot d = \xi \cdot \kappa \cdot d; \quad \xi = \frac{c}{v_\phi} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{Л}}}. \quad (1.8)$$

Коефіцієнт направленої дії антени рухомої хвилі

$$D = (6 \dots 8) L_{\text{опт}}/\lambda. \quad (1.9)$$



Рисунок 1.9 – Діаграма направленості решітки антени рухомої хвилі із ненаправлених випромінювачів.

У першому випадку антена формує випромінювання по нормалі до апертури. Другий тип фазового розподілу дозволяє сформувати випромінювання під деяким кутом до апертури. Більш складні фазові розподіли (наприклад квадратичний) можуть застосовуватися для придушення бічних пелюсток ДН, формування діаграм направленості складної форми і при багатопроменевій роботі.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АНТЕННИХ РЕШІТОК

2.1 Узагальнена математична модель АФАР

При теоретичних і експериментальних дослідженнях антенних систем визначається лише обмежене число їх параметрів і характеристик, причому, чим складніша антена, тим більшим числом її особливостей доводиться нехтувати. Тому, проектуючи антенну систему на основі теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень макетів самої антени і її окремих вузлів, фактично розглядають не справжній пристрій, а його модель, в певному сенсі подібну справжній антенній системі і яка відображає тільки основні її властивості.

Використовувані при теоретичному аналізі антенних систем математичні моделі описують зв'язок між найбільш вагомими впливами на антену і її реакціями [10]. Алгоритмічна, або, як її ще називають, цифрова модель являє собою програму розрахунку модельованого пристрою на ЕОМ, тобто це запрограмований алгоритм чисельного розрахунку модельованого пристрою, який зазвичай зводиться до вирішення системи алгебраїчних або диференціальних рівнянь. Надалі під математичною моделлю будемо розуміти алгоритмічну модель. Чисельна реалізація такої математичної моделі, тобто алгоритм визначення реакцією АР на зовнішній вплив, повинна забезпечувати отримання рішення за допустимий час. Тому при побудові математичної моделі АФАР зазвичай приймають компромісне рішення з урахуванням складності моделі і ступеня її адекватності аналізуємім антенній системі.

Як правило, проектування АФАР ведеться з використанням математичних моделей різного рівня адекватності (і, отже, складності), які базуються на двох різних підходах до моделювання. При першому підході складається математична модель АФАР в цілому, тобто модель, що зв'язує вихідні характеристики із зовнішніми впливами на антенну систему. Другий підхід базується на розчленовуванні (декомпозиції) всієї АФАР на окремі функціональні вузли: систему випромінювачів, активні модулі, фазообертачі, розподільну систему та ін. Сучасний рівень методів обчислювальної математики і засобів обчислювальної

техніки дозволяє використовувати перший підхід тільки при побудові математичних моделей АФАР низького рівня адекватності, а більш точні математичні моделі (включаючи моделі електродинамічного рівня) створюються на основі методу декомпозиції. У цьому випадку складення математичної моделі АФАР включає наступні етапи: розбиття АФАР на окремі функціональні вузли; вибір способів подання вхідних впливів на вузли АФАР і їх відповідних реакцій; вибір фізичних наближень побудови математичної моделі; математичне формулювання завдання; чисельна реалізація математичної моделі.

Перейдемо до побудови математичної моделі АФАР, функціональна схема якої приведена на рисунку 2.1.

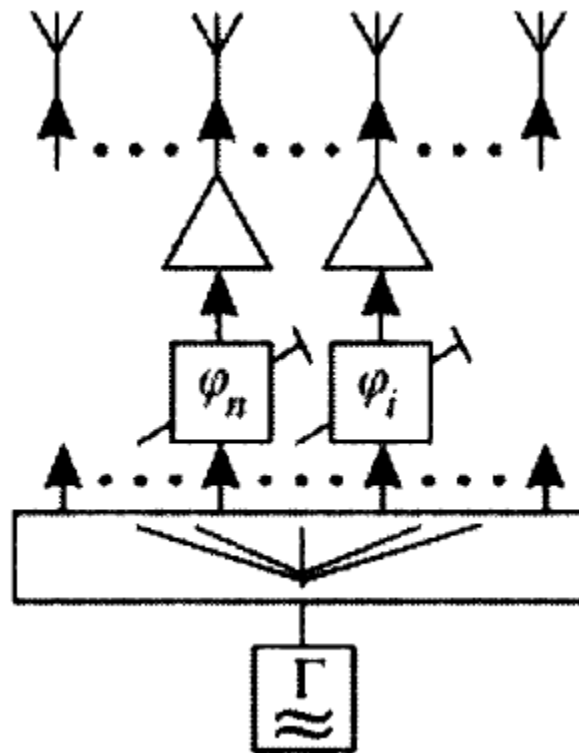


Рисунок 2.1 – Функціональна схема АФАР з фазуванням на основній частоті в режимі передачі

Для визначення поля випромінювання АФАР необхідно промодельовати процес проходження сигналів від збудника до випромінювача і процес їх випромінювання антенним полотном. При цьому кожен функціональний вузол

АФАР, через який проходить сигнал збудника, будемо описувати своєю математичною моделлю, а функціональні вузли (блок живлення, блок керування променем), через які сигнал збудника не проходить, будемо моделювати їх впливами на параметри математичних моделей відповідних функціональних вузлів.

Таким чином, до складу загальної математичної моделі АФАР входять математичні моделі збудника, розподільної системи, фазообертача, активного модуля, а також математична модель системи узгоджених випромінювачів. При моделюванні АФАР сукупністю математичних моделей її окремих блоків природним шляхом об'єднання їх в єдину систему є використання матричних методів. Входами і виходами розподільної системи і фазообертачів є одномодові лінії передачі сигналів, тому ці функціональні вузли можна описувати матрицями розсіювання $[S^p]$ і $[S^f]$, що зв'язують хвилі, падаючі і відбиті від входів модельованого пристрою (або іншими матрицями багатополісників). Систему узгоджених випромінювачів формально також можна описати матрицею розсіювання $[S^c]$, а збудник, що характеризується його вихідним сигналом, моделюється комплексною амплітудою A_B хвилі, падаючої на вхід розподільної системи. Активні модулі в загальному випадку є нелінійними невзаємними пристроями, тому елементи їх матриць розсіювання залежать як від рівня вхідних сигналів (хвиль, що падають на вхід і вихід АМ), так і від різниці фаз між ними. Специфічною особливістю АФАР є те, що АМ зазвичай забезпечують велику розв'язку між входом і виходом. Тому для опису проходження сигналів через АМ їх доцільно описувати двома комплексними характеристиками – коефіцієнтом відбиття від входу АМ $S_{11}^M(|a|)$ і коефіцієнтом передачі $H(|a|, \Gamma^H)$, де $|a|$ – амплітуда сигналу на вході АМ; Γ^H – коефіцієнт відбиття від навантаження АМ (випромінювача).

В результаті приходимо до схеми АФАР, представленій на рисунку 2.2, де a – падаючі хвилі; b – відбиті хвилі; нижні індекси відповідають номерам каналів АФАР, верхні – позначають різні ділянки одного каналу: (1) відноситься до падаючих і відбитих хвиль між виходами розподільної системи і входами фазо-

обертачів; (2) – те ж між виходами фазообертачів і входами активної частини модулів; (3) – те ж між виходами активних модулів і входами узгоджених випромінювачів.

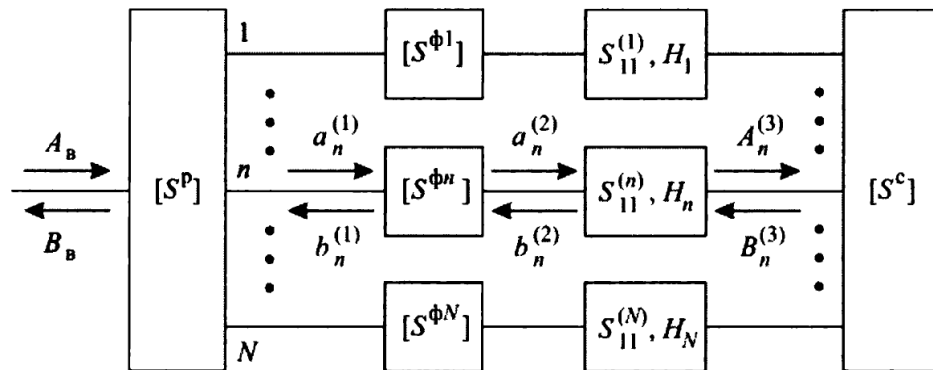


Рисунок 2.2 – Схема N-канальної передавальної АФАР

Матриця розсіювання розподільчої системи (символ «0» використано для нумерації її входу, а решта N символів – для нумерації виходів, число яких дорівнює числу випромінювачів) записується у вигляді

$$[S^p] = \begin{bmatrix} S_{00}^p & S_{01}^p & \dots & S_{0N}^p \\ S_{10}^p & S_{11}^p & \dots & S_{1N}^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{N0}^p & S_{N1}^p & \dots & S_{NN}^p \end{bmatrix}.$$

Матриці розсіювання фазообертача n-го каналу і узгоджених випромінювачів відповідно записуються

$$[S_n^\Phi] = \begin{bmatrix} S_{n11}^\Phi & S_{n12}^\Phi \\ S_{n21}^\Phi & S_{n22}^\Phi \end{bmatrix}, \quad [S^c] = \begin{bmatrix} S_{11}^c & S_{12}^c & \dots & S_{1N}^c \\ S_{21}^c & S_{22}^c & \dots & S_{2N}^c \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{N1}^c & S_{N2}^c & \dots & S_{NN}^c \end{bmatrix}.$$

Використовуючи введені матриці розсіювання вузлів АФАР і однонаправленість передачі сигналу активними модулями, приходимо до двох незалежних систем рівнянь, що є математичною моделлю передавальної АФАР і визначаючим комплексні амплітуди хвиль, що збуджують випромінювачі

$$\begin{cases} a_n^{(1)} = S_{n0}^p A_B + \sum_{i=1}^N S_{ni}^p b_i^{(1)}, \\ b_i^{(1)} = S_{i11}^\phi a_i^{(1)} + S_{i12}^\phi b_i^{(2)}, \\ a_n^{(2)} = S_{n21}^\phi a_n^{(1)} + S_{n22}^\phi b_n^{(2)}, \\ b_n^{(2)} = S_{n11}^M \left(|a_n^{(2)}| \right) a_n^{(2)}, \\ n = 1, 2, \dots, N, \end{cases} \quad (2.1)$$

Перше рівняння системи (2.1) визначає комплексні амплітуди $a_n^{(1)}$ хвиль, що падають на входи фазообертачів з урахуванням зв'язку каналів окремих випромінювачів через систему розподілу. Комплексна амплітуда $b_i^{(1)}$ хвилі, відбитої від входу фазообертача i -го випромінювача, знаходиться з врахуванням з'єднання фазообертача з неузгодженим навантаженням [11]. Третє і четверте рівняння (2.1) описують комплексні амплітуди $a_n^{(2)}, b_n^{(2)}$ хвиль, падаючих і відбитих від входу АМ n -го каналу.

$$\begin{cases} A_n^{(3)} = H_n \left(|a_n^{(2)}|, \Gamma_n^H \right) a_n^{(2)}, \\ B_n^{(3)} = \sum_{i=1}^N S_{ni}^c A_i^{(3)}, \\ \Gamma_n^H = \frac{B_n^{(3)}}{A_n^{(3)}}, \\ n = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (2.2)$$

Перше рівняння системи (2.2) визначає комплексну амплітуду хвилі $A_n^{(3)}$, що падає на вхід n -го узгодженого випромінювача, а друге – комплексну амплітуду хвилі $B_n^{(3)}$, відбиту від n -го випромінювача та рівну сумі амплітуд хвиль, наведених за рахунок взаємодії випромінювачів по зовнішньому простору.

Останнє рівняння системи (2.2) являє комплексний коефіцієнт відбиття від n -го випромінювача, який входить до першого рівняння цієї системи.

Із системи рівнянь (2.1) знаходяться амплітуди хвиль $[a_n^{(2)}]$, падаючих на входи АМ, а система рівнянь (2.2) визначає комплексні амплітуди хвиль $[A_n^{(3)}]$, падаючих на входи випромінювачів, що дозволяє знаходити поле випромінювання антенної решітки. Таким чином, невзаємні властивості АМ дозволяють роздільно моделювати дві частини АФАР, функціональні схеми яких наведені на рисунку 2.3: вхідну, що містить збудник, розподільну систему і систему фазування, навантажену на узгоджені навантаження (рис. 2.3, а), і вихідну, що складається з АМ та узгоджених випромінювачів (рис. 2.3, б).

Математичне моделювання вхідної частини АФАР може бути виконано відомими методами теорії лінійних НВЧ-ланцюгів. Не зупиняючись детально на їх розгляді, вхідну частину АФАР в її загальній математичній моделі будемо представляти набором комплексних амплітуд хвиль, що падають на входи АМ. Надалі, якщо це не буде особливо обумовлено, під математичною моделлю АФАР буде розумітися математична модель її вихідної частини (рис. 2.3, б).

У приймальних АФАР внаслідок малого рівня сигналу, поступаючого на входи модулів, їх активні елементи можна вважати лінійними пристроями, вхідні характеристики яких не залежать від рівня сигналів, що приймаються [11].

Функціональна схема вхідної частини приймальної АФАР містить випромінювачі, узгоджуючі ланцюги яких навантажені на вхідні опори активних модулів (рис. 2.3, в), де Z_n^H – вхідний опір активного елемента модуля n -го випромінювача. В силу принципу взаємності аналізувати еквівалентну схему вхідної частини приймальної АФАР (або каналу прийому приймально-передавальної АФАР) можна в режимі передачі, використовуючи ті ж алгоритми, що і для передавальної АФАР.

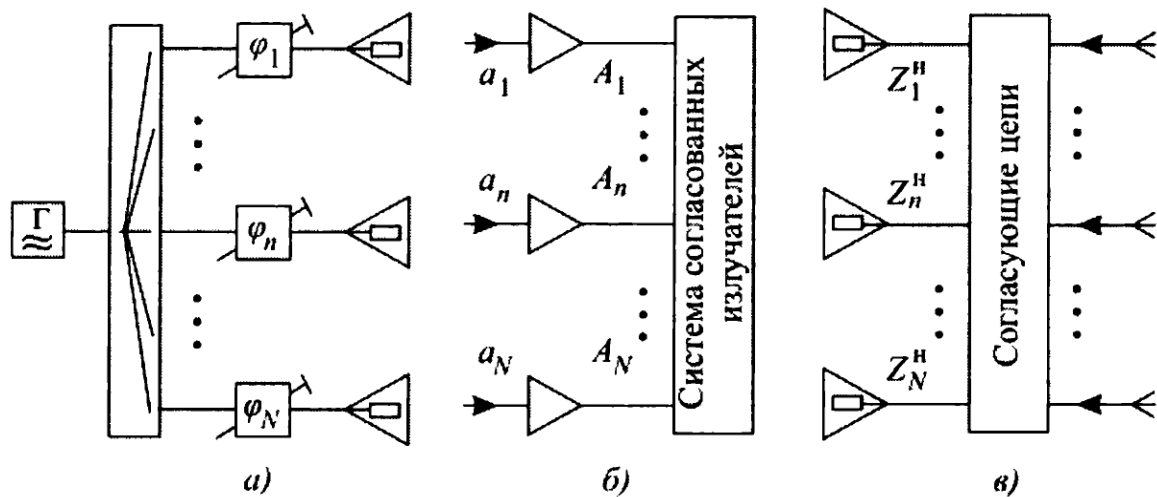


Рисунок 2.3 – Функціональні схеми вхідної частини (а), вихідної частини передавальної АФАР (б) та вхідної частини приймальної АФАР (в)

2.2 Математична модель АФАР з врахуванням функціональних вузлів

Як зазначалося вище, математична модель АФАР включає математичні моделі активних модулів, узгоджувальних пристроїв та випромінювального полотна. Така модель повинна відображати зв'язок між амплітудами мод, суперпозиція яких представляє струм випромінювача, і вхідними сигналами АМ. Будемо вважати надалі, що число АМ дорівнює числу випромінювачів. Якщо ця умова не виконується, то модель відповідної АР може бути отримана аналогічним чином.

З урахуванням математичних моделей усіх вузлів АФАР формула (2.2) матиме наступний вигляд

$$\begin{cases} A_n^i = H^i(\Gamma_n^1, \Gamma_n^2, \dots, \Gamma_n^i, \dots, \Gamma_n^{i_r} | a_n) a_n, \\ \Gamma_n^i = \frac{b_n^i}{A_n^i}, \quad b_n^i = \sum_{q=1}^N S_{nq}^{ci} A_q^i, \\ [D^i][I^i] = [F^i][A^i], \\ n = 1, 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, i_r. \end{cases} \quad (2.3)$$

В останньому виразі (2.3) матриця-стовпець $[A^i]$ утворена амплітудами гармонік A_n^i хвиль, що падають на входи узгоджувальних пристроїв випромінювачів; i_r – число гармонік вихідного струму підсилювача потужності, що враховуються при моделюванні АМ.

Так як коефіцієнт відбиття Γ_n^i від входу узгоджувального пристрою випромінювача знайдемо через амплітуди b_n^i відбитих хвиль, що залежать від амплітуд гармонік струмів випромінювачів $[I^i]$, то отримаємо

$$\begin{cases} [D^i][I^i] = [F^i][A^i], \\ \Gamma_n^i = \Gamma_n^i([I^i]), \\ A_n^i = H^i(\Gamma_n^1, \Gamma_n^2, \dots, \Gamma_n^i, \dots, |a|)a_n, \\ n = 1, 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, i_r, \end{cases} \quad (2.4)$$

де $[D^i]$ – квадратна матриця розміром $NM \times NM$, що характеризує взаємний вплив випромінювачів на частоті гармоніки i ;

$[I^i]$ – матриця-стовпець комплексних амплітуд мод струмів i -ої гармоніки випромінювачів розміром NM ;

$[F^i]$ – прямокутна матриця розміром $NM \times N$ для гармоніки i ;

$[A^i]$ – матриця-стовпець комплексних амплітуд хвиль гармоніки i , що падають на входи узгоджених випромінювачів;

Γ_n^i – коефіцієнт відбиття від входу n -го узгодженого випромінювача на частоті гармоніки i ;

$H^i(\Gamma_n^1, \Gamma_n^2, \dots, \Gamma_n^i, \dots, |a|)$ – комплексний коефіцієнт передачі активного модуля по i -тій гармоніці;

A_n^i – комплексна амплітуда хвилі i -тої гармоніки на вході n -го узгодженого випромінювача;

$\Gamma_n^i([I^i])$ – залежність, що розраховується з урахуванням конкретного виду узгоджувального пристрою і типу випромінювача;

a_n – комплексна амплітуда хвилі, падаючої на вхід АМ n -го каналу;

N – число випромінювачів.

Нелінійність системи рівнянь (2.4) обумовлена тільки рівнянням для A_n^i , в яке входить коефіцієнт передачі АМ. Якщо коефіцієнт передачі АМ не залежить від навантаження та рівня вхідного сигналу, то права частина цього рівняння виявляється постійною і (2.4) стає системою лінійних рівнянь. Аналітично дана система рівнянь не розв'язна і можливо тільки її чисельне рішення [12].

Практично всі чисельні методи рішення систем нелінійних рівнянь є ітераційними [1], тобто для вирішення системи рівнянь виду $f_n(x_1, x_2, \dots, x_N) = 0, n \in [1; N]$, з N невідомими $x_1, x_2, \dots, x_N$, починаючи з деяких початкових значень невідомих $\{x_n\}$, будують послідовні наближення $x_n^{(k+1)} = x_n^{(k)} + t^{(k)} g_n^{(k)}, n \in [1; N]$, які при $k \rightarrow \infty$ сходяться до деякого рішення $\{\hat{x}_n\}$. Різні методи рішення відрізняються вибором напрямку k -го кроку і його значенням, тобто вибором величин $\{g_n^{(k)}\}$ і $\{t^{(k)}\}$.

Використання для вирішення системи (2.4) швидкозбіжних ітераційних методів другого порядку вимагає зберігання в пам'яті ЕОМ матриці Гессе $\{f_n\}$, що утворює систему рівнянь, тому можна скористатися методом простої ітерації першого порядку. У цьому методі відсутні частинні похідні функцій, що складають систему рівнянь, у зв'язку з чим навантажувальні характеристики АМ можна обчислювати на основі лінійної інтерполяції. Оскільки $H^i(\Gamma_n^1, \Gamma_n^2, \dots, \Gamma_n^i, \dots, |a|)$ залежить від коефіцієнтів відбиття навантаження на всіх врахованих гармоніках вхідного сигналу, для визначення струмів випромінювачів $[I^i]$ на даних гармоніках необхідно спільне вирішення всіх рівнянь, що входять в систему (2.4).

У випадку АМ, що мають виражені фільтруючі властивості, коли потужність у навантаженні на гармоніках становить не більше $-(20 \dots 30)$ дБ щодо потужності на несучій частоті, коефіцієнти передачі АМ на враховуваних гармоніках i будуть в основному визначатись коефіцієнтами відбиття на навантаженні по 1-ій та i -тій гармонікам, тобто $H^i = H^i(\Gamma_n^1, \Gamma_n^i, |a|)$. В даному наближенні система рівнянь (2.4) розпадається на систему рівнянь для основної гармоніки

$$\begin{cases} [D][I] = [F][A], \\ \Gamma_n = \Gamma_n([I]), \\ A_n = H(\Gamma_n, |a|)a_n, \\ n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (2.5)$$

і незалежну систему рівнянь для інших (враховуваних) гармонік

$$\begin{cases} [D^i][I^i] = [F^i][A^i], \\ \Gamma_n^i = \Gamma_n^i([I^i]), \\ A_n^i = H^i(\Gamma_n^1, \Gamma_n^i, |a|)a_n, \\ n = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (2.6)$$

При вирішенні системи (2.6) в ній використовується значення Γ_n^i , знайдене з рішення (2.5). Системи рівнянь (2.5) і (2.6) мають однаковий вигляд і вирішуються одними і тими ж методами. Зупинимося на вирішенні системи (2.5) [12].

Знайшовши матрицю $[D]^{-1}$, систему рівнянь (2.5) можна записати в вигляді, зручному для визначення характеристик АР в режимах сканування або зміни форми діаграми направленості

$$\begin{cases} [I] = [D]^{-1}[F][A], \\ \Gamma_n = \Gamma_n([I]), \\ A_n = H(\Gamma_n, |a|)a_n, \\ n = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (2.7)$$

При цьому $(k + 1)$ -а ітерація рішення системи рівнянь методом простої ітерації має вигляд

$$\begin{cases} [I^{(k+1)}] = [D]^{-1}[F][A^{(k)}], \\ \Gamma_n^{(k+1)} = \Gamma_n([I^{(k+1)}]), \\ A_n^{(k+1)} = H(\Gamma_n^{(k+1)}, |a|)a_n, \\ n = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (2.8)$$

Таким чином, визначивши тим чи іншим способом матрицю $[D]$, залежності $\Gamma_n([I])$ і навантажувальні характеристики активних модулів $H(\Gamma, |a|)$, тобто склавши математичну модель АФАР, можна знайти амплітуди мод струмів випромінювачів $[I]$, які є основними вихідними даними для розрахунку спрямованих і енергетичних характеристик АФАР.

2.3 Математичний опис основних технічних характеристик АФАР

Активні фазовані антенні решітки описуються в основному тими ж параметрами, що й інші класи антенних систем: діаграмою направленості, шириною її головної пелюстки, рівнем бічних пелюсток, коефіцієнтом підсилення (КП), коефіцієнтом направленої дії, коефіцієнтами відбиття елементів, і мають ті ж характеристики.

Крім цього додаються нові енергетичні характеристики, що відображають специфіку АФАР: потенціал Π і питома спектральна щільність потужності шуму Q .

Для передавальної АФАР потенціал дорівнює

$$\Pi = G_a \Pi_\Sigma = \text{КП}_a P_0 N_e, \quad (2.9)$$

де G_a – коефіцієнт підсилення активної фазованої антенної решітки (чисельно дорівнює добутку коефіцієнта корисної дії на коефіцієнт направленої дії);

P_0 – потужність випромінювання одиничного випромінювача;

N_e – кількість одиничних випромінювачів;

Π_Σ – сумарний потенціал всіх одиничних випромінювачів.

Для приймальної АФАР питома спектральна щільність потужності шуму

$$Q = h_{\text{ш}} / S_{\text{еф}}, \quad (2.10)$$

де $h_{\text{ш}}$ – спектральна щільність потужності шуму на виході АФАР;

$S_{\text{еф}}$ – ефективна поверхня антени.

Тривимірна діаграма направленості АФАР $f(\theta, \varphi)$ у загальному випадку має вигляд

$$f(\theta, \varphi) = \frac{1}{MN} \left| \frac{\sin[M\pi d_x(\sin \theta \cos \varphi)/\lambda]}{\sin[\pi d_x(\sin \theta \cos \varphi)/\lambda]} \right| \times \left| \frac{\sin[N\pi d_y(\sin \theta \sin \varphi)/\lambda]}{\sin[\pi d_y(\sin \theta \sin \varphi)/\lambda]} \right|, \quad (2.11)$$

де M – кількість випромінювачів по довжині полотна антенної решітки;

N – кількість випромінювачів по ширині полотна антенної решітки;

d_x – відстань між випромінювачами в азимутній площині;

d_y – відстань між випромінювачами в кутомістній площині;

λ – робоча довжина хвилі випромінювання;

θ – азимут;

φ – кут місця.

Оптимальний вибір розмірів антенної решітки вибирається згідно аналітичної залежності виду

$$\begin{cases} d_x \leq \frac{\lambda}{1 + \sin(\theta_{\max}^x)}, \\ d_y \leq \frac{\lambda}{1 + \sin(\theta_{\max}^y)}, \end{cases} \quad (2.12)$$

де $\theta_{\max}^x$, $\theta_{\max}^y$ – максимальні кути розкриття діаграми направленості в азимутному і кутомістному напрямках відповідно.

Активний модуль АФАР в часовій області можна описати наступною системою рівнянь в операторній формі виду

$$\begin{cases} u_{\text{BX}} = L_{\text{BX}}(e, i_{\text{BX}}) \\ u_{\text{ВІХ}} = L_{\text{ВІХ}}(i_{\text{ВІХ}}) \end{cases}, \quad \begin{cases} i_{\text{BX}} = F_{\text{BX}}(u_{\text{BX}}, u_{\text{ВІХ}}) \\ i_{\text{ВІХ}} = F_{\text{ВІХ}}(u_{\text{BX}}, u_{\text{ВІХ}}) \end{cases}, \quad (2.13)$$

де u_{BX} , $u_{\text{ВІХ}}$, i_{BX} , $i_{\text{ВІХ}}$ – напруги і струми на вході і виході антенного модуля відповідно;

e – нормований вектор;

$F_{\text{ВХ}}, F_{\text{ВІХ}}$ – нелінійні в загальному випадку інтегродиференційні лінійно незалежні оператори, що описують активний елемент;

$L_{\text{ВХ}}, L_{\text{ВІХ}}$ – лінійні інтегродиференційні оператори, що описують вхідні і вихідні кола активного елемента (вакуумної лампи, біполярного або польового транзистора) і визначаються системою рівнянь виду

$$\begin{cases} L_{\text{ВХ}} = \sum_{m=0}^M a_m^R \frac{d^m}{dt^m} + \sum_{n=0}^N b_b^R \iint \dots \int dt^n, \\ L_{\text{ВІХ}} = \sum_{m=0}^M a_m^F \frac{d^m}{dt^m} + \sum_{n=0}^N b_b^F \iint \dots \int dt^n, \end{cases} \quad (2.14)$$

де R, F, n, m – індекси розмірності операторного простору;

a, b – вагові коефіцієнти.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОЇ ФАЗОВАНОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКА

3.1 Математичне моделювання лінійної фазованої антенної решітка

На основі математичної моделі, наведеної в розділі 2, було проведено комп'ютерне моделювання діаграм направленості АФАР. Для моделювання використовувались пакети Borland Delphi та Mathcad 14.

Моделювання основних характеристик активної фазованої антенної решітки дозволяє визначити (проаналізувати) на етапі проектування основні характеристики АФАР: мінімальну ширину основного променя (важлива при формуванні багатопробевої діаграми спрямованості), рівень бічних пелюсток (характеризує конструктивну грамотність виконання АФАР), спрямовані властивості активної фазованої решітки в цілому.

На рисунку 3.1 представлені діаграми спрямованості в азимутальній площині, отримані чисельним методом у пакеті Borland Delphi як суперпозиція всіх одиничних випромінювачів. Для моделювання бралась решітка розміром 128×128 елементів (крок решітки становить 0,125 м) на частоті 3, 10, 20 і 25 ГГц відповідно [13].

Результатом чисельного моделювання діаграми спрямованості АФАР є обґрунтування технічної реалізованості формування мінімального кута в залежності від частотного діапазону при організації, наприклад, рухомого супутникового зв'язку.

Розглянемо діаграму спрямованості АФАР в полярній системі координат (рисунк 3.2). Для прикладу використано кут сканування 30° і довільний ряд кутів сканування відповідно

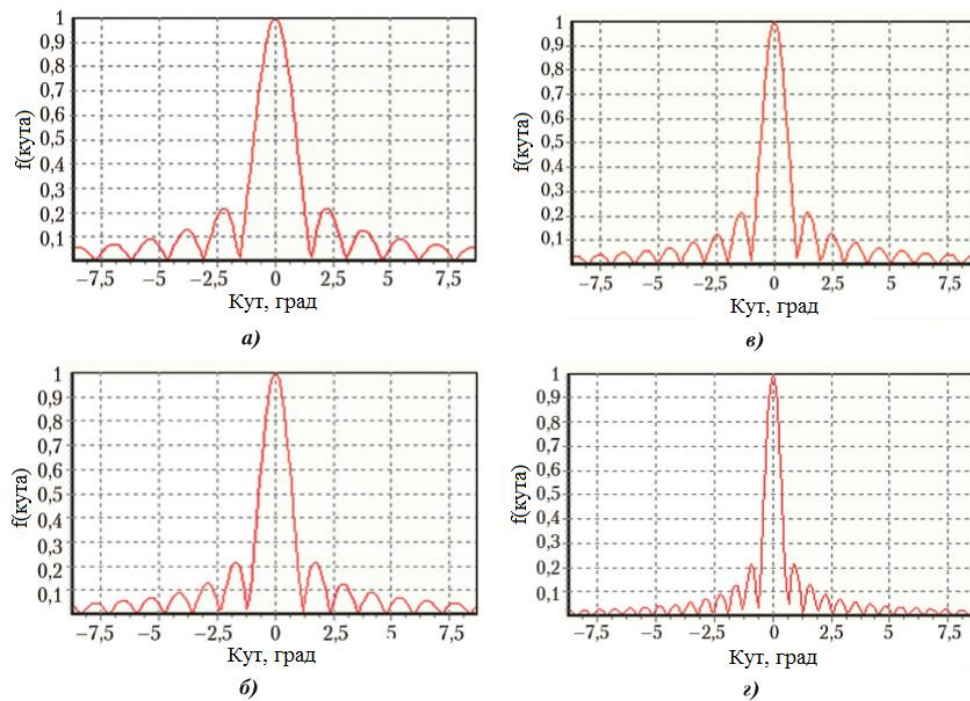


Рисунок 3.1 – Моделювання діаграм направленості симетричної АФАР на частоті 3 (а), 10 (б), 20 (в) і 25 (г) ГГц

Необхідно відзначити, що комп'ютерне моделювання дозволяє вже на етапі ескізного проекту кількісно оцінити основні технічні характеристики активної фазованої антенної решітки: ширину центрального променя діаграми спрямованості, коефіцієнт підсилення, рівень бічних пелюсток, коефіцієнт спрямованої дії. На підставі цих характеристик можна пред'явити конкретні вимоги до геометричних параметрів АФАР, кількості і потужності одиничних випромінювачів, довжині і ширині решітки, кроку між випромінювачами [13].

Вимірювальні антени призначені для вимірювання густини потоку потужності випромінювання, формування електромагнітного поля з заданою густиною потоку потужності випромінювання і для вимірювання інших параметрів антени: ефективної площі антени і коефіцієнта підсилення антени. Опис використовуваної в роботі вимірювальної антени додається до неї на робочому місці (з ним необхідно ознайомитися при підготовці до лабораторної роботи).

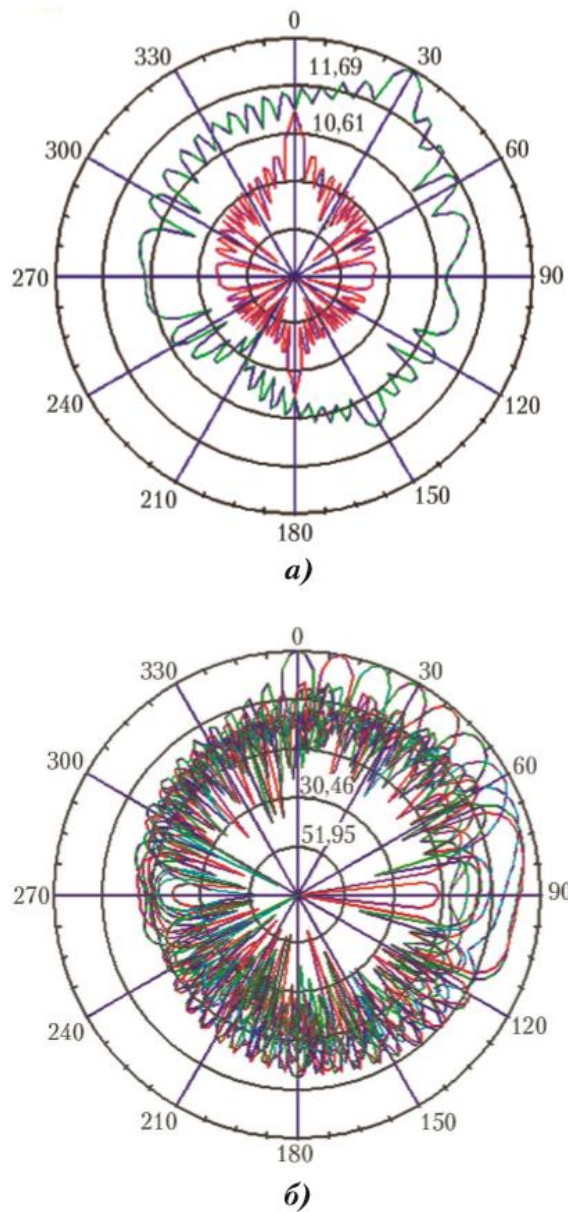


Рисунок 3.2 – Моделювання діаграм направленості АФАР при куту сканування 30° (а) і довільному ряду кутів сканування (б)

3.2 Методика експериментального дослідження характеристик випромінювання антен за допомогою вимірювальних антен

Методика експериментального дослідження характеристик випромінювання антен за допомогою вимірювальних антен складається з такої послідовності дій.

- 1) Виміряти густину потоку потужності випромінювання і ефективної поверхні антени.

Під'єднати антену до вимірювача потужності за допомогою кабеля чи безпосередньо до хвильового тракту (в залежності від умов вимірювань) у відповідності із схемою, зображений на рис. 3.3 [14].

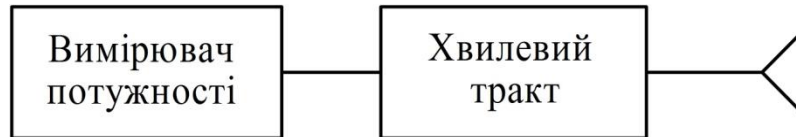


Рисунок 3.3 – Схема з'єднання приладів при вимірюванні густини потоку потужності випромінювання антени

2) Повернути антенну по азимуту, куту місця і поляризації до отримання максимального показника вимірювача потужності і по шкалі вимірювача провести відрахунок потужності P в мікроватах.

Якщо антенна підключається до вимірювача потужності кабелем, то дійсне значення прийнятої антенної потужності P визначається з врахуванням ослаблення кабеля за формулою $P_0 = \lambda \cdot P$, де λ – величина ослаблення кабеля у відносних одиницях, яка визначається для кожної частоти по графіку, який додається до вимірювача потужності.

3) Порахувати густину потоку потужності випромінювання в розкритті антени по формулі, мкВт/см²; $S = P_0 / A_{эф}$, де $A_{эф}$ – ефективна поверхня антени, см², яка визначається для кожної частоти по графіку, який додається до вимірювальної антени.

4) Похибка вимірювань густини потоку випромінювання антени вираховується по формулі $\delta_s = \pm \sqrt{\delta_s^2 + \delta_\alpha^2 + \delta_A^2 + \delta_{omp}^2}$, якщо рупорна антенна під'єднується до вимірювача потужності за допомогою кабеля, або по формулі $\delta_s = \pm \sqrt{\delta_p^2 + \delta_A^2 + \delta_{omp}^2}$, якщо рупорна антенна під'єднується безпосередньо до вимірювача потужності, де δ_p – похибка вимірювання потужності вимірювача; δ_α, δ_A – похибка атестації відповідно кабеля по ослабленню і антени по ефек-

тивної поверхні; $\delta_{отр}$ – максимальне значення похибки за рахунок неузгодженості.

Якщо вимірювальна антена приєднується до антени кабелем, то граничні значення $\delta_{отр}$ та $\delta''_{отр}$ похибок за рахунок неузгодженості обчислюються відповідно по формулам [14]

$$\delta_{отр} = \frac{(1 - |r_A|^2)(1 - |r_{ум}|^2)}{(1 - \rho + |r_A|^2 \cdot |r_{ум}| |r_1|^2)^2} - 1;$$

$$\delta''_{отр} = \frac{(1 - |r_A|^2)(1 - |r_{ум}|^2)}{(1 - \delta + |r_A| \cdot |r_{ум}| \cdot |r_1|^2)^2} - 1;$$

$$\delta = |r_A| \cdot |r_1| + |r_1| \cdot |r_{ум}| + \frac{1}{\alpha} |r_A| \cdot |r_{ум}|,$$

Де $|r_A|, |r_{ум}|, |r_1|$ – модуль коефіцієнта відбиття відповідно антени, вимірювача потужності і кабеля, який є однаковим з обох кінців кабеля.

$$\text{Модуль } |r_1| \text{ зв'язаний з КСХ відношенням } |r_1| = \frac{КСХ - 1}{КСХ + 1}.$$

Величини КСХ антени, кабеля і вимірювача потужності вказані в їх паспортах. В якості $\delta_{отр}$ береться більше по абсолютної величині із значень $\delta_{отр}$ та $\delta''_{отр}$.

Якщо вимірювач потужності під'єднується безпосередньо до антени, то то граничні значення $\delta_{отр}$ та $\delta''_{отр}$ похибок за рахунок неузгодженості вираховуються по формулам

$$\delta'_{отр} = \frac{(1 - |r_A|^2)(1 - |r_{ум}|^2)}{(1 - |r_A| \cdot |r_{ум}|)^2} - 1;$$

$$\delta''_{отр} = \frac{(1 - |r_A|^2)(1 - |r_{ум}|^2)}{(1 + |r_A| \cdot |r_{ум}|)^2} - 1;$$

В якості $\delta_{отр}$ береться більше по абсолютній величині із значень $\delta_{отр}$ та $\delta''_{отр}$.

5) Отримати електромагнітне поле з заданою густиною потоку потужності випромінення.

6) Розрахувати потужність P в мікроватах, яку потрібно підвести до передатної антени з умови отримання заданої густини потоку потужності випромінення на відстані l від антени, по формулі $P = \frac{S \cdot \lambda^2 \cdot I^2}{A_{эф}}$, де λ - довжина хвилі; $A_{эф}$ - ефективна поверхня антени, яка визначається для кожної частоти по графіку, який додається до вимірювальної антени.

7) З'єднати прилади по схемі, показаній на рис. 3.4.

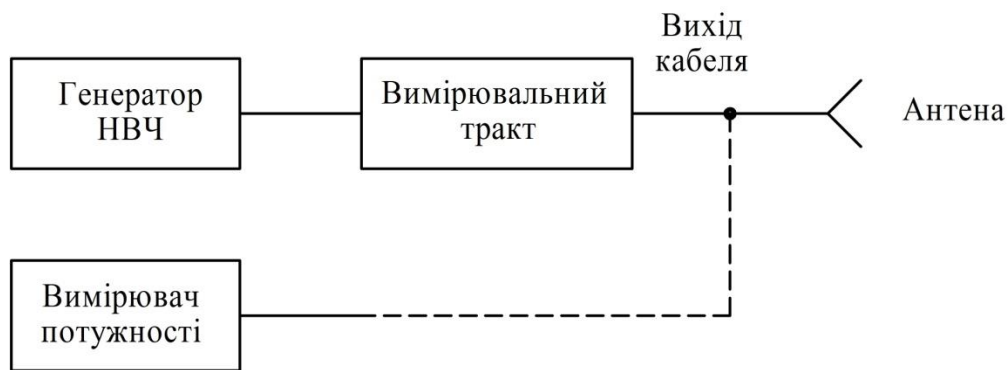


Рисунок 3.4 – Схема з'єднання приладів для створення електромагнітного поля антени із заданою густиною потоку потужності випромінення

8) Приєднати термісторний вимірювач потужності до виходу кабеля, приєднаного до ГНВЧ, і установити потрібний рівень потужності, обрахованого раніше.

9) Від'єднати кабель від вимірювача потужності і приєднати до антени. При цьому на відстані l від антени буде утворено поле з потрібною густиною потоку потужності випромінення.

10) Похибка δ_s створення електромагнітного поля антени із заданою точністю густиною потоку потужності випромінювання обрахувати по формулі

$$\delta_s = \pm \sqrt{\delta_p^2 + \delta_A^2 + (2\delta_e)^2 + (2\delta_\lambda)^2 + \delta_{amp}^2}, \text{ де } \delta_p, \delta_A, \delta_l, \delta_\lambda - \text{похибка відпові-}$$

дно зміна потужності вимірювачем потужності, атестації антени по ефективній поверхні антени, визначення відстані, визначення довжини хвилі, δ_{amp} – максимальне значення похибки за рахунок неузгодження.

11) Виміряти ефективну поверхню досліджуваної антени за допомогою вимірювальної антени методом порівняння.

12) З'єднати прилади по схемі, показаній на рис. 3.5. [15]/ В якості передаючої антени може бути використана будь – якого типу вказаного діапазону.

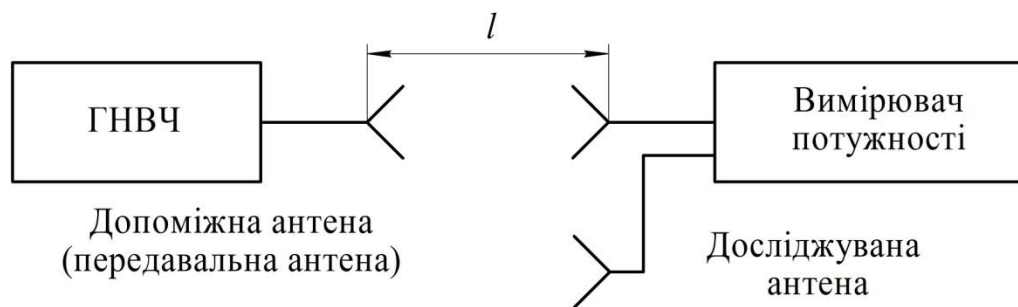


Рисунок 3.5 – Схема з'єднання приладів при вимірюванні ефективної поверхні антени

13) Встановити передавальну і прийомну антени на відстань l відносно один одного, але не менше чим на D_1 і D_2 – максимальні геометричні розміри розкриття антени відповідно передавальної та приймальної; λ - довжина, см.

14) Повертати приймальну та передавальну антени по азимуту, куту місця та поляризації до отримання максимального показника вимірювача потужності P_{np} , в мікроватах, прийняту вимірювальною антенною, і потужність P_{np} , прийняту досліджуваною антенною.

15) Визначити ефективну поверхню $A_{\text{эф}}$ досліджуваної антени по формулі,

$$\text{см}^2: A_{\text{эф}} = \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{эф}}} A_{\text{эф}}^{\circ} \text{ де } A_{\text{эф}}^{\circ} - \text{ефективна поверхня вимірювальної антени, яка ви-}$$

значається по графіку, який додається до вимірювальної антени.

16) Обчислити похибку визначення ефективної поверхні антени за формулою $\delta = \pm \sqrt{\delta_{\text{ср}}^2 + \delta_A^2 + \delta_{\text{отр}}^2}$ де $\delta_{\text{ср}}$ – похибка вимірювань відношення потужності вимірювачем потужності.

Граничні значення $\delta'_{\text{отр}}$ та $\delta''_{\text{отр}}$ похибок за рахунок неузгодженості обчислюється за формулами

$$\delta'_{\text{отр}} = \frac{(1 - |r_A|^2)(1 - |r_0| \cdot |r_{\text{ум}}|)^2}{(1 - |r|^2)(1 - |r_0| \cdot |r_{\text{ум}}|^2)} - 1; \delta''_{\text{отр}} = \frac{(1 - |r|^2)(1 - |r_0| \cdot |r_{\text{ум}}|)^2}{(1 - |r|^2)(1 + |r_0| \cdot |r_{\text{ум}}|^2)} - 1;$$

де $|r|, |r_0|, |r_{\text{ум}}|$ – модулі відповідно коефіцієнта відбиття вимірювальної антени, досліджуваної антени і вимірювача потужності [15].

В якості $\delta_{\text{отр}}$ береться більше по абсолютній величині із значень $\delta'_{\text{отр}}$ та $\delta''_{\text{отр}}$.

17) Освоїти методику перевірки ефективності антени і похибки вимірювань.

Виміряти ефективну поверхню антени методом двох антен. Антени при вимірюванні мають бути на висоті не менше 2м, відстань l між антенами і розрахунок для цих відстаней поправочного коефіцієнта γ на близькість приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення довжини хвилі та відстані між досліджуваною та вимірювальною антенами

Частота, ГГц	Довжина хвилі λ , см	Відстань l , см	Поправочний ко- ефіцієнт γ
1,0	30,0	300	1,000
2,0	15,0	300	1,015
3,0	10,0	500	1,015
4,0	7,50	500	1,023
5,0	6,00	500	1,037
5,5	5,46	600	1,046
6,0	5,00	600	1,043
6,5	4,62	760	1,031
7,0	4,29	760	1,036
7,5	4,00	760	1,041
8,0	3,75	760	1,059
8,5	3,53	760	1,062
9,0	3,33	800	1,052
9,5	3,16	937	1,044
10,0	3,00	937	1,046
10,5	2,86	937	1,046
11,0	2,37	937	1,049
11,5	2,61	937	1,055
12,0	2,50	937	1,062

Антени повинні бути розташовані так, щоб відбиття від стін, підлоги, стелі та інших предметів не впливали на результати вимірювань. Ефективна поверхня антени вимірюється не менше ніж на семи частотах (в тому числі і на двох крайніх) робочого діапазону антени в слідкуючій послідовності [16]:

А) З'єднати прилади за схемою, показаною на рис.3.4а;

Б) Включити ГНВЧ і навести передавальну антену на приймальну до отримання максимального сигналу на виході передавальної антени. Орієнтація антени при виконанні пунктів “в” та “г” не повинна змінюватися;

В) виміряти потужність $P_{пер}$, яка передається на вхід передавальної антени. Для цього ГНВЧ з підключеним до нього кабелем від’єднати від передавальної антени і під’єднати до вимірювача потужності. Встановити вихідну потужність ГНВЧ так, щоб покази вимірювача потужності були близькими до верхньої межі вимірювань. При виконанні слідуючого пункту ця потужність не повинна змінюватися;

Г) під’єднати ГНВЧ тим же кабелем знову до передаючої антени 1, ватметр до передавальної антени 2 і виміряти потужність $P_{пр}$, прийняту даною антеною.

Виміряти передану $P_{пер}$ і прийняту потужність по черзі не менше трьох разів кожен і обрахувати середнє арифметичне значення результатів трьох вимірів.

Д) Установити в якості передавальної антени третю, допоміжну антену і з’єднати її з вимірювачем відношень (рис.3.4,б);

Е) Приєднати передавальні антени 1 і 2 по черзі одним і тим же кабелем до ГНВЧ, потужність якого при цьому не повинна змінюватися, і наводити їх на допоміжну антену до отримання максимального сигналу на її виході. Більший по величині сигнал на виході допоміжної антени прийняти в якості опорної у вимірювачі відношень. Виміряти відношення сигналів від передавальних антен 1 та 2 за допомогою вимірювача відношень.

Ж) Визначити значення ефективної поверхні антен $A_{эф1}$, та $A_{эф2}$, передавальних антен 1 та 2 відповідно за формулами,

$$A_{эф1} = \gamma \cdot \lambda \cdot l \sqrt{\frac{P_{пр} \cdot \gamma}{P_{пер}}},$$

$$A_{эф2} = \gamma \cdot \lambda \cdot l \sqrt{\frac{P_{пер}}{P_{пр} \cdot \gamma}},$$

де γ - поправочний коефіцієнт, який враховує близькість антен; λ - довжина хвилі, на якій проводяться виміри; l - відстань між антенами, см. Значення γ, λ, l дані в табл. 3.1.

Порівняти значення ефективної поверхні антени $A_{y\phi}$, отриманої при вимірюваннях, із значенням ефективної поверхні антени $A_{y\phi}^{\circ}$ для даної частоти, вказаним на графіку.

Якщо похибка вимірювань δ ефективної поверхні антени, яка визначається по формулі [18]

$$\delta = \left| \frac{A_{\phi} - A_{\phi}^{\circ}}{A_{\phi}^{\circ}} \right| \cdot 100\%$$

Якщо не перевищує 20%, тоді вважаємо, що ефективна поверхня не змінилася. В іншому випадку графік коректується по результатам вимірювань.

По результатам вимірювань потрібно побудувати графіки залежності

$$P = f_1(\lambda),$$

$$S = f_2(\lambda),$$

$$\delta_s = f_3(\lambda),$$

$$A_{\phi} = f_4(\lambda),$$

$$\delta = f_5(\lambda),$$

$$\delta'_{\text{отр}} = f_6(\lambda),$$

$$\delta''_{\text{отр}} = f_7(\lambda).$$

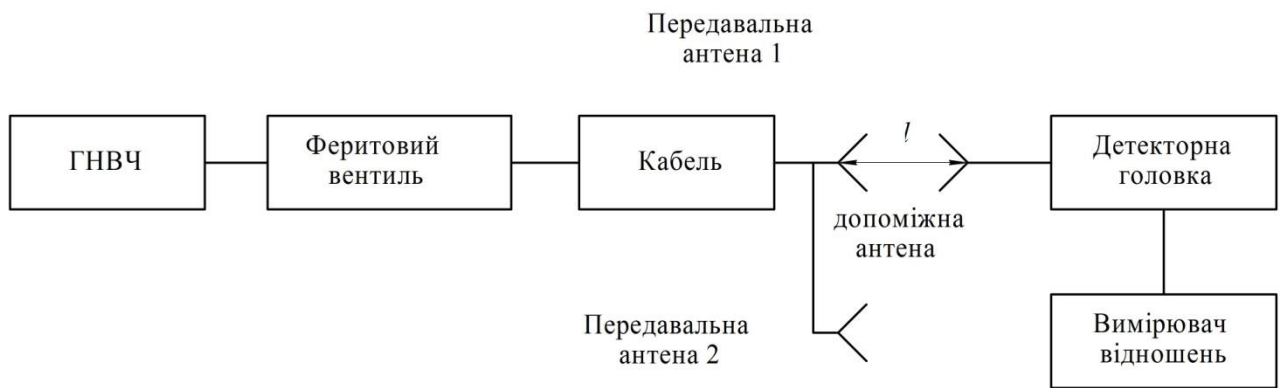
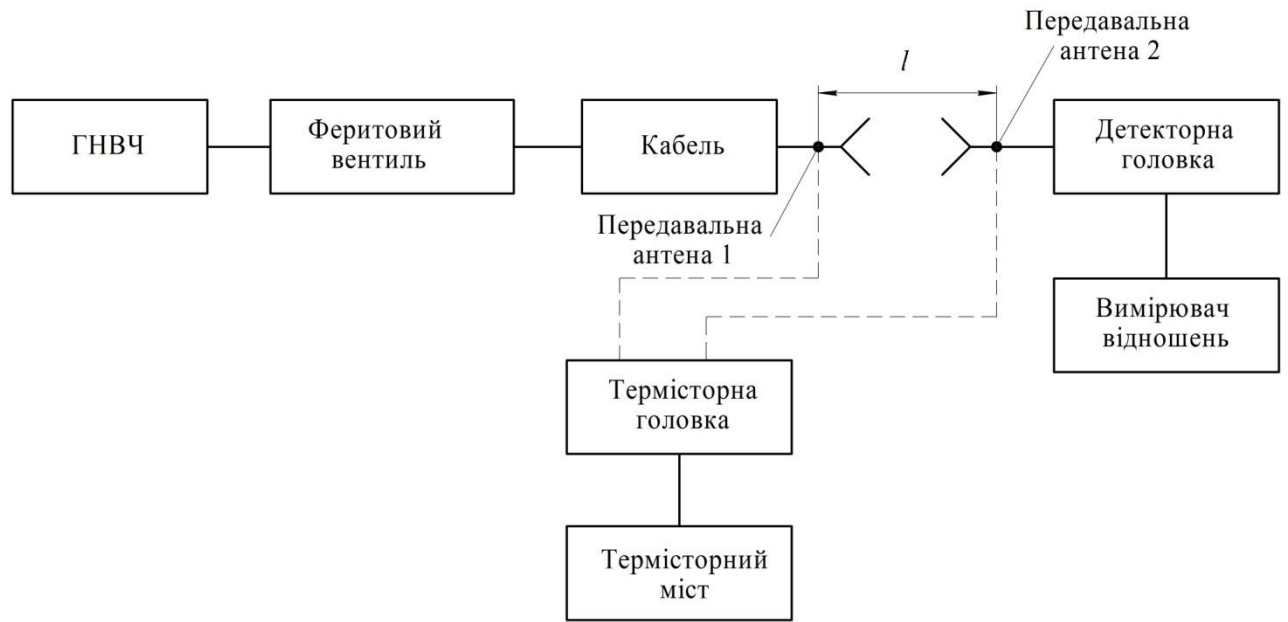


Рисунок 3.6 – Схема з'єднання приладів при вимірюванні електромагнітного поля антени

3.3 Результати експериментального дослідження лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки

Найпростішим варіантом є лінійна еквідистантна фазована антенна решітка, для якої фазові центри випромінювання окремих рупорних антен розташовані на однаковій відстані вздовж прямої лінії, що має назву вісі цієї фазованої антенної решітки (рис. 3.7 – рис. 3.8) [19]. Схема лабораторної роботи має вигляд на рис. 3.9

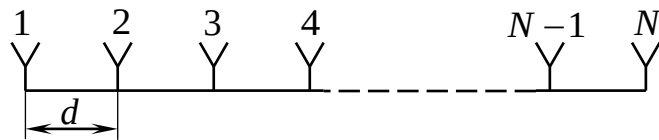


Рисунок 3.7 – Схема лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки

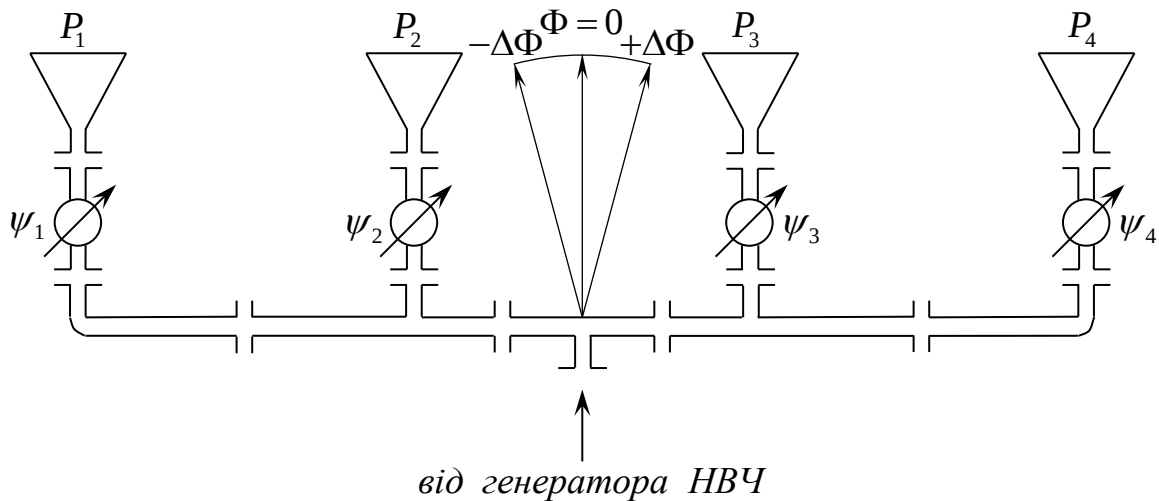


Рисунок 3.8 – Будова конструкції лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки з 4 рупорними випромінювачами

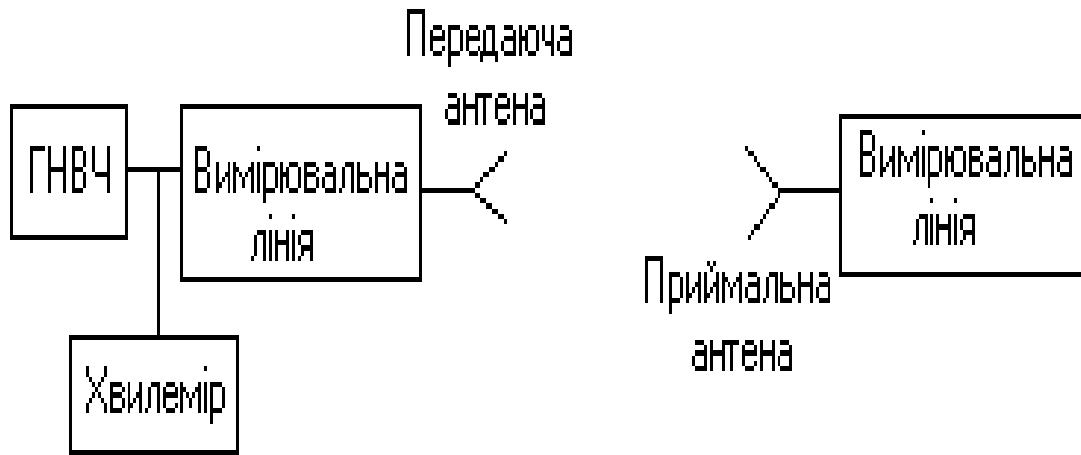


Рисунок 3.9 – Структурна схема лабораторної установки для дослідження характеристик лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки

Розміри площини розкриття кожного рупора: $a = 15$ см; $b = 10$ см.

1. Діаграма направленості рупорної антени в залежності від координати θ^E .

Таблиця 3.2 – Діаграма направленості в залежності від кута θ^E

θ	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$U_1 (\lambda_{\text{XB}} = 39,14)$	0,027 397	0,171 233	0,424 66	0,931 507	1	0,931 507	0,424 658	0,171 233	0,027 397
$U_2 (\lambda_{\text{XB}} = 40,15)$	0,051 282	0,192 308	0,371 79	0,743 59	1	0,743 59	0,371 795	0,192 308	0,051 282
$U_3 (\lambda_{\text{XB}} = 41,5)$	0,031 25	0,125	0,25	0,572 917	1	0,572 917	0,25	0,125	0,031 25

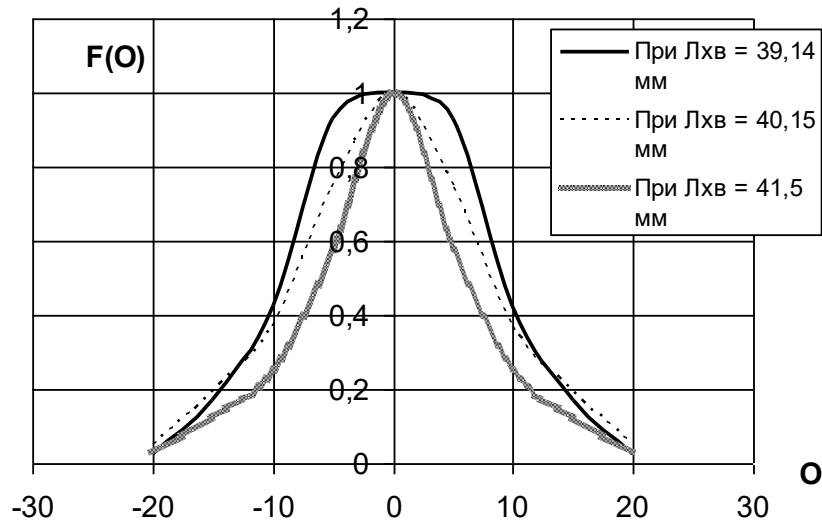


Рисунок 3.10 – Експериментально отримана діаграма направленості лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки в площині θ^E при різних довжині хвилі

Теоретично діаграму спрямованості в площині Е можна розрахувати за формулою

$$F(\theta^E) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot b \cdot \sin(\theta^E)}{\lambda}\right)}{\frac{\pi \cdot b \cdot \sin(\theta^E)}{\lambda}} \cdot \frac{1 + \cos(\theta^E)}{2}$$

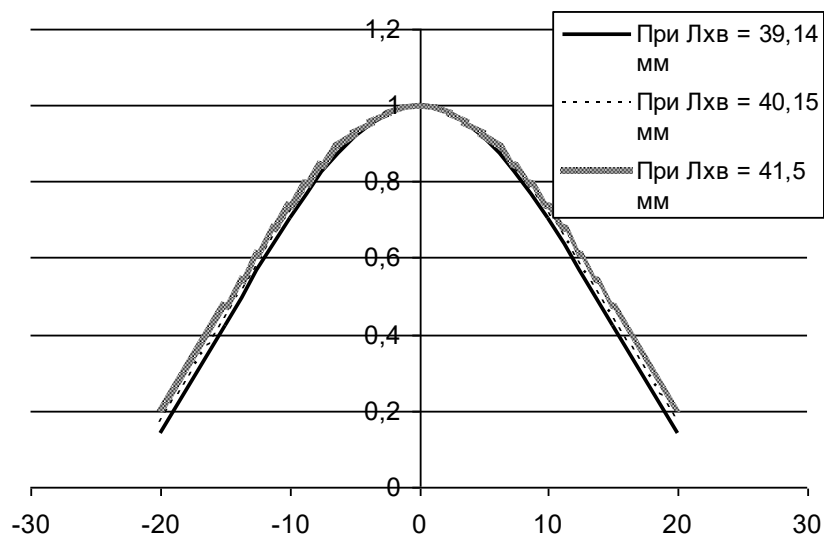


Рисунок 3.11 – Теоретично отримана діаграма направленості лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки в площині θ^E при різних довжині хвилі

2. Діаграма направленості рупорної антени в залежності від координати θ^H .

Результати занести до таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Діаграма направленості в залежності від кута θ^H

θ	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
$U_1 (\lambda_{XB} = 39,14)$	0,063 291	0,303 797	0,569 62	0,949 367	1	0,949 367	0,569 62	0,303 797	0,063 291
$U_2 (\lambda_{XB} = 40,15)$	0,075 758	0,151 515	0,303 03	0,636 364	1	0,636 364	0,303 03	0,151 515	0,075 758
$U_3 (\lambda_{XB} = 41,5)$	0,025 333	0,058 333	0,416 667	0,766 667	1	0,766 667	0,416 667	0,058 333	0,025 333

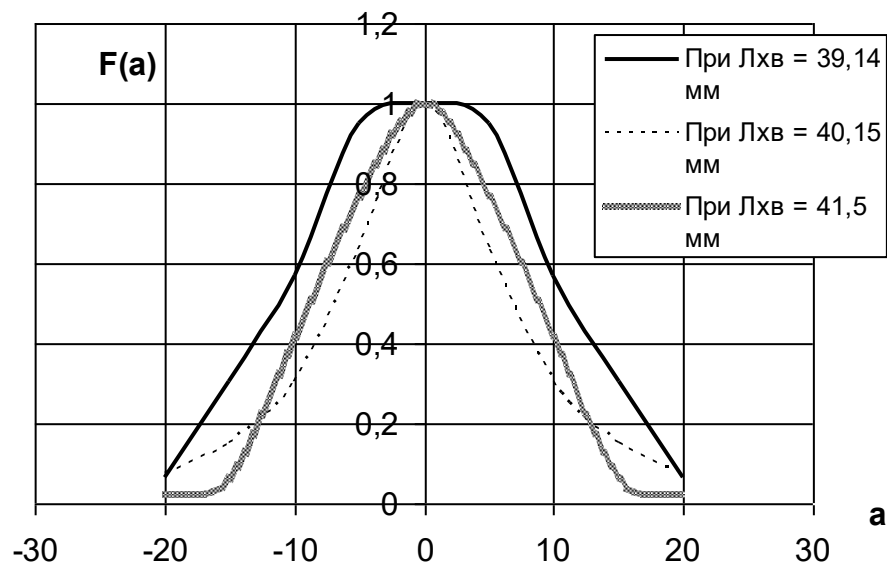


Рисунок 3.12 – Експериментально отримана діаграма направленості лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки в площині θ^H при різних довжинах хвилі

Теоретично діаграму спрямованості в площині H можна розрахувати за формулою [20]

$$F(\theta^H) = \frac{\cos\left(\frac{\pi \cdot a \cdot \sin(\theta^H)}{\lambda}\right)}{1 - \left(\frac{2 \cdot a \cdot \sin(\theta^H)}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{1 + \cos(\theta^H)}{2}$$

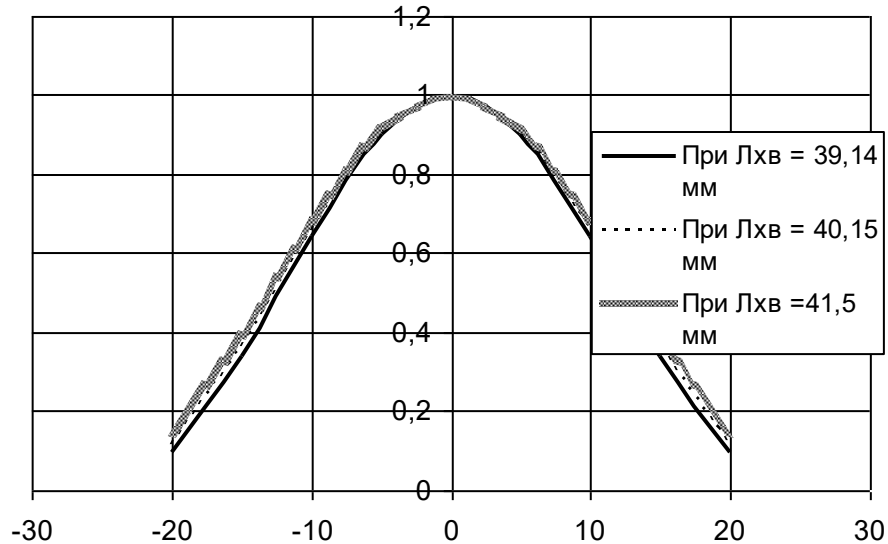


Рисунок 3.13 – Теоретично отримана діаграма направленості лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки в площині θ^H при різних довжині хвилі

3. Виміряти вхідний імпеданс для рупорної антени. По отриманим дослідним даним розрахувати $K_{\text{стн}}$, при допомозі номограми опорів знайдемо значення активного і реактивного опорів.

Результати вимірювань занести до таблиці 3.4 і 3.5.

Таблиця 3.4 – Дані зняті без екрану

$\lambda_{\text{ген}}$	$\lambda_{\text{хв}}$	L_1	L_2	ΔL	$\Delta L / \lambda_{\text{хв}}$	$K_{\text{стн}}$	R	X
29,95	39,14	63,4	57,4	6	0,153	1,93	1,31	-j2,1
30,21	40,15	59,2	52	7,2	0,179	2,34	1,12	-j1,66
30,96	41,5	55,65	48,7	6,95	0,167	2,1	1,18	-j1,87

Таблиця 3.5 – Дані зняті з екраном

$\lambda_{ген}$	$\lambda_{хв}$	L_1	L_2	ΔL	$\Delta L/\lambda_x$	$K_{сту}$	R	X
29,95	39,14	63,4	56	7,4	0,189	1,95	1,5	-j3,1
30,21	40,15	59,2	51	8,2	0,204	2,07	1,2	-j2
30,96	41,5	55,65	48,8	6,85	0,165	2,61	1,05	-j1,65

По результатам отриманим у таблицях 3 та 4 розрахуємо значення коефіцієнта підсилення за формулою [21]

$$G = (2\pi l/\lambda) \cdot (|Z_{нав}|/R_0),$$

де $Z_{нав} = Z_{вх} - Z'_{вх}$, $Z_{вх} = R_0 + jX_A$ - опір антени без екрану; $Z'_{вх} = R'_0 + jX'_A$ - опір антени з екраном. Результати занесені до таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати експериментального вимірювання коефіцієнта підсилення по потужності лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки

$\lambda_{хв}$, мм	39,14	40,15	41,5
G, дБ	37,42049	14,64119	27,8759

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розробка лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки відбувалася в приміщенні, яке обладнане робочими місцями з ПК. На розробника могли мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні:

- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи понижена температура повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;
- підвищена чи понижена іонізація повітря;
- недостатня освітленість робочої зони;
- відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до наведених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання робочого місця

Конструкція робочого місця розробника і взаємне розташування всіх його елементів повинне відповідати антропометричним, фізичним і психологічним вимогам. Велике значення має також характер роботи. [23]

Раціональне планування робочого місця передбачає чіткий порядок і сталість розміщення предметів, засобів праці і документації. Те, що потрібно для виконання робіт частіше, розташоване в зоні легкої досяжності робочого простору.

Вимоги до конструкції меблів (робочий стіл, стілець (крісло), розташованих на робочих місцях користувача ПК, визначаються вимогами [26]. Відпо-

відно до вимог екран ПК слід розташовувати на оптимальній відстані від очей працівника, але не ближче 0,4 м залежно від розміру екрана монітора.

Висота робочої поверхні столу для ПК має бути в межах 680 - 800 мм, а ширина - забезпечувати можливість виконання операцій в зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані розміри столу: висота - 725 мм, ширина - 600 - 1400 мм, глибина - 800 - 1000 мм.

Робочий стіл для ПК повинен мати простір для ніг висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги – не менше 650 мм.

Робочий стіл для ПК, як правило, має бути обладнаним підставкою для ніг шириною не менше 300 мм та глибиною не менше 400 мм, з можливістю регулювання по висоті в межах 150 мм та кута нахилу опорної поверхні - в межах 20 град. Підставка повинна мати рифлену поверхню та бортик на передньому краї заввишки 10 мм. Застосування підставки для ніг тими, у кого ноги не дістають до підлоги, є обов'язковим.

Основні вимоги щодо роботи на ПК:

- не залишати працюючі ПК і їхні пристрої без нагляду;
- підключати і відключати роз'єми кабелів пристроїв ПК тільки при відключеній напрузі;
- подавати напругу на пристрої і окремі блоки ПК тільки після ретельної перевірки надійності кріплення провідників заземлення, справності кабелів і роз'ємів мережі електроживлення;
- при виявленні запаху горілого в пристроях ПК необхідно вимкнути апаратуру, повторно не включати і звернутися до спеціаліста з технічного обслуговування ПК;
- для профілактики порушень і підтримання працездатності оператора ПК власником повинні бути введені додаткові регламентовані перерви для відпочинку;
- у період роботи за дисплеєм необхідно передбачити через кожні 40 – 45 хв три-п'ятихвилинні перерви для відпочинку. Середня сумарна тривалість

роботи за монітором за день не повинна перевищувати 4 год, а за тиждень 20 год [25].

В приміщенні, де проводилася розробка лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки використовується чотири провідна трифазна електромережа з заземленим нульовим проводом. Величина напруги цієї мережі становить 380 х 220В (фазна напруга (фаза – «0») – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В). Категорія умов з небезпеки електротравматизму – без підвищеної небезпеки [26].

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення із використанням природних заземлювачів;
- 3) систематичне проведення інструктажу з електробезпеки;
- 4) суворе дотримання правил електробезпеки на робочому місці.

Таким чином, рівень організації та обслуговування робочих місць значно впливає на ступінь важкості, стомливості й привабливості праці. Чим раціональніше організоване робоче місце, чим воно зручніше, чим краще забезпечене всім необхідним для безперебійної та ритмічної роботи, тим менш утомливою буде праця, тим більша її привабливість, тим вищі працездатність працівника і рівень продуктивності його праці.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Виробниче приміщення – замкнутий простір в спеціально призначених будинках та спорудах, в яких постійно (по змінах) або періодично (протягом частини робочого дня) здійснюється трудова діяльність людей.

Мікрокліматичні умови на робочому місці, у виробничих приміщеннях – найважливіший санітарно-гігієнічний фактор, від якого багато в чому залежить стан здоров'я та працездатність людини. Визначається він поєднанням та-

ких показників або параметрів, як температура повітря і поверхонь, відносна вологість, швидкість руху (рухливість) повітря, тепловивипромінювання.

У санітарних нормах ДСН 3.3.6.042-99 [27] встановлені величини параметрів мікроклімату, що створюють комфортні умови. Ці норми встановлюються залежно від пори року, характеру трудового процесу і характеру виробничого приміщення (значні або незначні тепловиділення).

Робота розробника лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки за енерговитратами відноситься до категорії І а (енерговитрати до 139Дж/с) [28]. Допустимі параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні	21 ... 25 ° С
	Відносна вологість	40 ... 60%
	Швидкість руху повітря	до 0,1 м / с
Теплий	Температура повітря в приміщенні	22 ... 28 ° С
	Відносна вологість	40 ... 60%
	Швидкість руху повітря	0,1 ... 0,2 м / с

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату в приміщенні використовується централізована парова система опалення (для підтримання температури в холодний період року) та система кондиціонування (для підтримання температури в теплий період року), а також систематичне (раз за зміну) вологе прибирання.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Чистота повітря виробничого середовища є важливим фактором підтримання стабільної працездатності працівників, формування у них позитивного ставлення до роботи, підвищення продуктивності праці. Багатьма дослідженнями доведено, що система дихання людини найменш пристосована до забрудненої атмосфери. Слизові оболонки, легеневий апарат піддаються більшому

впливу забрудненого повітря, ніж очі та шкіряний покрив. Разом з тим велика кількість виробничих процесів супроводжується утворенням дрібних часточок твердих або рідких речовин, які утримуються в повітрі. Кількість домішок – газів, парів, пилу, які містяться в одному літрі або одному кубічному метрі повітря у грамах, характеризує ступінь забруднення виробничого середовища.

В приміщенні, де виконується розробка лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки, можливими шкідливими речовинами у повітрі є фенол, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні, через вікна, двері та заноситься співробітниками.

ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³	Середньо добова	Клас небезпечності
	Максимально разова		
Фенол	0,01	0,01	3
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	1

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування та вологого прибирання.

4.2.3 Виробниче освітлення

Освітлення на робочих місцях справляє багатоплановий вплив на працівника, зокрема на його емоційний стан, працездатність, мотивацію, продуктивність і безпеку праці. Світло є не тільки важливою умовою роботи зорового аналізатора, а й біологічним фактором розвитку організму людини в цілому. Для людини день і ніч, світло і темрява визначають біологічний ритм – неспання та сон. Отже, недостатня освітленість або її надмірна кількість знижують рівень збудженості центральної нервової системи і активність усіх життєвих процесів. Рациональне освітлення є важливим фактором загальної культури виробництва. Неможливо забезпечити чистоту та порядок у приміщенні, в якому напівтемрява, світильники брудні або в занедбаному стані.

Згідно ДБН В.2.5-28-2018 [29] в приміщенні, де здійснюється робота за допомогою ПК необхідно застосувати систему комбінованого освітлення. Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні для роботи зазначені у таблиці 4.4:

Таблиця .4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Високої точності	0,3 - 0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

- 1) Максимальне використання бічного природного освітлення.
- 2) Систематичне очищення скла від бруду – не рідше двох разів на рік.
- 3) Систематична заміна перегорілих ламп.

4.2.4 Виробничий шум

Шкідливий та небезпечний вплив шуму на організм людини встановлено з повною достовірністю. Ступінь такого впливу, переважно, залежить від рівня та характеру шуму, форми та тривалості впливу, а також індивідуальних особливостей людини. Численні дослідження підтвердили той факт, що шум належить до загальнофізіологічних подразників, які за певних обставин можуть впливати на більшість органів та систем організму людини. Так, дія шуму може спричинити нервові, серцево-судинні захворювання, виразкову хворобу, порушення обмінних процесів та функціонування органів слуху тощо.

Джерелом шуму під час розробки лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки є працююча офісна техніка, а також – рух автотранспорту біля будинку. У табл.4.4 вказані граничні рівні звуку залежно від категорії тяжкості і напруженості праці, що є безпечними відносно збереження здоров'я і працездатності згідно ДСН 3.3.6.037-99 [30].

Таблиця 4.4 – Граничні рівні звуку, дБ, на робочих місцях.

Категорія напруженості праці	Категорія важкості праці			
	I. Легка	II. Середня	III. Важка	IV. Дуже важка
I. Мало напружений	80	80	75	75
II. Помірно напружений	70	70	65	65
III. Напружений	60	60	-	-
IV. Дуже напружений	50	50	-	-

Для зниження рівня шуму стіни і стеля приміщень, де встановлені комп'ютери, можуть бути облицьовані звукопоглинальними матеріалами.

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно використовувати комп'ютери з пасивним охолодженням та встановити пластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Розробка лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки відбувалася за допомогою ПК, відповідно існує ймовірність впливу ЕМП на працівника.

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини взагалі залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму. У результаті дії ЕМП на людину можливі гострі та хронічні форми порушення фізіологічних функцій організму.

Ці порушення виникають в результаті дії електричної складової ЕМП на нервову систему, в також на структуру кори головного та спинного мозку, серцево-судинної системи. У більшості випадків такі зміни в діяльності нервової та серцево-судинної системи мають зворотній характер, але в результаті тривалої дії вони накопичуються, підсилюються з плином часу, але, як правило, зменшуються та зникають при виключенні впливу та поліпшенні умов праці. Тривалий та інтенсивний вплив ЕМП призводить до стійких порушень та захворювань.

Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл.4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Найменування параметра	Допустимі значення
Напруженість електричної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	10 В/м
Напруженість магнітної складової електромагнітного поля на відстані 50 см від поверхні відеомонітору	0,3 А/м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати:	для дорослих користувачів 20кВ/м для дітей 15кВ/м

Заходи щодо зменшення впливу на працівника електромагнітного випромінювання: оптимальна організація робочого місця, доцільне розміщення технологічного устаткування, дотримання гігієнічно-обґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.

4.3 Пожежна безпека

Пожежна безпека – це стан об’єкта, при якому з регламентованою ймовірністю виключається можливість виникнення та розвиток пожежі і впливу на людей її небезпечних факторів, а також забезпечується захист матеріальних цінностей. Забезпечення пожежної безпеки є складовою частиною виробничої та іншої діяльності посадових осіб, працівників підприємств, установ, організацій та підприємців. Це повинно бути відображено у трудових договорах (контрактах) та статутах підприємств, установ та організацій.

В приміщенні, де проводилася робота, використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д» [31]. За вогнестійкістю приміщення відноситься до третьої категорії [32].

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де виконувалася робота такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- використання електропобутових пристроїв (електрочайники, обігрівачі); попадання вологи на працююче електрообладнання;
- залишення без нагляду увімкнутих комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

- проведення навчань з питань пожежної безпеки (інструктажі та пожежно-технічні мінімуми);
- суворе дотримання правил і норм, визначених чинними нормативними документами при реконструкції приміщень, будівлі, технічне переобладнання електромережі, опалення, вентиляції, освітлення тощо;
- заборона паління та застосування відкритого вогню у приміщенні;
- своєчасне проведення профілактичних оглядів, випробувань, ремонтів обчислювальної техніки та допоміжного устаткування.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Система протипожежного захисту – це сукупність організаційних заходів а також технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних чинників пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї. Протипожежний захист підприємства здійснюється за такими чотирма напрямками.

1. Обмеження розмірів та поширення пожежі: розміщення будівель та споруд на території об'єкта із дотриманням протипожежних розривів та інших вимог пожежної безпеки; дотримання обмежень стосовно кількості поверхів будівель та площі поверху; правильне планування та розміщення виробничих цехів, приміщень, ділянок у межах будівлі; вибір будівельних конструкцій не-

обхідних ступенів вогнестійкості; встановлювання протипожежних перешкод у будівлях, системах вентиляції; облаштування систем автоматичної пожежної сигналізації та пожежогасіння.

2. Обмеження розвитку пожежі: обмеження кількості горючих речовин, що одночасно знаходяться в приміщенні; використання оздоблювальних будівельних та конструкційних матеріалів з нормативними показниками вибухопожежонебезпечності.

3. Забезпечення безпечної евакуації людей та майна: вибір такого об'ємно-планувального та конструктивного виконання будівлі, щоб евакуація людей була завершена до настання гранично допустимих рівнів чинників пожежі; застосування аварійного вимкнення устаткування та комунікацій; облаштування систем протидимового захисту, які запобігають задимленню шляхів евакуації; влаштування необхідних шляхів евакуації (коридорів, сходових кліток, зовнішніх пожежних драбин), раціональне їх розміщення та належне утримання.

4. Створення умов для успішного гасіння пожежі: встановлення в будівлях та приміщеннях установок пожежної автоматики; забезпечення приміщень нормованою кількістю первинних засобів пожежогасіння.

У приміщенні на випадок виникнення пожежі для обмеження її розповсюдження знаходиться переносний вуглекислотний вогнегасник типу ОУ-5, що відповідає нормам [33]. Підходи до засобів первинного пожежогасіння та відключення електросхем устаткування вільні.

У коридорі приміщення розташована схема евакуації людей при пожежі. Шляхи евакуації з відділу відповідають правилам пожежної безпеки. У будинку є два виходи, ширина коридору – 2-3 метри, ширина дверей – 0,8 м., двері відкриваються по ходу руху людей у випадку евакуації.

ВИСНОВКИ

Використання антенних решіток має свій ряд як недоліків, так і переваг.

До переваг антенних решіток можна віднести: можливості застосування електричного сканування (переміщення променя в просторі без фізичного зміни положення антени); підвищення підсилення антени в порівнянні з елементарним випромінювачем; можливість формування діаграми спрямованості складної форми; адаптація до заводовій обстановці і компенсація відмов обладнання; формування ДН косекансної форми для оптимізації використання енергетичного потенціалу системи по дальності; можливість багатопроменевої роботи.

Недоліками в свою чергу являються: складність розрахунку конструкції і електричних параметрів; звуження смуги, викликане спотворенням форми ДН на частотах, відмінних від розрахункової; складність елементної бази і високі вимоги до неї; високу вартість.

У роботі проаналізовано поняття антенних решіток, їх класифікація, основні параметри та характеристики і формування випромінювання; виконано математичний опис АФАР та їх параметрів; проведено комп'ютерне моделювання на основі математичного опису.

Було опрацьовано такі аспекти охорони праці, як аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів у виробничому приміщенні (описання і класифікація потенційно шкідливих та небезпечних чинників, визначення можливих причини виникнення цих чинників і короткий опис їхньої дії на організм працівника); карта умов праці; заходи стосовно поліпшення умов праці, виконано розрахунок кроку сітки алюмінієвого сітчастого екрану, а також розглянуто норми пожежної безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Авдєєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Коломицев М. О. Застосування математичного апарату торцевих добутків матриць для опису оптимального вектору вагових коефіцієнтів адаптивної антенної решітки з неідентичними каналами обробки. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, 2011. № 30. С. 34–39.
2. Авдєєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Коломицев М. О., Якорнов Є. А. Застосування математичного апарату торцевих добутків матриць для опису оптимального вектору вагових коефіцієнтів адаптивної антенної решітки з неідентичними каналами обробки. VI Міжнародна науково-практичної конференції "Військова освіта та наука: сьогодення та майбутнє": зб.тез доповідей. 25-26 лист. 2010 р. Київ: ВІКНУ, 2010. С.356.
3. Авдєєнко Г. Л., Гелесев О. І., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Мазуренко О. В. Розробка оптимальних методів просторово-часової обробки сигналів радіоелектронних засобів на основі використання чотиривимірних матриць. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, 2008. №14. С. 61–73.
4. Авдєєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А. Синтез алгоритмів просторово-часової обробки сигналів для просторової режекції перешкод в антенних системах з широкою характеристикою спрямованості. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, 2009. №19. С. 34–44.
5. Авдєєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Коломицев М. О., Якорнов Є. А. Моделювання роботи мобільної радіомережі з розподіленими антенними системами, діаграми спрямованості яких адаптовані до впливу завад при обмеженому частотному ресурсі. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, 2011. № 33. С. 51-61.

6. Якорнов Є. А., Коломицев М. О., Авдеєнко Г. Л., Лавріненко О. Ю. Теоретичний аналіз можливості застосування фізичного явища кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі в стаціонарних системах радіозв'язку надвисокочастотного діапазону. Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Київ, 2012. № 48. С. 84–96.
7. Авдеєнко Г. Л., Якорнов Є. А. Застосування просторово-часової обробки сигналів за формою фазового фронту електромагнітної хвилі у безпроводових телекомунікаційних системах. Збірник наукових праць ВІПІ. Київ, 2018. №4. С. 6–13.
8. Avdieienko H., Yakornov Y. Application of Spatial Signal Processing by the Form of the Electromagnetic Wave Phase Front in Wireless Communication Systems. Advances in Information and Communication Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2019. Vol 560. P. 239–261.
9. Avdeyenko G. L., Kolomytsev M. A., Yakornov Ye. A. Efficiency of spatial signal processing in wireless communications. Telecommunication Sciences. 2012. Vol.3, No.2. P. 5-13.
10. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Коломицев М. А., Мазуренко О. В., Ліпчевська І. Л. Пріоритетні напрямки розвитку адаптивної обробки радіосигналів для підвищення ефективності функціонування бездротової мережі зв'язку з розподіленими антенними системами. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, 2010. № 28. С. 65–70.
11. Авдеєнко Г. Л., Карпенко Б. О., Якорнов Є. А., Ліпчевська І. Л., Мазуренко О. В. Сучасний стан обробки радіосигналів бездротової мережі зв'язку в передавальних антенних системах базових станцій. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, 2010. № 27. С. 42–46.
12. Спосіб просторової селекції джерел радіовипромінювання в довільній хвильовій зоні: пат. 121465 Україна : МПК G01S 5/08. №201705290 ; заявл. 30.05.2017 ; опубл. 11.12.2017, Бюл.№23. 4.128 с.

13. Авдеєнко Г. Л. Аналіз впливу активних перешкод на радіоканали транспортного засобу в системах диспетчеризації. Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Київ, 2008. №15. С. 5–14.
14. Адаптивна за відстанню антенна решітка : пат. 55438 Україна : МПК G01S 3/00, H01Q 3/00. № 201007929 ; заявл. 24.06.2010 ; опубл. 10.12.2010, Бюл. №23. 5.128 с.
15. Авдеєнко Г.Л., Якорнов Є. А. Спосіб просторової селекції джерел радіовипромінювання в довільній хвильовій зоні на основі модифікованого алгоритму Кейпона. Одинадцята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» : зб. матеріалів конф. 18-21 квіт. 2017р. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С.232-234.
16. Якорнов Е. А., Коломицев М. А. Авдеєнко Г. Л., Лавриненко О. Ю. Теоретичний аналіз можливості використання фізичного явища кривизни фазового фронту електромагнітної хвилі в стаціонарних системах радіозв'язку надвисокочастотного діапазону. Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: зб. тез. 22-29 лют. 2012 р. Київ: НТУУ “КПІ”, 2012. С.41-43.
17. Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Білик О.В., Шпильовий О.О. Дослідження густини потоку електромагнітного випромінювання від елементарного електричного випромінювача у ближній та проміжних зонах. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72), № 3, 2022, С. 13-19. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/03>
18. Andriy Semenov, Olena Semenova, Bogdan Pinaiev, Dmytro Kozin, Oleksandr Shpylovyyi. Study of the radiation pattern of a rectangular horn antenna in the operation of multimode propagation of electromagnetic waves. Technology Audit and Production Reserves, № 2/2(64), 2022, pp. 50-55. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256560>
19. Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Козін Д.О., Кристофоров А.В. Широкопasmовога прямокутна рупорна антена з діелектричною лінзою для

бездротового зв'язку «точка-точка». Системи та технології, Том 64, №2, 2022, С. 38-47. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.2-64.5>

20. Andriy Semenov, Olena Semenova, Bogdan Pinaiev, Roman Kulias, Oleksandr Shpylovyi. Development of a flexible antenna-wristband for wearable wrist-worn infocommunication devices of the LTE standard. Technology Audit and Production Reserves, № 3/1(65), 2022, pp. 20-26. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.261718>

21. 10) Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Куляс Р.О., Шпильовий О.О. Гнучка двохсмугова LTE антена для радіочастотних технологій доступу носимих пристроїв бездротових інфокомунікаційних і сенсорних мереж. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 4 2022. Частина 1. С. 32-38. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/07>

22. ДСТУ ISO 45001:2019 Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування (ISO 45001:2018, IDT). URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88004.

23. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028

24. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php

25. Про мінімальні вимоги безпеки при роботі з дисплейним обладнанням: 90/270/ЕЭС. Брюссель : Рада Європейських співтовариств, 1990. URL: <http://docs.pravo.ru/document/view/32704903/>

26. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

27. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

28. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

29. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

30. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

31. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759

32. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.

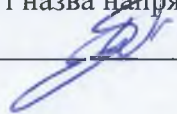
33. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

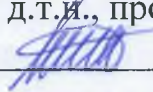
Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ЛІНІЙНА ЕКВІДИСТАНТНА ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШІТКА

Виконав: студент 2 (4)-го курсу, групи ТКР-22мс
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)


Дехтярук С.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІРТС

Семенов А.О.
(прізвище та ініціали)

«12» 06 2024 р.

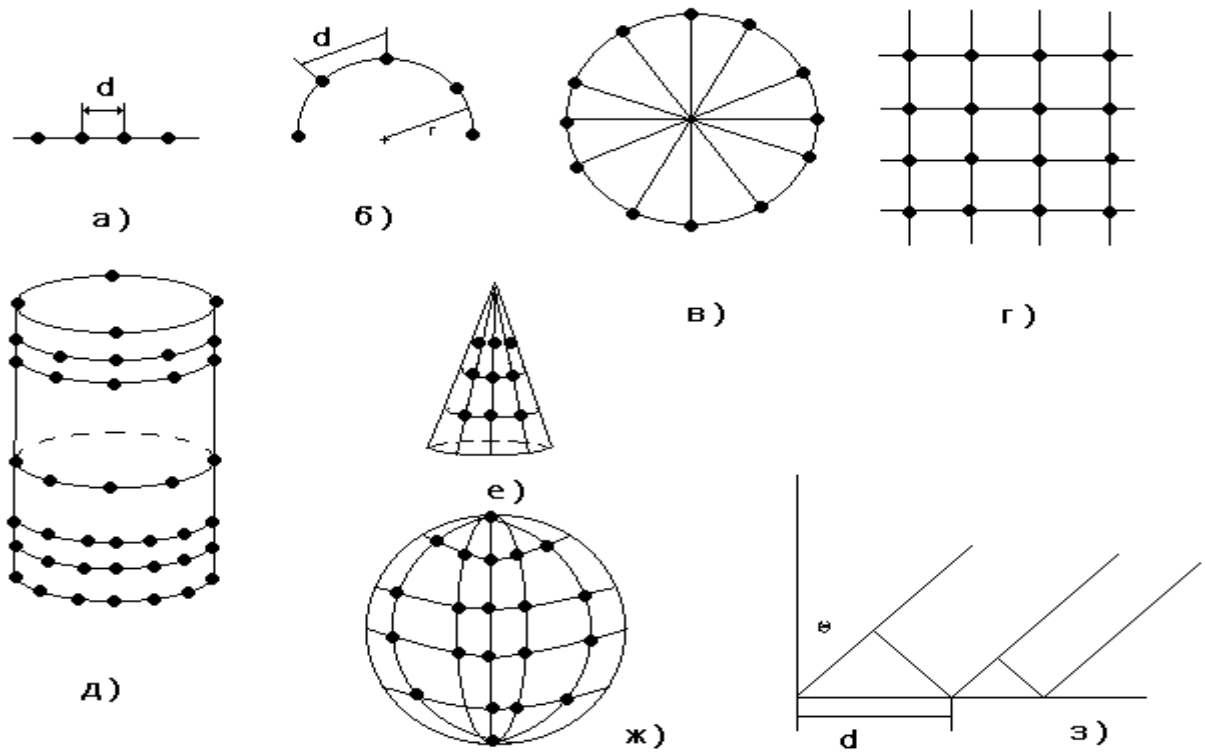


Рисунок 1 – Антенні решітки: а) – лінійні решітки; б) – дугові решітки; в) – кільцеві решітки; г) – плоскі решітки; д) – циліндричні решітки; е) – конічні решітки; ж) – сферичні решітки; з) – нееквідистантна решітка

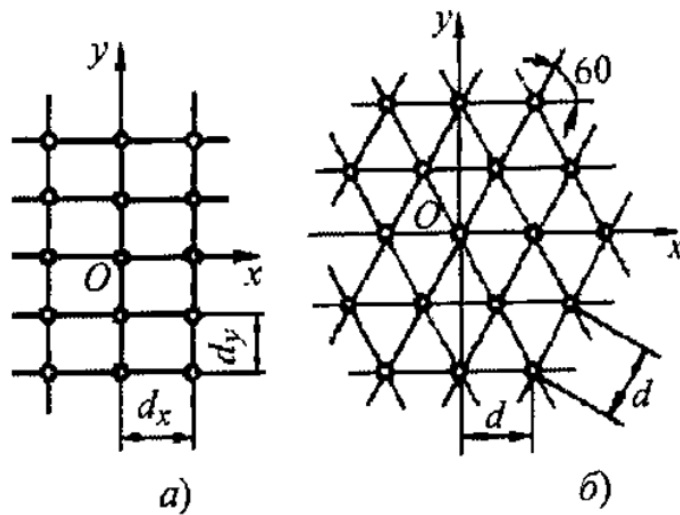


Рисунок 2 – Плоска прямокутна (а) і гексагональна (б) решітки

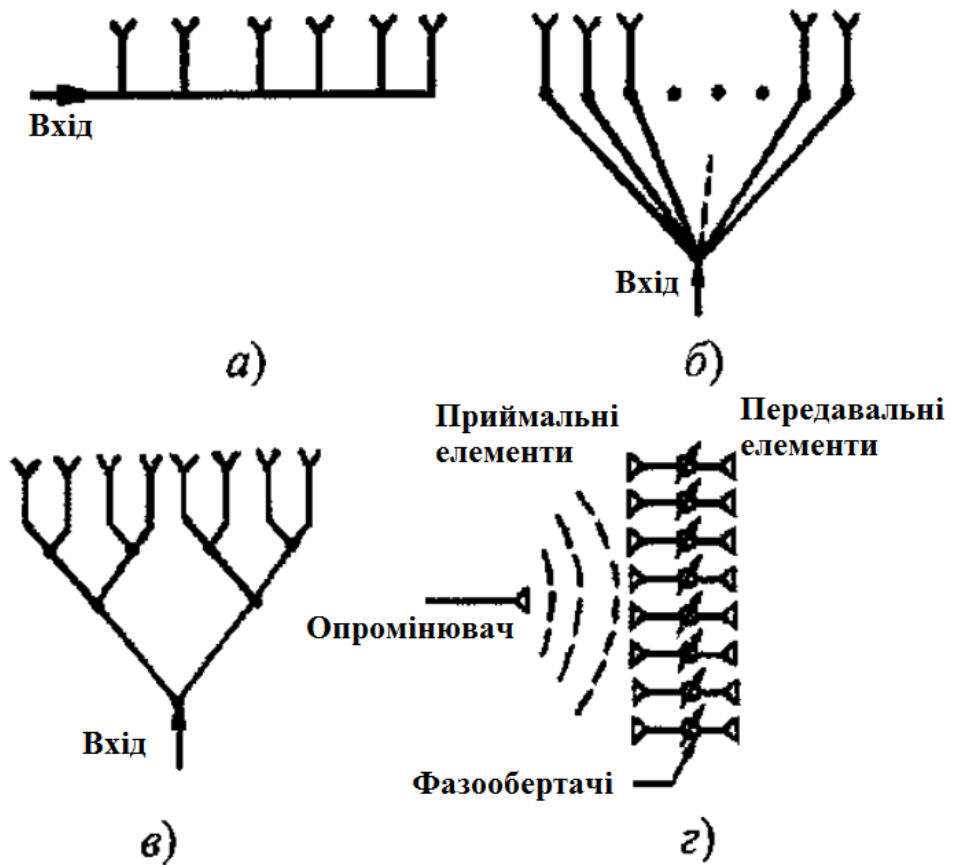


Рисунок 3 – Збудження випромінювачів в решітці: а) – послідовна схема; б) – паралельна схема; в) – схема живлення типу «ялинка»; г) – просторове збудження

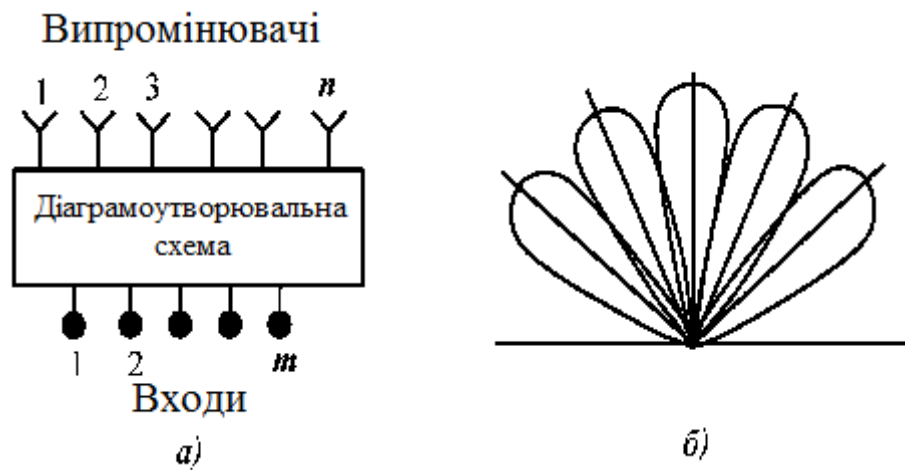


Рисунок 4 – Багатопроменева антенна решітка: а) – структурна схема; б) – діаграма направленості

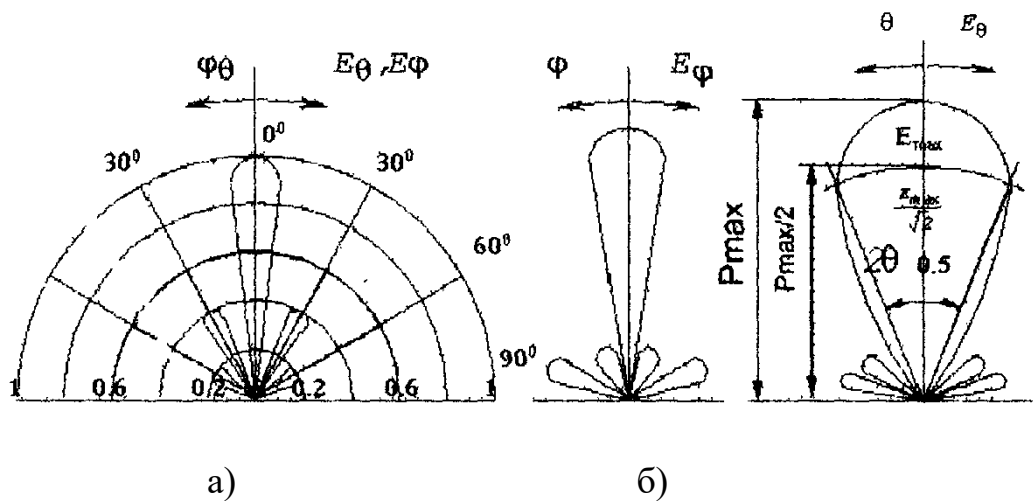


Рисунок 5 – Діаграма направленості: а) – голкоподібна в горизонтальній і вертикальній площинах; б) – віялоподібна в вертикальній площині

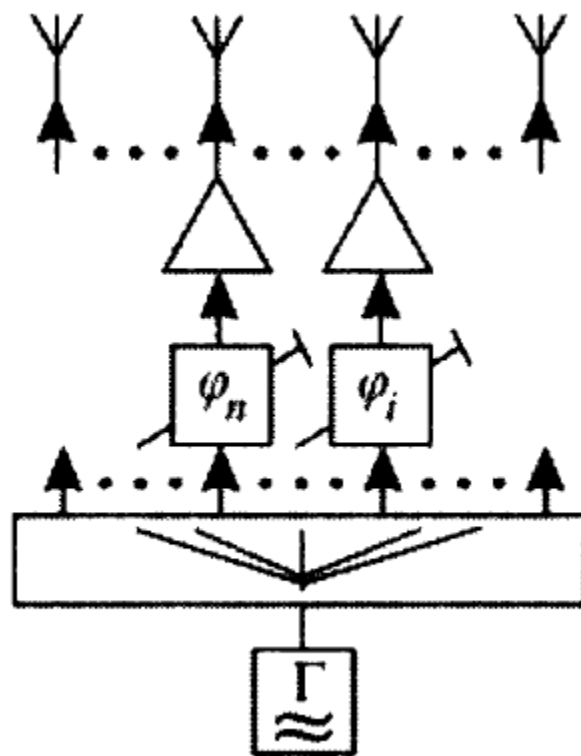


Рисунок 6 – Функціональна схема АФАР з фазуванням на основній частоті в режимі передачі

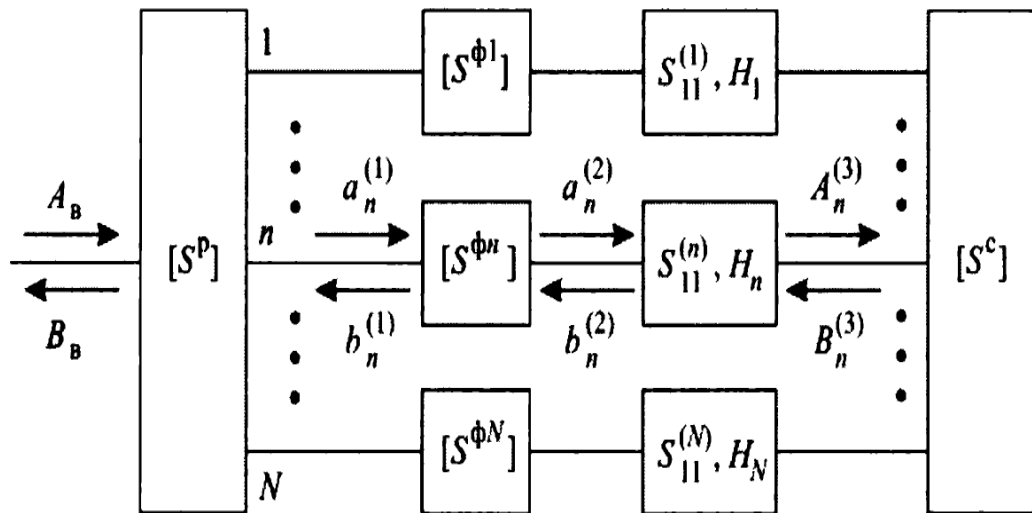


Рисунок 7 – Схема N-канальної передавальної АФАР

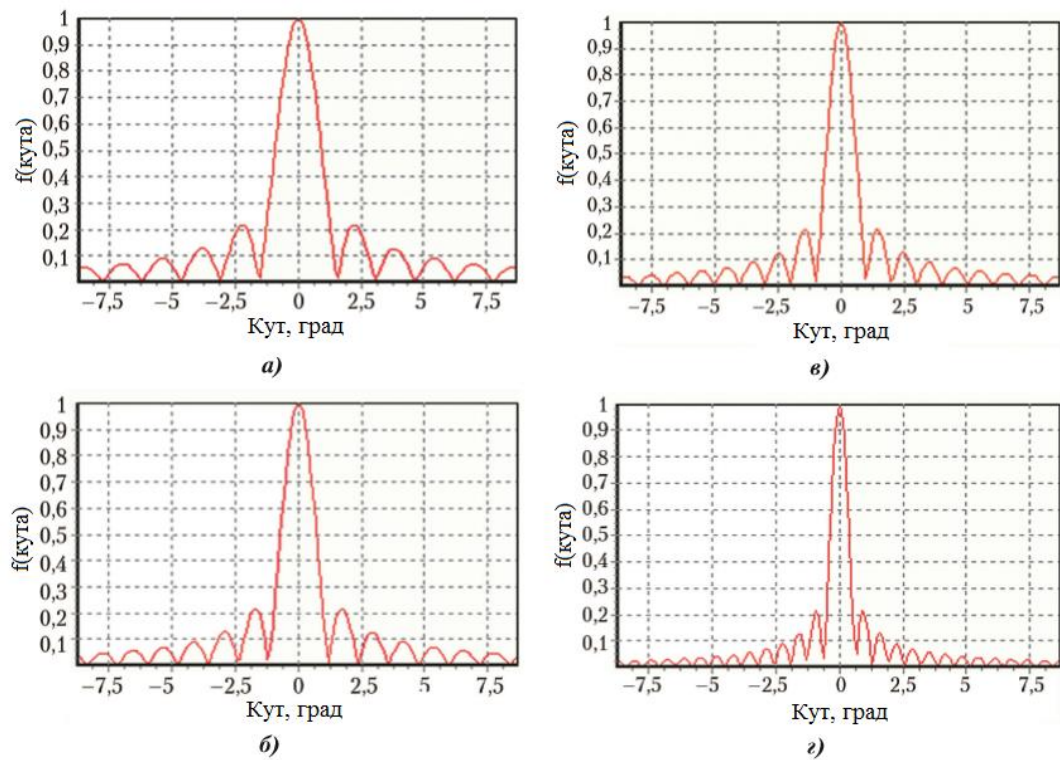


Рисунок 8 – Моделювання діаграм направленості симетричної АФАР на частоті 3 (а), 10 (б), 20 (в) і 25 (г) ГГц

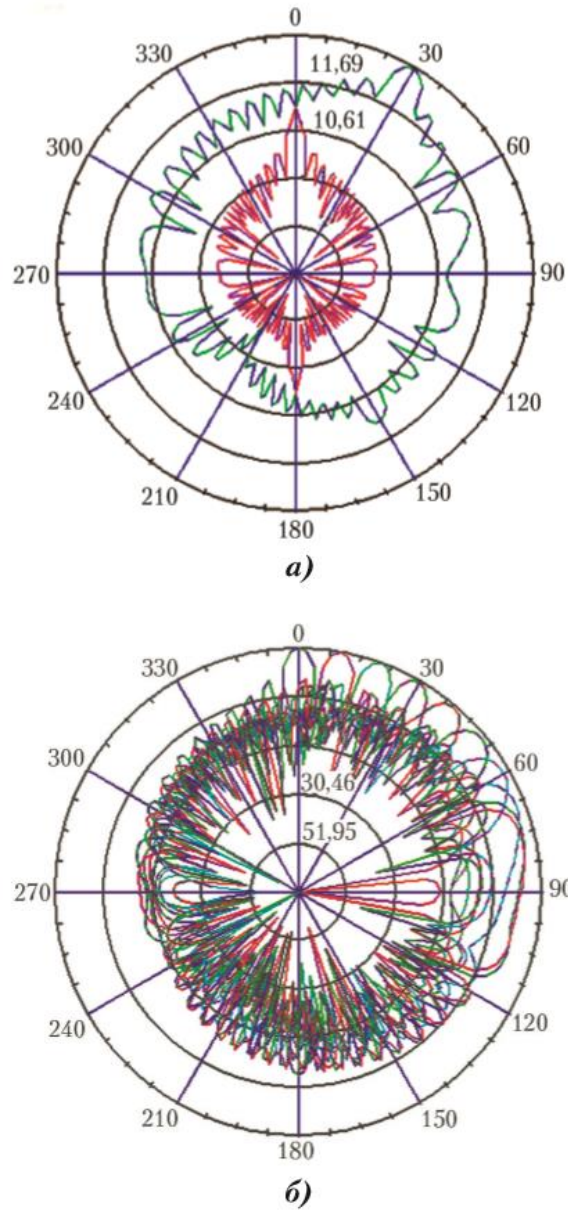


Рисунок 9 – Моделювання діаграм направленості АФАР при куту сканування 30° (а) і довільному ряду кутів сканування (б)

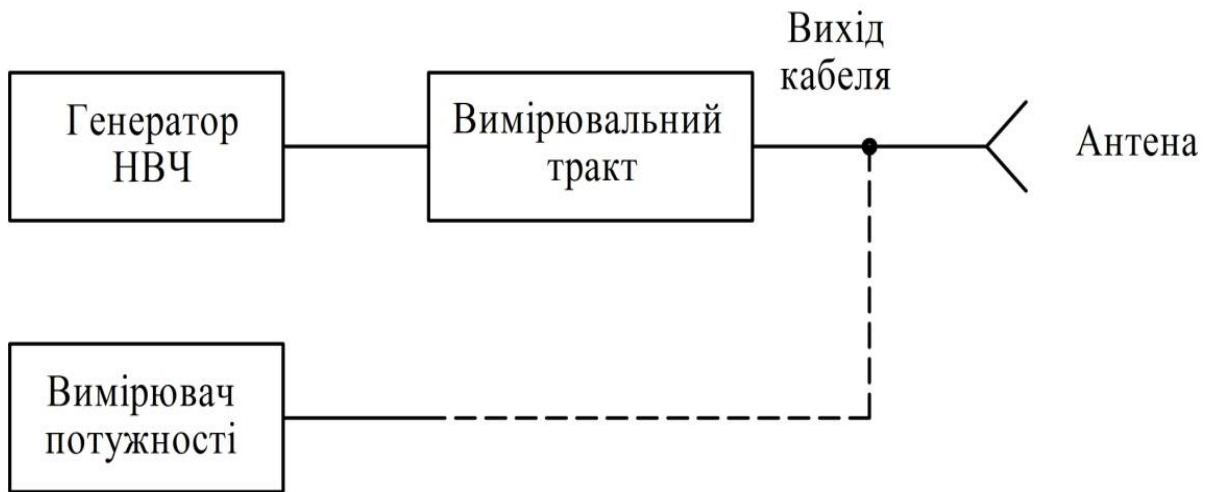


Рисунок 10 - Схема з'єднання приладів для створення електромагнітного поля антени із заданою густиною потоку потужності випромінювання

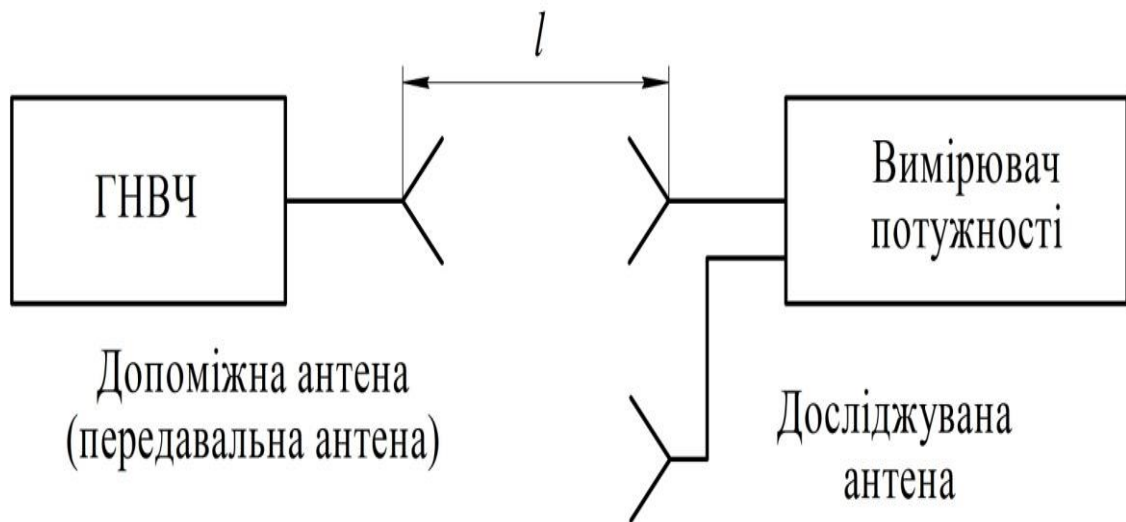


Рисунок 11 - Схема з'єднання приладів при вимірюванні ефективної поверхні антени

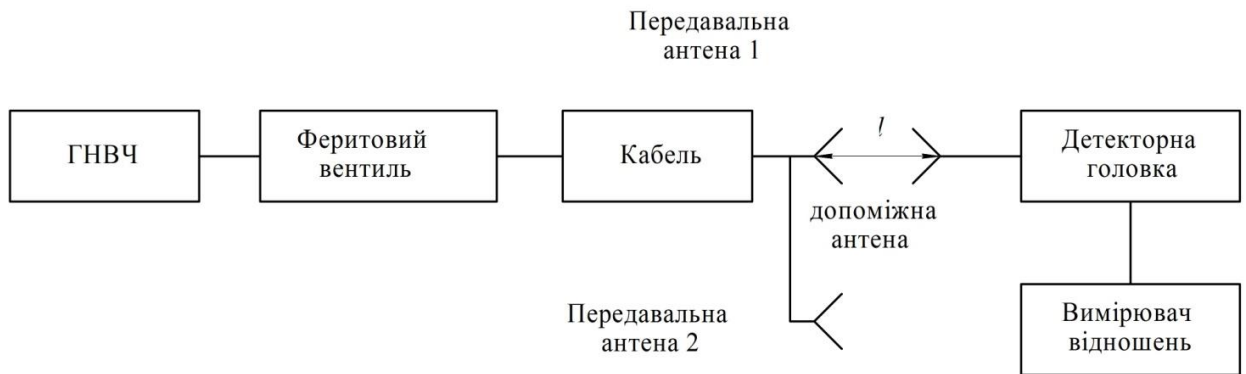
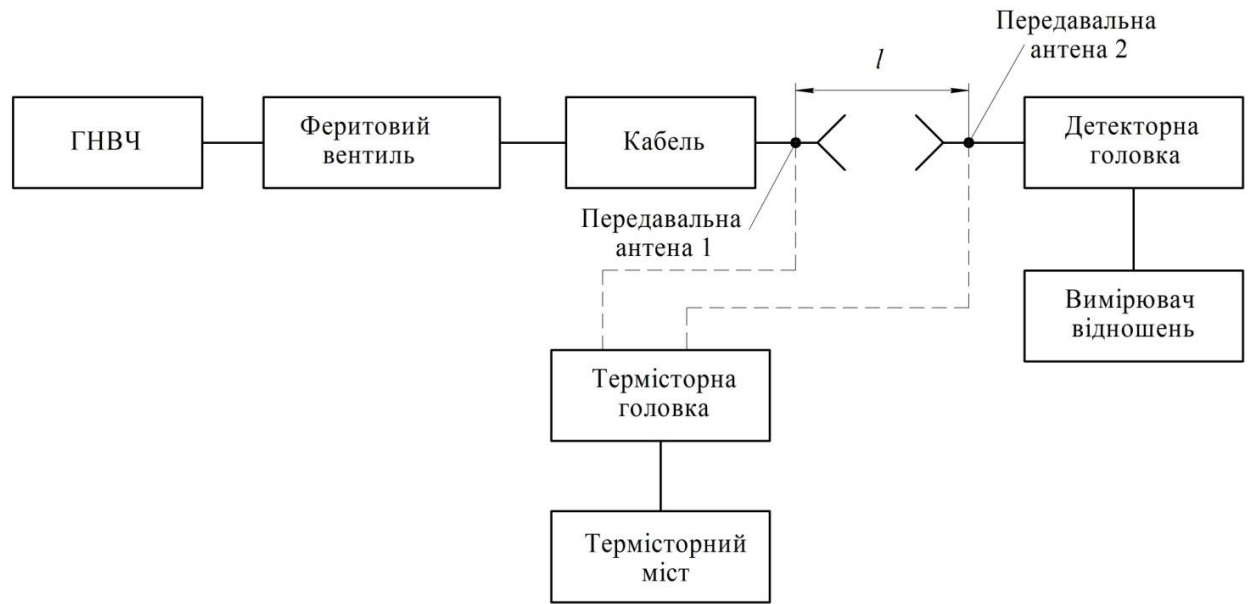


Рисунок 12 - Схема з'єднання приладів при вимірюванні електромагнітного поля антени

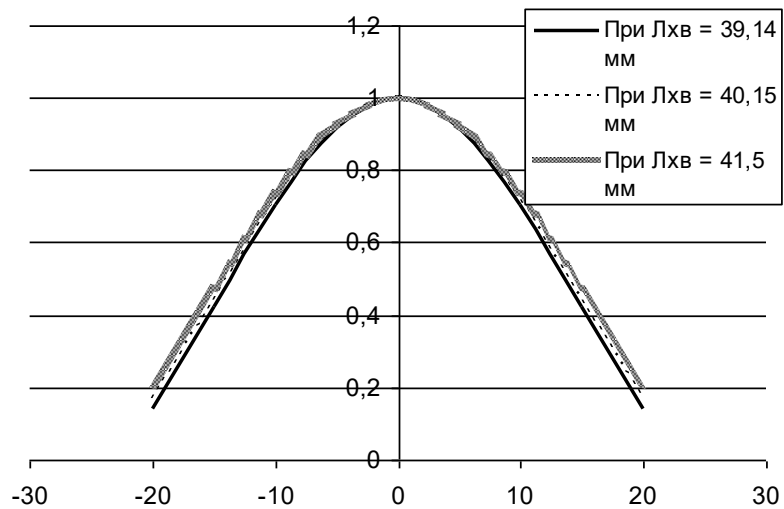


Рисунок 34 - Теоретично отримана діаграма направленості лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки в площині θ^E при різних довжинах хвиль

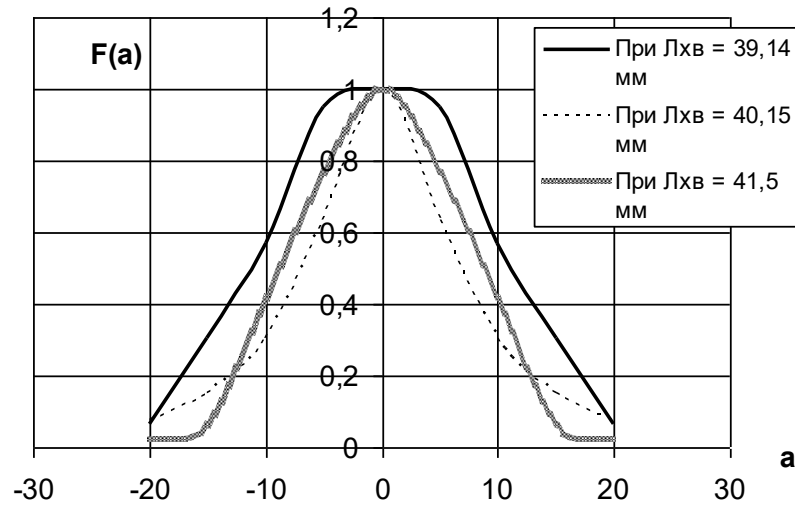


Рисунок 14 - Експериментально отримана діаграма направленості лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки в площині θ^H при різних довжині хвилі

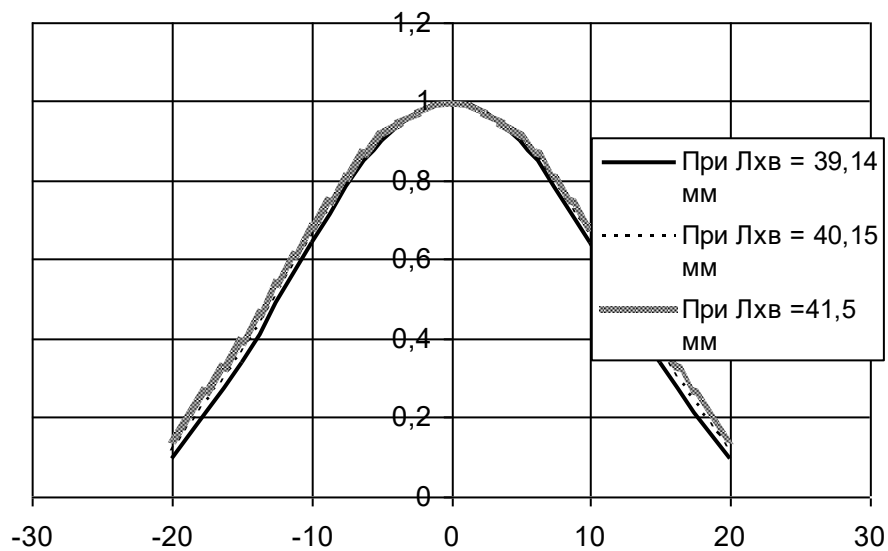


Рисунок 15 - Теоретично отримана діаграма направленості лінійної еквідистантної фазованої антенної решітки в площині θ^H при різних довжині хвилі

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ
ЛІНІЙНА ЕКВІДИСТАНТНА ФАЗОВАНА АНТЕННА РЕШІТКА

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Лінійна еквідистантна фазована антенна решітка»

Тип роботи: БДР
(БДР, МКР)

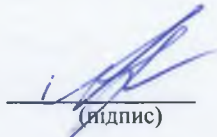
Підрозділ ІРТС, ІЕС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichек

Оригінальність 86,2% Схожість 13,8%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку 
(підпис)

Олександр ЗВЯГІН
(прізвище, ініціали)

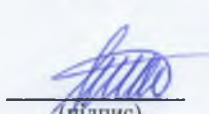
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichек щодо роботи.

Автор роботи


(підпис)

Сергій ДЕХТЯРУК
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Андрій СЕМЕНОВ
(прізвище, ініціали)