

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))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена»

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-21м  
спеціальності 172 – Телекомунікації  
та радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Орлов Н.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник: д.т.н., професор каф. ІРТС

Осадчук В. С.

(прізвище та ініціали)

«19» 12 2022 р.

Опонент: к.т.н., доц., доц. каф. ІКСТ

Семенова О.О.

(прізвище та ініціали)

«20» 12 2022 р.

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

(прізвище та ініціали)

«21» 12 2022 р.

Вінниця ВНТУ - 2022 рік

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем

Рівень вищої освіти II-й (магістерський)

Галузь знань – 17 Електроніка та телекомунікації

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма – Радіотехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ІРТС

д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2022 року

**З А В Д А Н Н Я**

**НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Орлову Назарію Максимовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена  
керівник роботи д.т.н., проф., професор кафедри ІРТС Осадчук В.С.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» 09.2022 р. №203.

2. Строк подання студентом роботи 19.12.2022р.

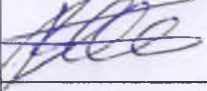
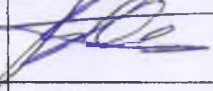

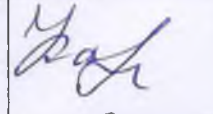
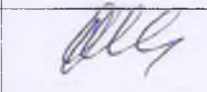

3. Вихідні дані до роботи: максимальна довжина хвилі в робочому діапазоні – 1 м; мінімальна довжина хвилі в робочому діапазоні – 0,1 м; КСХ у фідері – не більше 1,2; хвильовий опір антени – 75 Ом; коефіцієнт спрямованої дії антени в напрямку осі – не менше 8,0 дБ; б) орієнтоване значення кута  $\alpha$  - 15°.

4. Зміст текстової частини: Вступ. Методи аналізу логоперіодичної плоскої вібраторної антени. Електричні та конструкторські розрахунки надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени. Комп'ютерне моделювання частотних характеристик надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Приклади логоперіодичної плоскої вібраторної антени. Принцип роботи і конструкція класичної логоперіодичної плоскої вібраторної антени. Еквівалентні схеми пристрою. Розрахункові дані для комп'ютерного проектування антени. Введення вхідних даних в програму MMANA-GAL. Горизонтальна проекція антени. Дослідження розподілу струмів по поверхні антени. Конструкція антени. Діаграма спрямованості антени у вільному просторі на різних частотах. Діаграма спрямованості антени у вертикальній площині на різних частотах. Порівняння діаграм спрямованості в межах робочого діапазону частот. Дослідження залежності КСХ і КП антени від частоти. Дослідження впливу поверхні землі на просторову діаграму спрямованості від висоти підвісу антени на частоті 300 МГц. Дослідження впливу поверхні землі на просторову діаграму спрямованості від частоти при висоті підвісу антени 15 м.



## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	д.т.н., професор Осадчук В. С.		
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ к.е.н., Кавецький В.В.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 17.09.2022 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

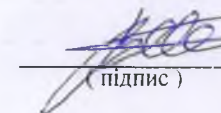
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2022-07.09.2022	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2022-13.09.2022	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	14.09.2022-27.09.2022	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2022-10.10.2022	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	11.10.2022-04.11.2022	
6.	Розробка графічної частини МКР.	05.11.2022-13.11.2022	
7.	Економічна частина.	14.11.2022-20.11.2022	
8.	Охорона праці (ОП).	21.11.2022-25.11.2022	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.11.2022-01.12.2022	
10.	Нормоконтроль.	02.12.2022-09.12.2022	
11.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	10.12.2022-20.12.2022	
12.	Захист МКР ЕК.	21.12.2022-23.12.2022	

Студент

  
(підпис)

Орлов Н. М.

Керівник роботи

  
(підпис)

Осадчук В. С.

## АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Орлов Н.М. Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2022. 144 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 31 назв; рис.: 58; табл. 21.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено розробку логоперіодичної плоскої вібраторної антени у дециметровому діапазоні. Наведено теоретичні відомості про даний клас широкосмугових антен та проаналізовано методи їх розрахунку. Виконано розрахунки параметрів та геометричних розмірів антени. Розроблено складальне креслення для антени виготовленої друкованим способом. Створено модель антени і проведено дослідження частотних характеристик за допомогою програми MMANA-GAL v.1.2.0.20. Отримано результати теоретичних досліджень і комп'ютерного моделювання діаграми спрямованості логоперіодичної антени у вільному просторі. Окремо досліджено вплив поверхні землі на діаграму спрямованості. Результати моделювання підтверджують правильність конструкторських розрахунків. Розроблений пристрій є функціонально-закінченим.

Графічна частина складається з 8 плакатів із результатами модельних та експериментальних досліджень. Також у магістерській кваліфікаційній роботі проведено розрахунки економічної частини та розділу охорони праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Ключові слова: логоперіодична антена, математична модель, випромінювання, діаграма спрямованості, частотна характеристика, коефіцієнт стоячої хвилі по напрузі.

## ABSTRACT

Orlov N.M. Ultra-broadband logoperiodic planar vibratory antenna. Digital frequency meters of radio technical signals on programmable logic integrated circuits and microcontrollers. Master's qualification work in specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - radio engineering. Vinnytsia: VNTU, 2022. 144 p.

In Ukrainian language. Refs.: 31 titles; Figs.: 58. Tables: 21.

In the master's qualification work, the development of a log-periodic planar vibrating antenna in the decimeter range was carried out. Theoretical information about this class of broadband antennas is presented and methods of their calculation are analyzed. The parameters and geometric dimensions of the antenna have been calculated. An assembly drawing for an antenna manufactured by a printed method has been developed. An antenna model was created and frequency characteristics were studied using the MMANA-GAL v.1.2.0.20 program. The results of theoretical studies and computer modeling of the directional diagram of the logoperiodic antenna in free space were obtained. The influence of the earth's surface on the directional pattern was studied separately. The simulation results confirm the correctness of the design calculations. The developed device is functionally complete.

The graphic part consists of 8 posters with the results of model and experimental studies. Also in the master's qualification work, calculations were made of the economic part and the section of labor protection and safety in emergency situations.

Keywords: logperiodic antenna, mathematical model, radiation, directional diagram, frequency characteristic, standing wave coefficient in voltage.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>1 МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ ПЛОСКОЇ ВІБРАТОРНОЇ АНТЕНИ</b> .....	10
1.1 Принцип роботи і конструкція класичної логоперіодичної плоскої вібраторної антени .....	10
1.2 Розрахунок параметрів розподільного фідера .....	16
1.3 Інтегральне рівняння Галлена для одного вібратора .....	24
1.4 Система інтегральних рівнянь Галлена для струмів у вібраторах.....	31
1.5 Система лінійних алгебраїчних рівнянь для струмів у вібраторах.....	35
1.6 Розрахунок діаграми спрямованості, вхідного опору, коефіцієнта стоячої хвилі і коефіцієнта спрямованої дії .....	37
<b>2 ЕЛЕКТРИЧНІ ТА КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ НАДШИРОКОСМУГОВОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ ПЛОСКОЇ ВІБРАТОРНОЇ АНТЕНИ</b> .....	40
2.1 Розрахунки діапазонних параметрів логоперіодичної плоскої вібраторної антени .....	40
2.2 Вибір оптимальних параметрів антени.....	41
2.3 Розрахунок геометричних розмірів антени .....	47
<b>3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДШИРОКОСМУГОВОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ ПЛОСКОЇ ВІБРАТОРНОЇ АНТЕНИ</b> .....	53
3.1 Вибір програмного забезпечення .....	53
3.2 Введення вхідних даних в програму .....	53
3.3 Дослідження залежності діаграми спрямованості антени від частоти....	58
3.4 Порівняння діаграм спрямованості антени на різних частотах .....	82
3.5 Дослідження залежності КСХ антени від частоти .....	83
3.6 Дослідження залежності коефіцієнта підсилення антени від частоти.....	84
<b>4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	85

4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки .....	85
4.2 Оцінювання рівня новизни розробки .....	89
4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	94
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором .....	107
4.5 Висновки до розділу .....	111
<b>5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ</b> .....	113
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	114
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії.....	116
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	122
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	124
Додаток А (обов'язковий). Ілюстративна частина .....	128
Додаток Б (обов'язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи .....	144

## ВСТУП

### *Актуальність теми.*

Логоперіодичні плоскі вібраторні антени (ЛПВА) забезпечують хороші електродинамічні характеристики практично в будь-якій смузі частот робочого діапазону, маючи при цьому кращі, ніж в інших типів вібраторних антен, масогабаритні характеристики. Останнє значно покращується застосуванням частково друкованих та друкованих ЛПВА, а також ЛПВА з кусково-лінійними вібраторами [1, 2].

В наш час відбувається бурхливий розвиток засобів зв'язку і телекомунікацій в метровому, дециметровому і в низькочастотній області сантиметрового діапазонів довжин хвиль [3, 4].

Засоби зв'язку в названих діапазонах зручні тим, що володіють великою ємністю, пропускнуою здатністю і доброю якістю зв'язку. Зв'язок забезпечується, здебільшого, в межах прямої видимості, хоча часто зберігається на відстанях, більших прямої видимості, за рахунок перевідбиття від щогл, високих споруд і рефракційних явищ. За рахунок обмеженого радіуса дії одностипні засоби зв'язку можуть працювати без взаємних перешкод як за рахунок їх рознесення за межі прямої видимості, так і за рахунок використання багатоканального зв'язку. В сучасних радіотелефонах здебільшого є декілька десятків каналів в межах виділеної ділянки діапазону і практично завжди є можливість вибрати вільний в даний момент канал. Крім того, в цих діапазонах довжин хвиль працює багато систем охоронної сигналізації, систем передачі телеметричної інформації, радіо модеми та ін. [5, 6].

### *Аналіз останніх досліджень.*

Основна проблема будь-якої системи радіозв'язку – збільшення радіусу дії, який залежить від енергетичного потенціалу системи зв'язку, що визначається потужністю передавача, чутливістю приймача та коефіцієнтом підсилення антени. Енергетичний потенціал радіо передавального пристрою можна підняти за рахунок збільшення потужності передавача. Проте потужність



передавача зазвичай обмежена для кожного конкретного класу засобів зв'язку.

Збільшити чутливість приймача, як правило, не вдається, так як в сучасних приймачах вже прийняті всі міри для підвищення чутливості. Тому реально підвищити чутливість приймача можна лише за рахунок застосування спрямованих антен, так як вони адсорбують падаючу енергію електромагнітного поля і з деякої площі в приймач потрапляє сигнал набагато більшої потужності [7, 8].

Серед антен невеликої спрямованості (з коефіцієнтом спрямованої дії КСД=10-11 дБ) найбільш зручними є логоперіодичні плоскі вібраторні антени (ЛПВА). ЛПВА була запропонована і розроблена в 1958р. Ізбеллом на основі більш ранньої роботи Дюмеля і Ізбелла по логарифмічних структурах. Ця антена була вперше детально вивчена Керрелом і результати дослідів опубліковані в 1961р. і з тих пір була багато раз цитувалась.

Основною їх перевагою є те, що вони дозволяють забезпечити добрі електричні характеристики практично в будь-якій заданій смузі частот, а їх габарити і вагові характеристики значно менші, ніж в антен інших відомих типів. Зменшення габаритів особливо помітне для антени з порівняно невеликим робочим діапазоном частот. До переваг ЛПВА можна віднести і відсутність елементів настройки, хоча це питання може виявитись спірним [9, 10].

ЛПВА відома достатньо давно, але до цього часу існує відношення до неї як до деякої екзотики. Проте конструктивні недоліки суттєво зменшуються, якщо антени виконуються повністю або частково друкованими. При цьому електродинамічні характеристики цих антен змінюються незначно [11].

*Метою роботи* є розробка та дослідження надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени.

*Задачами досліджень* магістерської кваліфікаційної роботи є:

- провести аналіз сучасного стану розробки надширокосмугових логоперіодичних плоских вібраторних антен;

- провести літературний огляд теоретичних основ надширокосмугових логоперіодичних плоских вібраторних антен;
- розробити варіанти надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени;
- здійснити дослідження спрямованих властивостей та частотних характеристик надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени;
- дослідити вплив виду та форми надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени.

*Об'єктом дослідження* є процеси прямого та зворотного перетворення енергії електромагнітних радіохвиль в електричний сигнал у надширокосмуговій логоперіодичній плоскій вібраторній антені.

*Предметом дослідження* є просторі та частотні параметри і характеристики надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени.

*Наукова новизна одержаних результатів* – отримав подальший розвиток метод побудови надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени.

*Практична новизна одержаних результатів* – полягає в отриманих нових конструкцій і результатів експериментальних і модельних досліджень надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени.

*Апробація результатів роботи.* Основні ідеї роботи доповідалися та обговорювалися на Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції «Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки», 17–18 листопада 2022 року, м. Вінниця у Вінницькому національному технічному університеті [11].

*Публікації результатів наукових досліджень.* За темою досліджень автором опубліковано 1 статтю у збірнику тез доповідей Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції «Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки», 17–18 листопада 2022 року, м. Вінниця, Вінницькій національний технічний університет [11].

# 1 МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ ПЛОСКОЇ ВІБРАТОРНОЇ АНТЕНИ

1.1 Принцип роботи і конструкція класичної логоперіодичної плоскої вібраторної антени

Схема розташування вібраторів у класичній логоперіодичній плоскій вібраторній антені (ЛПВА) зображена на рис. 1.1. Антена складається з паралельних вібраторів, розташованих в одній площині.

Відповідно до методики Керрела нумерація вібраторів та відстаней між ними починається з найдовшої [7]. Довжини вібраторів та відстані між ними змінюються в геометричній прогресії із знаменником  $\tau < 1,0$ . Параметр  $\sigma$  являє собою відношення відстані між сусідніми вібраторами  $d_n$  до  $2 \times 2h_n$  – подвійної повної довжини довшого з них вібратора. Параметр  $\tau$  (період структури) розраховується за виразом (1.1).

$$\tau = \frac{h_{n+1}}{h_n} = \frac{d_{n+1}}{d_n}. \quad (1.1)$$

Величина  $\sigma$  пов'язана із періодом структури співвідношенням (1.2).

$$\sigma = \frac{1}{4}(1 - \tau) \operatorname{ctg} \alpha, \quad (1.2)$$

де  $\alpha$  з – кут між віссю антени і лінією, що проходить через кінці вібраторів.

На рис. 1.1.  $N$  – кількість елементів структури антени (вібраторів),  $l_n$  – відстань від вершини антени до  $n$ -го вібратора,  $2h_n$  – довжина  $n$ -го симетричного вібратора,  $d_{n-1}$  – відстань між  $n-1$ -м та  $n$ -м вібратором,  $\alpha$  – кут між віссю антени та лінією, що проходить через кінці вібраторів.

При необмеженій кількості вібраторів в системі вона володіє наступною періодичною властивістю: зміна частоти в  $\tau$  раз переводить систему саму в себе.

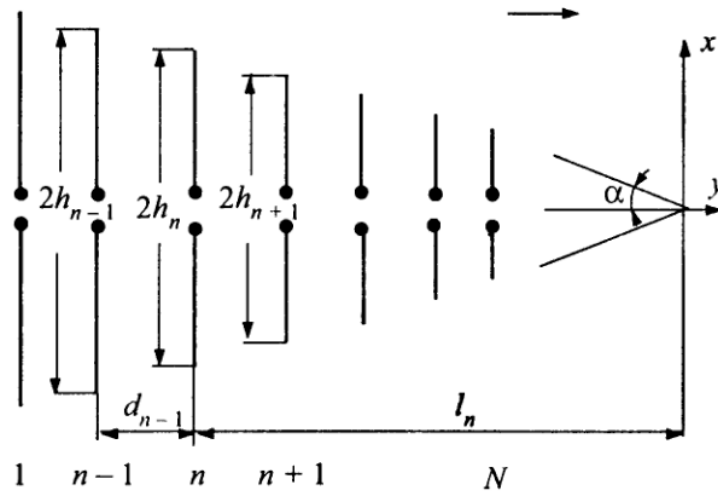


Рисунок 1.1 – Схема розташування вібраторів в класичній ЛПВА

Якщо антена спроектована правильно, то зміна частоти в межах періоду призводить до невеликих змін електродинамічних характеристик.

Зазвичай довжина максимального вібратора  $2h_1$  приймається рівною  $\lambda_{\max} / 2$ , тобто довжина одного плеча найдовшого вібратора визначається за виразом (1.3).

$$h_1 = \frac{\lambda_{\max}}{4}, \quad (1.3)$$

де  $\lambda_{\max}$  – максимальна довжина хвилі робочого діапазону частот ЛПВА. Відстань від цього вібратора до геометричної вершини антени (до вершини кута  $\alpha$ ) розраховується за виразом (1.4).

$$l_1 = h_1 \operatorname{ctg} \alpha \quad (1.4)$$

Всі наступні розміри отримуються із співвідношень (1.5), (1.6) та (1,7).

$$h_n = h_{n-1}\tau \quad (1.5)$$

$$d_n = d_{n-1}\tau \quad (1.6)$$

$$l_n = l_{n-1}\tau \quad (1.7)$$

Елементи структури (вібратори) збуджуються протифазно-симетричним розподільним фідером, починаючи з найкоротшого вібратора. Живлення можна підводити або безпосередньо симетричним фідером до вершини антени, або коаксіальним кабелем, прокладеним всередині одного з провідників симетричного розподільного фідера. Центральна жила кабеля при цьому повинна бути приєднана до другого провідника симетричної лінії. В цьому випадку двопровідна лінія одночасно грає роль симетруючого трансформатора. Розподільний фідер звичайно закорочений за першим, найдовшим вібратором на відстані  $\lambda_{\max}/8$  від вібратора. Короткозамикач збільшує міцність антени, відстань  $\lambda_{\max}/8$  вибрана, швидше за все, з міркування, що вхідний опір такого закороченого відрізка виходить індуктивним і дорівнює хвильовому опору розподільного фідера. Крім того короткозамикач забезпечує грозозахист антени, так як всі вібратори за остійним струмом виявляються підключеними до екрану (до землі). Схеми збудження ЛПВА наведені на рис. 1.2.

За термінологією Керрела вібратори, струм в яких дорівнює або перевищує рівень  $-10$  дБ по відношенню до максимального струму, формують активну область (активну зону). При зменшенні частоти сигналу, що випромінюється, активна область зміщується в бік більш довгих вібраторів, при збільшенні частоти – в бік коротших. В самій активній області струми у вібраторах, починаючи з найкоротшого, спочатку плавно зростають, а потім так само плавно спадають. Вібратори активної області знаходяться в нерівних умовах по відношенню до сигналу в розподільному фідері. Найбільший сигнал підводиться до найкоротшого вібратора і, не дивлячись на помітну різницю його резонансної частоти і частоти сигналу, струм в цьому вібраторі збуджується. Резонансна частота наступного вібратора ближча до частоти



сигналу, але до цього вібратора підводиться ослаблений сигнал, так як частина енергії вже випромінюлась.

В межах робочого діапазону частот максимум випромінювання спрямований вздовж осі антени в бік коротких вібраторів.

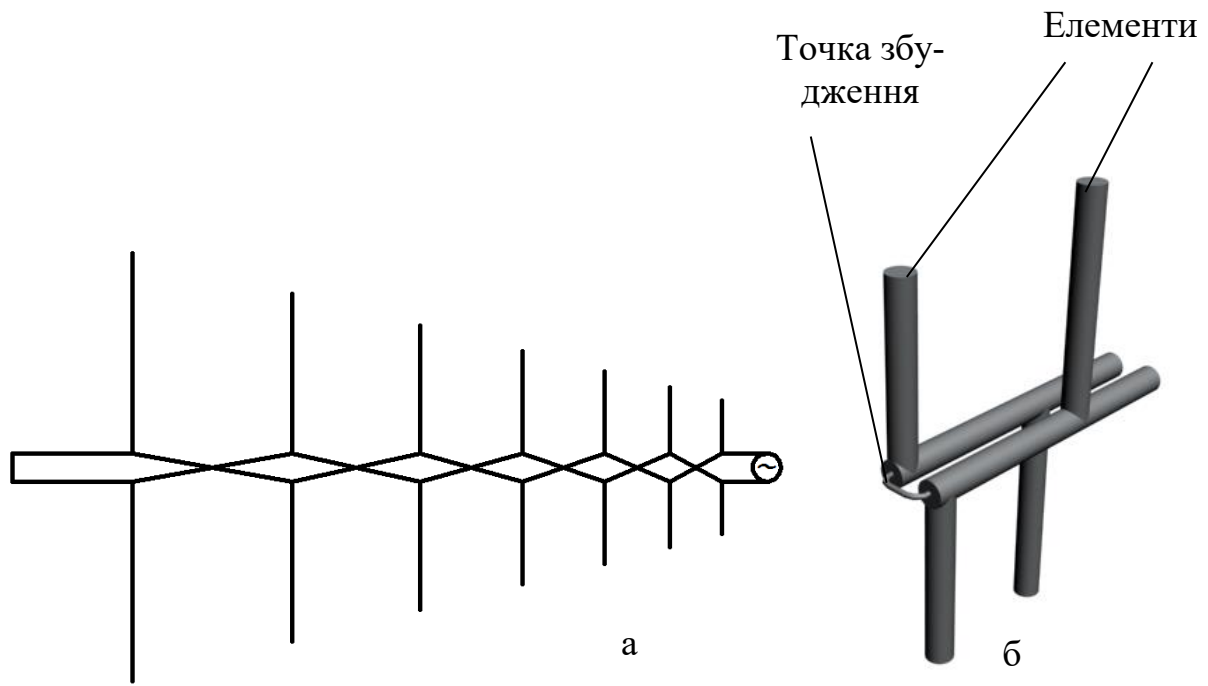


Рисунок 1.2 – Схеми збудження ЛПВА:

а – симетричним фідером, б – коаксіальним кабелем

Максимум випромінювання в багатовібраторній антені отримується в тому напрямку, де поля від всіх вібраторів приходять в одній фазі (тобто зсув фаз між полями окремих вібраторів дорівнює нулю або  $n \times 360^\circ$ , де  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ). Зсув фаз між полями двох сусідніх вібраторів в активній області ЛПВА в осьовому напрямку складається з кількох складових. Це зсуви фаз між напругами, що підводяться до вібраторів, і струмами в вібраторах – вхідний опір коротшого вібратора має більш ємнісний характер, ніж в наступного, довшого вібратора. Тому струм (а, відповідно, і поле, що ним випромінюється) в коротшому вібраторі буде дещо випереджати за фазою струм в довшому вібраторі на деяку величину  $\Delta\varphi$ . Поки хвиля пройде відстань по розподільному фідері від короткого вібратора до наступного, з'явиться дода-

тковий зсув фаз  $\Delta\varphi_d^\varphi$ . Протифазне збудження сусідніх вібраторів вносить власний фазовий зсув  $\Delta\varphi_{np\phi} = 180^\circ$ . Хвиля, що випромінюється довшим вібратором, за час проходження відстані від нього до найкоротшого також отримає додатковий фазовий зсув  $\Delta\varphi_d$ . Сума всіх фазових зсувів у ЛПВА в осьовому напрямку близька до  $360^\circ$  (1.8), що і забезпечує максимум випромінювання вздовж осі антени в бік коротких вібраторів.

$$\varphi = \Delta\varphi_l + \Delta\varphi_d^\varphi + \Delta\varphi_{np\phi} + \Delta\varphi_d \approx 360^\circ . \quad (1.8)$$

Насправді в ЛПВА відбуваються складніші процеси і енергія передається від вібратора до вібратора не тільки по розподільному фідеру, а й по просторі через поле випромінювання. Проте якісно картина роботи зберігається.

Між іншим, в самому принципі роботи ЛПВА, вже є основи для деякого зменшення габаритів. По-перше, ЛПВА, як і будь-яка антена біжучої хвилі осьового випромінювання, несе в собі деяку над спрямованість, яка в ідеальному випадку збільшує КСД приблизно на 3 дБ. По-друге, за рахунок того, що основна частина енергії, що підводиться, випромінюється більш короткими вібраторами, в більшості випадків можна вкоротити найдовший вібратор антени. А так як всі розміри антени визначаються розміром найдовшого вібратора, то його вкорочення призводить до помітного зменшення розмірів всієї антени.

Будемо вважати, що розподільний фідер не бере участі у випромінюванні антени. Це припущення дозволяє при описі розподільного фідера користуватися методами теорії кіл, а для системи вібраторів застосовувати добре розвинені в наш час методи електродинамічного аналізу паралельних провідників зі струмами.

За Керрелом ЛПВА являє собою паралельне з'єднання двох багатополуношників (рис. 1.3), один з яких описує систему з  $N$  вібраторів (рис. 1.3.а), пов'язаних між собою через поле випромінювання, інший – розподільний фі-

дер з розташованими на відповідних відстанях змінно-фазними відводами (рис. 1.3.б), що являють собою клеми до яких підключаються випромінювачі.

Позначивши матриці провідностей цих багатополюсників відповідно через  $[Y^a]$  та  $[Y^b]$  і маючи на увазі, що при паралельному включенні матриці провідностей складаються, можна отримати матричне рівняння відносно вектора напруг на клеммах вібраторів  $[Y^a]$ .

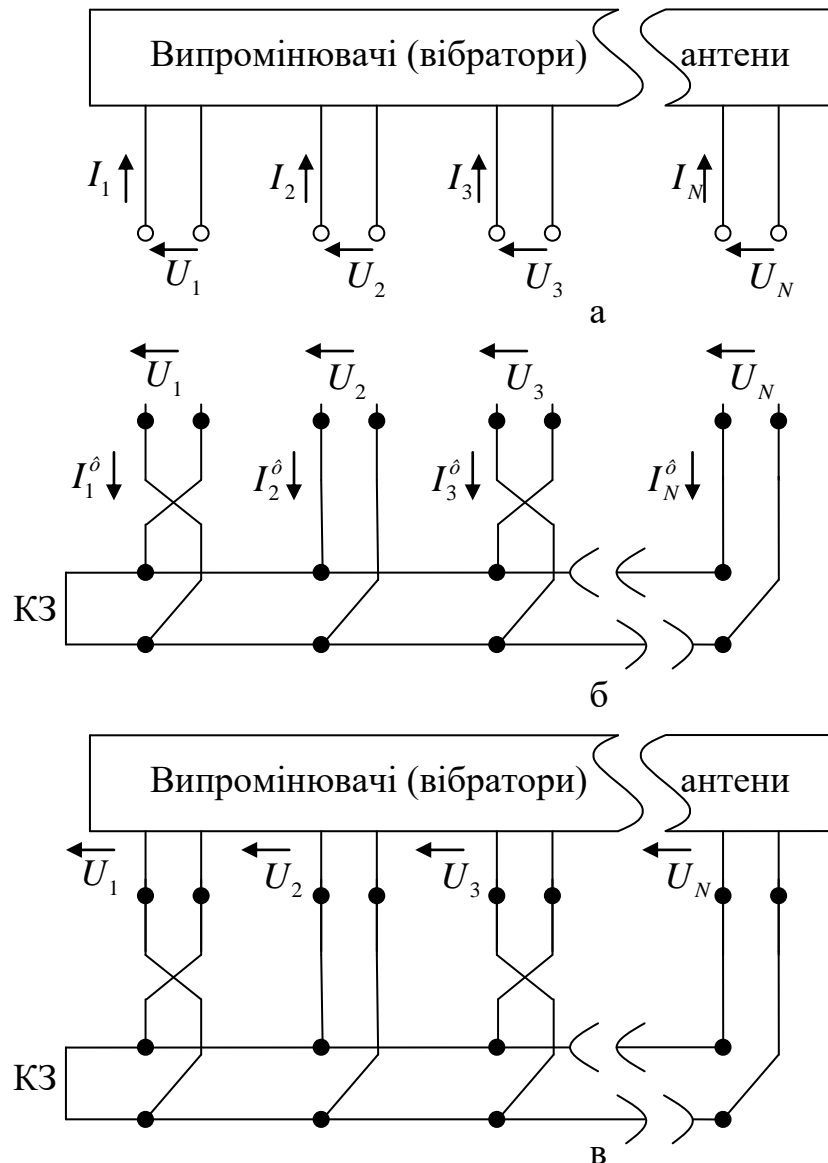


Рисунок 1.3 – Еквівалентні схеми:

а – багатополюсника фідера, б – багатополюсника вібраторів, в - ЛПВА

Такий підхід до вирішення задачі застосовував Керрел [12]. Для нас найбільший інтерес являє собою опис розподільного фідера за допомогою матриці  $[Y^b]$ .

Найпоширенішою є так звана змінно-фазна ЛПВА. В ній з'єднувальні чотириполіусники являють собою відрізки двопровідної лінії з додатковою інверсією фази, що умовно зображено на рис. 1.2.а у вигляді перехрещених провідників.

## 1.2 Розрахунок параметрів розподільного фідера

Як слідує з теорії кіл, елементи матриці  $[Y_{n\ m}^{\phi}]$  визначаються шляхом короткого замикання всіх клем розподільного фідера, крім  $m$ -ї клемі, до якої підключається джерело напруги. В результаті цього в даній матриці відрізняються від нуля лише елементи  $Y_{n\ n}^{\phi}$  і  $Y_{n\ n+1}^{\phi}$ , тобто діагональні і сусідні з діагональними. Таким чином, матриця  $[Y^{\phi}]$  легко виражається через  $Y$ -параметри чотириполіусників, що формують розподільний фідер. Для визначення елемента  $y_{1,1}^{\phi}$  скористаємось представленою на рис. 1.4 схемою.

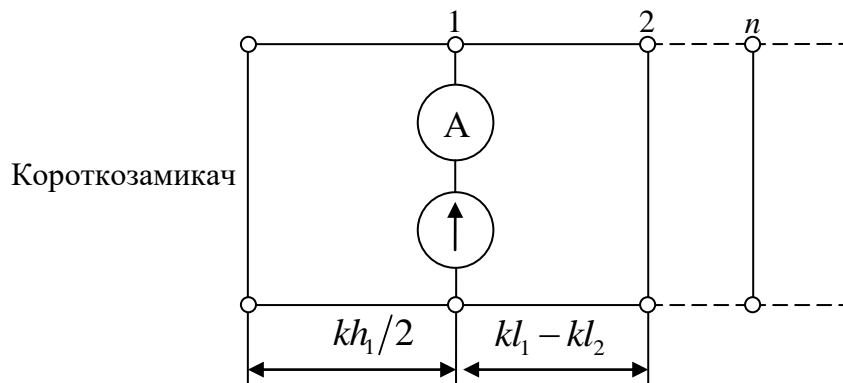


Рисунок 1.4 – Схема для визначення елемента  $y_{1,1}^{\phi}$

З урахуванням цього елемент  $y_{1,1}^{\phi}$  можна записати у вигляді (1.9).

$$y_{1,1}^{\phi} = -\frac{j}{W} \left[ \operatorname{ctg}(kl_1 - kl_2) + \operatorname{ctg} \frac{kh_1}{2} \right], \quad (1.9)$$

де  $kl_1 - kl_2$  – електрична довжина відрізка фідера між першим та другим вібраторами, а відрізок  $kh_1/2$  – електрична відстань між першим вібратором і короткозамикачем.

Наявність короткозамикача в ЛПВА призводить до появи паразитних резонансів. Останні з'являються тоді, коли відстань між одним з вібраторів активної області і короткозамикачем кратна  $\lambda/2$ . В цьому випадку хвиля не повністю випромінюється активною областю і збуджуються електрично довгі вібратори. На частотній характеристиці з'являються піки коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ), розподіл струмів і форма діаграми спрямованості (ДС) також змінюються.

Найпростіший спосіб боротьби з паразитними резонансами – за рахунок зміни відстані до короткозамикача змістити пік КСХ на неробочу частоту, хоча це далеко не завжди можливо.

Більш радикальне рішення – замість короткозамикача встановити поглинаюче навантаження (в нашому випадку – це резистор з опором  $R$ , що дорівнює хвильовому опору розподільного фідера). Проте при цьому ускладнюється кріплення антени і виникає питання про її грозозахист, тому що половина антени не заземлена. З цих причин можна запропонувати, залишивши короткозамикач, підключити поглинаючий резистор паралельно до розподільного фідера на середині ділянки фідера між найдовшим вібратором та короткозамикачем. В цьому випадку кріплення антени та її грозозахист не змінюються, але з'являється можливість боротися з паразитними резонансами. Схема для визначення елемента  $y_{1,1}^{\phi}$  показана на рис. 1.5.



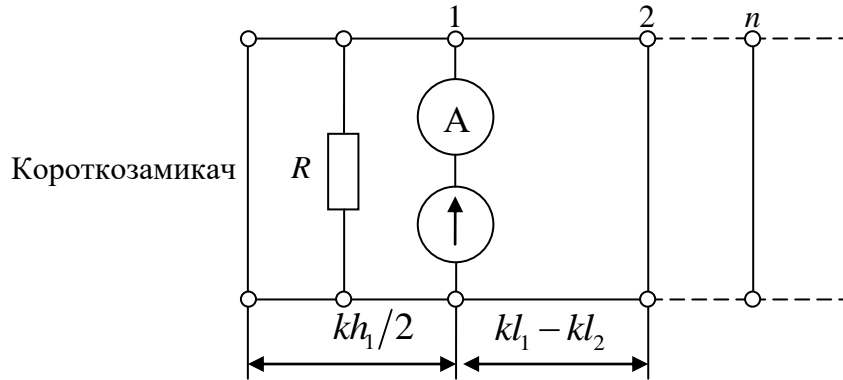


Рисунок 1.5 – Схема для визначення елемента  $y_{1,1}^{\phi}$  з резистором

З урахуванням вищесказаного для  $y_{1,1}^{\phi}$  отримаємо вираз (1.10).

$$y_{1,1}^{\phi} = -\frac{j}{W} \left[ \begin{array}{c} ctg(kl_1 - kl_2) + \frac{1 + \frac{j \operatorname{tg}\left(\frac{kh_1}{4}\right)}{y_d}}{\operatorname{tg}\left(\frac{kh_1}{4}\right) - \frac{j}{y_d W}} \end{array} \right], \quad (1.10)$$

де  $y_d$  – сумарна провідність поглинаючого резистора і відрізка фідера від відрізка фідера до короткозамикача, що визначається за виразом (1.11).

$$y_d = \frac{1}{R} - \frac{j \operatorname{ctg}\left(\frac{kh_1}{4}\right)}{W} \quad (1.11)$$

Якщо  $R \rightarrow \infty$ , то вираз (1.10) переходить у вираз (1.9).

Для останнього вібратора з номером  $N$  вираз для  $y_{N,N}^{\phi}$  і схема дещо зміняться (рис 1.6).

$$y_{N,N}^{\phi} = -\frac{j}{W} \operatorname{ctg}(kl_{N-1} - kl_N), \quad (1.12)$$

де  $kl_{N-1} - kl_N$  – електрична довжина відрізка між останнім і передостаннім вібраторами.

Вираз (1.13) і схему (рис. 1.7) для діагональних елементів  $y_{n,n}^\phi$  при  $1 < n < N$  отримуємо аналогічно (1.9).

$$y_{n,n}^\phi = -\frac{j}{W} \left[ \operatorname{ctg}(kl_{n-1} - kl_n) + \operatorname{ctg}(kl_n - kl_{n+1}) \right]; \quad n = 1, 2, \dots, N-1, \quad (1.13)$$

де  $kl_{n-1} - kl_n$  – електрична довжина відрізка фідера між поточним і попереднім вібраторами, а  $kl_n - kl_{n+1}$  – електрична довжина відрізка фідера між поточним і наступним вібраторами.

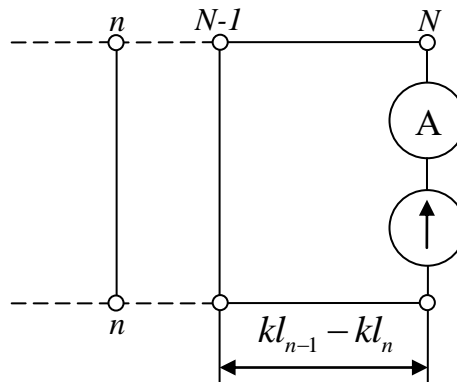


Рисунок 1.6 – Схема для визначення елемента  $y_{N,N}^\phi$

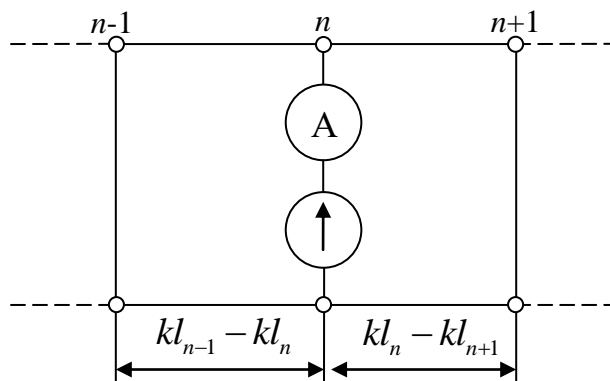


Рисунок 1.7 – Схема для визначення елемента  $y_{n,n}^\phi$

Сусідні з діагональними елементи матриці  $y_{n,n+1}^\phi$  і  $y_{n+1,n}^\phi$  (рис. 1.8) виглядають наступним чином

$$y_{n,n+1}^\phi = y_{n+1,n}^\phi = -\frac{j}{W} \frac{1}{\sin(kl_n - kl_{n+1})}; n = 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.14)$$

При проектуванні будь-якої антени необхідно отримати потрібний вхідний опір і хороше узгодження в робочій смузі частот. Хороше узгодження означає, що реальний вхідний опір розрахований правильно. Мірою узгодження зазвичай служить КСХ, який визначається через коефіцієнт відбиття хвилі від антени і розраховується за формулою (1.15).

$$КСХ = \frac{1+|p|}{1-|p|}, \quad (1.15)$$

де  $p$  – коефіцієнт відбиття хвилі від антени.

ЛПВА відноситься до класу широкосмугових антен, але складається з набору вібраторів різної довжини. Тому деяка залежність (дисперсія) вхідного опору від частоти неминуча. Для отримання найкращого узгодження в робочій смузі частот, необхідно знати або визначати межі зміни  $R_{ex}$  у всій робочій смузі частот.

Як показав Керрел [12], поки на антені існує добре сформована активна область, вимірюване на різних частотах значення вхідного опору антени  $Z_{ex}$  розташовуються на круговій діаграмі повних опорів навколо середнього значення  $R_{ex}$ . Для визначення  $R_{ex}$  потрібно за можливістю провести коло по вимірних точках. Перетин цього кола з віссю активних опорів визначає мінімальне і максимальне значення активного опору в робочому діапазоні частот. При цьому усереднений в робочому діапазоні частот вхідний опір антени визначається як середнє геометричне максимального і мінімального значень активного опору (1.45), а КСХ розраховується за виразом (1.17).

$$R_{ex} = \sqrt{R_{max} R_{min}}, \quad (1.16)$$

$$КСХ = \sqrt{\frac{R_{max}}{R_{min}}} \quad (1.17)$$

Звідси слідує, що величина  $R_{ex}$  дійсно повинна дорівнювати вхідному опору лінії передачі, що складається з розподільного фідера, навантаженого малими елементами (короткими вібраторами, розташованими в активній області), і що активна область являє собою навантаження, яке добре узгоджене з цією лінією.

Якщо розглядати малий елемент як ємнісне навантаження, то ємність пропорційна довжині елемента, а відстань до  $n$ -го елемента, тобто  $l_n$ , пропорційна до його довжини. Тоді наближено можна вважати, що величина ємності на одиницю довжини розподільного фідера постійна.

Таким чином, до звичайної погонної ємності навантаженого фідера додається зосереджена ємність, що обумовлена елементами малої довжини.

Розглянемо наближену формулу для визначення вхідного опору вібратора (1.18) [7].

$$Z_n = -jZ_a \operatorname{ctg} kh_n, \quad (1.18)$$

де  $Z_a$  – середнє значення хвильового опору вібратора (в класичній ЛПВА припускається, що  $\frac{h_n}{a_n}$  – величина стала), що обчислюється за виразом

1.19.

$$Z_a = 120 \left( \ln \frac{h_n}{a_n} - 2,25 \right) \quad (1.19)$$

Для вібраторів малої довжини  $k$  дорівнює коефіцієнту фази у вільному просторі. Замінивши котангенс його наближеним значенням  $\frac{1}{kh_n}$  для  $n$ -го вібратора при  $kh_n \leq 0,4$  отримаємо ємність  $n$ -го вібратора (1.20).

$$C_n = \frac{h_n}{cZ_a}, \quad (1.20)$$

де враховано, що  $Z_n = -\frac{1}{\omega C_n}$ ,  $k = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\mu_0$  – електрична і магнітна сталі,  $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$  – швидкість світла у вакуумі,  $\omega$  – кутова частота.

Введемо середню відстань до  $n$ -го вібратора 1.21.

$$d_{\text{сер}} = \sqrt{d_n d_{n-1}} = \frac{d_n}{\sqrt{\tau}}, \quad (1.21)$$

Отримаємо значення для середньої погонної ємності (1.22)

$$\Delta C = \frac{C_n}{d_{\text{сер}}} = \frac{h_n \sqrt{\tau}}{cd_n Z_a} \quad (1.22)$$

Враховуючи, що  $\sigma = \frac{d_n}{4h_n}$ , співвідношення 1.22 перетвориться наступним чином (1.23).

$$\Delta C = \sqrt{\tau 4cZ_a \sigma} \quad (1.23)$$

Так як хвильовий опір двопровідної лінії обчислюється за виразом 1.24 і для лінії з повітряним заповненням швидкість світла виражається через параметри лінії (1.25), то для вхідного опору лінії навантаженої елементами малої довжини, отримаємо вираз 1.26.



$$W = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \quad (1.24)$$

де  $L_0$ ,  $C_0$  – погонні індуктивність та ємність довгої лінії відповідно.

$$c = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (1.25)$$

$$R_{\text{ex}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0 - \Delta C}} = \frac{W}{\sqrt{m}} \quad (1.26)$$

$$m = 1 + \frac{\frac{W}{\sqrt{\tau}}}{4\sigma Z_a} \quad (1.27)$$

З 1.26 знайдемо вираз для хвильового опору фідера (1.28).

$$W = R_{\text{ex}} \left[ \frac{R_{\text{ex}} \sqrt{\tau}}{8\sigma Z_a} + \sqrt{\left( \frac{R_{\text{ex}} \sqrt{\tau}}{8\sigma Z_a} \right)^2 + 1} \right] \quad (1.28)$$

Хвильовий опір двопровідної лінії визначається наступним виразом (1.29) [13].

$$W = 120 \ln \left[ \frac{D}{\hat{d}} + \sqrt{\left( \frac{D}{\hat{d}} \right)^2 - 1} \right], \quad (1.29)$$

де  $D$  і  $\hat{d}$  – відстані між центрами провідників і діаметри провідників відповідно.

З 1.29 отримаємо вираз для відстаней між центрами провідників за заданим хвильовим опором і діаметрами провідників (1.30).

$$D = \frac{\hat{d}}{2} \left( e^{W/120} + e^{-W/120} \right) \quad (1.30)$$

### 1.3 Інтегральне рівняння Галлена для одного вібратора

Аналіз ЛПВА потрібно далі проводити на основі системи інтегральних рівнянь (ІР) Галлена. Спочатку розглянемо ІР Галлена для тонкого симетричного електричного вібратора.

Задача про випромінювання електромагнітних хвиль вібраторними антенами зазвичай вирішується за два етапи: на першому визначається розподіл струмів по вібраторах антени, а на другому розраховуються електричні характеристики за знайденим розподілом струму. Розподіл струму по антені і вектори електромагнітного поля, збудженого цим струмом повинні задовольняти рівняння Максвела (1.31, 1.32).

$$\text{rot } \vec{H} = i\omega\tilde{\epsilon}\vec{E} + \vec{j}^c; \quad (1.31)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H}, \quad (1.32)$$

де  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  – комплексні амплітуди векторів напруженостей електричного та магнітного полів,  $\vec{j}^c$  – комплексна амплітуда щільності об'ємного струму у вібраторі,  $\omega$  – кутова частота,  $\tilde{\epsilon}$ ,  $\mu$  – комплексна діелектрична і магнітна проникності (абсолютні),  $i$  – уявна одиниця.

Визначаючи комплексну амплітуду електричного векторного потенціалу  $\vec{A}$  виразом 1.33 знаходимо з 1.32 комплексну амплітуду вектора напруженості електричного поля (1.34).

$$\mu\vec{H} = \text{rot } \vec{A} \quad (1.33)$$

$$\vec{E} = -i\omega\vec{A} - \frac{i}{\omega\tilde{\epsilon}\mu} \text{grad div } \vec{A} \quad (1.34)$$

Електричний векторний потенціал задовольняє рівняння Гельмгольца [47, 50]

$$\Delta \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\mu \vec{j}^c, \quad (1.35)$$

де  $\vec{j}^c(p)$  – розглядається як щільність стороннього струму

Розглянемо симетричний електричний вібратор довжиною  $2h$ .

Вісь  $x$  декартової системи координат спрямована вздовж осі вібратора, а початок її розташуємо посередині зазору. Довжину вібратора позначимо через  $b$ . Тоді розв'язком рівняння Гельмгольца буде 1.36.

$$A(p) = \mu \int_{V_g} \vec{j}(q) G(q, p) dV', \quad (1.36)$$

де  $G(q, p) = \frac{1e^{-ikr}}{4\pi r}$  – функція Гріна необмеженого простору,  $p = p(x, y, z)$  – точка спостереження електромагнітного поля,  $q = q(x', y', z')$  – точка інтегрування розташована в об'ємі  $V_g$  джерела (вібратора),  $k = \omega\sqrt{\epsilon\mu}$  – коефіцієнт поширення електромагнітного поля у вільному просторі, що дорівнює коефіцієнту фази,  $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$  – відстань між точками  $p$  і  $q$ . Будемо вважати, що плечі вібратора мають ідеальну провідність, вібратор є тонким, тобто  $a \ll h, \lambda$ , струмами на кінцях вібраторів нехтуємо. При цьому вектор щільності поверхневого електричного струму має тільки одну складову, спрямовану вздовж осі вібратора, тоді вираз 1.36 матиме вигляд 1.37.

$$A_x(p) = \frac{\mu}{4\pi} \int_s J_x(q_s) \frac{e^{-ikr}}{r} ds', \quad A_y = A_z = 0, \quad (1.37)$$

де  $s$  – поверхня плечей вібратора, по якій протікає поверхневий струм,  $q_s$  – точка інтегрування на  $s$ .

Математичною моделлю трубки електричного струму, що тече тільки вздовж осі вібратора, є нитка з щільністю лінійного струму  $J(x)$ , суміщена з

віссю вібратора, причому струм дорівнює нулю на кінцях плечей вібратора. Так як вібратор симетричний, то виконується співвідношення 1.38.

$$I(x) = I(-x) \quad (1.39)$$

У випадку вібратора циліндричної форми виконується співвідношення 1.40. Тому  $A(p)$  буде визначатись за виразом 1.41.

$$I(x) = 2\pi a J_x(x) \quad (1.40)$$

$$A(p) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{-h}^h I(x') \frac{e^{-ikr}}{r_{pa}} dx', \quad (1.41)$$

де  $r_{pa} = \sqrt{a^2 + (x - x')^2}$ , тобто вважається, що точка інтегрування знаходиться на циліндричній поверхні пліч вібратора. Для скорочення запису  $r_{pa} = r$ .

Для складання інтегрального рівняння струму врахуємо, що  $I(x)$  є вторинним струмом, що збуджується під дією стороннього електромагнітного поля з векторами напруженостей  $\vec{E}_{cm}$ ,  $\vec{H}_{cm}$  (при  $-b/2 \leq x \leq b/2$ ), що наводиться джерелом ідеальної електрорушійної сили з напругою  $-U_0$ , і електромагнітним полем з векторами напруженостей  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  в оточуючому вібратор просторі. Це електромагнітне поле породжується самим вторинним струмом  $I(x)$ . Так як  $b \ll \lambda$ , то в зазорі буде виконуватись співвідношення 1.42.

$$\int_{-b/2}^{b/2} \vec{E}_{cm}(x') \vec{i}_x dx' = \int_{-b/2}^{b/2} \vec{E}_{cm}(x') dx' = U_0 \quad (1.42)$$

При ідеальній провідності пліч вібратора дотична до поверхні  $S$ , яка складає  $E_x$  вектора  $\vec{E}$  повинна перетворюватись в нуль на  $S$ . В зазорі ця складова дорівнює  $E_{cm}(x)$ , отже граничною умовою при  $y, z \in S$  буде 1.43

$$E_x(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } b/2 < x \leq h, -h \leq x < -b/2, \\ E_{cm}(x) & \text{при } -b/2 \leq x \leq b/2. \end{cases} \quad (1.43)$$

Враховуючи, що  $\vec{A} = 1_x A_x$ , за допомогою 1.34 визначимо  $E_x$  (1.44)

$$E_x = \frac{1}{i\omega\tilde{\epsilon}\mu} \left( \frac{d^2 A_x}{dx^2} + k^2 A_x \right) \quad (1.44)$$

Підставивши цей вираз в граничну умову, матимемо при  $y, z \in S$  (1.45)

$$\frac{d^2 A_x}{dx^2} + k^2 A_x = \begin{cases} 0 & \text{при } b/2 < x \leq h, -h \leq x < -b/2, \\ i\omega\tilde{\epsilon}\mu E_{cm}(x) & \text{при } -b/2 \leq x \leq b/2. \end{cases} \quad (1.45)$$

Розв'язок цього неоднорідного звичайного диференційного рівняння другого порядку може бути отриманий методом функцій Гріна або методом варіації сталих.

Застосуємо метод функцій Гріна. Для цього на інтервалі  $x \in [-h, h]$ , на кінцях якого не поставлені крайові умови, визначимо функцію Гріна  $g(\zeta, \zeta')$  рівняння (1.46).

$$\frac{d^2 g}{d\zeta^2} + g(\zeta, \zeta') = \delta(\zeta, \zeta'), \quad (1.46)$$

де  $\zeta = kx$ ,  $\zeta' = kx'$ .

Записуючи два розв'язки на інтервалах  $x \leq x'$  і  $x \geq x'$ , враховуючи рівність розв'язків і розрив перших похідних цих розв'язків при  $x = x'$ , знаходимо  $g(x, x')$ .

$$g(x, x') = \begin{cases} g'(x, x') \\ g''(x, x') \end{cases} = C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx} + i \cdot 0,5 \begin{cases} e^{ik(x-x')}, & x \leq x'; \\ e^{-ik(x-x')}, & x \geq x', \end{cases} \quad (1.47)$$

де коефіцієнти  $C_1$ ,  $C_2$  визначаються крайовими умовами при  $x = \pm h$ .

Розв'язок рівняння 1.45 отримуємо за допомогою останнього виразу (1.47).

$$A_x(x) = \frac{i\omega\tilde{\epsilon}\mu}{k} \int_{-b/2}^{b/2} E_{cm}(x) \begin{cases} g'(x, x') \\ g''(x, x') \end{cases} \cdot dx, \quad \begin{matrix} \text{при } x \leq -b/2, \\ \text{при } x \geq b/2, \end{matrix} \quad (1.48)$$

Підставляючи  $g'$  і  $g''$  в 1.48, інтегруючи результат, враховуючи 2-й закон Кірхгофа і позначивши  $E_{cm}b = -U_0$  – напруга джерела сторонньої ЕРС, отримуємо 1.49.

$$A_x(x) = \frac{i\mu}{Z_0} U_0 (C_1 e^{ikr} + C_2 e^{-ikr} + i \cdot 0,5 e^{\pm ikr}), \quad (1.49)$$

де  $Z_0 = \sqrt{\mu/\epsilon}$  – характеристичний опір середовища, верхній знак береться при  $-h \leq x < -b/2$ , а нижній – при  $b/2 \leq x \leq h$ .

З виразу 1.49 видно, що стороннє джерело збуджує на плечах вібратора, дві біжучі хвилі струму, одна з яких з хвильовим множником  $\cos(\omega t + kx)$  поширюється в напрямку кінця вібратора, де  $x = -h$ , а інша з хвильовим множником  $\cos(\omega t - kx)$  поширюється в напрямку іншого кінця вібратора, де  $x = h$ . Коефіцієнти  $C_1$  і  $C_2$  при хвильових множниках враховують зворотні (відбиті від кінців вібратора) хвилі струму. Накладання назустріч біжучих хвиль повинне визначати розподіл струму по вібратору.

Підставимо в ліву частину рівняння 1.49 значення  $A_x$  з 1.41 і помножимо результат на  $4\pi/\mu$ . Маємо рівняння (1.50)

$$\int_{-h}^h I(x') \frac{e^{-ikr}}{r} dx' = \frac{i4\pi U_0}{Z_0} (C_1 e^{ikx} + C_2 e^{-ikx}) - \frac{2\pi U_0}{Z_0} e^{\pm ikx} \quad (1.50)$$

Позначимо  $C_{3,4} = i4\pi U_0 C_{1,2} Z_0^{-1}$  – сталі коефіцієнти. Тоді можна спростити останній вираз. Маємо 1.51.

$$\int_{-h}^h I(x') \frac{e^{-ikr}}{r} dx' = C_3 e^{ikx} + C_4 e^{-ikx} - \frac{2\pi U_0}{Z_0} e^{\pm ikx} \quad (1.51)$$

Першу частину 1.51 за допомогою формули Ейлера виразимо через тригонометричні функції. Інтегрування в лівій частині рівності виконаємо окремо по обох плечах вібратора. Отримаємо (1.52).

$$\int_{-h}^{-b/2} I(x') \frac{e^{-ikr}}{r} dx + \int_{b/2}^h I(x') \frac{e^{-ikr}}{r} dx = C_5 \cos kx + C_6 \sin kx \mp i \frac{2\pi U_0}{Z_0} \sin kx, \quad (1.52)$$

де  $C_5 = C_3 + C_4 - \frac{2\pi U_0}{Z_0}$ ,  $C_6 = i(C_3 - C_4)$  – сталі коефіцієнти.

Визначимо струм  $I(x)$  в точці при  $x = x_1$ , де  $x_1 \in [b/2, h]$ .

$$\begin{aligned} & \int_{-h}^{-b/2} I(x') \frac{e^{-ik\sqrt{a^2+(x_1-x')^2}}}{\sqrt{a^2+(x_1-x')^2}} dx' + \int_{b/2}^h I(x') \frac{e^{-ik\sqrt{a^2+(x_1-x')^2}}}{\sqrt{a^2+(x_1-x')^2}} dx' = \\ & = C_5 \cos kx_1 + C_6 \sin kx_1 - i \frac{2\pi U_0}{Z_0} \sin kx_1, \end{aligned} \quad (1.53)$$

Визначимо струм в симетричній точці при  $x = -|x_1|$ , де  $x \in [-h, -b/2]$ .

$$\begin{aligned}
& \int_{-h}^{-b/2} I(x') \frac{e^{-ik\sqrt{a^2+(|x_1|+x')^2}}}{\sqrt{a^2+(|x_1|+x')^2}} dx' + \int_{b/2}^h I(x') \frac{e^{-ik\sqrt{a^2+(|x_1|+x')^2}}}{\sqrt{a^2+(|x_1|+x')^2}} dx' = \\
& = C_5 \cos k|x_1| + C_6 \sin k|x_1| - i \frac{2\pi U_0}{Z_0} \sin k|x_1|,
\end{aligned} \tag{1.54}$$

Виконаємо тут зміну змінних інтегрування за правилом  $x' = -\zeta$  і врахуємо, що значення визначеного інтеграла не залежить від позначення змінної інтегрування  $\zeta$ . Тому замінимо  $\zeta$  на  $x'$  в результаті. Отримаємо 1.55.

$$\begin{aligned}
& \int_{-h}^{-b/2} I(-x') \frac{e^{-ik\sqrt{a^2+(|x_1|-x')^2}}}{\sqrt{a^2+(|x_1|-x')^2}} dx' + \int_{b/2}^h I(-x') \frac{e^{-ik\sqrt{a^2+(|x_1|-x')^2}}}{\sqrt{a^2+(|x_1|-x')^2}} dx' = \\
& = C_5 \cos k|x_1| + C_6 \sin k|x_1| - i \frac{2\pi U_0}{Z_0} \sin k|x_1|,
\end{aligned} \tag{1.55}$$

Порівняння 1.53 з 1.55 показує, що умову рівності струмів в симетричних точках вібратора, тобто умову  $I(x) = I(-x)$ , 1.52 задовольняє тільки при  $C_6 = 0$ . Таким чином, з урахуванням того, що  $Z_0 = 120\pi \text{ Ом}$  з 1.52 маємо 1.56

$$\int_{-h}^h I(x') \frac{e^{-ikr}}{r} dx' = C_5 \cos kx - i \frac{U_0}{60} \sin k|x|. \tag{1.56}$$

Коефіцієнт  $C_5$  тут можна виключити. Вважаючи, що  $x = 0$ , отримаємо 1.57.

$$C_5 = \int_{-h}^h I(x') \frac{e^{ikr^0}}{r^0} dx', \tag{1.57}$$



де  $r^0 = \sqrt{a^2 + x'^2}$ . Підставляючи  $C_5$  в попередній вираз, об'єднуючи інтеграли і множачи чисельник і знаменник правої частини на  $i$ , отримуємо інтегральне рівняння Галлена (1.58)

$$\int_{-h}^h I(x') K(x, x') dx' = \frac{U_0}{i60} \sin k|x| \quad (1.58)$$

де  $K(x, x')$  – ядро інтегрального рівняння.

$$K(x, x') = \frac{e^{-ikr}}{r} - \cos kx \frac{e^{-ikr^0}}{r^0}. \quad (1.59)$$

#### 1.4 Система інтегральних рівнянь Галлена для струмів у вібраторах

До цього часу всі роздуми відносились до одного вібратора. Проте ЛПВА являє собою систему з  $N$  вібраторів і для аналізу цієї антени будемо користуватися методикою описаною в [17]. Врахуємо, що в ЛПВА присутні вібратори різної довжини і для зменшення залежності характеристик антени від частоти вельми бажано у кожного  $n$ -го вібратора забезпечити стале відношення довжини вібратора до його радіуса  $h_n/a_n$ . Для ЛПВА (див. рис. 1.1) отримуємо систему інтегральних рівнянь для невідомих струмів.

$$\sum_{m=1}^N \int_{-h_m}^{h_m} I_m(x') K_{mn}(x, x') dx' = \frac{U_n}{i60} \sin k|x|, \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad (1.60)$$

$$K_{mn}(x, x') = \frac{e^{-ikr_{mn}}}{r_{mn}} - \cos kx \frac{e^{-ikr_{mn}^0}}{r_{mn}^0}, \quad (1.61)$$

$$r_{mn} = \sqrt{(x - x')^2 + (l_m - l_n)^2 + a_n^2}; \quad (1.62)$$

$$r_{mn}^0 = \sqrt{(x')^2 + (l_m - l_n)^2 + a_n^2}. \quad (1.63)$$

При виведенні ІР Галлена для одного вібратора прийнято в 1.45, що електромагнітне поле поверхневого струму з густиною  $J(x)$ , що протікає по бічній поверхні вібратора з радіусом  $a$  паралельно до його осі, при відсутності азимутальної варіації струму еквівалентно ЕМ полю лінійного струму, що протікає по осі циліндра з щільністю  $J(x) = 2\pi a J(x)$ . Таким чином густина поверхневого струму, що протікає по бічній поверхні вібратора, замінена густиною лінійного струму, що тече по осі циліндра. Проте в цьому випадку вираз для функції Гріна  $-\exp(-ikr)/4\pi r$ , при  $a \rightarrow 0$   $r = \sqrt{a^2 + (x - x')^2} = |x - x'|$ , так як при цьому  $a = 0$ . При співпадінні точок інтегрування і спостереження  $x = x'$   $r = 0$ . Якщо строго дотримуватись цього наближення, то при інтегруванні 1.45 в точці  $x = x'$  підінтегральний вираз перетворюється в нескінченність і цю особливість слід враховувати при розрахунках. Крім того, в цьому випадку нехтують залежністю результатів розрахунків від радіусів вібраторів.

Але для системи вібраторів відстані  $r_{mn}$  і  $r_{mn}^0$  не можуть перетворитися в нуль при  $a = 0$ . Якщо  $m \neq n$  через рознесення вібраторів по осі  $y$ , то в даному випадку можна прийняти радіус вібратора  $a$  рівним нулю. З урахуванням цих міркувань відстані  $r_{mn}$  і  $r_{mn}^0$  виражаємо наступним чином (1,64), (1.65).

$$r_{mn} = \begin{cases} \sqrt{(x - x')^2 + a^2} & \text{при } m = n, \\ \sqrt{(x - x')^2 + (l_m - l_n)^2} & \text{при } m \neq n \end{cases} \quad (1.64)$$

$$r_{mn}^0 = \begin{cases} \sqrt{(x')^2 + a^2} & \text{при } m = n, \\ \sqrt{(x')^2 + (l_m - l_n)^2} & \text{при } m \neq n \end{cases} \quad (1.65)$$

В останні роки з'явився ряд праць [13], [14], де використовуються інші варіанти функції Гріна необмеженого простору, в яких електричний вібратор

замінюється ідеально провідною трубкою. Ці представлення функцій Гріна дозволяють врахувати кінцеву ширину зазору в точках живлення вібраторів, в той час як звичайно цей зазор представляється нульовим.

Ці розклади функцій Гріна використовуються для побудови сингулярних інтегральних рівнянь відносно похідної струму вібратора по поздовжній координаті.

Використання цих функцій Гріна в наведених розрахунках не є можливим, причому не стільки через математичні складності, скільки через різке (на декілька порядків) збільшення затрат машинного часу.

В більшості математичних виразів для аналізу ЛПВА використовуються електричні розміри, тобто лінійні розміри, помножені на коефіцієнт фази, що дорівнює у вільному просторі  $k = 2\pi/\lambda$ . В цьому випадку будь-який лінійний розмір виражається через довжину хвилі, а відрізок довжиною  $\lambda$  буде дорівнювати  $2\pi$ . Електричні розміри зручніші, ніж лінійні, так як дозволяють швидше знайти помилки в математичних викладках і дещо спрощують час обчислень. Тому, замінивши лінійні розміри в межах інтегрування у виразах 1.60 на електричні, отримаємо 1.66

$$\sum_{m=1}^N \int_{-kl_m}^{kl_m} I_m(\hat{x}') K_{mn}(kx, \hat{x}') \hat{x}' = \frac{U_n}{i60} \sin|kx|, \quad (1.66)$$

$$\text{де } K_{mn}(kx, \hat{x}') = \frac{e^{-i\hat{r}_{mn}}}{\hat{r}_{mn}} - \cos x \frac{e^{-i\hat{r}_{mn}^0}}{\hat{r}_{mn}^0};$$

$$\hat{r}_{mn} = \begin{cases} \sqrt{(kx - kx')^2 + k^2 a^2} & \text{при } m = n, \\ \sqrt{(kx - kx')^2 + (kl_m - kl_n)^2} & \text{при } m \neq n \end{cases} \quad (1.67)$$

$$r_{mn} = \begin{cases} \sqrt{(kx')^2 + k^2 a^2} & \text{при } m = n, \\ \sqrt{(kx')^2 + (kl_m - kl_n)^2} & \text{при } m \neq n \end{cases} \quad (1.68)$$

В правій частині 1.66 знаходяться відомі клемні напруги. Їх потрібно виразити через значення клемних струмів  $I_m(0)$ . Зауважимо, що напруги на вібраторах дорівнюють напругам на клеммах розподільного фідера. Ввівши для розподільного фідера матрицю  $[Z^{\hat{o}}]$ , отримаємо 1.69.

$$U_n = \sum_{m=1}^N Z_{mn}^{\phi} I_m^{\phi}. \quad (1.69)$$

При описі параметрів розподільного фідера була визначена матриця  $[Y^{\phi}]$ . Матрицю  $[Z^{\phi}]$  визначимо як перетворення матриці  $[Y^{\phi}]$ , тобто  $[Y^{\phi}] = [Z^{\phi}]^{-1}$ .

У виразі 1.69  $I_m^{\phi}$  – струми на клеммах розподільного фідера, які просто пов'язані з струмами  $I_m(0)$  на клеммах вібраторів (1.70), (1.71).

$$I_m^{\phi} + I_m(0) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } m = N; \\ 0, & \text{якщо } m \neq N, \end{cases} \quad (1.70)$$

$$I_m^{\phi} = \begin{cases} 1 - I_m(0), & \text{якщо } m = N; \\ -I_m(0), & \text{якщо } m \neq N, \end{cases} \quad (1.71)$$

З урахуванням 1.70, 1.71 перетворимо 1.66 до вигляду 1.72.

$$\sum_{m=1}^N \left[ \int_{-kh_m}^{kh_m} I_m(\hat{x}') K(kx, \hat{x}') dx' + I_m(0) \frac{Z_{mn}^{\phi}}{i60} \sin|kx| \right] = \frac{Z_{nN}^{\phi}}{i60} \sin|kx|. \quad (1.72)$$

Для знаходження струму  $I_m(x)$ , що протікає по  $m$ -му вібраторі, представимо його у відповідності з методом моментів у вигляді ряду за деякими базисними функціями  $\phi_m^{\mu}(x)$  (1.73)

$$I_m(x) = \sum_{\mu=1}^Q I_m^{\mu} \phi_m^{\mu}(x), \quad (1.73)$$

де  $I_m^\mu$  – невідомі коефіцієнти розкладу,  $Q$  – кількість гармонік струму.

Рівняння 1.73 справедливе в межах  $n$ -го вібратора, тобто при  $|x| \leq h_n$ . Вимагатимемо, щоб воно виконувалось в дискретних точках  $x_v = v \frac{h_n}{Q}$ ;  $v = 1, 2, \dots, Q$ . Тоді підставивши 1.73 в 1.72, отримаємо скінченну систему з  $N \times Q$  лінійних алгебраїчних рівнянь, розв'язок яких визначає шукані коефіцієнти  $I_m^\mu$  (1.74)

$$\sum_{m=1}^N \sum_{\mu=1}^Q A_{nm}^{\nu\mu} I_m^\mu = b_n^\nu; \quad \begin{array}{l} n = 1, 2, \dots, N; \\ \nu = 1, 2, \dots, Q. \end{array} \quad (1.74)$$

$$b_n^\nu = Z_n^\phi \frac{\sin |kx_\nu|}{i60}. \quad (1.75)$$

$$A_{nm}^{\nu\mu} = \int_{-kh_m}^{kh_m} \phi_m^\mu(\hat{x}') K_{nm}(kx_\nu, \hat{x}') d\hat{x}' + \phi_m^\mu(0) \frac{Z_{nm}^\phi}{i60} \sin |kx_\nu|. \quad (1.76)$$

Перша частина системи визначається за виразом 1.75, а елементи матриці визначаються виразом 1.76, в якому інтеграли в свою чергу визначаються чисельними методами.

### 1.5 Система лінійних алгебраїчних рівнянь для струмів у вібраторах

Точність чисельного розв'язку, що отримується, (а також трудомісткість розрахунків) в основному визначається вибором системи базисних функцій. Як було зазначено раніше, будемо розглядати два варіанти системи базисних функцій – синусоїдальний розподіл струму по вібраторі і тричленне представлення закону розподілу струму, відоме як гармоніки Кінга.

Синусоїдальний розподіл вважається у випадку тонких вібраторів справедливим при довжинах вібратора, що не перевищують  $0,6 - 0,7\lambda$ . В той же час в ЛПВА, що призначена для роботи в широкій смузі частот, можуть бути присутніми і значно довші вібратори. Проте для антен з  $KСД \geq 7\text{дБ}$  точність розрахунку основних параметрів (таких як діаграма спрямованості,

вхідний імпеданс і КСХ) з урахуванням тільки синусоїдального розподілу виявляється достатньою. Цю обставину можна пояснити тим, що в ЛПВА на будь якій робочій частоті активними є вібратори довжиною не більше  $0,5\lambda$ , розподіл струму в яких добре описується синусоїдальними наближеннями.

Можливі випадки, коли наближений метод може призвести до дуже великого завищення КСД в порівнянні з істинним значенням. Це має місце для тих антен, в яких з якихось причин збуджуються електрично довгі вібратори. Наприклад, для стиснених ЛПВА з великим кутом при вершині можливе просочування енергії по розподільному фідеру за активну зону, внаслідок чого виникає паразитне збудження довгих вібраторів. Аналогічне явище спостерігається у випадку ЛПВА, що складається з занадто тонких вібраторів.

Синусоїдальний закон розподілу описується наступним виразом (1.77)

$$I_m(x) = I_m(0) \frac{\sin(kh_m - |kx|)}{\sin kh_m}, \quad (1.77)$$

де  $I_m(0)$  – струм в середині  $m$ -го вібратора.

Система лінійних алгебраїчних рівнянь 1.74 в цьому випадку спрощується і матиме вигляд 1.78.

$$\sum_{m=1}^N A_{nm} I_m = b_n; n = 1, 2, \dots, N. \quad (1.78)$$

Спрощуються також вирази для елементів матриці і правої частини системи (1.79), (1.80).

$$A_{nm} = \frac{1}{\sin kh_m} \int_{-kh_m}^{kh_m} \sin(kh_m - |x'|) K_{nm}(kh_n, \hat{x}') d\hat{x}' + \frac{Z_{nm}^{\delta}}{i60} \sin|kh_n|. \quad (1.79)$$

$$b_n = \frac{Z_{nN}^{\phi}}{i60} \sin|kh_n|. \quad (1.80)$$

Для знаходження струмів у вібраторах при синусоїдальному наближенні необхідно задати розміри антени, знайти параметри розподільного фідера (отримати матрицю  $[Y^\phi]$  – параметрів і перетворити її в матрицю  $[Z^\phi]$  – параметрів) і за допомогою виразів 1.78-1.80 визначити ці струми.

Більш точне вираження отримується при використанні в розкладі 1.73 наступних трьох функцій запропонованих Кінгом 1.81.

$$\begin{aligned}\phi_m^1(x) &= \sin kh_m - \sin |kx|; \\ \phi_m^2(x) &= \cos kh_m - \cos kx; \\ \phi_m^3(x) &= \cos \frac{kh_m}{2} - \cos \frac{kx}{2}.\end{aligned}\tag{1.81}$$

1.6 Розрахунок діаграми спрямованості, вхідного опору, коефіцієнта стоячої хвилі і коефіцієнта спрямованої дії

Як відомо з курсу антен форма діаграми спрямованості повністю визначає найважливішу енергетичну характеристику антени – коефіцієнт спрямованої дії (КСД). Скористаємося наступним виразом для КСД (1.82).

$$КСД(\theta, \varphi) = \frac{|E(\theta, \varphi)|^2}{|E_{сеп}|^2},\tag{1.82}$$

де  $|E(\theta, \varphi)|$  – квадрат модуля повного вектора напруженості електричного поля в заданому напрямку,  $|E_{сеп}|^2$  – усереднене за повним тілесним кутом значення квадрата модуля повного вектора напруженості електричного поля.

Величину  $|E_{сеп}|^2$  можна пов'язати з повною потужністю  $P_\Sigma$ , що випромінюється антеною. В свою чергу повну потужність, при відсутності втрат можна виразити через струм на вході антени і активну складову вхідного опору.

В цьому випадку вираз для КСД прийме вигляд 1.83.

$$КСД(\theta, \varphi) = \frac{r^2 |E(\theta, \varphi)|^2}{30I^2 \operatorname{Re} Z_{\text{ex}}}. \quad (1.83)$$

Винесемо за знак модуля квадрат множника  $1/r$ , який завжди присутній у виразі для  $E(\theta, \varphi)$ , і врахуємо, що в нашому випадку струм на вході антени дорівнює  $1A$ . Отримаємо розрахунковий вираз для КСД по відношенню до спрямованого (ізотропного) випромінювача (1.84).

$$КСД(\theta, \varphi) = \frac{|f(\theta, \varphi)|}{30 \operatorname{Re} Z_{\text{ex}}}, \quad (1.84)$$

де  $f(\theta, \varphi)$  – ненормована діаграма спрямованості.

Вираз для ненормованої діаграми спрямованості ЛПВА не залежить від вибору системи базисних функцій і має вигляд діаграми спрямованості антенної решітки [5] (1.85).

$$f(\theta, \varphi) = 60 \sum_{n=1}^N f_n(\theta, \varphi) \exp(-ikl_n \sin \theta \sin \varphi), \quad (1.85)$$

де – діаграма спрямованості  $n$ -го вібратора антени, решта позначень зрозумілі з рис. 1.1.

Вираз діаграми спрямованості одного вібратора повністю визначається вибраним законом розподілу струму по вібраторі. Для синусоїдального наближення

$$f(\theta, \varphi) = I_n \frac{\cos(kh_n \sin \theta \cos \varphi - \cos kh_n)}{\sin kh_n \sqrt{1 - (\sin \theta \cos \varphi)^2}}. \quad (1.86)$$

Вхідний опір антени в даному випадку зручно виразити через  $Z$ -параметри розподільного фідера. Відзначимо, що так як струм на вході антени



ни прийнято рівним  $1A$ , то вхідний опір чисельно дорівнює напрузі на вході антени (1.88)

$$Z_{ex} = V_N = Z_{NN}^{\phi} - \sum_{m=1}^N Z_{Nm}^{\phi} \sum_{\mu=1}^Q I_m^{\mu} \phi_m^{\mu}(0). \quad (1.88)$$

Для синусоїдального наближення вираз (1.88) спрощується до (1.89).

$$Z_{ex} = Z_{NN}^{\phi} - \sum_{m=1}^N Z_{Nm}^{\phi} I_m. \quad (1.89)$$

## 2 ЕЛЕКТРИЧНІ ТА КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРАХУНКИ НАДШИРОКОСМУГОВОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ ПЛОСКОЇ ВІБРАТОРНОЇ АНТЕНИ

2.1 Розрахунки діапазонних параметрів логоперіодичної плоскої вібраторної антени

На певній частоті робочого діапазону антени  $f_n$ , при якій довжина півхвилі співпадає з довжиною одного з симетричних вібраторів (вираз 2.1.), на цьому вібраторі відбувається резонанс, тобто даний елемент структури стає резонансним для даної частоти. Вібратори що знаходяться поблизу і струми в яких не менші ніж 10 дБ по відношенню до максимального утворюють активну область. Резонанси на більш довгих вібраторах є незначними, оскільки значна частина енергії (в правильно спроектованій антені) випромінюється активною областю

$$2h_n = \frac{\lambda_n}{2} = \frac{c}{2f_n}, \quad (2.1)$$

де  $2h_n$  – довжина резонансного вібратора на деякій частоті робочого діапазону  $f_n$ ,  $\lambda_n = \frac{c}{f_n}$  – довжина хвилі, що відповідає частоті  $f_n$ ,  $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{м}{с}$  – швидкість світла у вакуумі.

Для діапазону дециметрових хвиль (ДДХ)  $\lambda_{\min} = 0,1 м$ ,  $\lambda_{\max} = 1 м$ . Відповідно частотні границі ДДХ визначаються за виразом (2.2).

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

$$f_{\min} = \frac{c}{\lambda_{\max}} = \frac{3 \cdot 10^8}{1} = 3 \cdot 10^8 \text{ (Гц)};$$

$$f_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\min}} = \frac{3 \cdot 10^8}{0,1} = 3 \cdot 10^9 \text{ (Гц)}.$$

Ширина смуги частот діапазону визначається за виразом (2.3).

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}. \quad (2.3)$$

$$\Delta f = 3000 - 300 = 2700 \text{ (МГц)}.$$

За виразом (2.4) визначимо коефіцієнт перекриття за частотою або довжиною хвилі

$$K_f = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{\frac{c}{\lambda_{\min}}}{\frac{c}{\lambda_{\max}}} = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} = K_\lambda. \quad (2.4)$$

$$K_f = K_\lambda = \frac{1}{0,1} = 10 \text{ (раз)}.$$

Для багатьох широкосмугових (частотно незалежних) антен, в тому числі і для класичної ЛПВА коефіцієнт перекриття за частотою становить десятки разів, тому одна антена може перекрити весь ДДХ. Користуючись виразом (1.1) розрахуємо довжини резонансних вібраторів на максимальній та мінімальній частотах діапазону.

$$2h_{\min} = \frac{0,1}{2} = 0,05 \text{ (м)};$$

$$2h_{\max} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ (м)}.$$

## 2.2 Вибір оптимальних параметрів антени

Для того, щоб розробити оптимальний конструктивний варіант виконання ЛПВА, необхідно забезпечити з одного боку як найменші масогабаритні показники, з іншого боку – потрібну ширину головної пелюстки діаграми спрямованості чи коефіцієнт спрямованої дії антени. Крім того, габарити антени залежать в першу чергу від робочого діапазону.

Параметрами структури ЛПВА є кут між віссю антени та лінією, що проходить через кінці вібраторів  $\alpha$ , період структури  $\tau < 1$ , та параметр  $\sigma$ . Саме від цих параметрів залежить як довжина антени так і характеристики спрямованості. Відстань від  $n$ -го вібратора до вершини антени визначається за виразом (2.5).

$$l_n = h_n \cdot \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2.5)$$

Отже відстань від найдовшого вібратора до вершини антени

$$l_1 = h_1 \cdot \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2.6)$$

Довжина антени буде визначатись за наступними виразами (2.7-2.10).

$$l_a = (h_1 - h_N) \operatorname{ctg} \alpha; \quad (2.7)$$

$$l_a = l_1 \frac{\Delta f}{f_{\max}} = \frac{\Delta f \cdot h_1 \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{f_{\max}}; \quad (2.8)$$

$$l_a = l_1 - \frac{l_1}{K_f} = \left(1 - \frac{1}{K_f}\right) l_1 = \left(1 - \frac{1}{K_f}\right) h_1 \operatorname{ctg} \alpha; \quad (2.9)$$

$$l_a = \sum_{n=1}^{N-1} d_n, \quad (2.10)$$

де  $N$  – кількість вібраторів.

Період структури  $\tau$  – це величина, що є відношенням  $n$ -го вібратора до попереднього (довшого). Період структури завжди менший одиниці, він визначається за виразом (2.11).

$$\tau = \frac{h_n}{h_{n-1}} = \frac{h_{n+1}}{h_n} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{h_3}{h_2} = \dots = \frac{h_N}{h_{N-1}}. \quad (2.11)$$

Це відношення також буде пов'язане з котом  $\alpha$ . Визначимо цю залежність.

$$h_n - h_{n+1} = d_n \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{d_n}{\operatorname{ctg} \alpha}. \quad (2.12)$$

У випадку, коли виконується рівність (2.13) вираз (2.12) перетвориться в (2.14).

$$d_n = h_{n+1}; \quad (2.13)$$

$$h_n - d_n = d_n \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{d_n}{\operatorname{ctg} \alpha}; \quad (2.14)$$

$$h_n = d_n \cdot \operatorname{tg} \alpha + d_n = d_n (1 + \operatorname{tg} \alpha) = h_{n+1} (1 + \operatorname{tg} \alpha); \quad (2.15)$$

З виразів (2.11) та (2.15) отримаємо залежність періоду структури  $\tau$  від кута між віссю антени та лінією, що проходить через кінці елементів структури (вібратори)  $\alpha$  (співвідношення (2.16)).

$$\tau = \frac{h_{n+1}}{h_n} = \frac{h_{n+1}}{h_{n+1} \cdot (1 + \operatorname{tg} \alpha)} = \frac{1}{1 + \operatorname{tg} \alpha}. \quad (2.16)$$

Визначимо залежність  $\alpha$  від  $\tau$  (2.18)

$$1 + \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\tau}; \quad (2.17)$$

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{\tau} - 1 \right). \quad (2.18)$$

Параметр  $\sigma$  являє собою відношення відстані між сусідніми вібраторами до резонансної довжини хвилі довшого вібратора (2.19).

$$\sigma = \frac{d_n}{\lambda_n}, \quad (2.19)$$

де  $\lambda_n$  – резонансна довжина хвилі  $n$ -го вібратора,  $d_n$  – відстань від  $n$ -го до  $n+1$ -го елемента структури.

Виразивши  $\lambda_n$  з (2.1) і підставивши в (2.19) отримаємо (2.20).

$$\sigma = \frac{d_n}{4h_n}. \quad (2.20)$$

Підставивши (2.15) в (2.20) отримаємо (2.21).

$$\sigma = \frac{d_n}{4d_n(1 + tg \alpha)} = \frac{1}{4(1 + tg \alpha)}. \quad (2.21)$$

Проаналізувавши попередні перетворення отримаємо вираз для  $\sigma$  через період структури (2.22).

$$\sigma = \frac{\tau}{4}. \quad (2.22)$$

Крім параметрів розрахованих вище є ще одна величина, яка визначає масогабаритні показники, – кількість вібраторів  $N$ , яка буде залежати від періоду структури антени та її робочого діапазону.

Виразимо довжину  $n$ -го вібратора через довжину 1-го. Виходячи з виразу (2.11) довжина кожного наступного вібратора буде дорівнювати довжині попереднього помноженій на період структури (2.23).

$$h_2 = h_1 \cdot \tau; h_3 = h_2 \cdot \tau; \dots h_n = h_{n-1} \cdot \tau; \dots h_N = h_{N-1} \cdot \tau. \quad (2.23)$$

Отже,

$$h_N = h_{N-1} \cdot \tau = h_{N-2} \cdot \tau^2 = h_1 \cdot \tau^{N-1}, \quad (2.24)$$

де  $N$  – кількість вібраторів.

Знайдемо  $N$  з виразу (2.24). Залежність кількості вібраторів від періоду структури і коефіцієнта перекриття за частотою матиме вигляд (2.28).

$$\tau^{N-1} = \frac{h_N}{h_1} = \frac{1}{K_f}; \quad (2.25)$$

$$\tau^{1-N} = K_f; \quad (2.26)$$

$$1 - N = \log_{\tau} K_f; \quad (2.27)$$

$$N = 1 - \log_{\tau} K_f. \quad (2.28)$$

Крім того число  $N$  завжди повинне бути цілим, тому при виборі оптимальних параметрів потрібно, щоб виконувалась рівність виразів (2.7) та (2.10).

$$\sum_{n=1}^{N-1} d_n = (h_1 - h_N) \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2.29)$$

Оберемо кут  $\alpha = 15^\circ$ . За виразом (2.16) обчислимо період структури.

$$\tau = \frac{1}{1 + \operatorname{tg} 15^\circ} = \frac{1}{1 + 0,268} \approx 0,789.$$

Скориставшись виразом (2.28) знайдемо приблизну кількість вібраторів в антені.

$$N = 1 - \log_{0,789} 10 = 1 + \log_{0,789} 0,1 \approx 9,8.$$

Прийmemo  $N=10$ . Розрахуємо нові значення параметрів антени, при яких буде виконуватись умова (2.29). Для розрахунку періоду структури виразимо його з (2.25).

$$\tau = \sqrt[N-1]{\frac{1}{K_f}} = \left( \frac{1}{K_f} \right)^{\frac{1}{N-1}}. \quad (2.30)$$

Підставивши відомі нам значення в (2.30), розрахуємо  $\tau$ .

$$\tau = 0,1^{0,1} \approx 0,774.$$

За формулою (2.18) знайдемо кут між віссю антени та лінією, що проходить через кінці вібраторів.

$$\alpha = \arctg\left(\frac{1}{0,774} - 1\right) = 16,28^\circ.$$

Скориставшись (2.22) розрахуємо параметр  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{0,774}{4} = 193,5 \cdot 10^{-3}.$$

Розраховані оптимальні параметри класичної логоперіодичної плоскої вібраторної антени, яка повинна перекривати весь дециметровий діапазон наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри антени

Мінімальна довжина хвилі (максимальна частота) робочого діапазону $\lambda_{\min}(f_{\max})$	0,1 м (3000 МГц)
Максимальна довжина хвилі (мінімальна частота) робочого діапазону $\lambda_{\max}(f_{\min})$	1 м (300 МГц)
Коефіцієнт перекриття за частотою (за довжиною хвилі) $K_{f(\lambda)}$	10
Ширина смуги робочих частот $\Delta f$	2700 МГц
Кількість елементів структури (вібраторів) $N$	10
Відношення довжини $n+1$ -го вібратора до довжини $n$ -го (період структури) $\tau$	0,774
Кут між лінією, що проходить через кінці вібраторів та віссю антени $\alpha$	16,28°



Відношення відстані між сусідніми вібраторами до резонансної довжини хвилі довшого з них $\sigma$	$193,5 \cdot 10^{-3}$
---	-----------------------

Продовження таблиці 2.1 – Параметри антени

Довжина плеча першого (найдовшого) симетричного вібратора, що є резонансним на мінімальній частоті робочого діапазону $h_1 = h_{\max}$	0,25 м
Довжина плеча останнього (найкоротшого) симетричного вібратора, що є резонансним на максимальній частоті робочого діапазону $h_{11} = h_{\min}$	0,025 м

### 2.3 Розрахунок геометричних розмірів антени

Використавши дані табл. 2.1 розрахуємо геометричні розміри вібраторів антени. Довжина кожного вібратора розраховується за виразом (2.23).

$$\begin{aligned}
 h_1 &= h_{\max} = 250 \text{ (мм)}; \\
 h_2 &= 250 \cdot 0,774 \approx 193,5 \text{ (мм)}; \\
 h_3 &= 250 \cdot 0,774^2 \approx 149,8 \text{ (мм)}; \\
 h_4 &= 250 \cdot 0,774^3 \approx 115,9 \text{ (мм)}; \\
 h_5 &= 250 \cdot 0,774^4 \approx 89,7 \text{ (мм)}; \\
 h_6 &= 250 \cdot 0,774^5 \approx 69,4 \text{ (мм)}; \\
 h_7 &= 250 \cdot 0,774^6 \approx 53,8 \text{ (мм)}; \\
 h_8 &= 250 \cdot 0,774^7 \approx 41,6 \text{ (мм)}; \\
 h_9 &= 250 \cdot 0,774^8 \approx 32,2 \text{ (мм)}; \\
 h_{10} &= 250 \cdot 0,774^9 \approx 24,9 \text{ (мм)}.
 \end{aligned}$$

Внаслідок округлень при розрахунках довжина плеча найкоротшого вібратора відрізняється від заданої в табл. 2.1. на 0,1 мм. Ця різниця є незначною, тому можна вважати, що розрахунки виконано з достатньою точністю.

Відстань між сусідніми вібраторами в нашому випадку буде співпадати з довжиною плеча коротшого з них (2.13). Проте для будь-якої ЛПВА повинне виконуватись співвідношення (1.20). Виразивши з нього відстань  $d_n$ , отримаємо формулу (2.31), що повинна справджуватись для всіх, в т. ч. і для даної ЛПВА.

$$d_n = \sigma \cdot 4h_n \quad (2.31)$$

Підставивши в (2.31) вирази (2.22) та (2.23) отримаємо (2.32).

$$d_n = \frac{\tau}{4} \cdot 4h_n = \tau h_n = h_{n+1} \quad (2.32)$$

Оскільки вираз (2.13) співпадає з виразом (2.32), то він є справедливим для даної антени і є лише окремим випадком з (2.31). Користуючись розрахованими довжинами пліч вібраторів запишемо відстані між вібраторами.

$$d_1 = h_2 = 193,5 \text{ (мм)};$$

$$d_2 = 149,8 \text{ (мм)};$$

$$d_3 = 115,9 \text{ (мм)};$$

$$d_4 = 89,7 \text{ (мм)};$$

$$d_5 = 69,4 \text{ (мм)};$$

$$d_6 = 53,8 \text{ (мм)};$$

$$d_7 = 41,6 \text{ (мм)};$$

$$d_8 = 32,2 \text{ (мм)};$$

$$d_9 = 24,9 \text{ (мм)}.$$

За формулою (2.6) розрахуємо відстань від найдовшого вібратора до вершини кута  $\alpha$ , розраховане значення якого візьмемо з табл. 2.1.

$$l_1 = 250 \cdot \operatorname{ctg} 16,28^\circ \approx 250 \cdot 3,424 \approx 856 \text{ (мм)}.$$

Довжину антени визначимо з виразами (2.7,...,2.10). Для цього скористаємось розрахованими значеннями з табл. 2.1 та знайденим значенням  $l_1$ . Якщо розрахунки проведено правильно, то результати наступних обчислень повинні збігатись з певною точністю.

$$l_a = (250 - 25) \operatorname{ctg} 16,28^\circ \approx 770,4 \text{ (мм)};$$

$$l_a = 856 \cdot \frac{2700 \cdot 10^6}{3000 \cdot 10^6} \approx 770,4 \text{ (мм)};$$

$$l_a = \left(1 - \frac{1}{10}\right) 856 \approx 770,4 \text{ (мм)};$$

$$l_a = 193,5 + 149,8 + 115,9 + 89,7 + 69,4 + 53,8 + 41,6 + 32,2 + 24,9 = 770,8 \text{ (мм)}.$$

Розрахунки співпадають з доволі великою точністю. При проектуванні приймемо  $l_a = 770,8 \text{ мм}$ . Насправді необхідна довжина симетричної лінії ЛПВА буде більшою, оскільки за найдовшим вібратором на відстані  $\frac{\lambda_{\max}}{8}$  повинен бути розташований короткозамикач. Враховуючи це, повна довжина антени буде розраховуватись за виразом (2.33).

$$l_{an} = l_a + \frac{\lambda_{\max}}{8} = l_a + \frac{h_{\max}}{2}; \quad (2.33)$$

$$l_{an} = 770,8 + \frac{250}{2} = 770,8 + 125 = 895,8 \text{ (мм)}.$$

Розрахованих вище величин достатньо для побудови ЛПВА, проте для подальших розрахунків будуть потрібні відстані від вершини кута  $\alpha$  до кожного з вібраторів. Відстань до першого (найдовшого) вібратора використову-

валась при обчисленнях довжини антени, тому була розрахована вище і становить  $l_1 = 856$  (мм). Решту відстаней можна розрахувати за формулами (2.34) та (2.35).

$$l_n = l_{n-1} - d_{n-1} = l_{n-2} - d_{n-2} - d_{n-1} = \dots = l_1 - \sum_{i=1}^{n-1} d_i; \quad (2.34)$$

$$l_n = l_1 - l_a + \sum_{i=N-1}^n d_i; \quad (2.35)$$

Для випадку, коли  $n = N$  вираз (2.35) матиме вигляд (2.36).

$$l_n = l_1 - l_a. \quad (2.36)$$

За виразом (2.34) розрахуємо відстані  $l_n$ .

$$l_2 = 856 - 193,5 = 662,5 \text{ (мм)};$$

$$l_3 = 662,5 - 149,8 = 512,7 \text{ (мм)};$$

$$l_4 = 512,7 - 115,9 = 396,8 \text{ (мм)};$$

$$l_5 = 396,8 - 89,7 = 307,1 \text{ (мм)};$$

$$l_6 = 307,1 - 69,4 = 237,7 \text{ (мм)};$$

$$l_7 = 237,7 - 53,8 = 183,9 \text{ (мм)};$$

$$l_8 = 183,9 - 41,6 = 142,3 \text{ (мм)};$$

$$l_9 = 142,3 - 32,2 = 110,1 \text{ (мм)};$$

$$l_{10} = 110,1 - 24,9 = 85,2 \text{ (мм)}.$$

Оскільки при розрахунку кожної відстані  $l_n$  ми використовували обчислену попередню  $l_{n-1}$ , то в разі помилки всі подальші розрахунки виявляться неправильними. Крім того, зі збільшенням  $n$ , може збільшуватись похибка, що пов'язана з округленням при розрахунках відстаней між вібраторами  $d_n$ .

З цих міркувань найбільша ймовірність помилки обчислень та найбільша абсолютна, а тим більше, відносна похибка в розрахунках припадає на відстань до останнього (найкоротшого) елемента структури  $l_N$ , тобто  $l_{10}$ . Тому перерахуємо цю відстань за формулою (2.36).

$$l'_{10} = 856 - 770,8 = 85,2 (\text{мм}) = l_{10}.$$

Оскільки результат співпав, тому помилок в розрахунках не було. Для перевірки точності обчислень перетворимо вираз (1.7) аналогічно (2.23) в (2.37), за отриманим виразом розрахуємо  $l_N$ .

$$l_N = l_1 \tau^{N-1}; \quad (2.37)$$

$$l''_{10} = 856 \cdot 0,774^9 = 85,3 \approx 85,2 (\text{мм}).$$

Таким чином ми бачимо, що розрахунки виконано з достатньою точністю.

Розрахуємо радіуси вібраторів, враховуючи що відношення довжини вібратора до його радіуса повинне бути сталим. Для цього оберемо хвильовий опір антени  $W = 75 \text{ Ом}$ , Відношення  $h_n/a_n$  вибирають в межах 50..150 [1], але можуть бути вибрані і інші значення. Оберемо  $h_n/a_n = 125$ . Відповідно до цього розрахуємо радіуси вібраторів  $a_n$ .

$$a_1 = \frac{h_1}{125} = \frac{250}{125} = 2 (\text{мм});$$

$$a_2 = \frac{193,5}{125} = 1,548 (\text{мм});$$

$$a_3 = \frac{149,8}{125} \approx 1,198 (\text{мм});$$

$$a_4 = \frac{115,9}{125} = 0,927 (\text{мм});$$

$$a_5 = \frac{89,7}{125} \approx 0,718(\text{мм});$$

$$a_6 = \frac{69,4}{125} = 0,555(\text{мм});$$

$$a_7 = \frac{53,8}{125} = 0,43(\text{мм});$$

$$a_8 = \frac{41,6}{125} \approx 0,333(\text{мм});$$

$$a_9 = \frac{32,2}{125} \approx 0,258(\text{мм});$$

$$a_{10} = \frac{24,9}{125} \approx 0,199(\text{мм}).$$

Оскільки радіуси елементів структури пропорційні їх довжинам, то виконується співвідношення (2.38).

$$a_n = a_{n-1}\tau = a_{n-2}\tau^2 = a_1\tau^{n-1}. \quad (2.38)$$

Перерахуємо радіус останнього вібратора скориставшись виразом (2.39).

$$a_{10} = 2 \cdot 0,774^9 \approx 0,199(\text{мм}).$$

Розрахунки виконано з достатньою точністю.

Виходячи з найбільшого радіуса вібратора оберемо радіус провідників розподільного фідера  $\hat{d}/2 = a_1$ . Користуючись (1.30) розрахуємо відстань між центрами провідників.

$$D = 2 \left( e^{\frac{75}{120}} + \frac{1}{e^{\frac{75}{120}}} \right) = 4,807(\text{мм}).$$

Розрахованих величин геометричних розмірів ЛПВА достатньо для побудови складального креслення. Креслення для ЛПВА виготовленої друкованим способом наведено в додатку В.

### **3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДШИРОКОСМУГОВОЇ ЛОГОПЕРІОДИЧНОЇ ПЛОСКОЇ ВІБРАТОРНОЇ АНТЕНИ**

#### **3.1 Вибір програмного забезпечення**

Під частотною будемо розуміти характеристику, що відображає залежність деякого електричного чи електродинамічного параметра антени від частоти сигналу на вході. Заздалегідь зазначимо, що для широкосмугових антен, до яких належить ЛПВА, більшість важливих параметрів, наприклад діаграма спрямованості, коефіцієнт спрямованої дії та коефіцієнт стоячої хвилі у фідері незначно залежать від частоти в межах робочого діапазону. З цієї ж причини дану групу антен також називають частотно незалежними.

Аналіз ЛПВА є дуже складним і часто потребує машинних розрахунків, тому досліджувати її частотні характеристики краще за допомогою моделювання. В наш час існує багато програм, що призначені для моделювання багатовібраторних антен та розрахунків їх параметрів.

Дуже поширеними серед таких програм є EMC Studio та MMANA-GAL. Перевагою першої є простота побудови антени, але порівняно з другою вона витрачає на обчислення набагато більше машинного часу. Тому для розрахунку КСХ та побудови ДС використаємо програму MMANA-GAL v.1.2.0.20.

#### **3.2 Введення вхідних даних в програму**

Для дослідження антени потрібно спочатку створити її модель. В даному випадку можуть бути розглянуті два варіанти моделей ЛПВА: 1) модель активної зони антени; 2) модель всієї антени. Перший варіант не може дати точних результатів, але він набагато простіший. Проблема полягає в тому, що від фідера збуджується лише резонансний (активний) вібратор, а до решти енергія передається лише через простір, хоч насправді в ЛПВА відбуваються більш складні процеси.

Щоб створити таку модель, введемо геометричні розміри антени в програму. Для цього потрібно розрахувати координати початків та кінців вібраторів, провідників симетричного фідера та короткозамикача. Для того, щоб плече вібратора вважалось приєднаним до провідника, в місці приєднання провідник повинен бути розірваний, тобто поділений на відрізки що сполучають елементи структури. Товщини провідників (вібраторів) вже відомі. Провідники симетричної лінії з приєднаними до них вібраторами утворюють дві з'єднані короткозамикачем конструкції, що лежать в двох паралельних площинах відстань між якими дорівнює відстані між провідниками розподільного фідера. Від кожного з провідників відходить по одному з пліч кожного елемента структури, причому по чергові. Розташуємо короткозамикач на осі OZ прямокутної системи координат так, щоб нижній його кінець співпадав з початком координат  $O(0,0,0)$ . Це дасть нам змогу розташувати половину антени в площині XY ( $z=0$ ), а іншу половину в площині  $z=D$ , де  $D$  – відстань між осями провідників розподільного фідера, що розрахована вище і становить  $0,004807$  м (в даному випадку буде рівною довжині короткозамикача). Розташуємо нижній провідник фідера на осі Y ( $z=0, y=0$ ) відповідно верхній ( $z=D, y=0$ ). Таке розташування значно спрощує розрахунки координат точок. Знаючи довжини всіх провідників і відстані між ними розрахуємо координати їх кінців, занесемо їх до табл. 3.1. Також занесемо до табл. 3.1 товщини всіх провідників, що також є вхідними даними.

Введемо дані з табл. 3.1 (крім провідників фідера) в поле редагування геометрії антени програми (рис. 3.1) . З'єднаємо початки вібраторів відрізками розподільного фідера користуючись графічним редагуванням провідників (рис. 3.2). Приєднаємо до кінців провідників джерела живлення з зсувом фаз  $180^\circ$  (рис. 3.3).



Таблиця 3.1 – Вхідні дані

Провідник	Перша точка			Друга точка			Радіус
	x, м	y, м	z, м	x, м	y, м	z, м	
Короткозамикач	0	0	0	0	0	0,004807	2
Провід фідера 1	0	0	0	0	0,8958	0	2
Провід фідера 2	0	0	0,004807	0	0,8958	0,004807	2
Плече 1 вібр. 1	0	0,125	0,004807	-0,25	0,125	0,004807	2
Плече 2 вібр. 1	0	0,125	0	0,25	0,125	0	2
Плече 1 вібр. 2	0	0,3158	0	-0,1935	0,3158	0	1,548
Плече 2 вібр. 2	0	0,3158	0,004807	0,1935	0,3158	0,004807	1,548
Плече 1 вібр. 3	0	0,4683	0,004807	-0,1498	0,4683	0,004807	1,198
Плече 2 вібр. 3	0	0,4683	0	0,1498	0,4683	0	1,198
Плече 1 вібр. 4	0	0,5842	0	-0,1159	0,5842	0	0,927
Плече 2 вібр. 4	0	0,5842	0,004807	0,1159	0,5842	0,004807	0,927
Плече 1 вібр. 5	0	0,6739	0,004807	-0,0897	0,6739	0,004807	0,718
Плече 2 вібр. 5	0	0,6739	0	0,0897	0,6739	0	0,718
Плече 1 вібр. 6	0	0,7433	0	-0,0694	0,7433	0	0,555
Плече 2 вібр. 6	0	0,7433	0,004807	0,0694	0,7433	0,004807	0,555
Плече 1 вібр. 7	0	0,7971	0,004807	-0,0538	0,7971	0,004807	0,43
Плече 2 вібр. 7	0	0,7971	0	0,0538	0,7971	0	0,43
Плече 1 вібр. 8	0	0,8387	0	-0,0416	0,8387	0	0,333
Плече 2 вібр. 8	0	0,8387	0,004807	0,0416	0,8387	0,004807	0,333
Плече 1 вібр. 9	0	0,8709	0,004807	-0,0322	0,8709	0,004807	0,258
Плече 2 вібр. 9	0	0,8709	0	0,0322	0,8709	0	0,258
Плече 1 вібр. 10	0	0,8958	0	-0,0249	0,8958	0	0,199
Плече 2 вібр. 10	0	0,8958	0,004807	0,0249	0,8958	0,004807	0,199

Геометрия Вид Вычисления Диаграмма направленности

Имя  Частота 1650 МГц  в лямбдах

Проводов 23 Автоsegmentация: DM1 800 DM2 80 SC 2.0 EC 1  Не разрывать

No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.004807	2.0	-1
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8958	0.0	2.0	-1
3	0.0	0.0	0.004807	0.0	0.8958	0.004807	2.0	-1
4	0.0	0.125	0.004807	-0.25	0.125	0.004807	2.0	-1
5	0.0	0.125	0.0	0.25	0.125	0.0	2.0	-1
6	0.0	0.3158	0.0	-0.1935	0.3158	0.0	1.548	-1
7	0.0	0.3158	0.004807	0.1935	0.3158	0.004807	1.548	-1
8	0.0	0.4683	0.004807	-0.1498	0.4683	0.004807	1.198	-1
9	0.0	0.4683	0.0	0.1498	0.4683	0.0	1.198	-1

Источников 0  Одинаковые источники

Нагрузок 0  Включить нагрузки

Комментарий

No.	PULSE	Phase dg	Volt V
след.			

No.	PULSE	Type	L(uH)	C(pF)	Q	F(MHz)
след.						

Рисунок 3.1 – Поле редагування геометрії

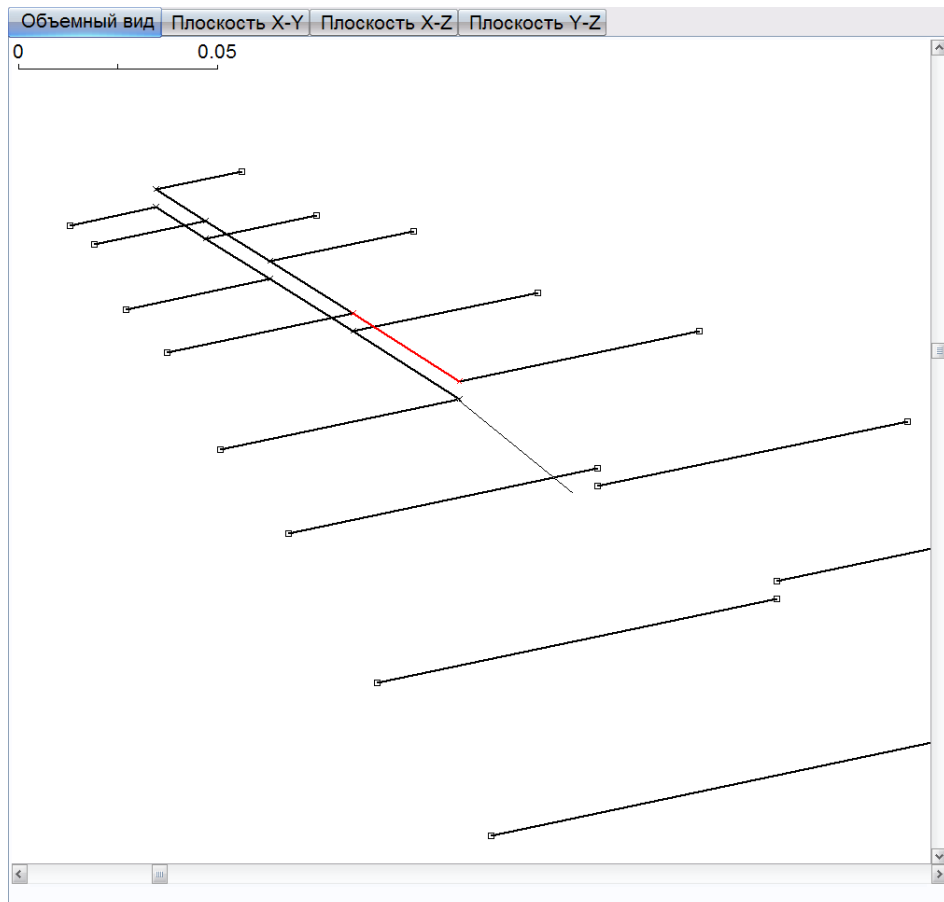


Рисунок 3.2 – Графічне редагування провідників

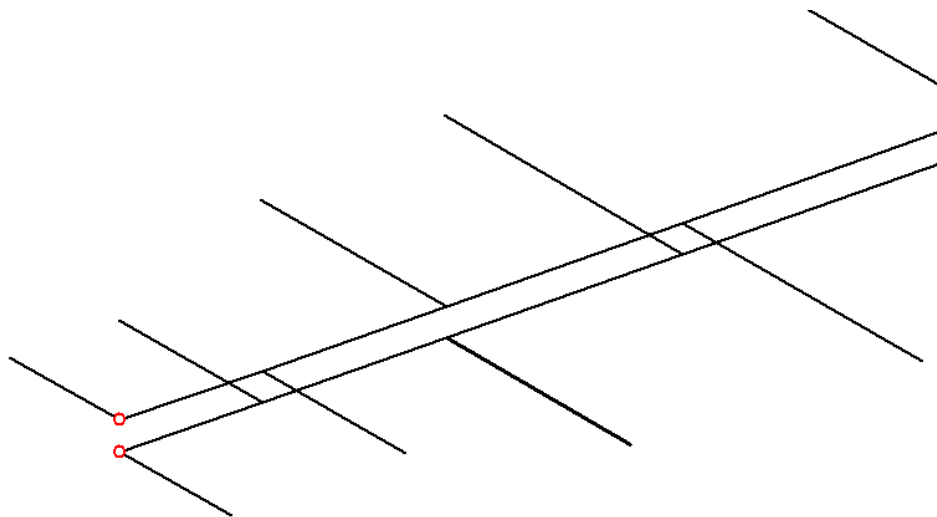


Рисунок 3.3 – Джерела живлення

Посередині відрізка між короткозамикачем і першим вібратором створимо відрізок провідника з поглинаючим навантаженням  $R_{\text{погл}} = W$ ,  $R_{\text{погл}} = W$ , де  $W$  – хвильовий опір розподільного фідера (рис. 3.4).

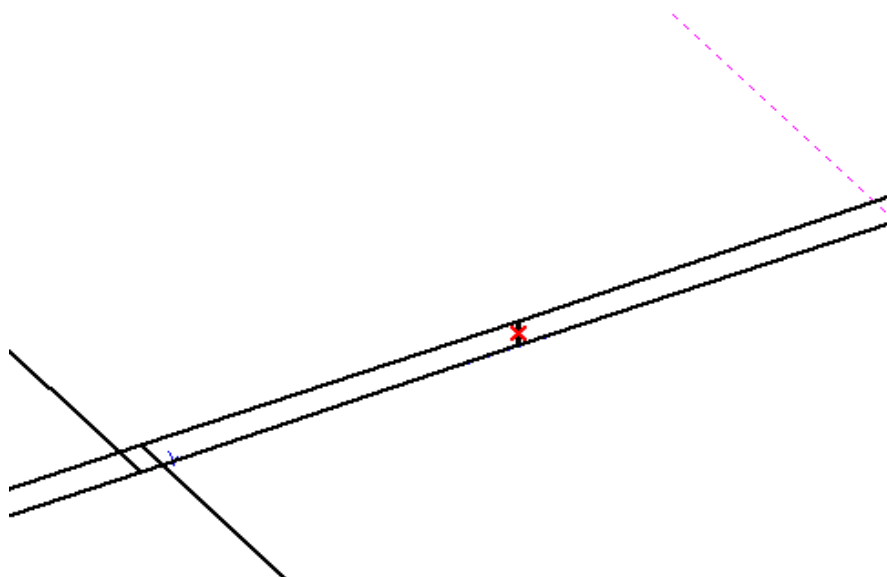


Рисунок 3.4 – Розташування поглинаючого навантаження

Для перевірки правильності введених розмірів переглянемо вигляд антени на координатній сітці в горизонтальній проекції (рис. 3.5)

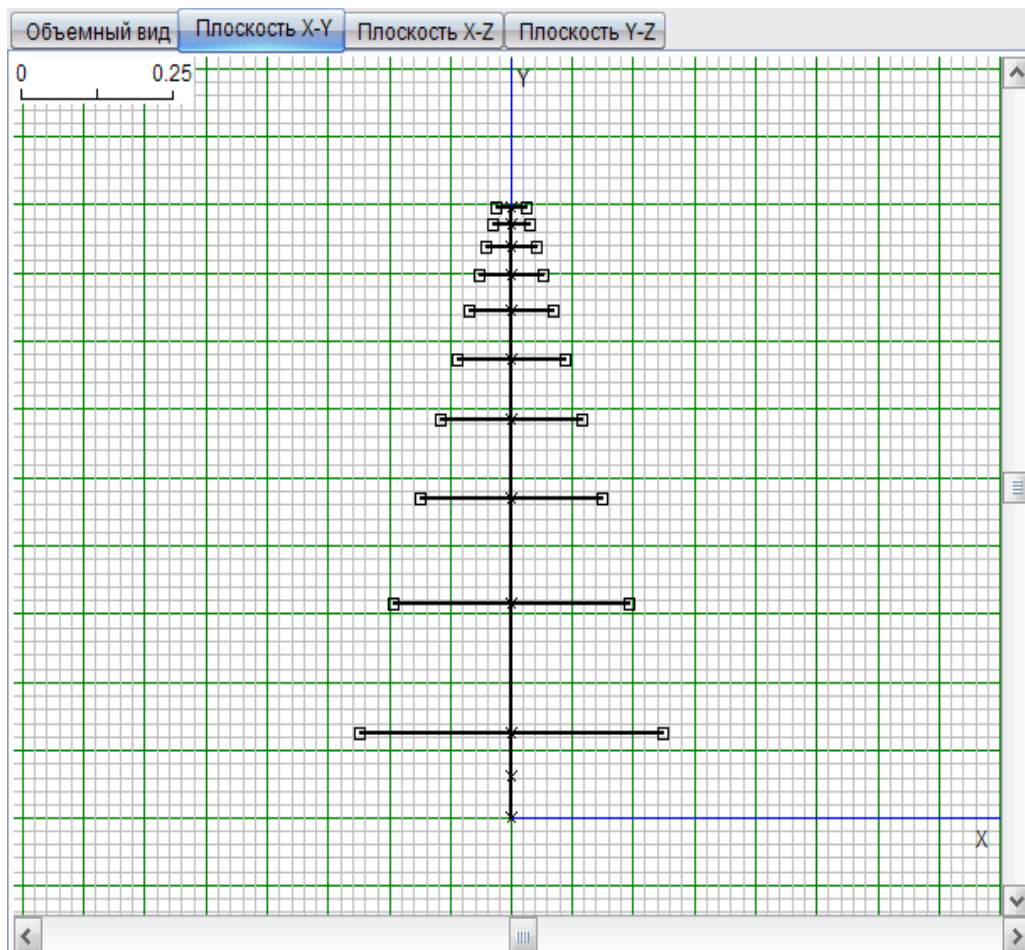


Рисунок 3.5 – Горизонтальна проекція антени

### 3.3 Дослідження залежності діаграми спрямованості антени від частоти

#### 3.3.1 Дослідження ДС в межах робочого діапазону ЛПВА

Для розрахунку характеристик антени програма автоматично розділяє провідники антени на сегменти, кількість яких збільшується зі збільшенням довжини хвилі, що випромінюється (рис 3.6). В межах кожного з сегментів розподіл струму вважається рівномірним. Така апроксимація значно скорочує час розрахунків, але й забезпечує достатню точність.

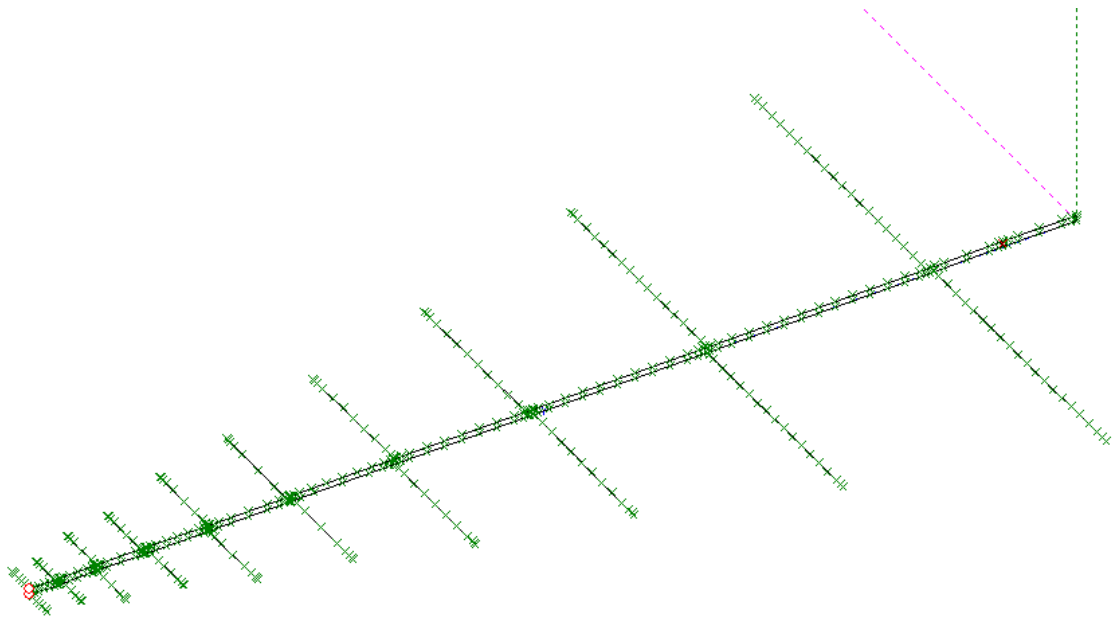


Рисунок 3.6 – Поділ провідників антени на сегменти

Проведемо дослідження на нижній частоті діапазону резонансним буде найдовший вібратор, але частина струму вже буде відібрана попередніми вібраторами, резонансна частота яких близька до робочої. Розподіл струмів у антені при частоті 300 МГц ( $\lambda = 1 м$ ) показаний на рис. 3.7. Діаграма спрямованості в такому випадку буде мати вигляд показаний на рис. 3.8. Проведемо також дослідження на інших частотах всього діапазону. Оберемо частоти для досліджень:

$$f_0 = 300 \text{ МГц} (\lambda_0 = 1 \text{ м});$$

$$f_1 = 500 \text{ МГц} (\lambda_1 = 0,6 \text{ м});$$

$$f_2 = 900 \text{ МГц} (\lambda_2 = 0,333 \text{ м});$$

$$f_3 = 1200 \text{ МГц} (\lambda_3 = 0,25 \text{ м});$$

$$f_4 = 1500 \text{ МГц} (\lambda_4 = 0,2 \text{ м});$$

$$f_5 = 2100 \text{ МГц} (\lambda = 0,143);$$

$$f_6 = 2700 \text{ МГц} (\lambda_6 = 0,11 \text{ м});$$

$$f_7 = 3000 \text{ МГц} (\lambda_6 = 0,01 \text{ м}).$$

Результати розрахунків показані на рис 3.7 – 3.42. Проаналізувавши нижче наведені об'ємні діаграми можна побачити, що кількість пелюсток зростає зі збільшенням висоти розташування антени (наприклад, рис. 3.13, рис. 3.14) і зі збільшенням частоти. При значній зміні висоти пелюстки складаються і їх кількість знову стає малою. Враховуючи цю тенденцію, для частот, крім двох перших наведені діаграми з урахуванням впливу поверхні Землі лише для висоти 15 м. При зростанні частоти активна зона зміщується в бік коротших вібраторів, тому розподіл струму не на краях діапазону показаний лише для  $f_1$  (див. рис. 3.16).

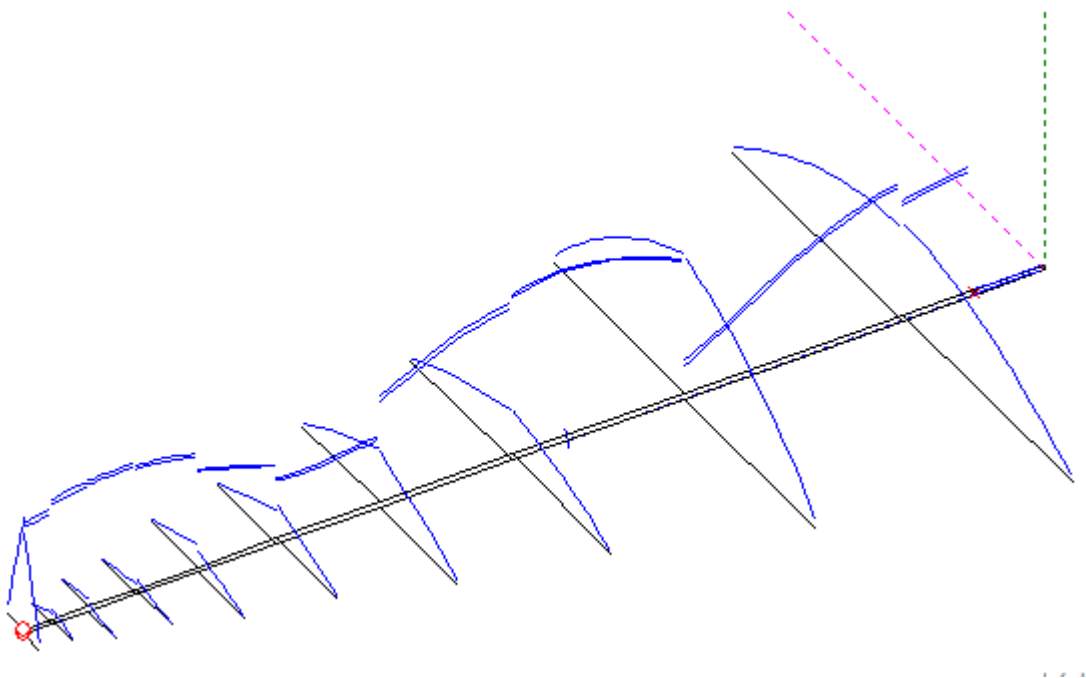


Рисунок 3.7 – Розподіл струмів при  $\lambda = 1\text{ м}$

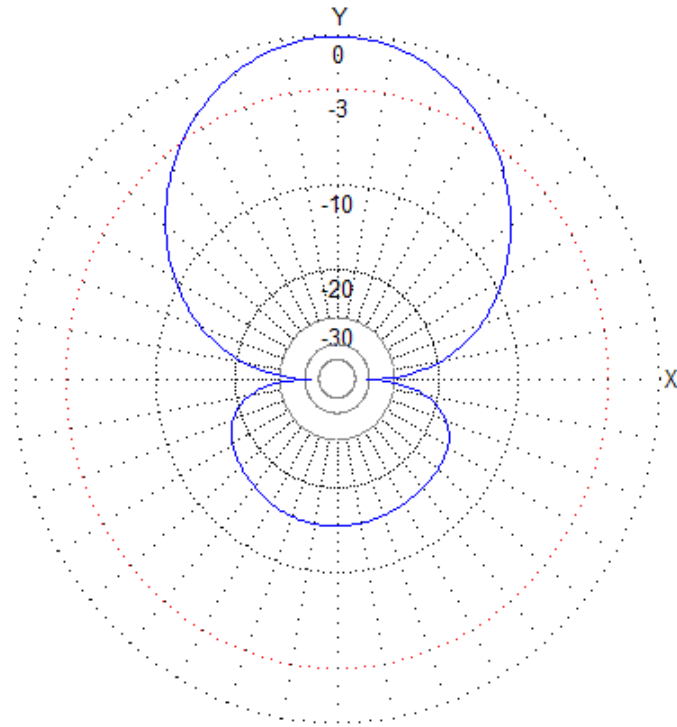


Рисунок 3.8 – Діаграма спрямованості в площині вектора напруженості електричного поля при  $\lambda = 1 \text{ м}$

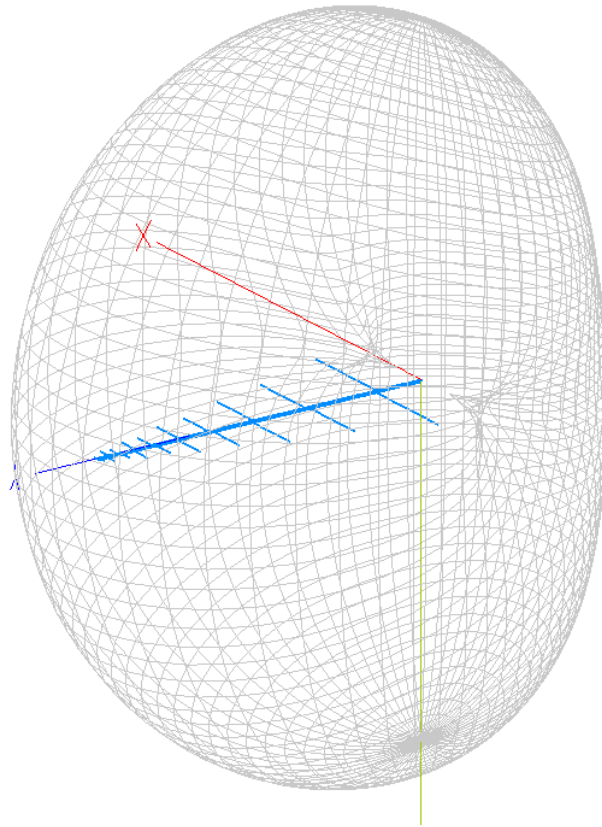


Рисунок 3.9 – Діаграма спрямованості у вільному просторі при  $\lambda = 1 \text{ м}$

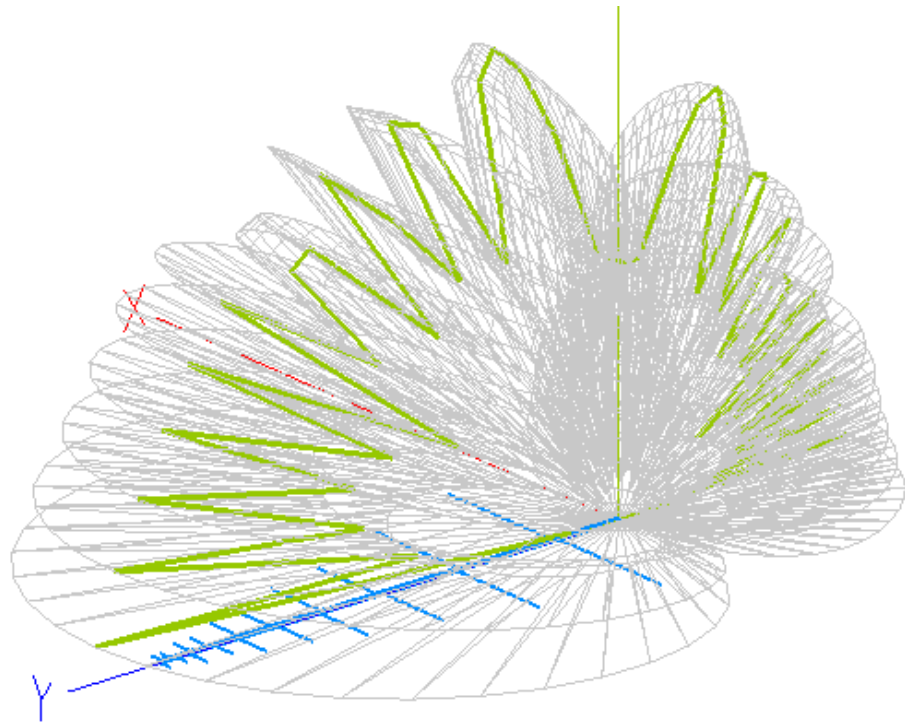


Рисунок 3.10 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 300 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 5 м

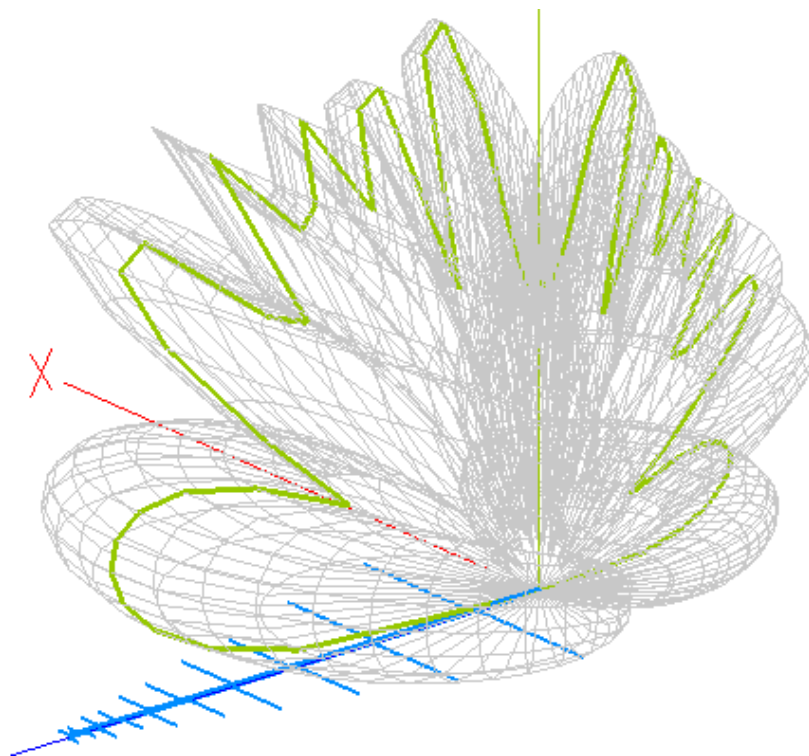


Рисунок 3.11 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 300 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 10 м



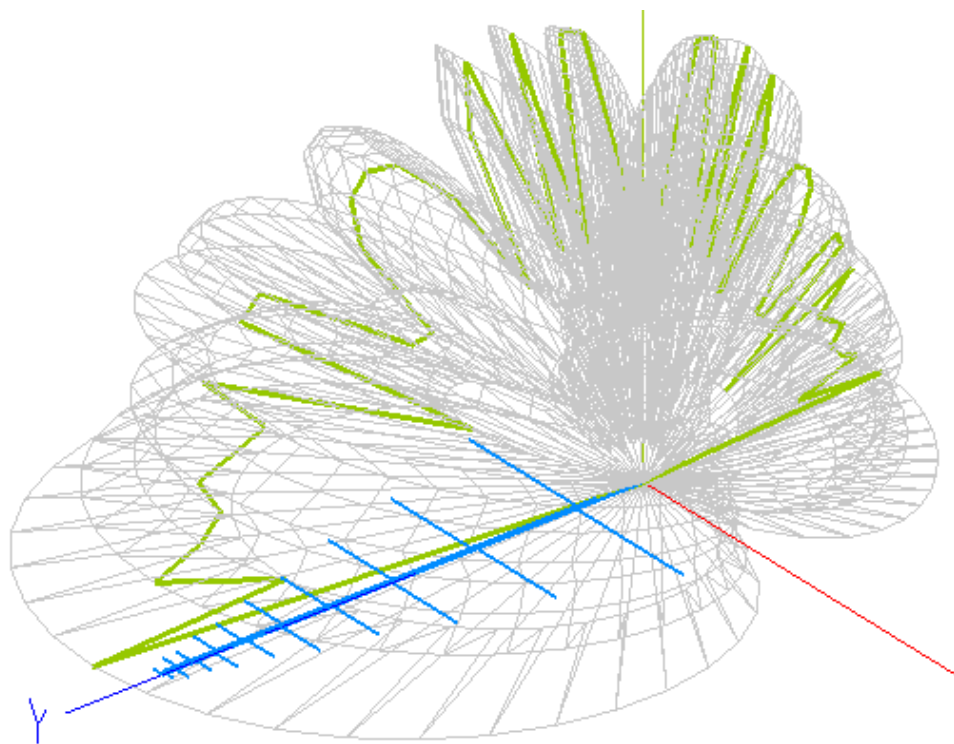


Рисунок 3.12 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 300$  МГц з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 15 м

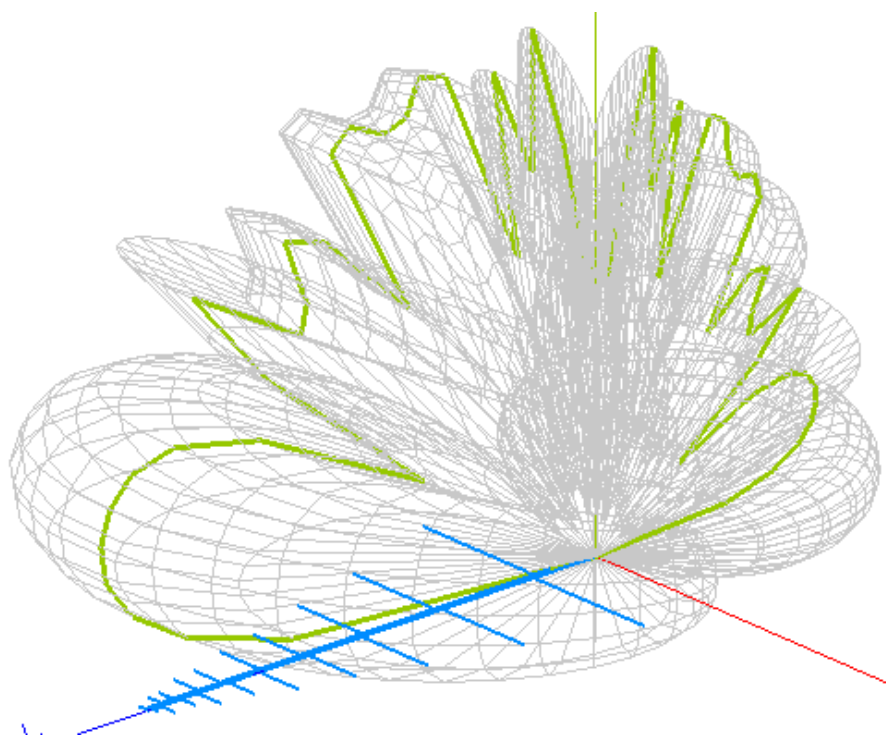


Рисунок 3.13 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 300$  МГц з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 20 м

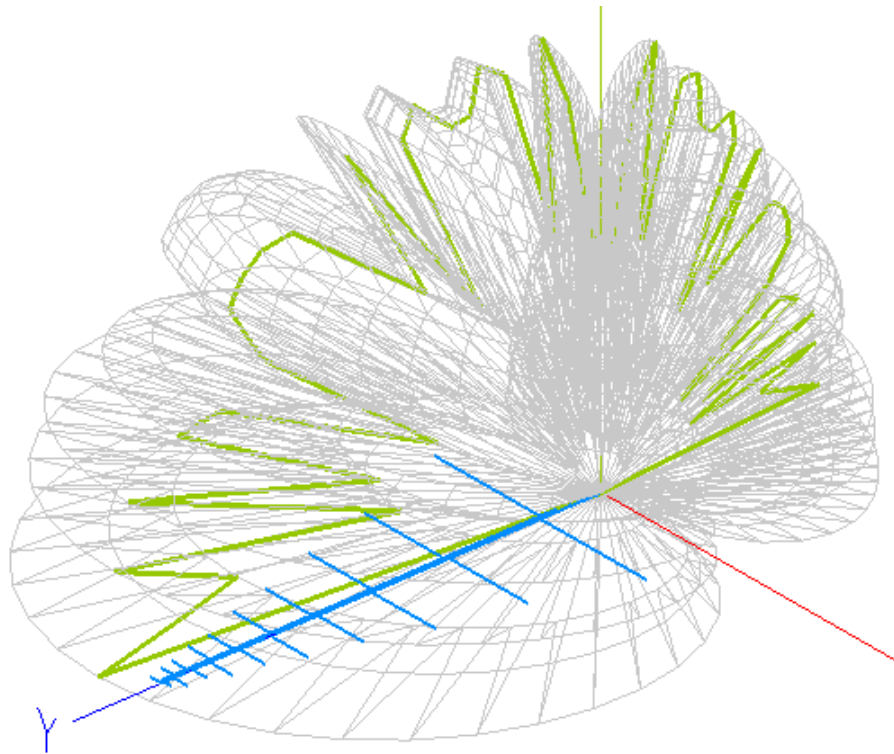


Рисунок 3.14 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 300$  МГц з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 25 м

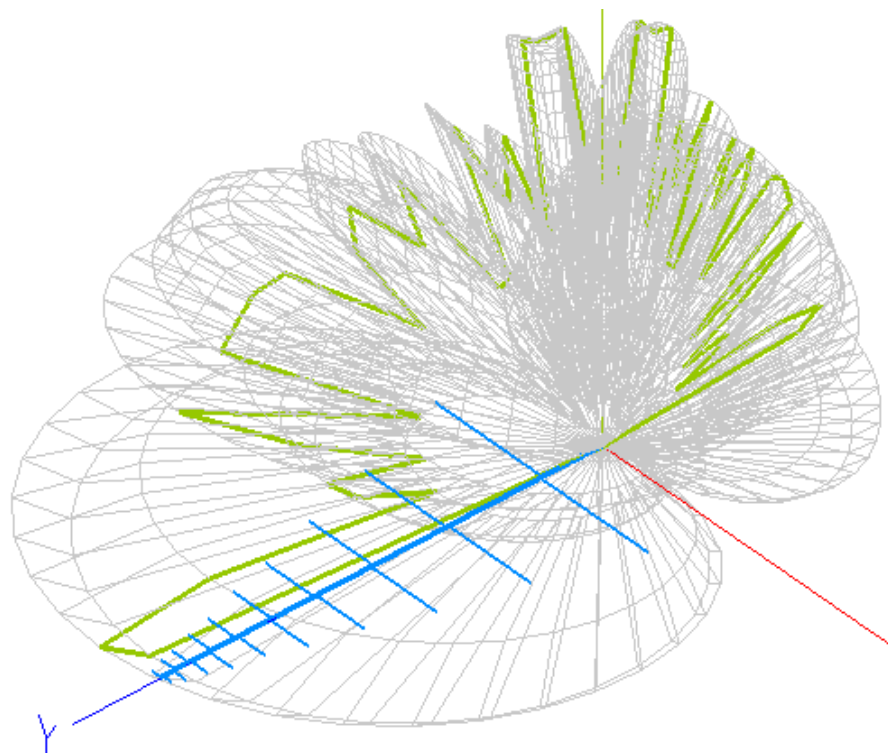


Рисунок 3.15 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 300$  МГц з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 60 м

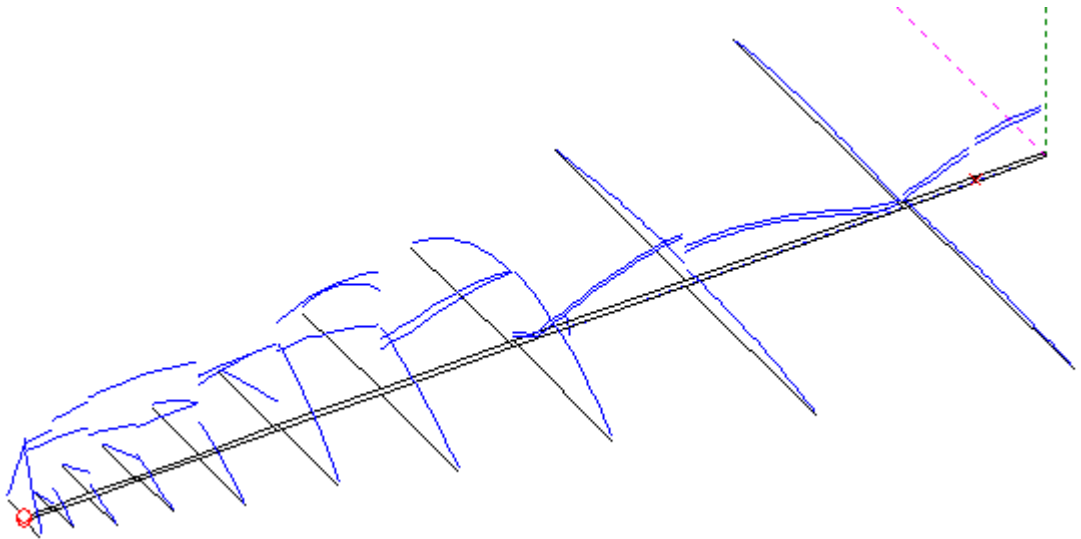


Рисунок 3.16 – Розподіл струмів у вібраторах на частоті 500 МГц

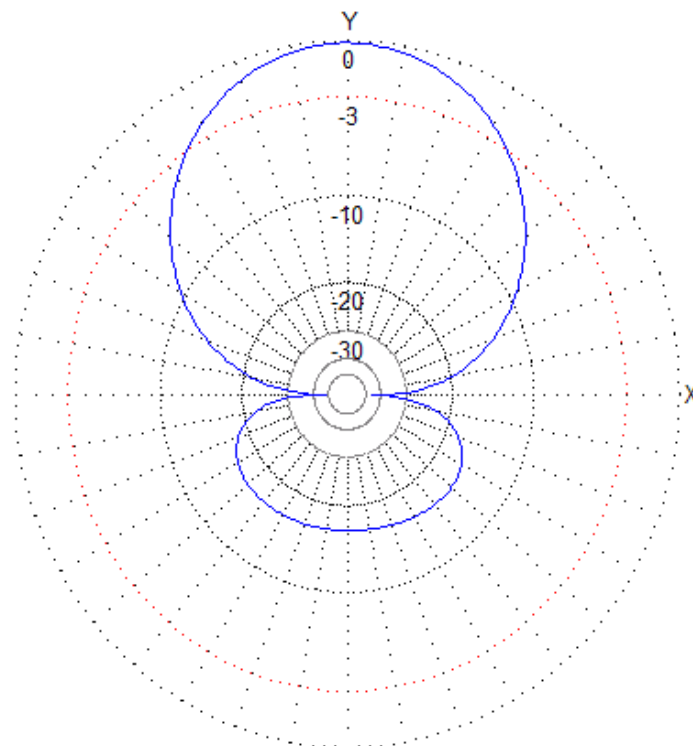


Рисунок 3.17 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  
 $f = 500 \text{ МГц}$

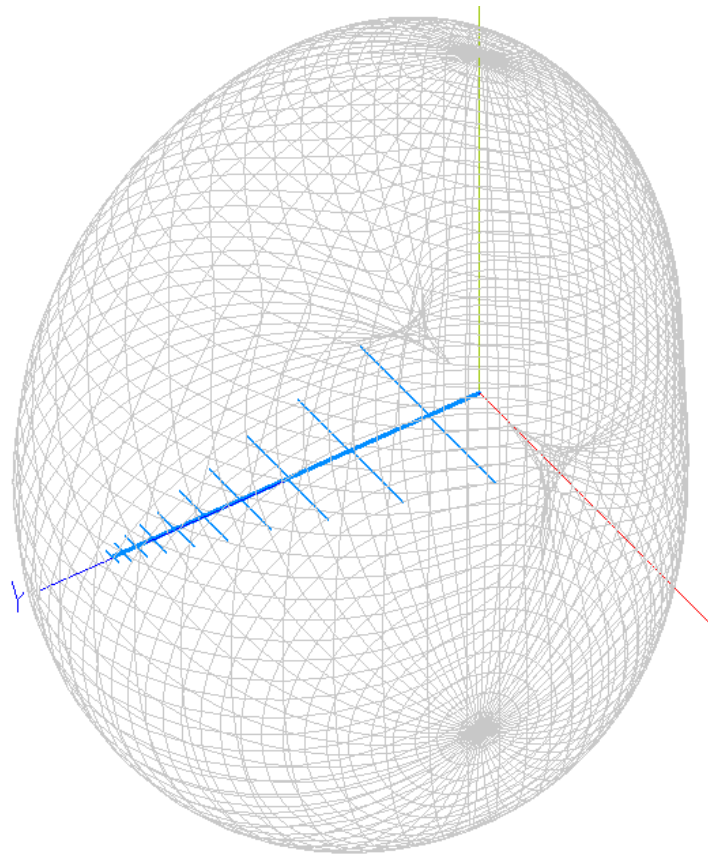


Рисунок 3.18 – Діаграма спрямованості у вільному просторі при  $f = 500 \text{ МГц}$

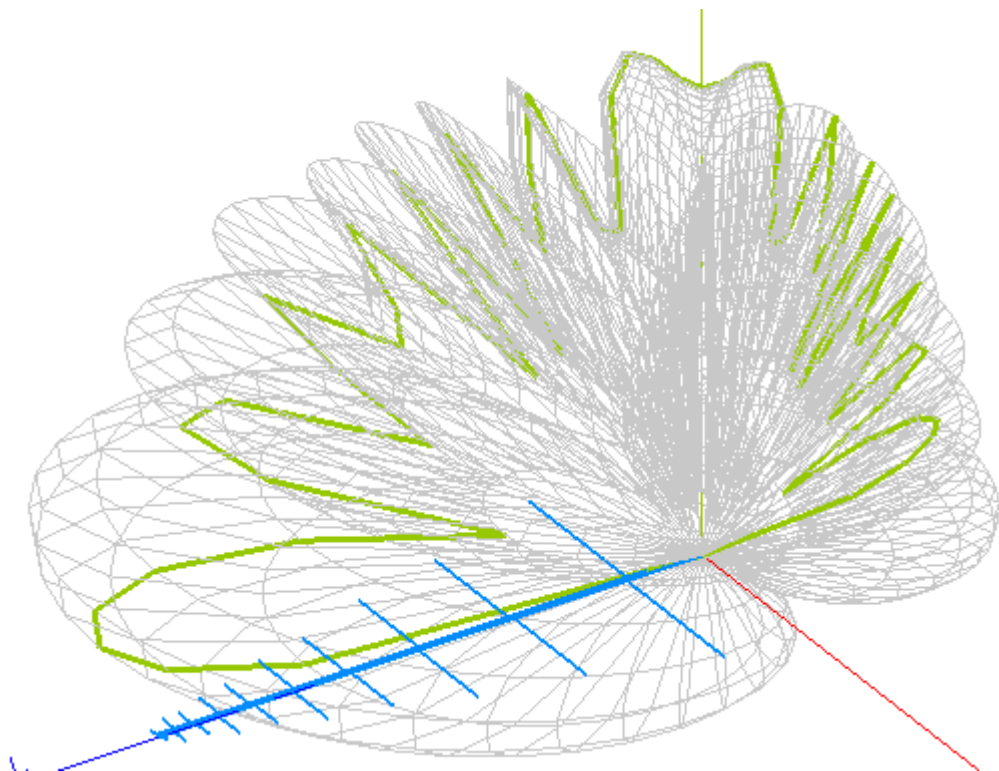


Рисунок 3.19 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 500 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 5 м

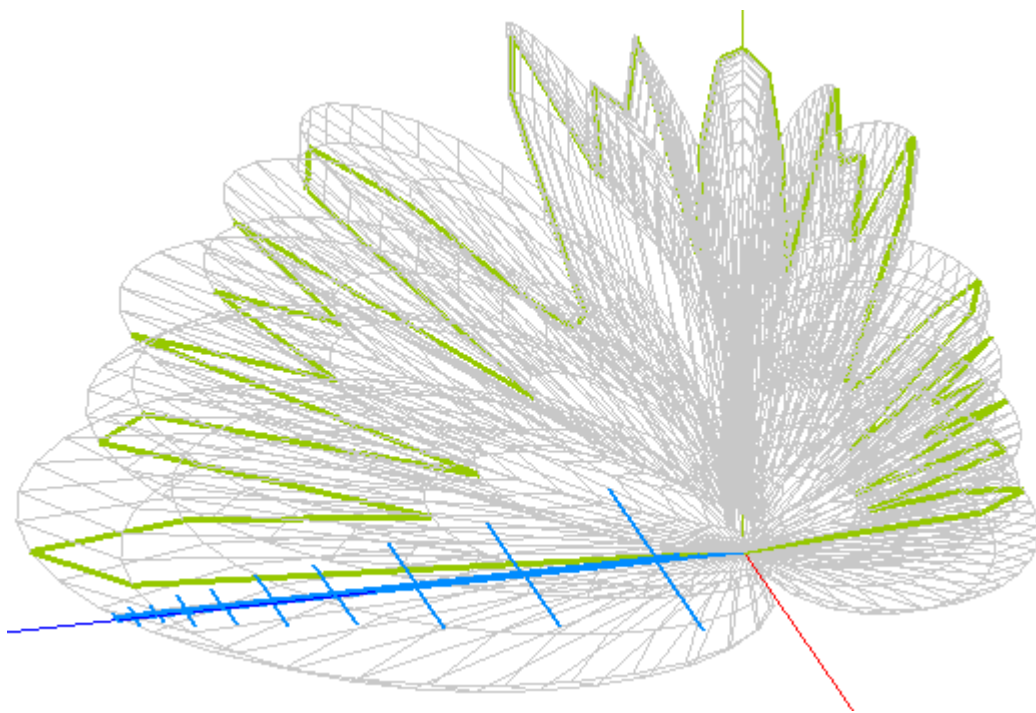


Рисунок 3.20 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 500 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 10 м

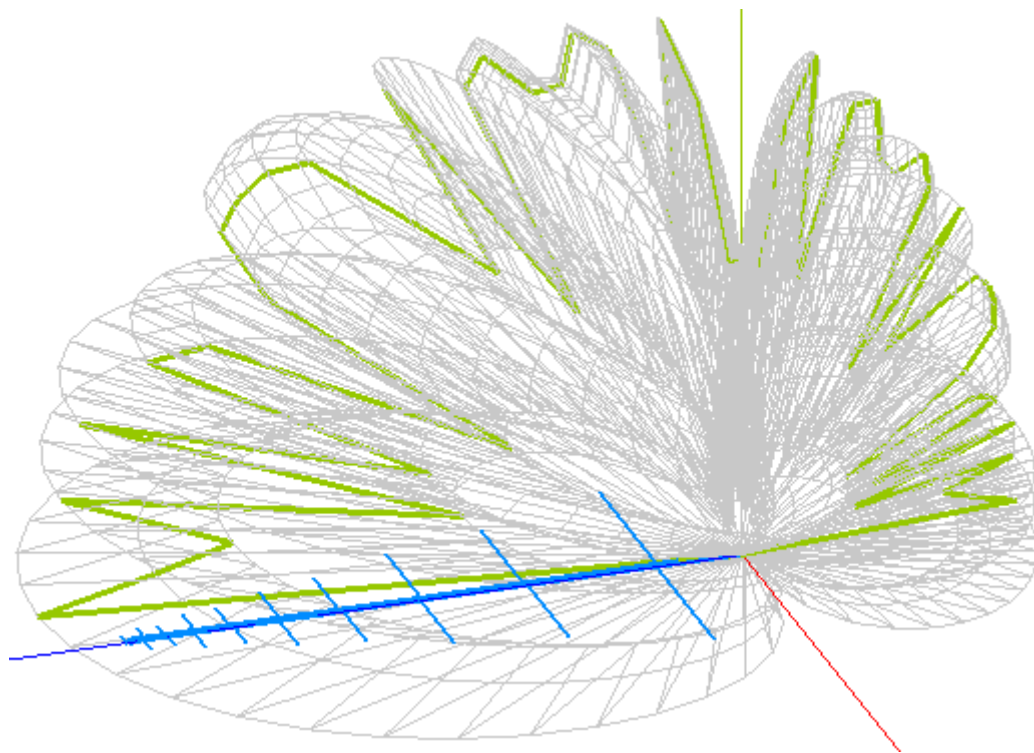


Рисунок 3.21 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 500 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 15 м



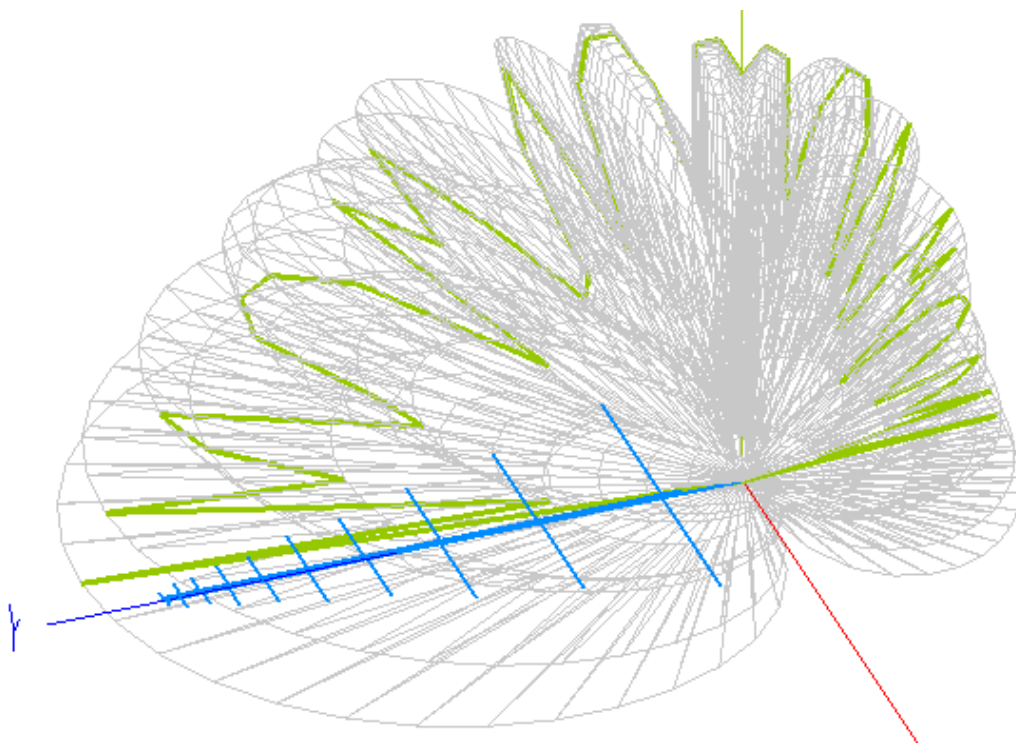


Рисунок 3.22 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 500 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 20 м

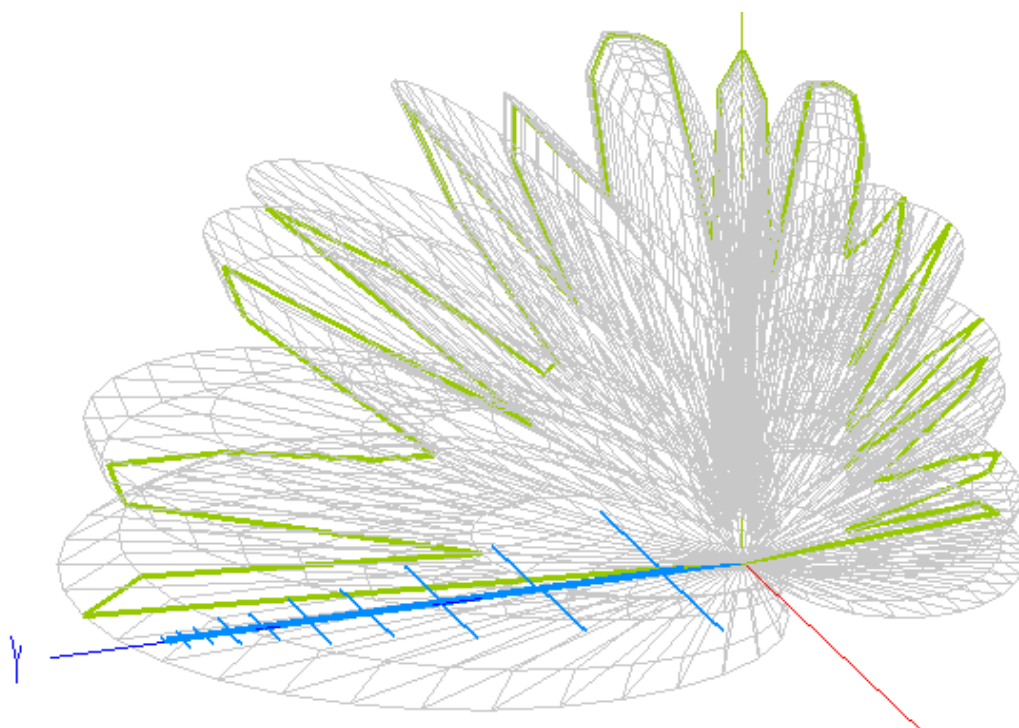


Рисунок 3.23 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f_a = 770,8 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 25 м

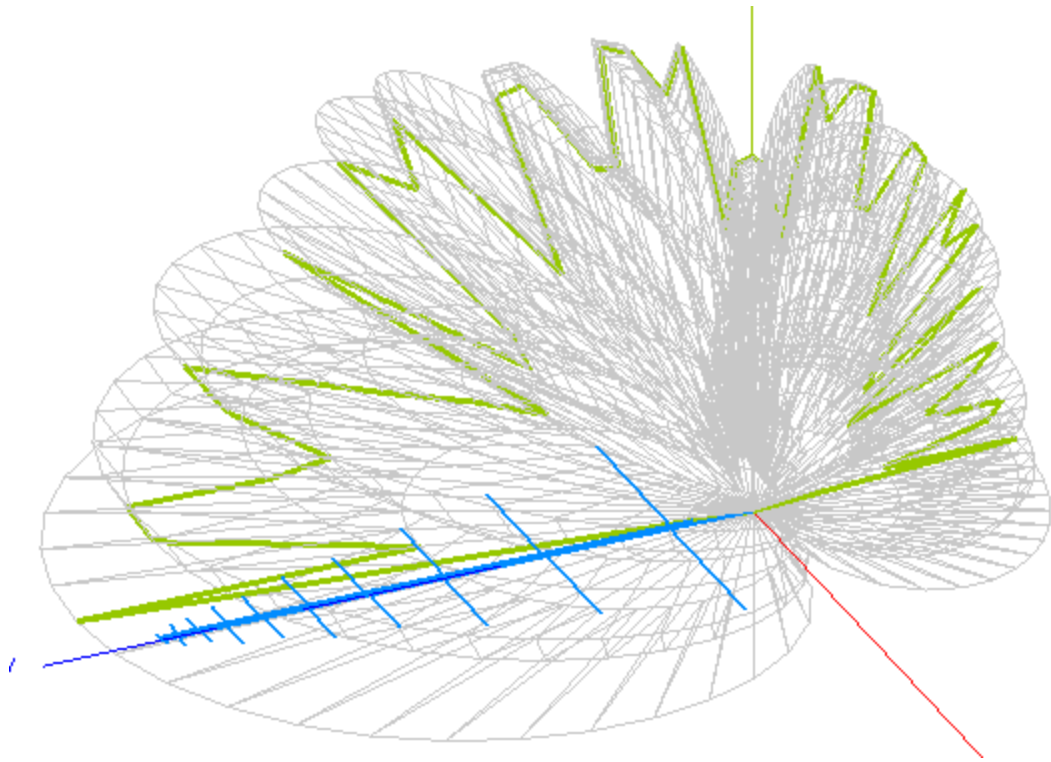


Рисунок 3.24 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 500 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 60 м

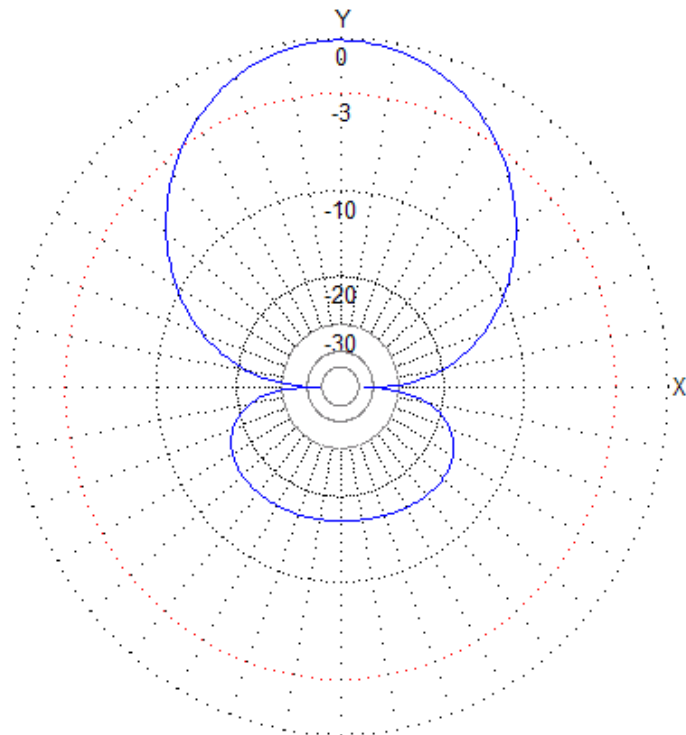


Рисунок 3.25 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  $f = 900 \text{ МГц}$

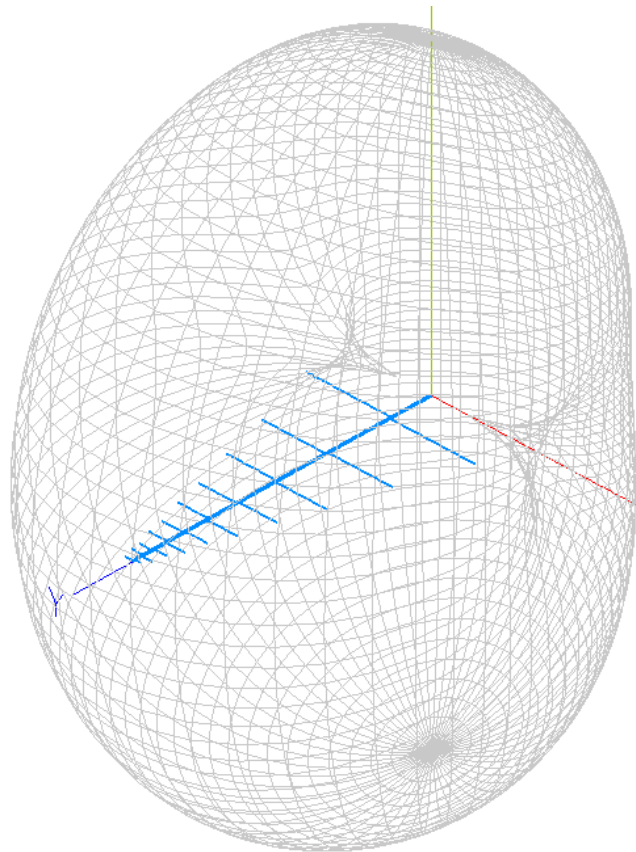


Рисунок 3.26 – Діаграма спрямованості у вільному просторі при  $f = 900$  МГц

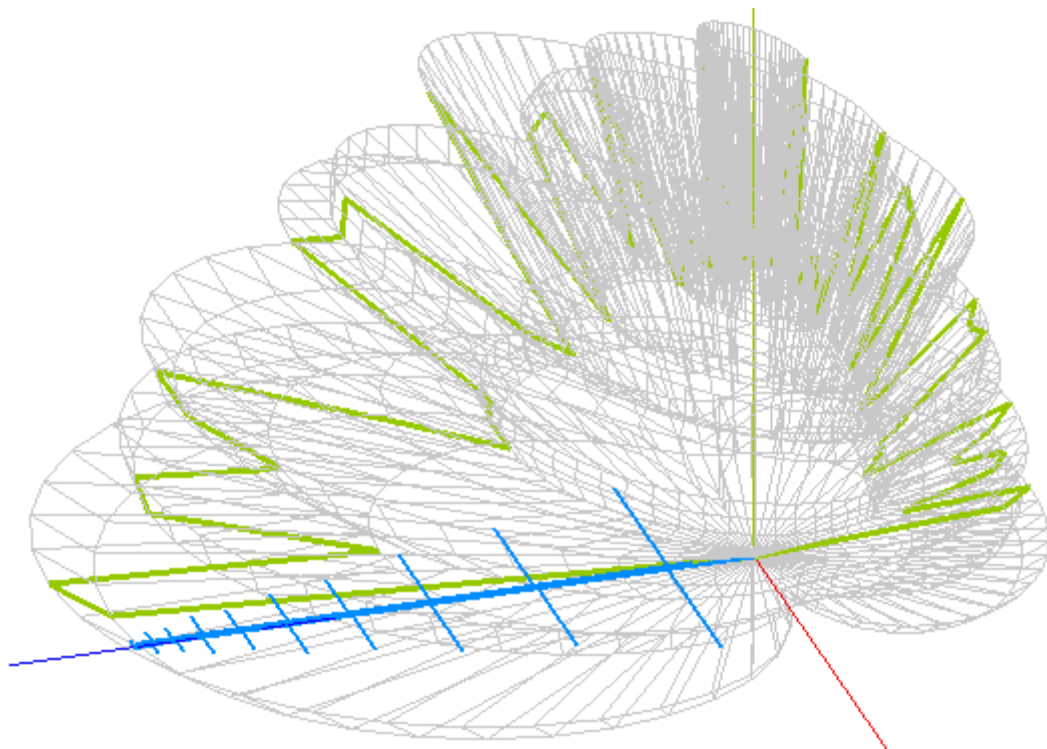


Рисунок 3.27 – Тривимірний ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 900$  МГц з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 15 м



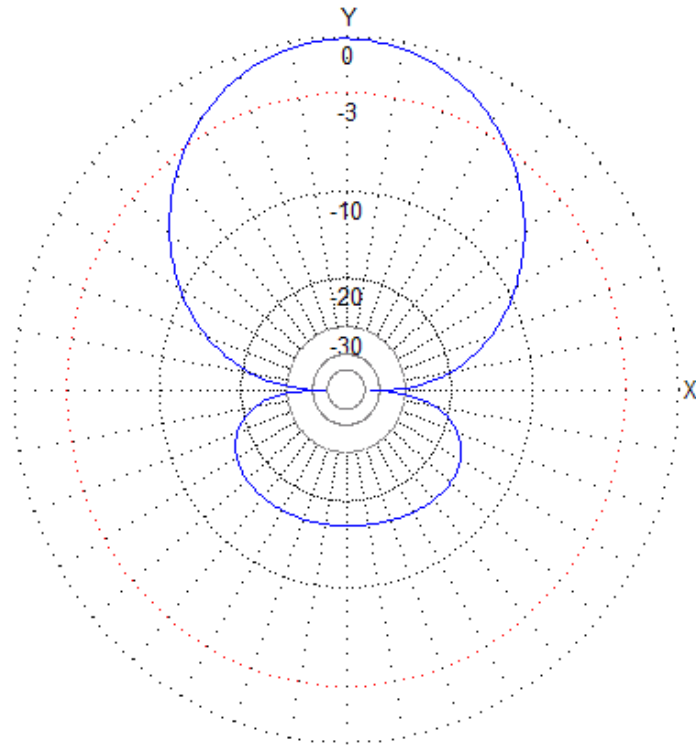


Рисунок 3.28 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  
 $f = 1200 \text{ МГц}$

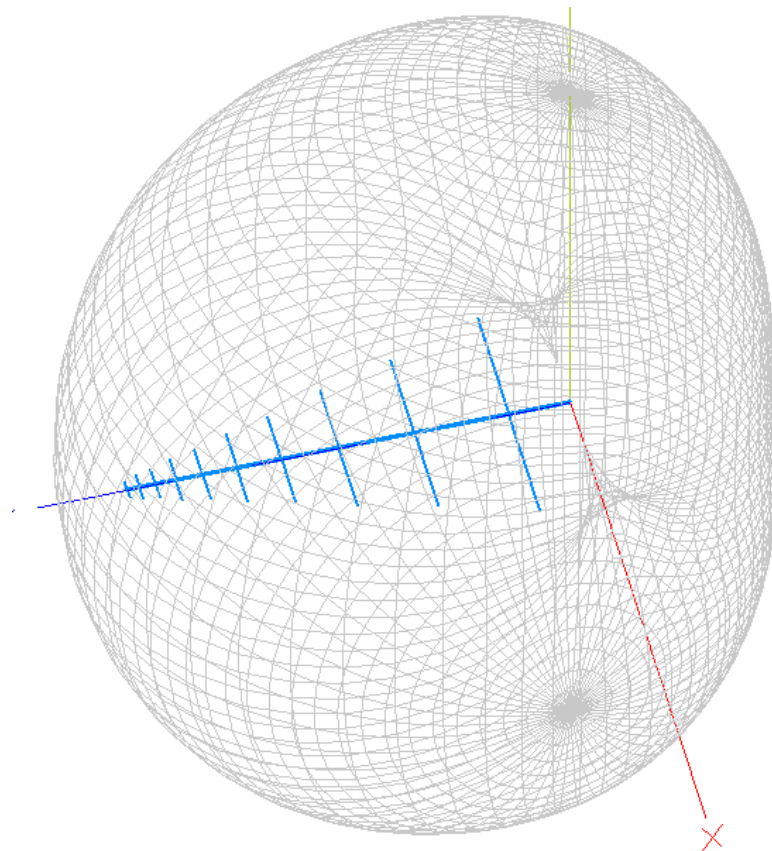


Рисунок 3.29 – Діаграма спрямованості у вільному просторі при  
 $f = 1200 \text{ МГц}$

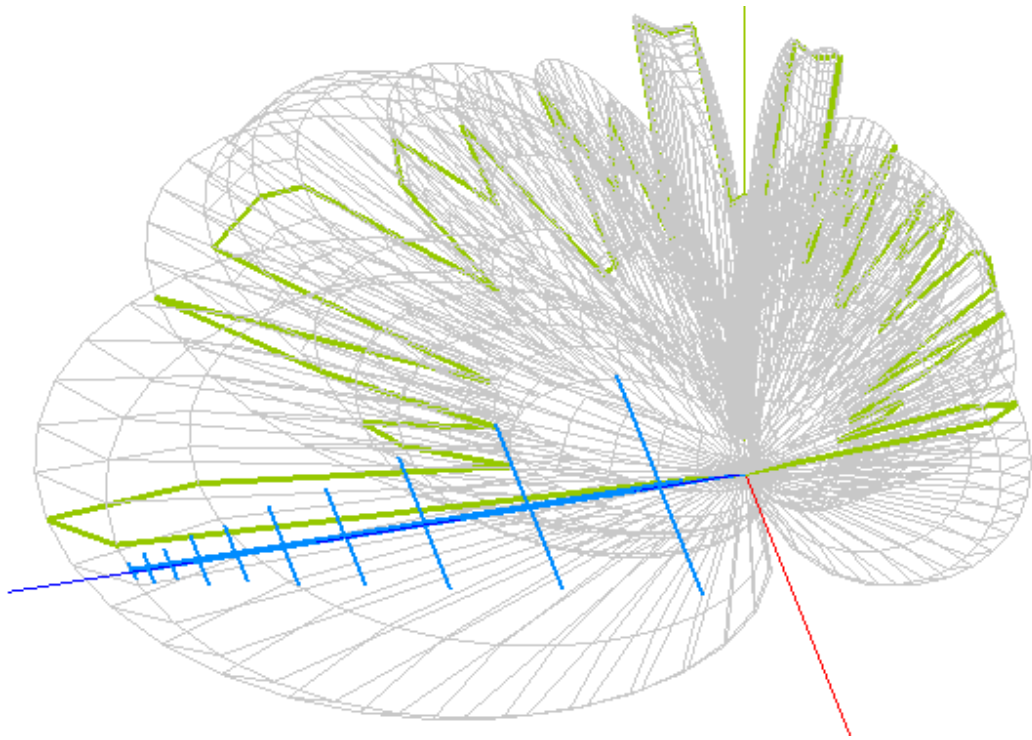


Рисунок 3.30 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 1200 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 15 м

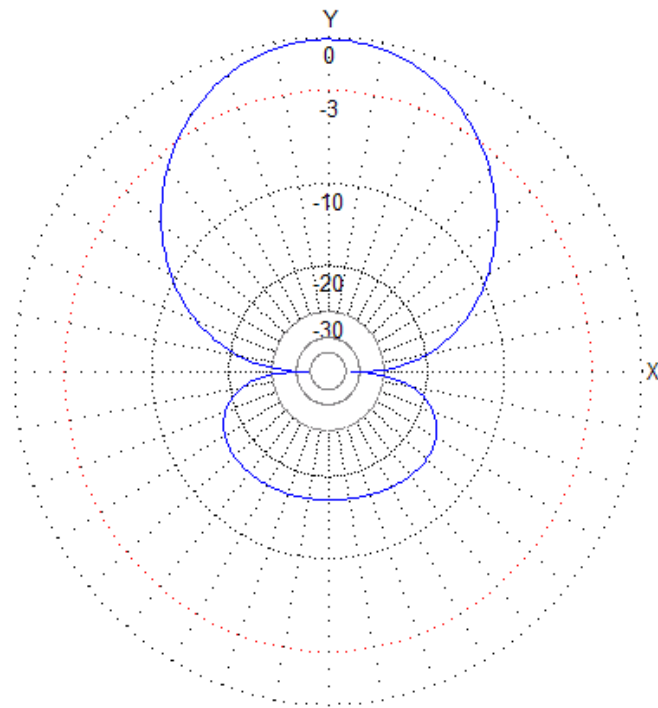


Рисунок 3.31 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  $f = 1500 \text{ МГц}$

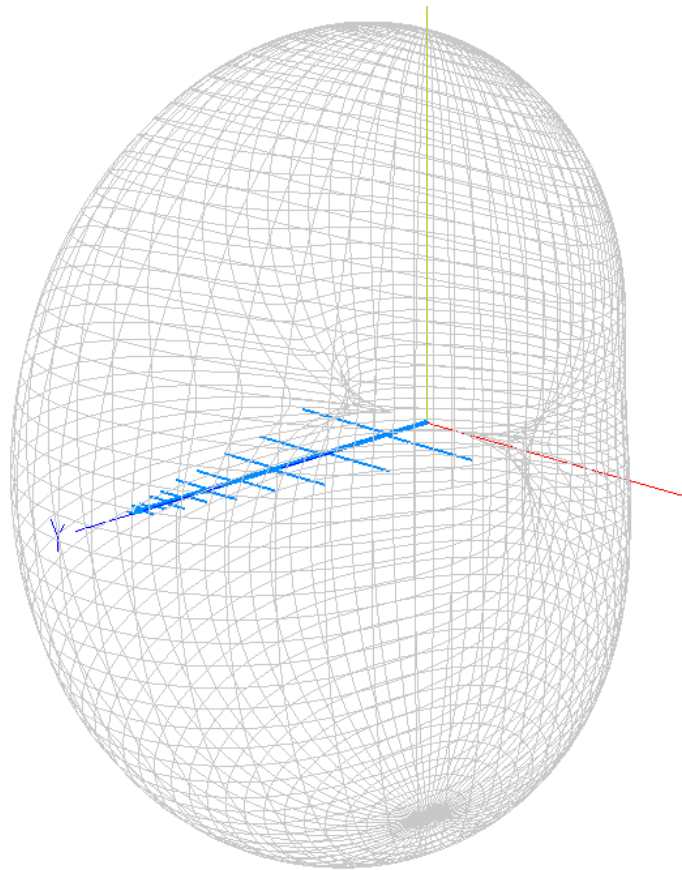


Рисунок 3.32 – Діаграма спрямованості у вільному просторі при  
 $f = 1500 \text{ МГц}$

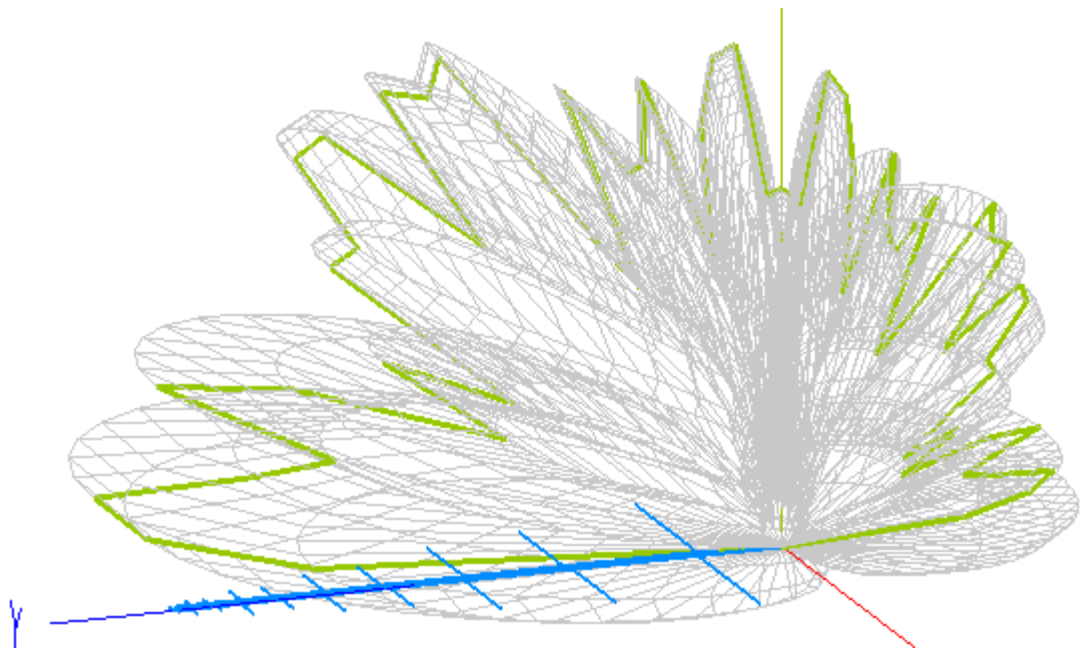


Рисунок 3.33 – Тривимірний ДС при горизонтальній поляризації на частоті  
 $f = 1500 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени  
на висоті 15 м

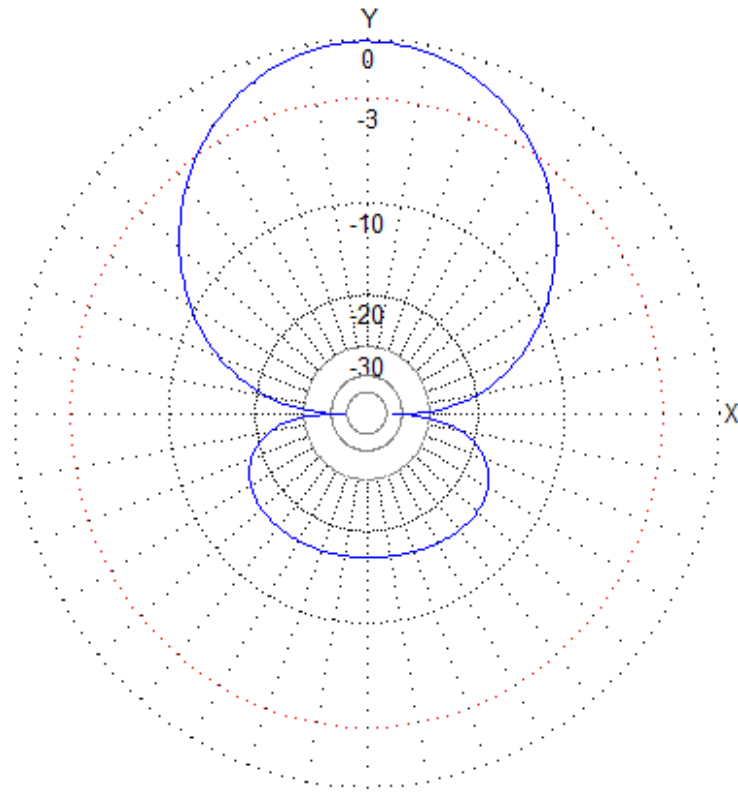


Рисунок 3.34 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  
 $f = 2100 \text{ МГц}$

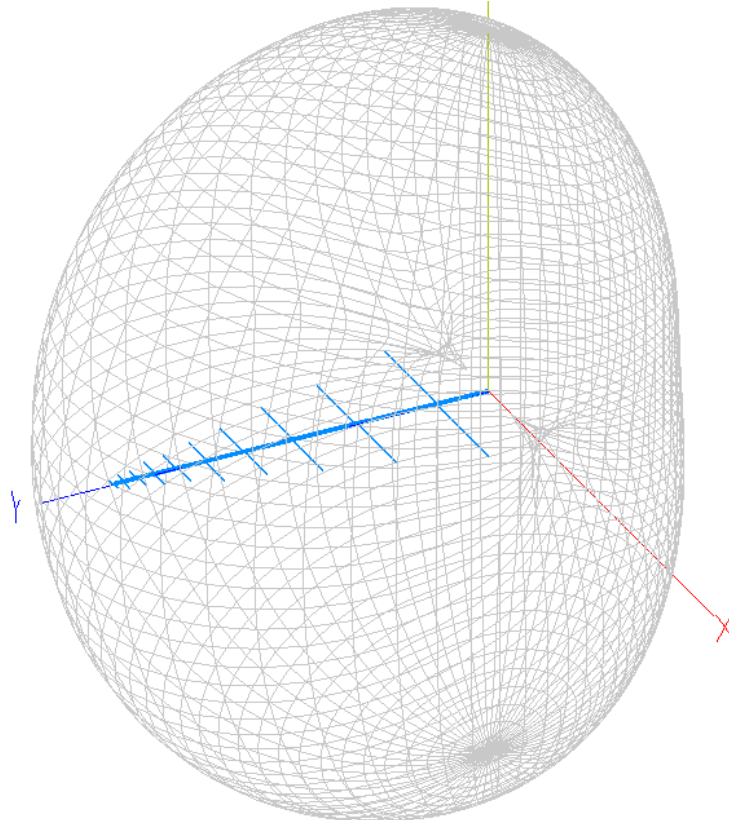


Рисунок 3.35 – Діаграма спрямованості у вільному просторі при  
 $f = 2100 \text{ МГц}$

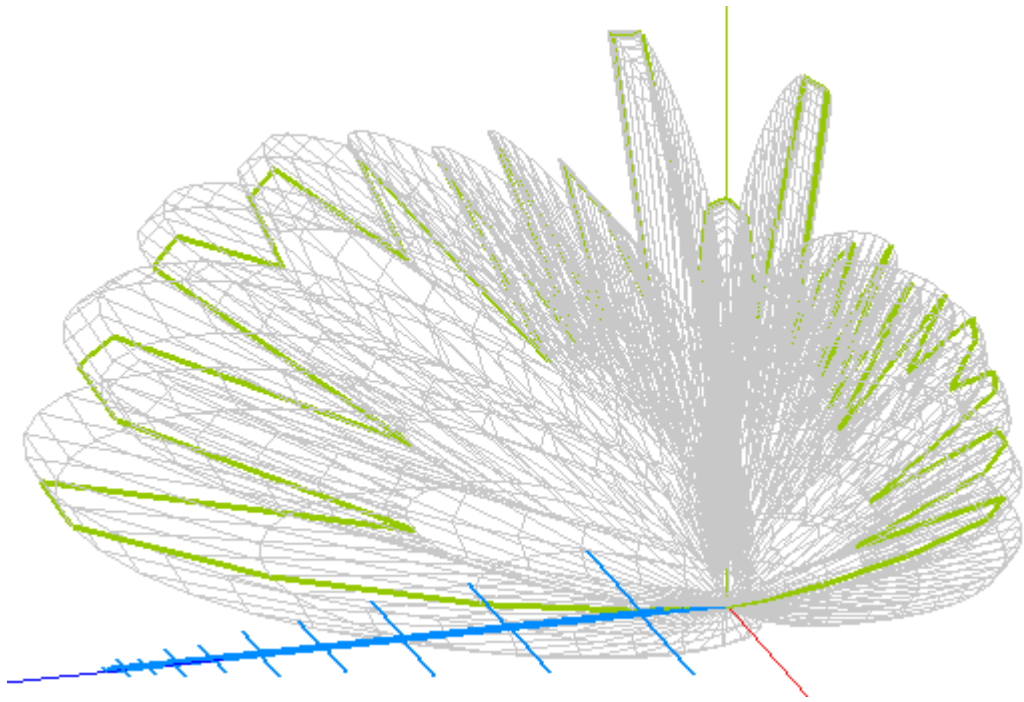


Рисунок 3.36 – Тривимірний ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 2100$  МГц з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 15 м

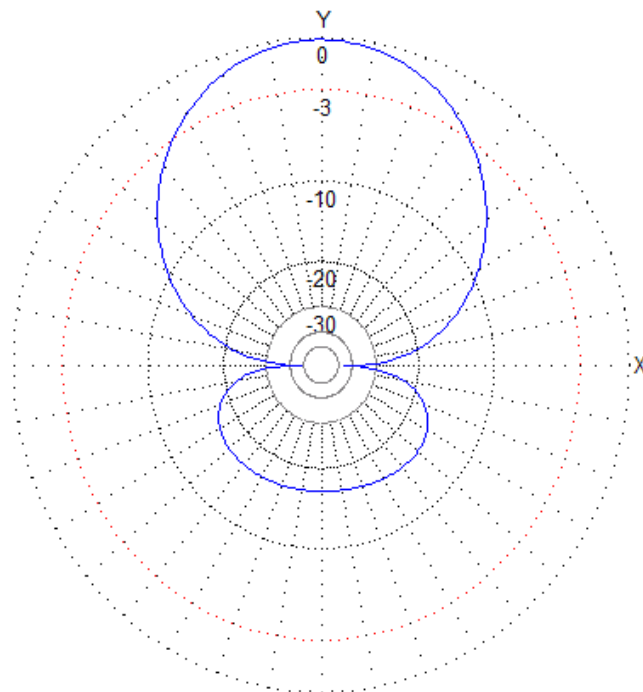


Рисунок 3.37 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  $f = 2700$  МГц

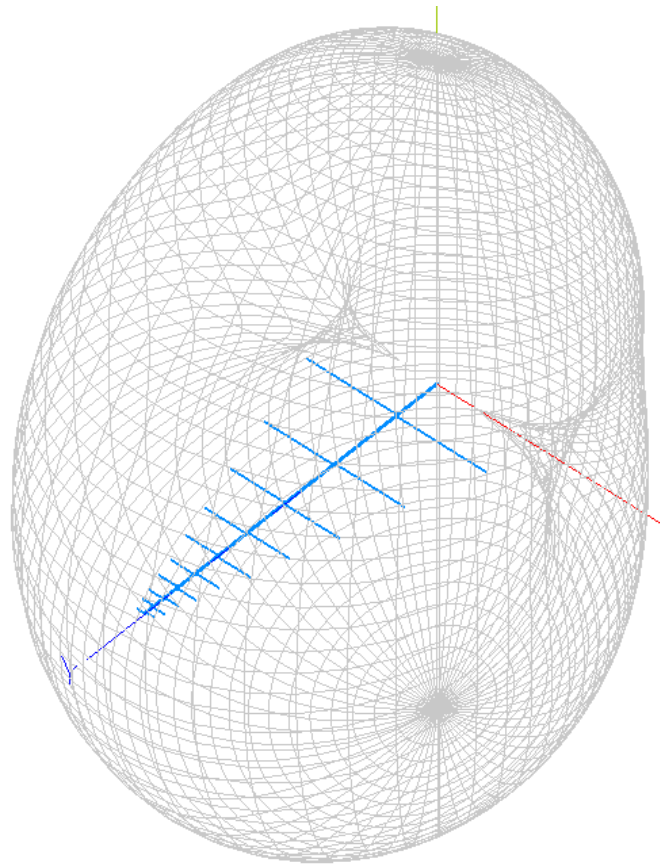


Рисунок 3.38 – Діаграма спрямованості у вільному просторі при  
 $f = 2700 \text{ МГц}$

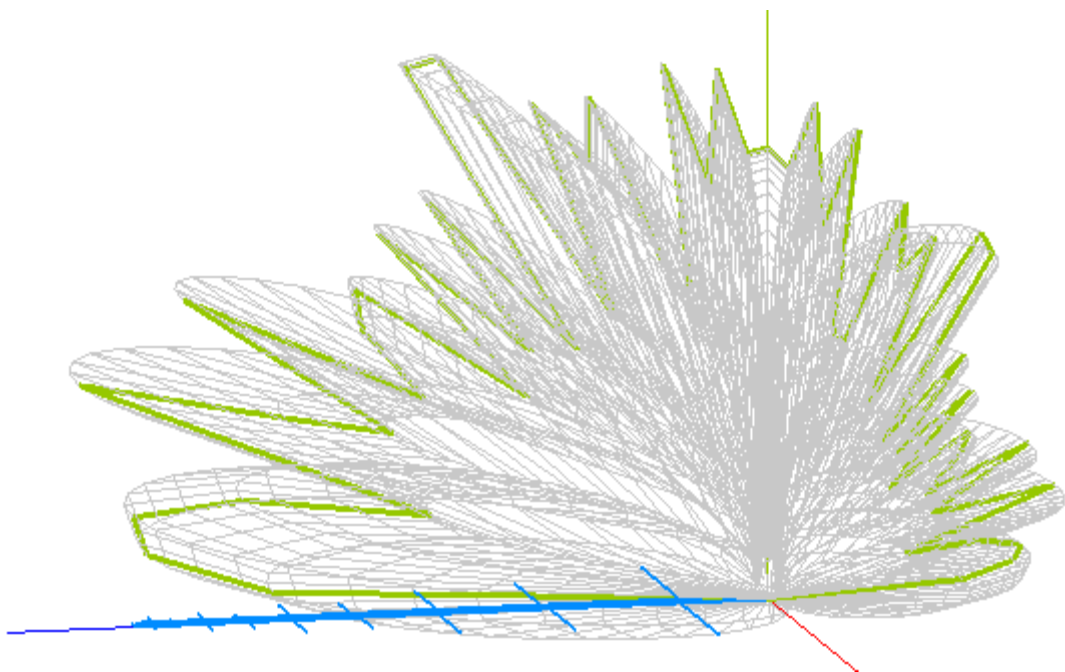


Рисунок 3.39 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  
 $f = 2700 \text{ МГц}$  з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени  
 на висоті 15 м



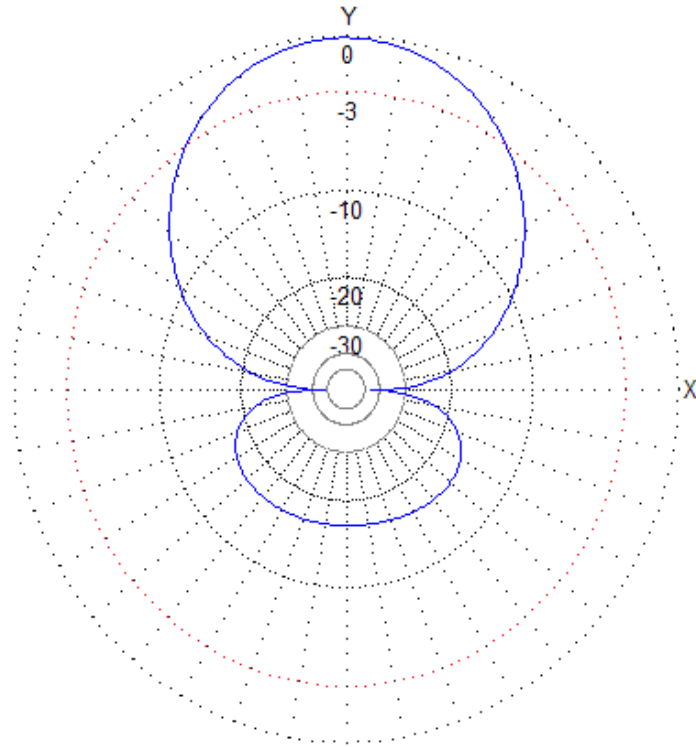


Рисунок 3.40 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  
 $f = 3000 \text{ МГц}$

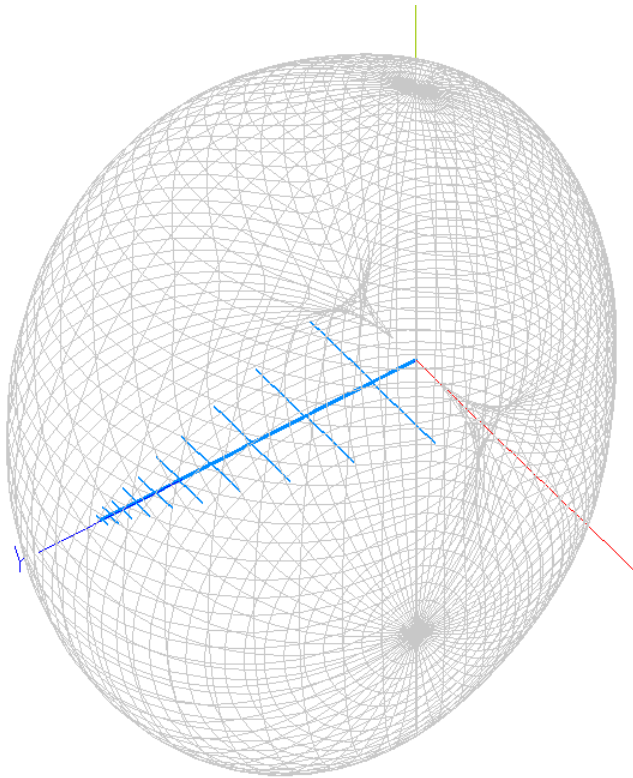


Рисунок 3.41 – Діаграма спрямованості у вільному просторі при  
 $f = 3000 \text{ МГц}$

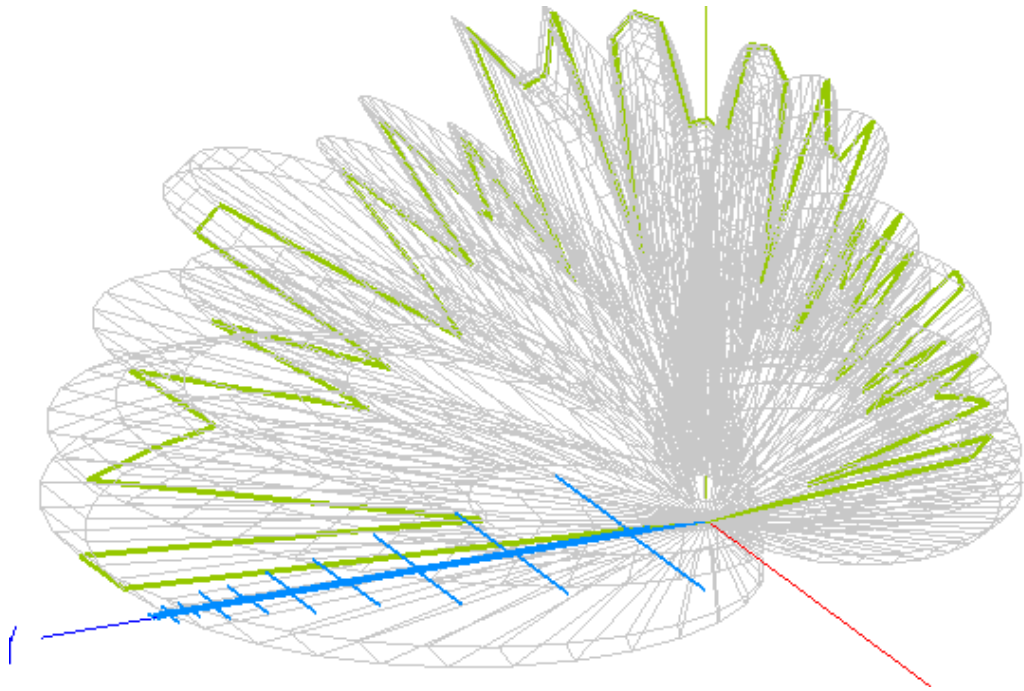


Рисунок 3.42 – Тривимірна ДС при горизонтальній поляризації на частоті  $f = 3000$  МГц з урахуванням впливу поверхні землі при розташуванні антени на висоті 15 м

### 3.3.2 Дослідження ДС за межами дециметрового діапазону

Дослідимо діаграми спрямованості за межами робочого діапазону ЛПВА. На частоті, що близька до нижньої частоти дециметрового діапазону  $f = 295$  МГц зберігається достатньо великий КСД (дим. рис. 3.43).



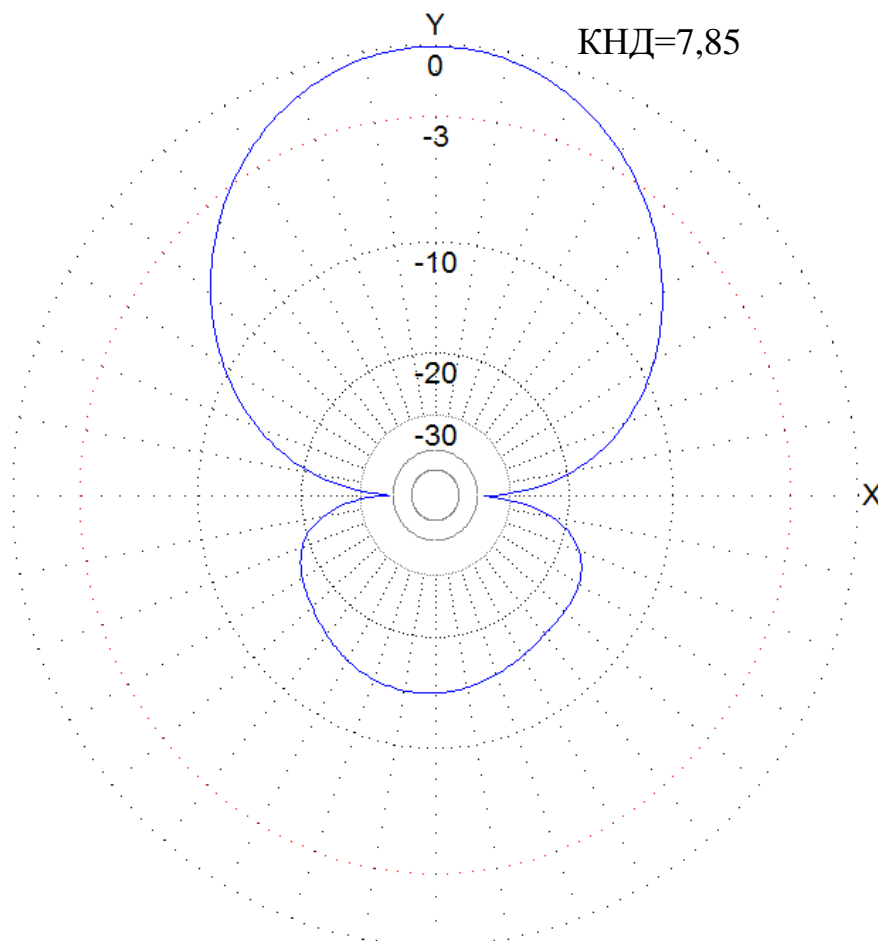


Рисунок 3.43 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  $f = 295 \text{ МГц}$

В більшості широкосмугових антен електродинамічні характеристики різко змінюються за межами робочого діапазону, тому обрані частоти досліджень повинні лежати в межах  $280..300 \text{ МГц}$ ,  $3000..3200 \text{ МГц}$ .

Оберемо частоти для досліджень:

$$f'_2 = 280 \text{ МГц};$$

$$f'_3 = 290 \text{ МГц};$$

$$f'_4 = 3100 \text{ МГц};$$

$$f'_5 = 3200 \text{ МГц}.$$

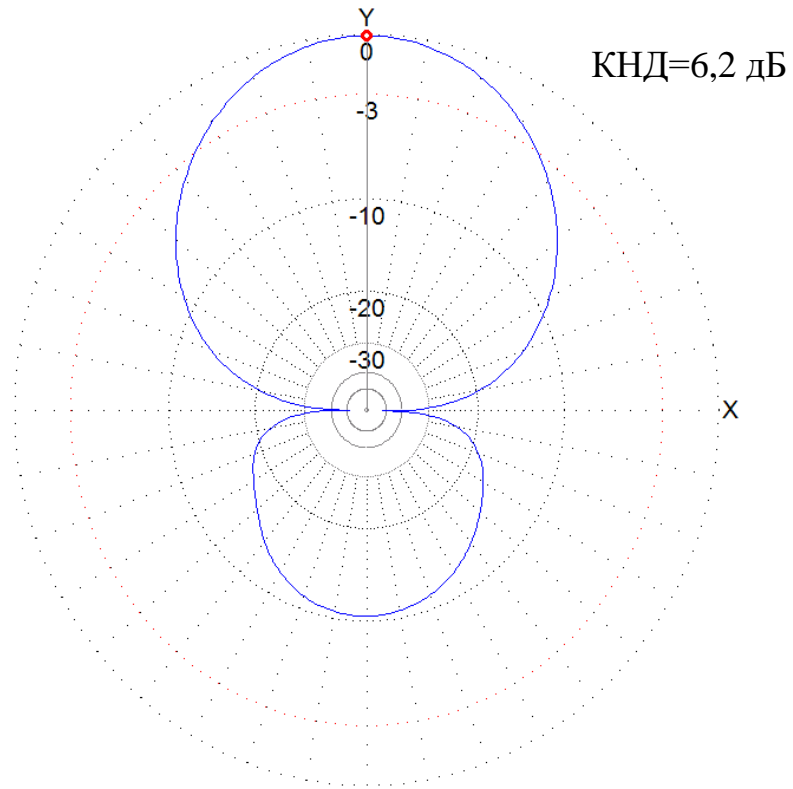


Рисунок 3.44 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при

$$f = 290 \text{ МГц}$$

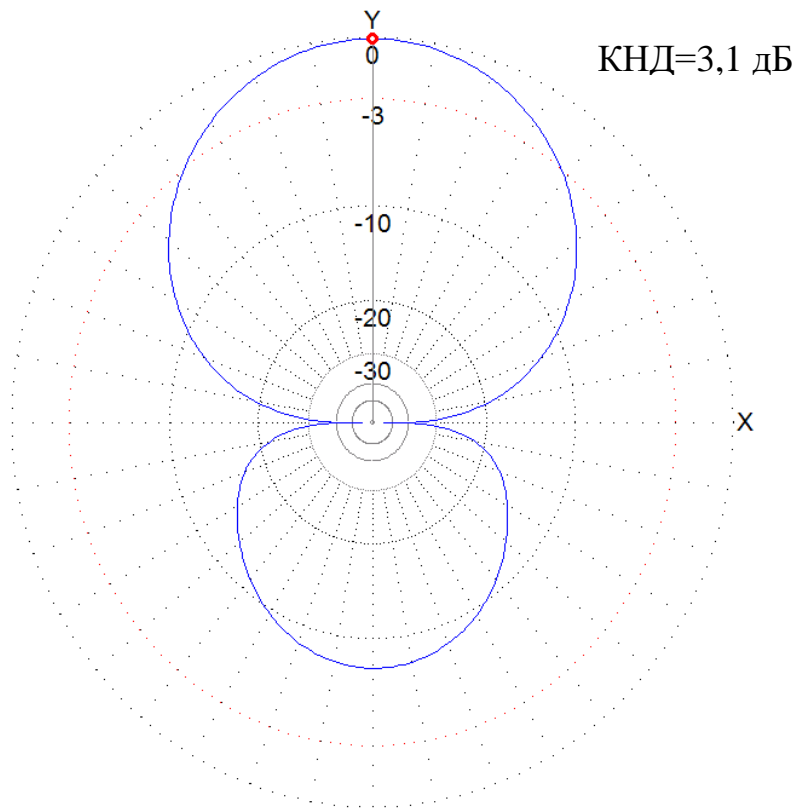


Рисунок 3.45 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при

$$f = 280 \text{ МГц}$$

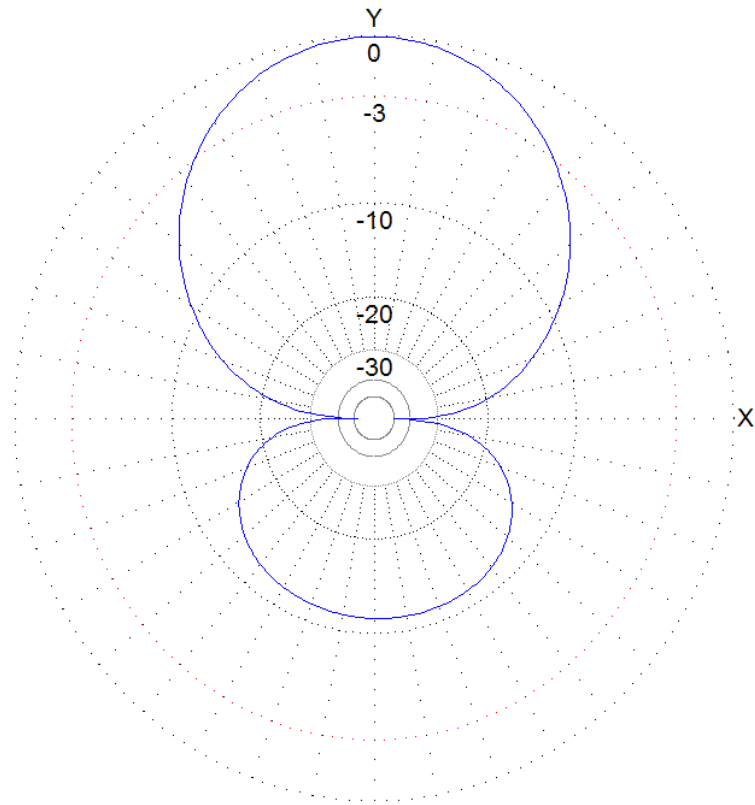


Рисунок 3.46 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  
 $f = 3100 \text{ МГц}$

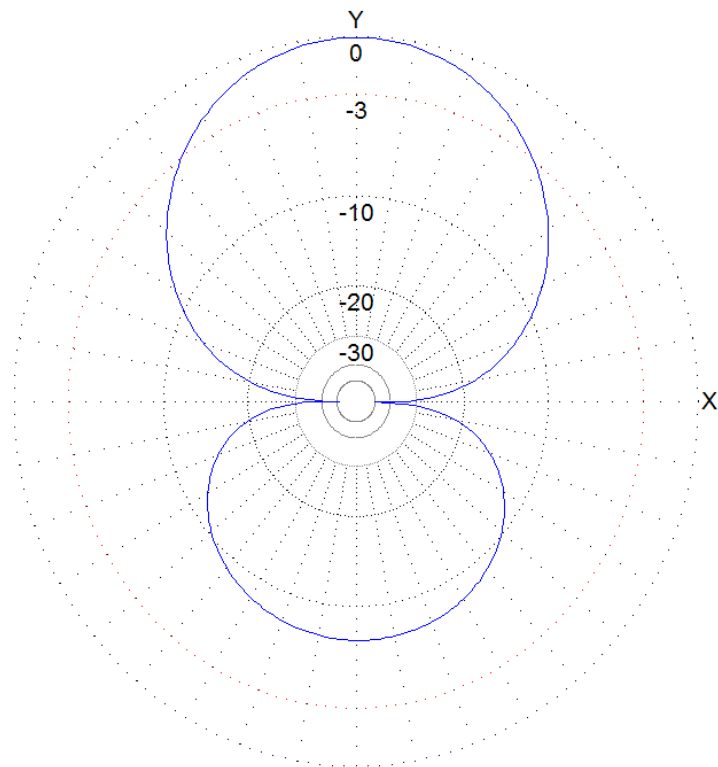


Рисунок 3.47 – ДС в площині вектора напруженості електричного поля при  
 $f = 3100 \text{ МГц}$

Отже, за межами діапазону КСД різко падає, збільшується випромінювання в зворотній бік та у верхню півсферу.

### 3.4 Порівняння діаграм спрямованості антени на різних частотах

Виконаємо автоматичне порівняння ДС.

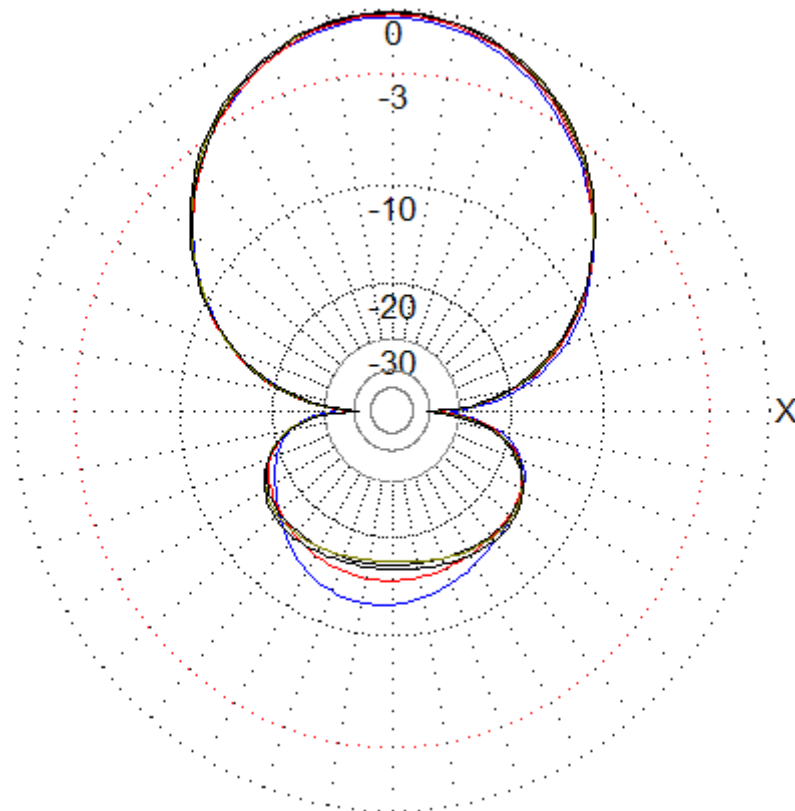


Рисунок 3.48 – Порівняння діаграм спрямованості в межах діапазону

На рис. 3.48 показані діаграми спрямованості на різних частотах. Очевидно, що форма головної пелюстки діаграми спрямованості майже не залежить від частоти (КСД в напрямку осі антени коливається в межах від 8,7 до 8,8 дБ). Форма задньої пелюстки суттєвого значення не має, проте й вона змінюється лише на краях робочого діапазону антени.

Порівняємо ДС з виходом за межі діапазону (див. рис. 3.48).

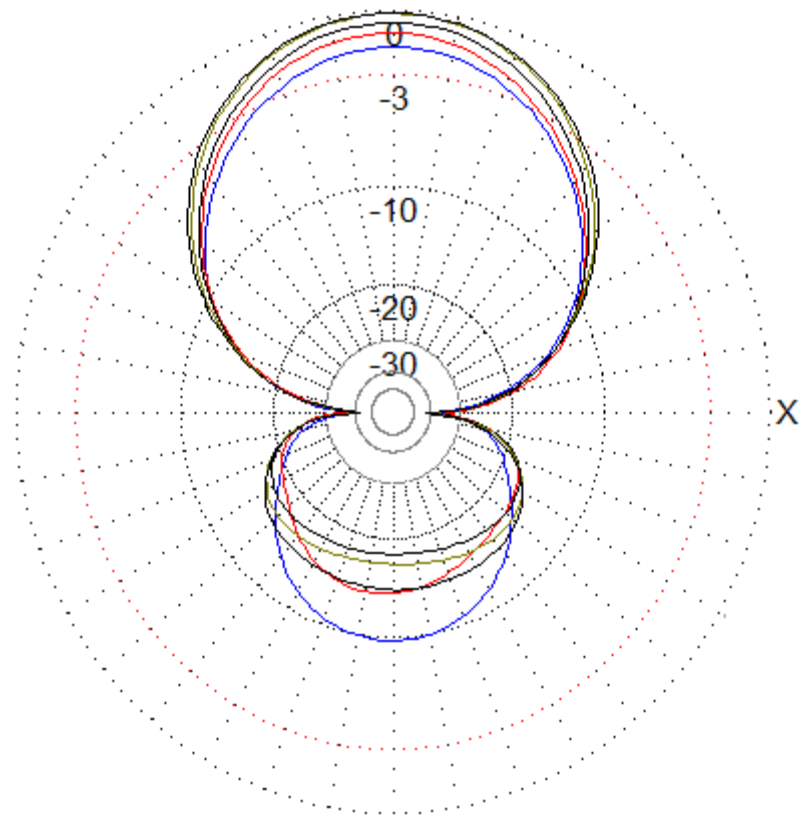


Рисунок 3.49 – Порівняння діаграм спрямованості в межах діапазону

Діаграми спрямованості за межами діапазону не співпадають з рештою.

### 3.5 Дослідження залежності КСХ антени від частоти

Коефіцієнт стоячої хвилі є параметром узгодження антени з фідером. Для визначення його залежності від частоти задамо ширину смуги частот розраховану в п. 1.1 та центральну частоту. Центральна частота буде визначатися за виразом 3.1.

$$f_u = \frac{f_{\max} + f_{\min}}{2}. \quad (3.1)$$

$$f_u = \frac{3000 + 300}{2} = 1650 (\text{МГц}).$$

Отриманий графік КСХ зображений на рис. 3.50.

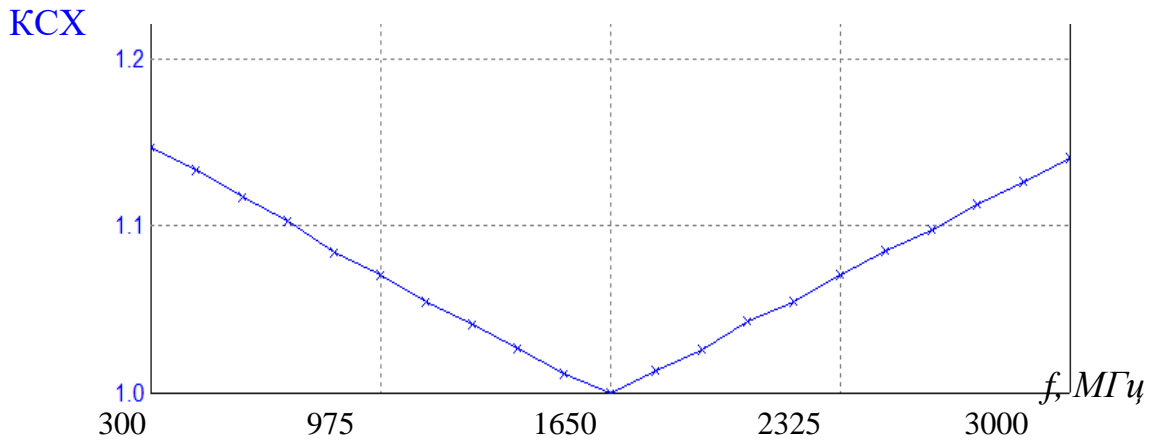
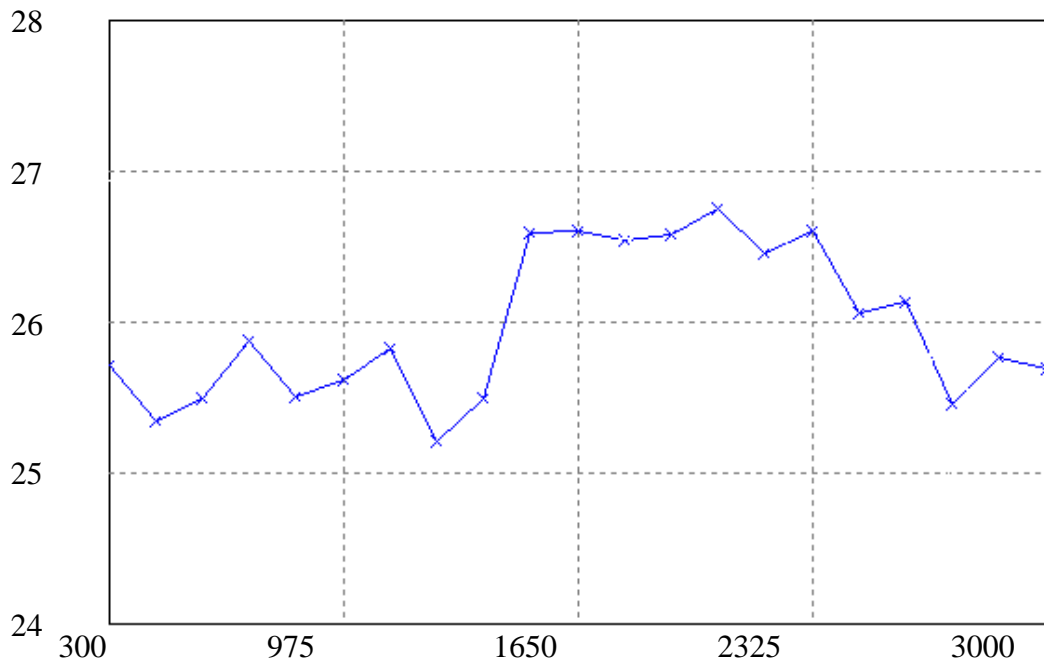


Рисунок 3.50 – Графік залежності КСХ від частоти

Як видно з рис. 3.50,  $КСХ < 1,2$ , тобто не перевищує максимально допустимого КСХ, що заданий в технічному завданні.

### 3.6 Дослідження залежності коефіцієнта підсилення антени від частоти

Рисунок 3.51 – Графік залежності  $G(f)$ 

Дослідимо залежність коефіцієнта підсилення від частоти  $G(f)$  у всьому діапазоні. Коефіцієнт підсилення мало залежить від частоти в робочому діапазоні (див. рис. 3.51).

## 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Магістерська кваліфікаційна робота з розробки та дослідження «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена» відноситься до науково-технічних робіт, які орієнтовані на виведення на ринок (або рішення про виведення науково-технічної розробки на ринок може бути прийнято у процесі проведення самої роботи), тобто коли відбувається так звана комерціалізація науково-технічної розробки. Цей напрямок є пріоритетним, оскільки результатами розробки можуть користуватися інші споживачі, отримуючи при цьому певний економічний ефект. Але для цього потрібно знайти потенційного інвестора, який би взявся за реалізацію цього проекту і переконати його в економічній доцільності такого кроку.

Для наведеного випадку нами мають бути виконані такі етапи робіт:

- 1) проведено комерційний аудит науково-технічної розробки, тобто встановлення її науково-технічного рівня та комерційного потенціалу;
- 2) розраховано витрати на здійснення науково-технічної розробки;
- 3) розрахована економічна ефективність науково-технічної розробки у випадку її впровадження і комерціалізації потенційним інвестором і проведено обґрунтування економічної доцільності комерціалізації потенційним інвестором.

### 4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена» є

оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 4.1 [19].

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
<b>Технічна здійсненність концепції</b>					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
<b>Ринкові переваги (недоліки)</b>					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів



Продовження таблиці 4.1

Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне значне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне значне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військовопромисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років

12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту
----	---	--	---	--	---

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	5	5	5
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	4	4	4
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	4	4	4
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	5	4	5
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	1	1	1
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	1	2	1
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	3	3	3
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	4	4
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	4	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	4	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	4	3
Сума балів	41	42	41
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	41,3		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 4.3 [19].

Таблиця 4.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів СБ , розрахована на основі висновків експе-	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена» становить 41,3 бала, що, відповідно до таблиці 4.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

#### 4.2 Оцінювання рівня новизни розробки

Виводячи на ринок новинку виробник вважає, що тієї новизни, якою наділена нова розробка є достатньо для того, щоб вона була сприйнята споживачем як нова. Але це не завжди так, в силу того, що споживач і виробник неоднозначно визначають її рівень новизни. Тому доцільним є визначення рівня новизни розробки отриманої в результаті досліджень за темою «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена».

Саме визначення рівня і ступеня інтегральної новизни є найбільш актуальним, оскільки її рівень визначає ступінь однакового позитивного сприйняття новизни розробки як виробником, так і споживачем, а отже і ринком в цілому, а це, у свою чергу, є гарантією того, що новинка знайде своє місце на ринку, користуватиметься попитом у споживачів і забезпечить відшкодування витрат, зазнаних товаровиробником під час розроблення та виробництва технічної розробки [20].

Рівень новизни нової продукції розраховуємо експертним методом шляхом протиставлення нової продукції та її аналогів, що існують в даний

час на ринку, за чинниками що визначають її значення, в системі «краще-гірше». Рівень новизни встановлюємо відносно рівня аналога (або продукту, що досить близький до аналога).

Для визначення  $i$ -го виду новизни, застосуємо чинники, які впливають на її рівень. Кожен чинник  $i$ -го виду новизни розраховуємо в балах. Більша кількість набраних балів свідчить про більший рівень новизни. Для оцінювання рівня новизни використаємо думки експертів, які встановлюють визначені бали відповідним чинникам. Бал відповідності проставляється в діапазоні від (-5 – значно гірше аналога до +5 – значно краще аналога). Результати попереднього оцінювання зведемо до відповідного листа оцінювання (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Лист оцінювання рівня новизни експертами

Види та чинники		Бали та експерти		
		Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
<i>1</i>		<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Споживча новизна	Питома вага 0,24	Максимальний бал $B_i$		25
		<i>MAX</i>		
1. Зміна поведінкових звичок споживача		4	4	4
2. Ступінь задоволення потреб і запитів		5	5	5
3. Спосіб задоволення потреби		3	3	4
4. Формування нової потреби		3	3	2
5. Формування нового споживача		0	0	0
Середній бал експертів $B_{i\text{ омп}}$		15		
Товарна новизна	Питома вага 0,202	Максимальний бал $B_i$		30
		<i>MAX</i>		
1. Параметричні зміни показників продукції				
1.1. Якісні		3	4	3
1.2. Технічні		4	4	3
1.3. Економічні		3	3	3
1.4. Сервісні		4	4	4
2. Якість продукції по відношенню до конкурентів		3	3	3
3. Функціональні зміни		3	3	3

Продовження таблиці 4.4

Середній бал експертів $B_{i\text{ отр}}$		20	
Виробнича новизна	Питома вага 0,042	Максимальний бал $B_i$ <i>MAX</i>	25
1. Рівень унікальності товару для підприємства		5	5
2. Рівень унікальності для галузі		3	4
3. Рівень унікальності товару для країни		1	1
4. Зміна виробничої системи		4	4
5. Відносно існуючого асортименту		2	2
Середній бал експертів $B_{i\text{ отр}}$		15	
Прогресивна новизна	Питома вага 0,2	Максимальний бал $B_i$ <i>MAX</i>	25
1. Зміна технології виготовлення		4	4
2. Рівень застосування нових компонентів і матеріалів		1	2
3. Зміна технологічного принципу дії виробу		1	2
4. Зміна конструктивного виконання		3	2
5. Рівень застосування інновацій		2	2
Середній бал експертів $B_{i\text{ отр}}$		11	
Ринкова новизна	Питома вага 0,1	Максимальний бал $B_i$ <i>MAX</i>	20
1. Новий виріб на новому ринку		0	0
2. Новий виріб на відомому ринку		2	2
3. Модернізований виріб		2	2
4. Нова модель		1	2
Середній бал експертів $B_{i\text{ отр}}$		6	
Екологічна новизна	Питома вага 0,035	Максимальний бал $B_i$ <i>MAX</i>	20
1. Рівень екологічної чистоти технології виробництва		5	5
2. Рівень впровадження мало- та безвідходних технологій		5	5
3. Рівень екологічно небезпечних режимів експлуатації продукції		5	5

Продовження таблиці 4.4

4. Рівень забруднення навколишнього середовища		5	5	5
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		20		
Соціальна новизна	Питома вага 0,036	Максимальний бал $B_i$		20
		<i>MAX</i>		
1. Використання нового товару приводить до покращення стану здоров'я нації		0	0	0
2. Використання нового товару приводить до зростання доходів населення		0	0	0
3. Виробництво нового товару приводить до збільшення (зменшення) кількості робочих місць на підприємстві		4	5	4
4. Виробництво нового товару приводить до підвищення кваліфікації персоналу		3	3	3
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		7		
Маркетингова новизна	Питома вага 0,145	Максимальний бал $B_i$		20
		<i>MAX</i>		
1. Нові методи маркетингових досліджень		0	0	0
2. Вживання нових стратегій сегментації ринку		3	3	3
3. Вибір нової маркетингової стратегії обхвату і розвитку цільового сегмента		2	3	2
4. Побудова нових каналів збуту		0	1	1
Середній бал експертів $B_{i\ oмп}$		6		

Значення  $i$ -го виду новизни розрахуємо за формулою [20]

$$I_i = \frac{B_{i\ oмп}}{B_{i\ MAX}}, \quad (4.1)$$

де  $B_{i\ oмп}$  – отримана кількість балів за шкалою оцінок чинників, що визначають  $i$ -й вид новизни;

$B_{i\ MAX}$  – максимальна кількість балів, що може бути отримана за  $i$ -м видом новизни.

Загальний рівень інтегральної новизни розраховуємо шляхом перемноження отриманого значення  $i$ -го виду новизни на її вагомість, причому вагомість  $i$ -го виду новизни визначаємо експертним методом, за формулою [20]

$$N_{int} = \sum_i^n W_i \cdot I_i, \quad (4.2)$$

де  $N_{int}$  – рівень інтегральної (сукупної) новизни;

$W_i$  – вагомість (питома вага)  $i$ -го виду новизни;

$n$  – загальна кількість видів новизни.

$$N_{int} = (0,24 \cdot 15/25) + (0,202 \cdot 20/30) + (0,042 \cdot 15/25) + (0,2 \cdot 11/25) + (0,1 \cdot 6/20) + (0,035 \cdot 20/20) + (0,036 \cdot 7/20) + (0,145 \cdot 6/20) = 0,515.$$

Отримане значення інтегрального рівня новизни зіставляємо зі шкалою, що наведена в табл. 4.5 [19].

Таблиця 4.5 – Рівні новизни нового товару та їхня характеристика

Рівні новизни товару	Значення інтегральної новизни	Характеристика товару	Вид нового товару
Найвища	1,00	Абсолютно новий товар	Новий товар, що наділений ознаками інноваційності (інноваційний товар)
Висока	0,8...0,99	Товар, який не має аналогів	
Значуща	0,6...0,79	Принципова зміна споживчих властивостей товару	
Достатня	0,4...0,59	Принципова технологічна модифікація товару	
Незначна	0,2...0,39	Кардинальна зміна параметрів	Новий товар
Помилкова	0,00...0,19	Малоістотна модифікація	

Згідно таблиці 4.5 розробка відповідає рівню при значенні інтегральної новизни 0,515 - достатня новизна; за характеристикою: принципова технологічна модифікація товару; вид розробки - новий товар, що наділений ознаками інноваційності (інноваційний товар).

### 4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

#### 4.3.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

#### Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ( $Z_o$ ) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [19]

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де  $k$  – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

$M_{ni}$  – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

$t_i$  – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці,  $T_p=24$  дні.



$$Z_o = 12500,00 \cdot 33 / 24 = 17187,50 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник проекту	12500,00	520,83	33	17187,50
Науковий співробітник	11500,00	479,17	24	11500,00
Інженер-розробник теле-комунікаційних мереж	11500,00	479,17	24	11500,00
Інженер-радіотехнік	11500,00	479,17	20	9583,33
Технік	7000,00	291,67	20	5833,33
Всього				55604,17

#### Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ( $Z_p$ ) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена» розраховуємо за формулою

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де  $C_i$  – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

$t_i$  – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду  $C_i$  можна визначити за формулою

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.4)$$

де  $M_M$  – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), приймемо  $M_M=2600,00$  грн; на 01.07.2022 року.

$K_i$  – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [19];

$K_c$  – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

$T_p$  – середнє число робочих днів в місяці, приблизно  $T_p = 24$  дн;

$t_{зм}$  – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 2600,00 \cdot 1,10 \cdot 1,65 / (24 \cdot 8) = 24,58 \text{ (грн.)},$$

$$З_{pl} = 24,58 \cdot 16,00 = 393,25 \text{ (грн.)}.$$

Таблиця 4.7 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Установка обладнання для проведення досліджень	16,00	2	1,10	24,58	393,25
Підготовка робочого місця розробника	8,00	3	1,35	30,16	241,31
Встановлення програмного забезпечення розробки електронних схем	10,00	5	1,70	37,98	379,84
Підготовка бази даних	24,00	3	1,35	30,16	723,94
Монтаж компонентів надширокосмугової логоперіодичної плоскої вібраторної антени	16,00	4	1,50	33,52	536,25
Випробування компонентів експериментальних блоків	6,50	5	1,70	37,98	246,90

## Продовження таблиці 4.7

Налагодження системи	5,00	6	2,00	44,69	223,44
Випробування системи	5,50	3	1,35	30,16	165,90
Технічна підтримка експериментів	12,00	5	1,70	37,98	455,81
Всього					3366,64

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де  $H_{\text{доп}}$  – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доп}} = (55604,17 + 3366,64) \cdot 10 / 100\% = 5897,08 \text{ (грн.)}$$

## 4.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доп}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%}, \quad (4.6)$$

де  $H_{\text{зн}}$  – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (55604,17 + 3366,64 + 5897,08) \cdot 22 / 100\% = 14270,94 \text{ (грн.)}$$

## 4.3.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предме-

ти праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена».

Витрати на матеріали ( $M$ ), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{vj}, \quad (4.7)$$

де  $H_j$  – норма витрат матеріалу  $j$ -го найменування, кг;

$n$  – кількість видів матеріалів;

$C_j$  – вартість матеріалу  $j$ -го найменування, грн/кг;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ );

$B_j$  – маса відходів  $j$ -го найменування, кг;

$C_{vj}$  – вартість відходів  $j$ -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3,00 \cdot 290,00 \cdot 1,1 - 0,000 \cdot 0,00 = 957,00 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Багатофункціональний білий офісний папір Cristal pro80-500 A4	290,00	3,00	0,000	0,00	957,00
Папір для записів Cristal 70 A5-250	150,00	3,00	0,000	0,00	495,00

## Продовження таблиці 4.8

Тека Cristal Office	160,00	2,00	0,000	0,00	352,00
Набір офісний DATUM 300	210,00	3,00	0,000	0,00	693,00
Картридж для принтера HP-5100	2380,00	1,00	0,000	0,00	2618,00
Склотекстоліт СТФ 2 – 1.5 ДЕСТ 102-78	210,00	0,06	0,000	0,00	13,86
Припой ПОС-61 ДЕСТ 21931-86	560,00	0,01	0,000	0,00	6,16
Флюс ФКСП ОСТ	340,00	0,01	0,000	0,00	3,74
Міні-коаксіальний кабель	190,00	0,150	0,000	0,00	31,35
Всього					5170,11

## 4.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі ( $K_6$ ), які використовують при проведенні НДР на тему «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

де  $H_j$  – кількість комплектуючих  $j$ -го виду, шт.;

$C_j$  – покупна ціна комплектуючих  $j$ -го виду, грн;

$K_j$  – коефіцієнт транспортних витрат, ( $K_j = 1,1 \dots 1,15$ ).

$$K_g = 1 \cdot 36,60 \cdot 1,1 = 40,26 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Рефлектор	1	36,60	40,26
Випромінювачі	10	29,60	325,60
Компенсатор	5	30,80	169,40
Трійник	2	15,00	33,00
Погоджуючий трансформатор	2	62,00	136,40
Всього			704,66

#### 4.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{нр.і}} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де  $C_i$  – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{нр.і}}$  – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ( $K_i = 1,10 \dots 1,12$ );

$k$  – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 4350,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 4785,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за оди- ницю, грн	Вартість, грн
Випромінювач частот	1	4350,00	4785,00
Приймач частот	1	2980,00	3278,00
Всього			8063,00

#### 4.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k C_{\text{прог}} \cdot C_{\text{прог}.i} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де  $C_{\text{прог}}$  – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог}.i}$  – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

$K_i$  – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ( $K_i = 1,10 \dots 1,12$ );

$k$  – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 8300,00 \cdot 1 \cdot 1,1 = 9130,00 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ОС Windows	1	8300,00	9130,00
Прикладний пакет Microsoft Office	1	7120,00	7832,00
Пакет Visual System Simulator	1	5250,00	5775,00
Пакет Microwave Office	1	6850,00	7535,00
Пакет Matlab 2020	1	5340,00	5874,00
Всього			36146,00

#### 4.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{в}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де  $Ц_{б}$  – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$  – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{в}$  – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (25350,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 2112,50 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.12.



Таблиця 4.12 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер ПЕОМ	25350,00	2	2	2112,50
Обчислювальний комплекс обробки даних	22450,00	2	2	1870,83
Робоче місце розробника	11500,00	5	2	383,33
Пристрій графічного виводу інформації	8700,00	4	2	362,50
Оргтехніка	8900,00	4	2	370,83
Приміщення лабораторії	289000,00	25	1	963,33
Частотомір цифровий ЧМ-СЦ12	6700,00	4	1	139,58
Генератор еталонної частоти ГЧ-1880	9300,00	4	1	193,75
Всього				6396,67

#### 4.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію ( $B_e$ ) розраховуємо за формулою

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де  $W_{yi}$  – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

$t_i$  – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

$C_e$  – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo  $C_e = 6,12$  грн;

$K_{eni}$  – коефіцієнт, що враховує використання потужності,  $K_{eni} < 1$ ;

$\eta_i$  – коефіцієнт корисної дії обладнання,  $\eta_i < 1$ .

$$V_e = 0,56 \cdot 240,0 \cdot 6,12 \cdot 0,95 / 0,97 = 822,53 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.13.

Таблиця 4.13 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер ПЕОМ	0,56	240,0	822,53
Обчислювальний комплекс обробки даних	0,42	160,0	411,26
Робоче місце розробника	0,16	160,0	156,67
Пристрій графічного виводу інформації	0,32	60,0	117,50
Оргтехніка	0,80	10,0	48,96
Частотомір цифровий ЧМ-СЦ12	0,25	160,0	244,80
Генератор еталонної частоти ГЧ-1880	0,10	160,0	97,92
Випромінювач частот	0,02	60,0	7,34
Приймач частот	0,01	60,0	3,67
Всього			1910,66

#### 4.3.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розроблен-

ням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.14)$$

де  $H_{cv}$  – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo  $H_{cv} = 25\%$ .

$$B_{cv} = (55604,17 + 3366,64) \cdot 25 / 100\% = 14742,70 \text{ (грн.)}$$

4.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де  $H_{cn}$  – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo  $H_{cn} = 40\%$ .

$$B_{cn} = (55604,17 + 3366,64) \cdot 40 / 100\% = 23588,32 \text{ (грн.)}$$

4.3.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$I_s = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{is}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де  $H_{is}$  – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo  $H_{is} = 80\%$ .

$$I_s = (55604,17 + 3366,64) \cdot 80 / 100\% = 47176,65 \text{ (грн.)}$$

#### 4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.17)$$

де  $H_{нзв}$  – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo  $H_{нзв} = 150\%$ .

$$B_{нзв} = (55604,17 + 3366,64) \cdot 150 / 100\% = 88456,22 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Надширококутова логоперіодична плоска вібраторна антена» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{\text{заг}} = Z_o + Z_p + Z_{\text{доо}} + Z_n + M + K_{\text{в}} + B_{\text{снец}} + B_{\text{прз}} + A_{\text{обл}} + B_e + B_{\text{св}} + B_{\text{сп}} + I_{\text{в}} + B_{\text{нзв}}. \quad (4.18)$$

$$B_{\text{заг}} = 55604,17 + 3366,64 + 5897,08 + 14270,93631 + 5170,11 + 704,66 + 8063,00 + 36146,00 + 6396,67 + 1910,66 + 14742,70 + 23588,32 + 47176,65 + 88456,22 = 311493,82 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати  $ZB$  на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{\text{заг}}}{\eta}, \quad (4.19)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo  $\eta=0,9$ .

$$ZB = 311493,82 / 0,9 = 346104,25 \text{ (грн.)}$$

4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів цієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Надширокосмугова лого-періодична плоска вібраторна антена» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

$\Delta N$  – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	600	900	1000	750

$N$  – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, приймемо 2000 осіб;

$C_o$  – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, приймемо 340,00 (грн.);

$\pm\Delta C_o$  – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, приймемо 580,00 (грн.).

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора  $\Delta\Pi_i$  для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [19]

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right), \quad (4.20)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2022 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт  $\lambda = 0,8333$ ;

$\rho$  – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).  
Приймемо  $\rho = 35\%$ ;

$\vartheta$  – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2022 році  $\vartheta = 18\%$ ;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (580,00 \cdot 2000,00 + 920,00 \cdot 600) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 407815,52 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (580,00 \cdot 2000,00 + 920,00 \cdot 1500) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 605053,40 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (580,00 \cdot 2000,00 + 920,00 \cdot 2500) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 824206,60 \text{ (грн.)}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (580,00 \cdot 2000,00 + 920,00 \cdot 3250) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 988571,50 \text{ (грн.)}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків  $ПП$ , що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t}, \quad (4.21)$$

де  $\Delta\Pi_i$  – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

$T$  – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

$\tau$  – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні,  $\tau=0,15$ ;

$t$  – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} ПП &= 407815,52/(1+0,15)^1 + 605053,40/(1+0,15)^2 + 824206,60/(1+0,15)^3 + \\ &+ 988571,50/(1+0,15)^4 = 354622,19 + 457507,30 + 541929,22 + 565218,96 = \\ &= 1919277,67 \text{ (грн.)}. \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій  $PV$ , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ, \quad (4.22)$$

де  $k_{инв}$  – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо  $k_{инв}=1,5$ ;

$ЗВ$  – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 346104,25 (грн.).

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ = 1,5 \cdot 346104,25 = 519156,37 \text{ (грн.)}.$$

Абсолютний економічний ефект  $E_{abc}$  для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме

$$E_{abc} = III - PV \quad (4.23)$$

де  $III$  – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 1919277,67 грн;

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 519156,37 (грн.).

$$E_{abc} = III - PV = 1919277,67 - 519156,37 = 1400121,30 \text{ (грн.)}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_g$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$E_g = T_{жс} \sqrt{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (4.24)$$

де  $E_{abc}$  – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 1400121,30 (грн.);

$PV$  – теперішня вартість початкових інвестицій, 519156,37 (грн.);

$T_{жс}$  – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримання позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_g = T_{жс} \sqrt{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1 = (1 + 1400121,30 / 519156,37)^{1/4} = 0,39.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій  $\tau_{min}$

$$\tau_{min} = d + f, \quad (4.25)$$

де  $d$  – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2022 році в Україні  $d = 0,11$ ;



$f$  – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийmemo 0,25.

$\tau_{\min} = 0,11 + 0,25 = 0,36 < 0,39$  свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій  $E_g$ , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена» доцільно.

Період окупності інвестицій  $T_{ок}$  які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (4.26)$$

де  $E_g$  – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 0,39 = 2,59 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

#### 4.5 Висновки до розділу

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена» становить 41,3 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий).

Також термін окупності становить 2,59 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Надширокосмугова логіперіодична плоска вібраторна антена».

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Умови праці поділяються на чотири класи:

- Оптимальні — взагалі нічого шкідливого на робочих місцях працівників немає.
- Допустимі — скоріше все гаразд.
- Шкідливі — поступово щось шкодить здоров'ю працівника, шкідливі фактори треба усунути.
- Небезпечні — в таких умовах працювати заборонено.

Класи умов праці складаються з таких чинників:

- Шкідливі фактори на робочому місці — сирість, холод, брак світла, пил, постійний шум.
- Ступінь складності виконуваної роботи — тривала робота «на ногах» або робота, пов'язана з підніманням важких предметів.
- Напруженість трудового процесу — робота, яка потребує високої уваги до багатьох сигналів одночасно, чи кропітка, але монотонна робота.

Фізично атестацію робочих місць, як процес, можна проводити або не проводити. Але обидва шляхи потребують документального оформлення.

Розробка конструкції надширокосмугової логоперіодичної плоски вібраторної антени, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, згідно ГОСТ 12.0.003-74 [22], мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

## 5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

### 5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Організація робочого місця – це система заходів щодо його спеціалізації, оснащення необхідними засобами і предметами праці, їхнього розміщення на робочому місці, його зовнішнього оформлення і створення належних умов праці. Конкретний зміст цих заходів визначається характером і спеціалізацією робочого місця, його видом і значенням у виробничому процесі.

Робоче місце працівника складається зі столу, крісла і підніжки, які дають змогу зберігати раціональну робочу позу впродовж усього робочого дня.

Конструкція робочого столу відповідає сучасним вимогам ергономіки і забезпечує оптимальне розміщення на робочій поверхні використовуваного обладнання (дисплея, клавіатури, принтера) і документів.

Робочий стілець підйомно-поворотний з можливістю регулювання за висотою та кутом нахилу сидіння та спинки. Поверхня сидіння плоска, передній край - заокруглений. Регулювання за кожним із параметрів здійснюється незалежно, легко і надійно фіксується.

Конструкція робочого місця користувача ПК має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками:

- ступні ніг – на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна – в горизонтальній площині;
- передпліччя – вертикально;
- лікті – під кутом 70 – 90 град. до вертикальної площини;
- зап'ястя зігнуті під кутом не більше 20 град. відносно горизонтальної площини,
- нахил голови – 15 – 20 град. відносно вертикальної площини [26].

Розташування екрана ПК забезпечує зручність зорового спостереження у вертикальній площині під кутом +30° до нормальної лінії погляду дослідника.

Висота робочої поверхні столу для ПК знаходиться в межах 680 – 800 мм, а ширина – забезпечує можливість виконання операцій в зоні досяжності моторного поля.

У приміщеннях з персональними комп'ютерами слід щоденно проводити вологе прибирання. Також в цих приміщеннях повинні бути медичні аптечки першої допомоги.

### 5.1.2 Електробезпека приміщення

Лінія електромережі для живлення персональних комп'ютерів, їх периферійних пристроїв (принтер, сканер тощо) в приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів.

Нульовий захисний провід прокладено від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового захисного провідників [27].

Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму тощо.

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників мають спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Конструкція їх має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Необхідно унеможливити з'єднання контактів фазових провідників з контактами нульового захисного провідника. Неприпустимим є підключення комп'ютерів, периферійних при-

строїв до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі – з використанням перехідних пристроїв. Категорія умов з небезпеки електротравматизму – без підвищеної небезпеки [27].

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення;
- 3) систематичне проходження інструктажу з електробезпеки.

## 5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

### 5.2.1 Мікроклімат

На самопочуття та стан здоров'я людини впливає мікроклімат виробничих приміщень, який визначається дією на організм людини температури, вологості, рухомості повітря і теплового випромінювання. Виробничий мікроклімат, як правило, відрізняється значною мінливістю, нерівномірністю по горизонталі та вертикалі, різноманітністю сполучень температури, вологості, рухомості повітря, інтенсивності випромінювання залежно від особливостей технології виробництва, кліматичних особливостей місцевості, конструкцій споруд, організації повітрообміну із зовнішнім середовищем.

Робота розробника надширокосмугової логоперіодичної плоски вібраторної антени відноситься до категорії легких робіт Ia. В табл. 5.1. наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Забезпечення допустимих метеорологічних умов праці в приміщенні здійснюється за допомогою системи кондиціонування та регулярного провітрювання.

### 5.2.2 Склад повітря робочої зони

Нормуються шкідливі речовини у повітря робочої зони згідно ДСН 3.3.6.042-99 [25].

Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин для повітря робочої зони під час розробки конструкції мікроконтролерного терморегулятора наведені у табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

Назва речовини	ГДК, мг/м <sup>3</sup>		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Озон	0,16	0,01	1
Вуглекислий газ (CO <sub>2</sub> )	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Шкідливих речовин в повітрі робочої зони не виявлено. Кількість пилу, що наявна в приміщенні, зменшується за допомогою систематичного вологого прибирання.

### 5.2.3 Виробниче освітлення

У приміщенні, де виконуються розробка надширокосмугової логоперіодичної плоски вібраторної антени використовується штучне та природне освітлення.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні, які необхідно за-

безпечити під час виконання роботи зазначені у табл. 5.4 (відповідно ДБН В.2.5-28-2006 [23]).

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнюванн я	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, Лк		КПО, %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	Світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення передбачені такі заходи:

1. Відносно вікон робоче місце розміщене так, щоб природне світло було з лівого боку.
2. Робоче місце дослідника, обладнане ПК розташоване так, щоб уникнути попадання в очі прямого світла.
3. Джерела штучного світла розташовані з обох сторін від екрану паралельно напрямку зору.
4. Щоб уникнути світових блисків від екрану, клавіатури, освітлювальних пристроїв, сонця в напрямку очей необхідно застосовувати антиблискові сітки, спеціальні фільтри для екрану, захисні козирки, жалюзі на вікнах.



5. Вікна приміщень повинні мати регульовальні пристрої для відкривання.

#### 5.2.4 Виробничий шум та вібрації

У робочому приміщенні мають місце шуми механічного і аеродинамічного походження, широкосмугові із аперіодичним підсиленням при роботі принтерів.

Допустимі рівні звукового тиску та рівні звуку  $L_A$  під час роботи згідно з вимогами ДСН 3.3.6.037-99 [24] наведені у табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні передбачено використання відповідних склопакетів та пасивного охолодження ПК. Виробничих вібрацій не виявлено.

#### 5.2.5 Виробничі випромінювання

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини залежить від діапазону частот, інтенсивності впливу відповідних чинників, тривалості опромінення, характеру випромінювання, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яка опромінюється, та індивідуальних особливостей організму.

Під час проведення досліджень на ПК на працівника діє електромагнітне випромінювання (ЕМВ), що створюється ПК. Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – 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 гігієнічнообґрунтованих режимів праці та відпочинку, зменшення часу перебування у зоні опромінення.

#### 5.2.6 Пожежна безпека

Основними чинниками пожеж на виробництві є: порушення технологічного режиму роботи обладнання; несправність електроустаткування; погана підготовка обладнання до ремонту; самозаймання деяких матеріалів і речовин тощо

З метою досягнення нормативного рівня безпеки в Україні створено систему пожежної безпеки, яка включає:

- систему протипожежного захисту;
- систему передбачення пожежі.

В приміщенні, де виконувалася робота використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, тому за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д». Пожежну небезпеку несуть у собі лише кабельні електропроводки до обладнання, що є припустимим для даної категорії приміщень [31].

За вогнестійкістю приміщення відноситься до другої категорії згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [31]. Робоча зона дослідника відноситься до класу вибухонебезпечності В-Па та пожежонебезпечності П-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

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.

В цілому приміщення по категорії вибухо- і пожежонебезпечності та ступеню вогнестійкості відповідає нормам, але особливу увагу потрібно звернути на утримання в справному стані засобів протипожежного захисту та своєчасне інформування пожежної охорони про несправність пожежної техніки, впровадження систем протипожежного захисту.

## ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської кваліфікаційної роботи розроблено класичну логоперіодичну плоску вібраторну антену, що працює в дециметровому діапазоні.

В результаті досліджень були отримані результати, що доводять відносно малі зміни електродинамічних характеристик ЛПВА (коефіцієнта стоячої хвилі, коефіцієнта спрямованої дії, діаграми спрямованості та коефіцієнта підсилення антени) при зміні частоти всередині робочого діапазону. Тобто антена може працювати на будь-якій з номінальних частот.

Зміна діаграми спрямованості залежить від висоти розташування антени і від частоти (довжини хвилі). Тому при встановленні антени потрібно обрати оптимальну висоту розташування, на якій буде забезпечуватись необхідний коефіцієнт спрямованої дії вздовж осі чи при заданих зенітних кутах на будь-якій з робочих частот. При використанні ЛПВА для дуплексного зв'язку може бути достатньо забезпечення КСД лише на двох частотах.

Дана антена може бути використана здебільшого як передавальна, наприклад, для дециметрових каналів телебачення або в обладнанні спеціального призначення для радіоелектронної боротьби. Розроблена антена має великий коефіцієнт підсилення і в більшості випадків можна обійтись без антенного підсилювача. Для забезпечення дуже великих коефіцієнтів спрямованої дії використовують фазовані антенні решітки (ФАР) з ЛПВА.

В економічній частині згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена» становить 41,3 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки високий). Також термін окупності становить 2,59 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

У розділі охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях розглянуто технічні рішення щодо безпечного виконання роботи та організацію робочого місця дослідника. Проаналізовано технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії та досліджено електробезпеку приміщення. Досліджено ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини залежить від діапазону частот, інтенсивності впливу відповідних чинників, тривалості опромінення, характеру випромінювання, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яка опромінюється, та індивідуальних особливостей організму.

За темою досліджень автором опубліковано 1 статтю у збірнику тез доповідей Всеукраїнській науково-технічній інтернет-конференції «Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки», 17–18 листопада 2022 року, м. Вінниця, Вінницькій національний технічний університет.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Патент на корисну модель України 1922 по класу H01Q11/20. Логоперіодична антена / Кірік І. О., Клікман В. Г., Ржендзицький А. В. // Заявл. 23.04.2003, номер заявки у 2003043724. Опубл. 15.07.2003, Бюл. №7. – 6 с.
2. Патент на винахід України 88880 по класу МПК (2009) H01Q 11/00. Логоперіодична антена / Овсяніков В. В., Овсяніков В. В. // Заявл. 10.04.2006, номер заявки а200603967. Опубл. 10.12.2009, Бюл.№ 23. – 6 с.
3. Патент на корисну модель України 93490 по класу МПК 2006.01 H01Q 21/22. Логоперіодична антена з частотним скануванням / Ковальчук Д. А., Щекатурін А. А. // Заявл. 07.02.2014, номер заявки у 2014 01208. Опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19. – 4 с.
4. Патент на корисну модель України 113095 по класу МПК 2006.01 G01S 7/03. Складана логоперіодична вібраторна антена / Слюсарчук О. О., Стейскал А. Б., Мороз М. В. // Дата подання заявки 05.07.2016, номер заявки у 2016 07282. Опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 6 с.
5. Патент на корисну модель України 144434 по класу МПК 2006.01 G01S 7/03. Двodiaпазонна широкопasmугова логоперіодична вібраторна антена / Слюсарчук О. О., Руденко В. В., Мороз М. В., Поліський О. М. // Дата подання заявки 26.05.2020, номер заявки: у 2020 03177. Опубл. 25.09.2020, Бюл. № 18. – 6 с.
6. Семенов А.О., Шутило М.А., Луцький Є.Ф., Зубарев О.В. Дослідження впливу поверхні землі на спрямовані властивості пасивних логоперіодичних антен цифрового телебачення стандартів DVB-T і DVB-T2. Збірник тез доповідей II міжнародної конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», 29-31 жовтня 2013 року, Вінниця. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – С. 206-208. Петров Б.М. и др. Логопериодические вибраторные антенны. Учебное пособие для вузов. М: Горячая линия – телеком, 2005. 239 с.

7. Айзенберг Г.З., Белоусов С.П., Журбенко Э.М. Коротковолновые антенны. М: Радио и связь, 1985. 328 с .
8. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. М: Радио и связь. 2000. 559 с.
9. Вычислительные методы в электродинамике / Под редакцией Р.М. Митры. М: Мир, 1977. 485 с.
10. Верига Б.А., Полухин Г.А., Ушаков Ю.С. Широкодиапазонные фазированные решетки из логопериодических вибраторных антенн. М: Высшая школа, 1982. 232 с.
11. Семенов А.О., Орлов Н.М., Тесля Р.В. Надширокосмугова логоперіодична вібраторна антена. Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції «Актуальні проблеми бойового застосування та експлуатації і ремонту зразків озброєння та військової техніки», 17–18 листопада 2022 року, м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/apozbt/apozbt2022/paper/view/16654>
12. Неганов В.А., Матвеев И.В. Применение сингулярного интегрального уравнения для расчета тонкого электрического вибратора // Письма в ЖТФ, 2000. Т. 27. – Вып. 4. – с. 62 – 71.
13. Неганов В.А., Корнеев М.Г., Матвеев И.В. Новое интегральное уравнение для расчета тонкого электрического вибратора. ДАН. 2000. Т. 371. № 1. С. 36 – 38.
14. Яцкевич В.А., Самусенко А.И. Шлык Н.И. Логопериодические антенны уменьшенных размеров. М: Радио и связь. 1984. 6 с.
15. <http://ru-patent.info/20/45-49/2048696.html>
16. [http://www.gelezo.com/antennas/distance\\_tv\\_receiving.html](http://www.gelezo.com/antennas/distance_tv_receiving.html)
17. Семенов А.О., Матковська К.О., Остапюк А.А. Застосування циліндричних спіральних антен в обладнанні радіотехнічних систем і систем зв'язку. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвячений Дню науки, м. Житомир 15 – 17 травня 2013 року. Житомир : ЖДТУ, 2013. С. 173-174.

18. 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>

19. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.

20. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: **практикум** / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.

21. ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, від 27.12.2001 року №528. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.dnaop.com/html/1709>.

22. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

23. ДБН В.2.5-28-2006. Природне і штучне освітлення. Мінбуд України. К.: 2006

24. 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>

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

26. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. [Електронний ресурс] - Режим доступу: [http://sop.zp.ua/norm\\_npaop\\_0\\_00-7\\_15-18\\_01\\_ua.php](http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php)



27. Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>
28. Про охорону праці. Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ
29. НАПБА.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с
30. ДСТУ 2272:2006 Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять (Пожарная безопасность. Термины и определения основных понятий). URL: [https://ammokote.com/wp-content/uploads/2020/08/DSTU\\_2272\\_2006.pdf](https://ammokote.com/wp-content/uploads/2020/08/DSTU_2272_2006.pdf).
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](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759).

Додаток А  
(обов'язковий)

**ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**  
**НАДШИРОКОСМУГОВА ЛОГОПЕРІОДИЧНА**  
**ПЛОСКА ВІБРАТОРНА АНТЕНА**

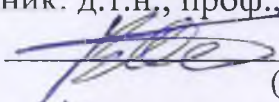
Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-21м  
спеціальності 172 – Телекомунікації та радіо-  
техніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

 Орлов Н. М.

(прізвище та ініціали)

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

 Осадчук В. С.

(прізвище та ініціали)

« 19. » 12 2022 р.

## Приклади логоперіодичної плоскої вібраторної антени

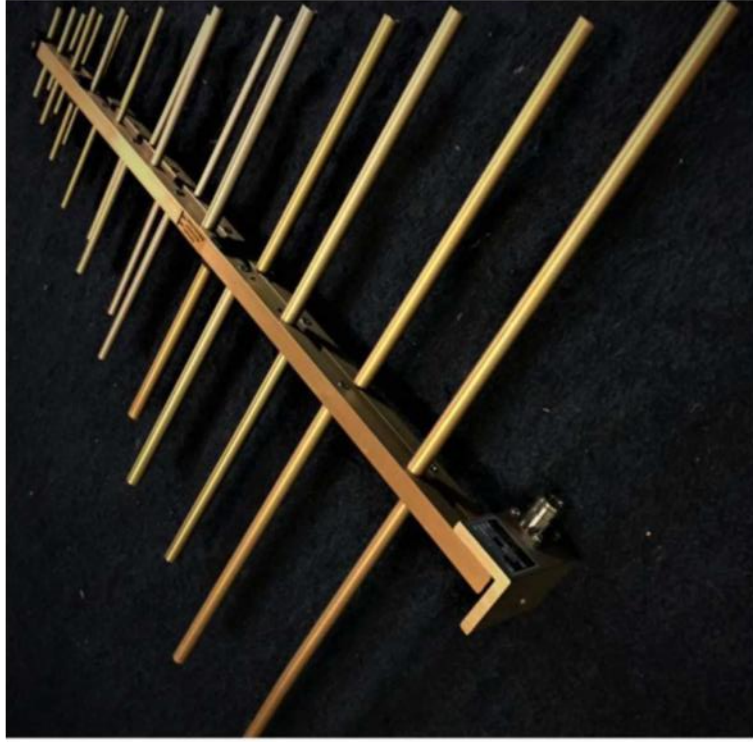


Рисунок 1 – Приклад класичної плоскої логоперіодичної антени



Рисунок 2 – Приклад плоскої вібраторної логоперіодичної антени, модель ALC100 (фірма Com-Power corporation)

# Принцип роботи і конструкція класичної логоперіодичної плоскої вібраторної антени

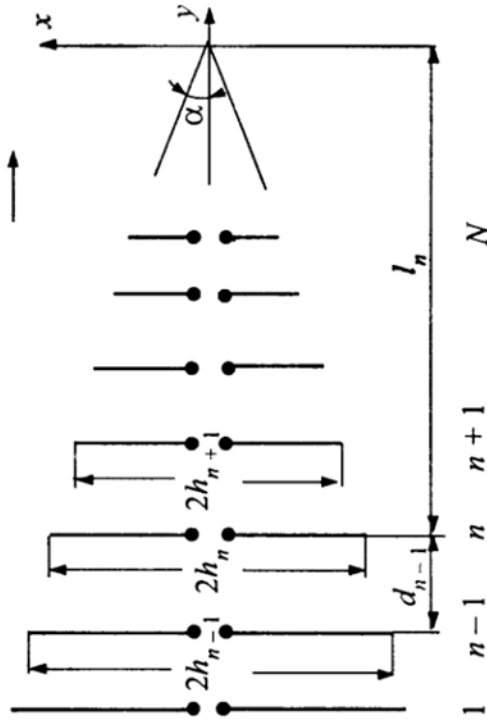


Рисунок 1 – Схема розташування вібраторів в класичній ЛПВА

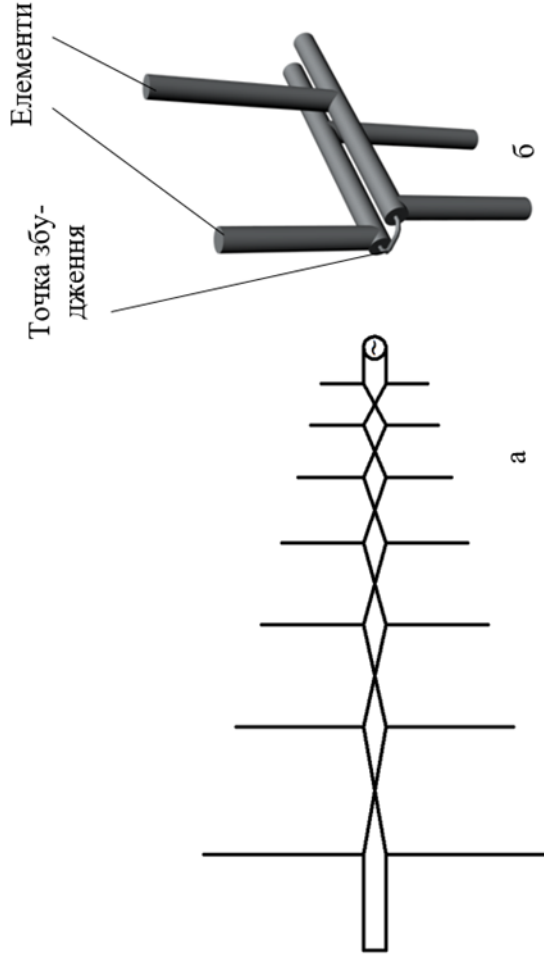


Рисунок 2 – Схеми збудження ЛПВА:  
а – симетричним фідером, б – коаксіальним кабелем

## Еквівалентні схеми пристрою

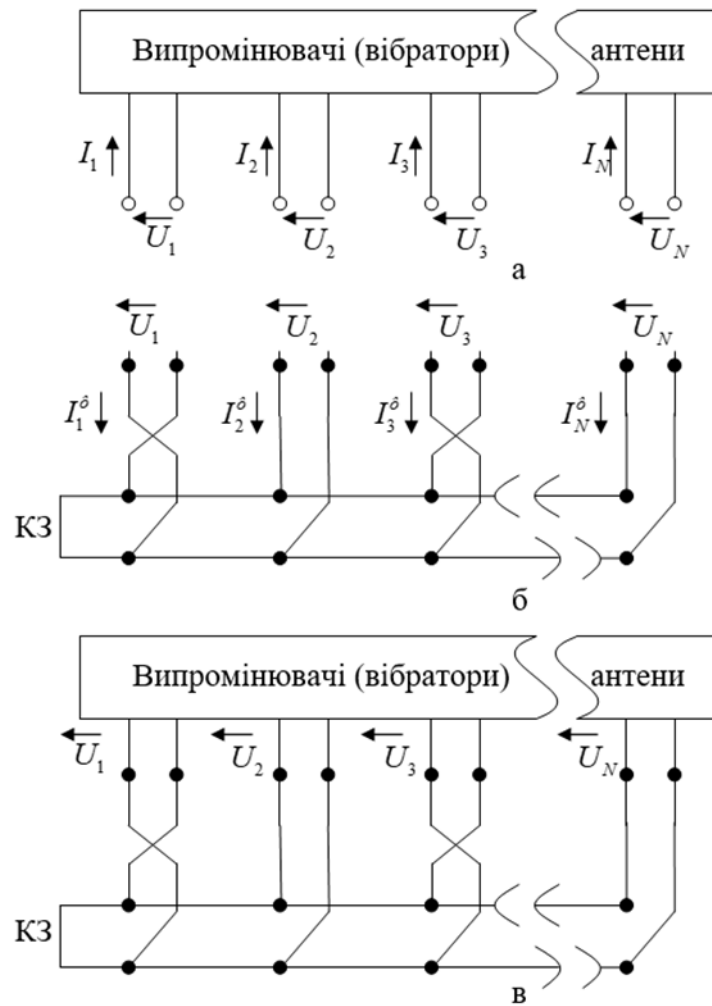


Рисунок 1 – Еквівалентні схеми:

а – багатополіусника фідера, б – багатополіусника вібраторів, в - ЛПВА

## Параметри антени

Мінімальна довжина хвилі (максимальна частота) робочого діапазону $\lambda_{\min}(f_{\max})$	0,1 м (3000 МГц)
Максимальна довжина хвилі (мінімальна частота) робочого діапазону $\lambda_{\max}(f_{\min})$	1 м (300 МГц)
Коефіцієнт перекриття за частотою (за довжиною хвилі) $K_{f(\lambda)}$	10
Ширина смуги робочих частот $\Delta f$	2700 МГц
Кількість елементів структури (вібраторів) $N$	10
Відношення довжини $n+1$ -го вібратора до довжини $n$ -го (період структури) $\tau$	0,774
Кут між лінією, що проходить через кінці вібраторів та віссю антени $\alpha$	16,28°
Відношення відстані між сусідніми вібраторами до резонансної довжини хвилі довшого з них $\sigma$	$193,5 \cdot 10^{-3}$
Довжина плеча першого (найдовшого) симетричного вібратора, що є резонансним на мінімальній частоті робочого діапазону $h_1 = h_{\max}$	0,25 м
Довжина плеча останнього (найкоротшого) симетричного вібратора, що є резонансним на максимальній частоті робочого діапазону $h_{11} = h_{\min}$	0,025 м

## Розрахункові дані для комп'ютерного проектування антени

Провідник	Перша точка			Друга точка			Ра- діус
	x, м	y, м	z, м	x, м	y, м	z, м	
Короткозами- кач	0	0	0	0	0	0,004807	2
Провід фідера 1	0	0	0	0	0,8958	0	2
Провід фідера 2	0	0	0,004807	0	0,8958	0,004807	2
Плече 1 <u>вiбр.</u> 1	0	0,125	0,004807	-0,25	0,125	0,004807	2
Плече 2 <u>вiбр.</u> 1	0	0,125	0	0,25	0,125	0	2
Плече 1 <u>вiбр.</u> 2	0	0,3158	0	-0,1935	0,3158	0	1,548
Плече 2 <u>вiбр.</u> 2	0	0,3158	0,004807	0,1935	0,3158	0,004807	1,548
Плече 1 <u>вiбр.</u> 3	0	0,4683	0,004807	-0,1498	0,4683	0,004807	1,198
Плече 2 <u>вiбр.</u> 3	0	0,4683	0	0,1498	0,4683	0	1,198
Плече 1 <u>вiбр.</u> 4	0	0,5842	0	-0,1159	0,5842	0	0,927
Плече 2 <u>вiбр.</u> 4	0	0,5842	0,004807	0,1159	0,5842	0,004807	0,927
Плече 1 <u>вiбр.</u> 5	0	0,6739	0,004807	-0,0897	0,6739	0,004807	0,718
Плече 2 <u>вiбр.</u> 5	0	0,6739	0	0,0897	0,6739	0	0,718
Плече 1 <u>вiбр.</u> 6	0	0,7433	0	-0,0694	0,7433	0	0,555
Плече 2 <u>вiбр.</u> 6	0	0,7433	0,004807	0,0694	0,7433	0,004807	0,555
Плече 1 <u>вiбр.</u> 7	0	0,7971	0,004807	-0,0538	0,7971	0,004807	0,43
Плече 2 <u>вiбр.</u> 7	0	0,7971	0	0,0538	0,7971	0	0,43
Плече 1 <u>вiбр.</u> 8	0	0,8387	0	-0,0416	0,8387	0	0,333
Плече 2 <u>вiбр.</u> 8	0	0,8387	0,004807	0,0416	0,8387	0,004807	0,333
Плече 1 <u>вiбр.</u> 9	0	0,8709	0,004807	-0,0322	0,8709	0,004807	0,258
Плече 2 <u>вiбр.</u> 9	0	0,8709	0	0,0322	0,8709	0	0,258
Плече 1 <u>вiбр.</u> 10	0	0,8958	0	-0,0249	0,8958	0	0,199
Плече 2 <u>вiбр.</u> 10	0	0,8958	0,004807	0,0249	0,8958	0,004807	0,199



# Введення вхідних даних в програму MMANA-GAL

Геометрія Вид Вичислення **Діаграма направленности**

Имя \_\_\_\_\_ Частота 1650 МГц  в лямбдах

Проводов 23 Автосегментация: DM1 800 DM2 80 SC 2.0 EC 1  Не разрывать

No.	X1(m)	Y1(m)	Z1(m)	X2(m)	Y2(m)	Z2(m)	R(mm)	Seg.
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.004807	2.0	-1
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8958	0.0	2.0	-1
3	0.0	0.0	0.004807	0.0	0.8958	0.004807	2.0	-1
4	0.0	0.125	0.004807	-0.25	0.125	0.004807	2.0	-1
5	0.0	0.125	0.0	0.25	0.125	0.0	2.0	-1
6	0.0	0.3158	0.0	-0.1935	0.3158	0.0	1.548	-1
7	0.0	0.3158	0.004807	0.1935	0.3158	0.004807	1.548	-1
8	0.0	0.4683	0.004807	-0.1498	0.4683	0.004807	1.198	-1
9	0.0	0.4683	0.0	0.1498	0.4683	0.0	1.198	-1

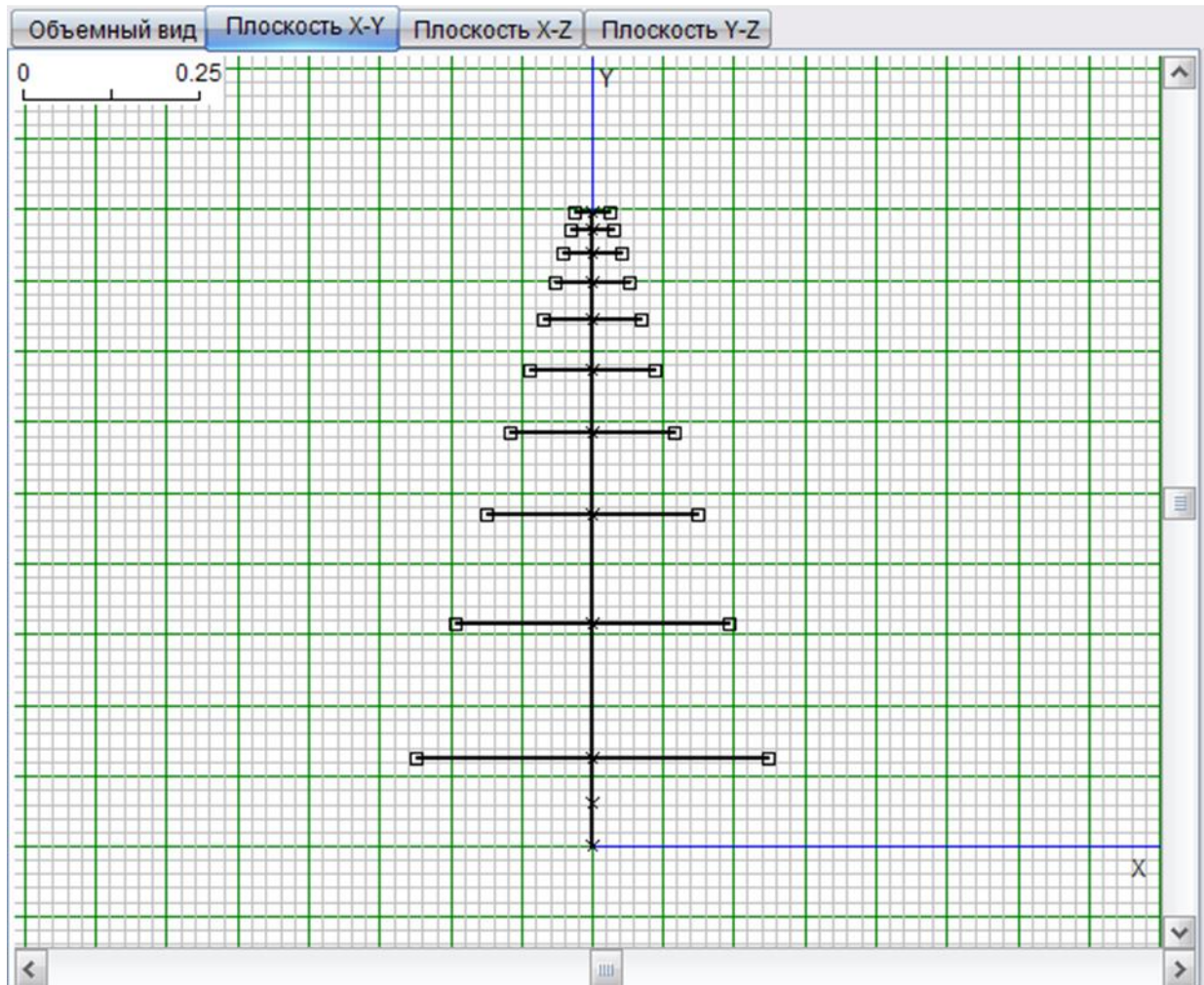
Источников 0  Одинаковые источники Нагрузок 0  Включить нагрузки **Комментарий**

No.	PULSE	Phase dg	Volt. V	No.	PULSE	Типе	L(шH)	C(pF)	Q	F(MHz)
след.				след.						

Рисунок 1 – Поле редагування геометрії



## Горизонтальна проекція антени



## Дослідження розподілу струмів по поверхні антени

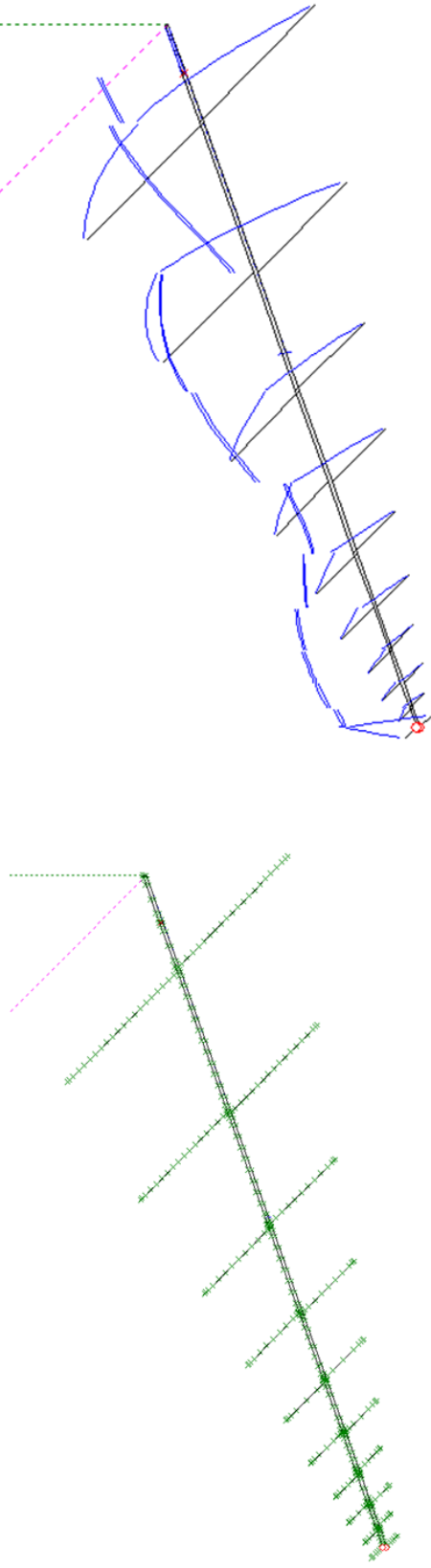


Рисунок 1 – Поділ провідників антени на сегменти

Рисунок 2 – Розподіл струмів на частоті 300 МГц

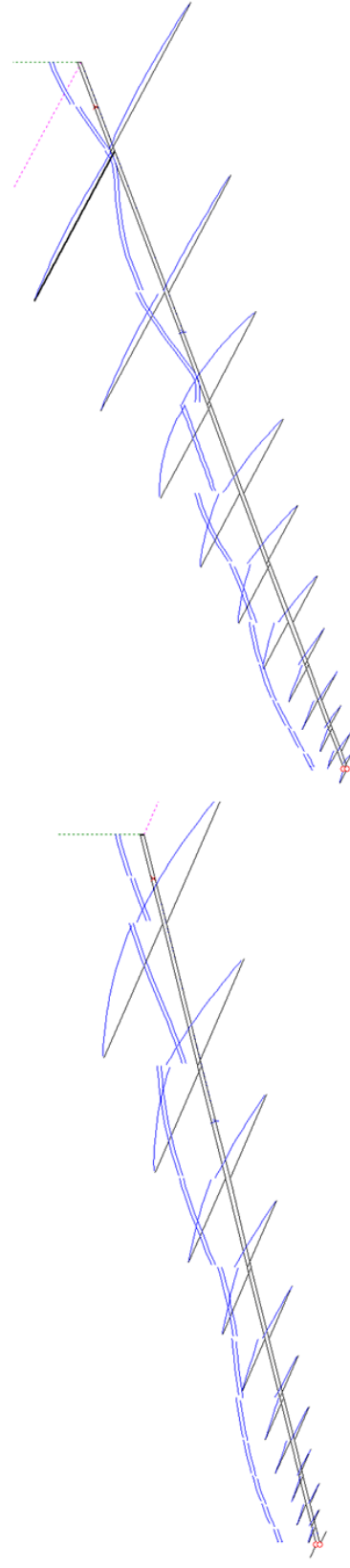
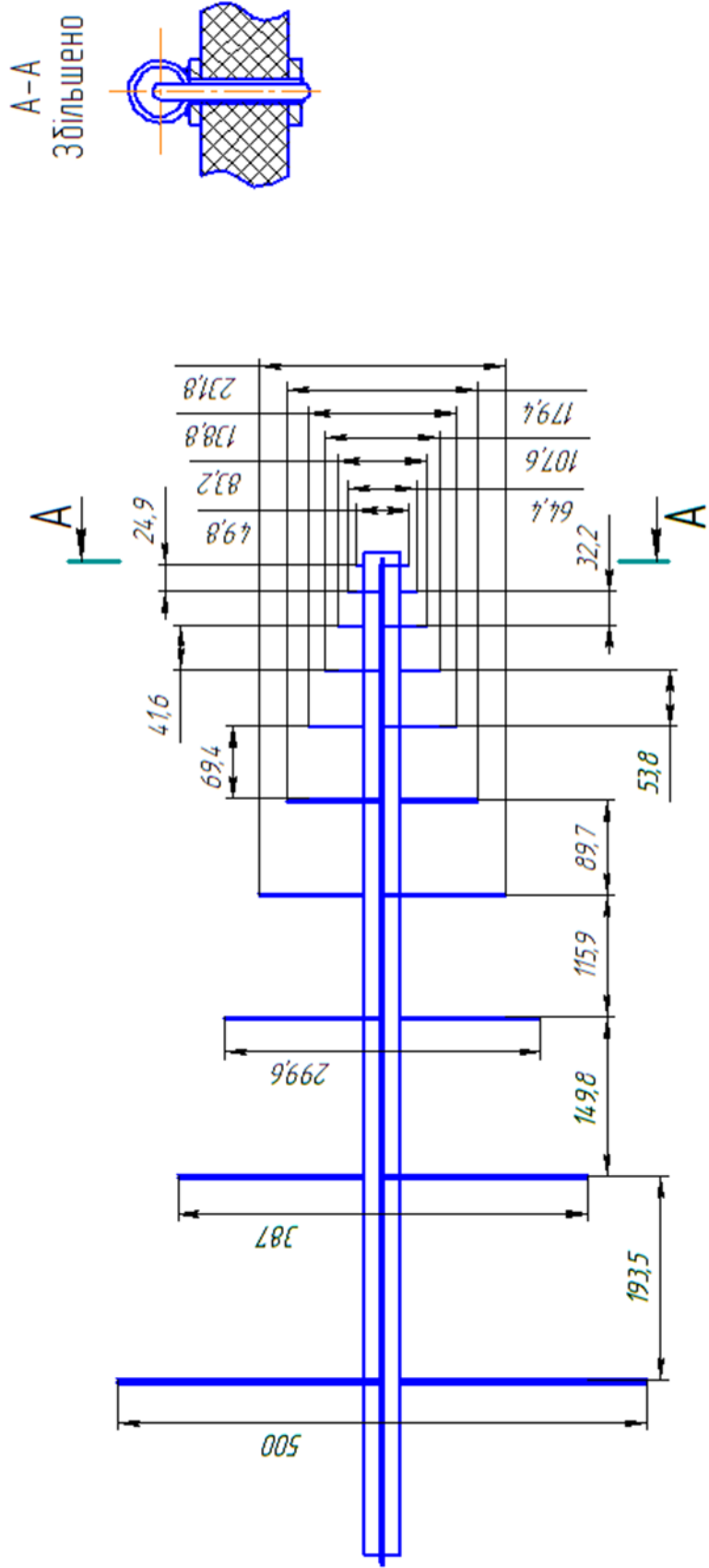


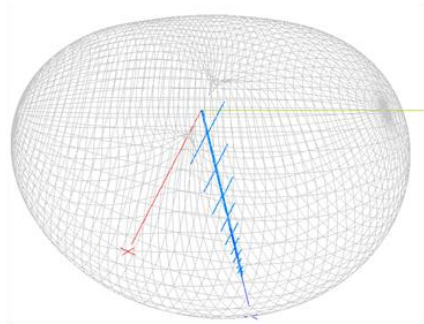
Рисунок 3 – Розподіл струмів на частоті 500 МГц

Рисунок 4 – Розподіл струмів на частоті 900 МГц

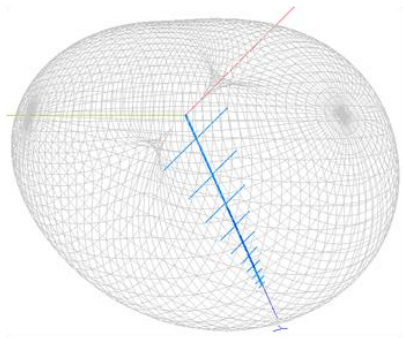
# Конструкція антени



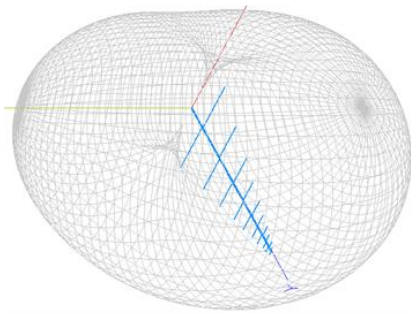
## Діаграма спрямованості антени у вільному просторі на різних частотах



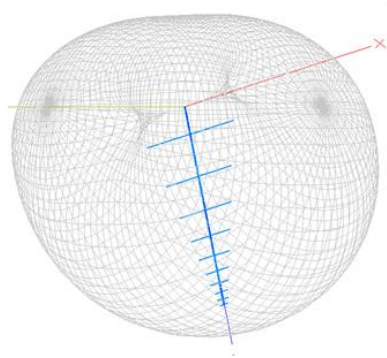
300 МГц



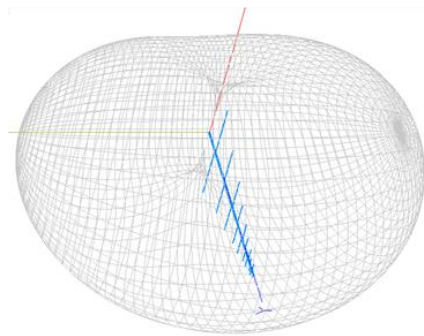
500 МГц



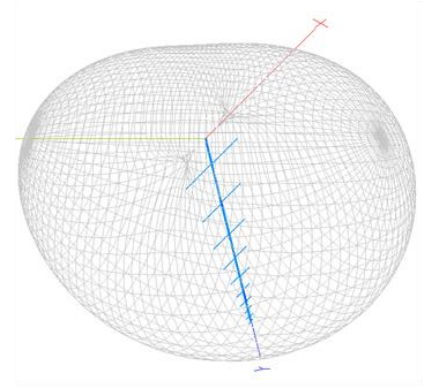
900 МГц



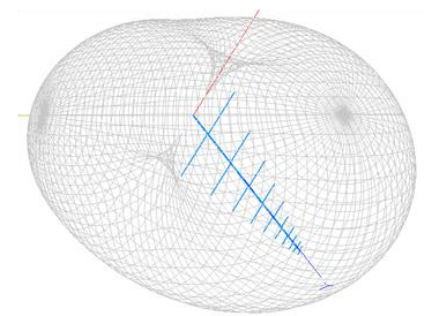
1200 МГц



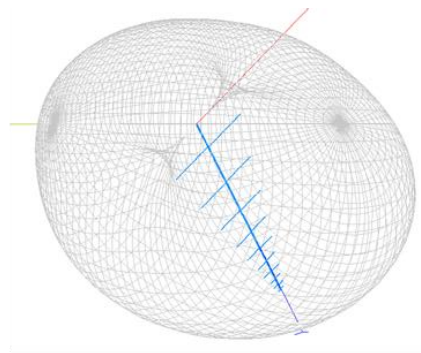
1500 МГц



2100 МГц

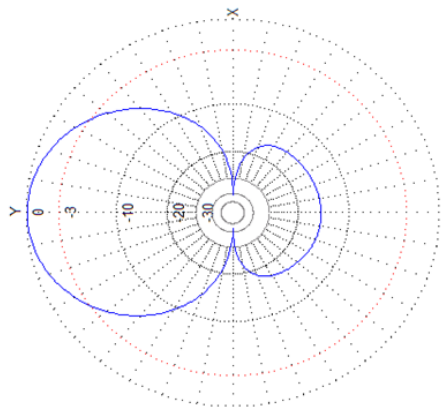


2700 МГц

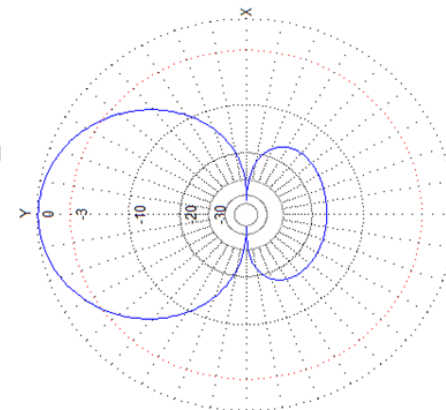


3000 МГц

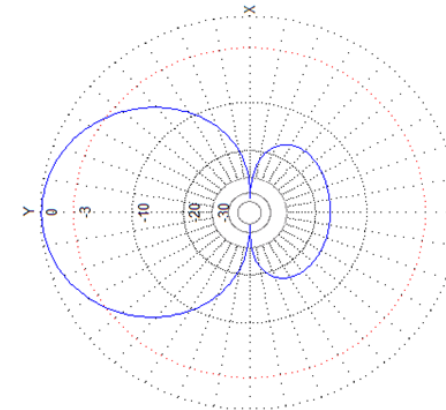
## Діаграма спрямованості антени у вертикальній площині на різних частотах



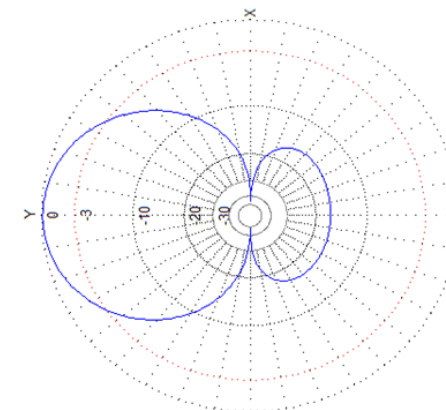
300 МГц



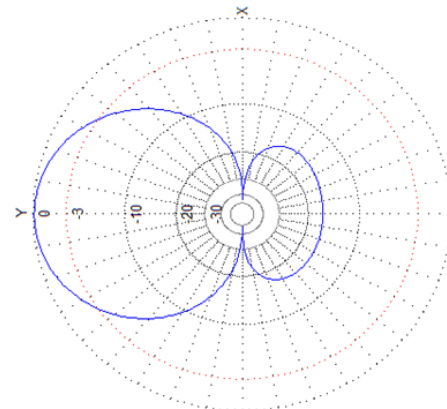
500 МГц



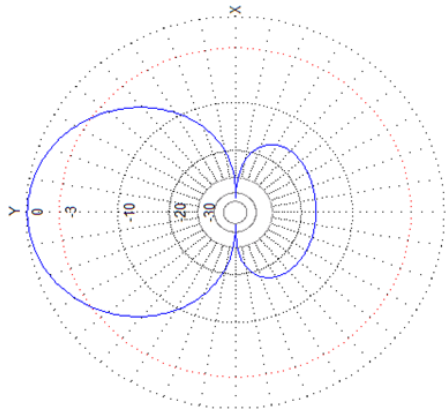
900 МГц



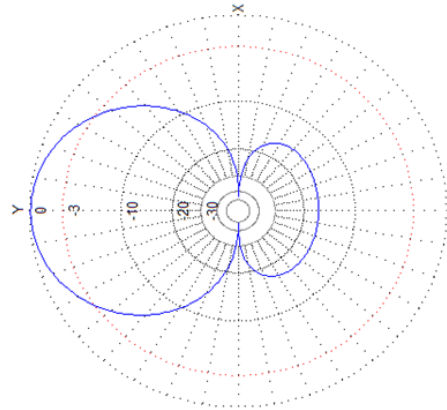
1200 МГц



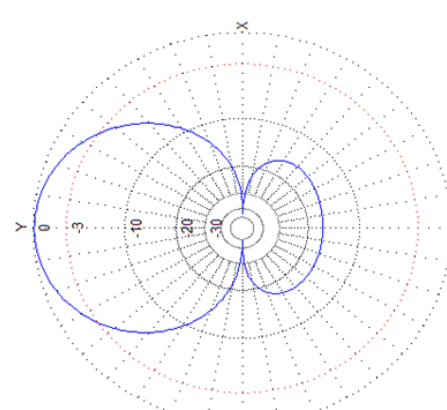
1500 МГц



2100 МГц



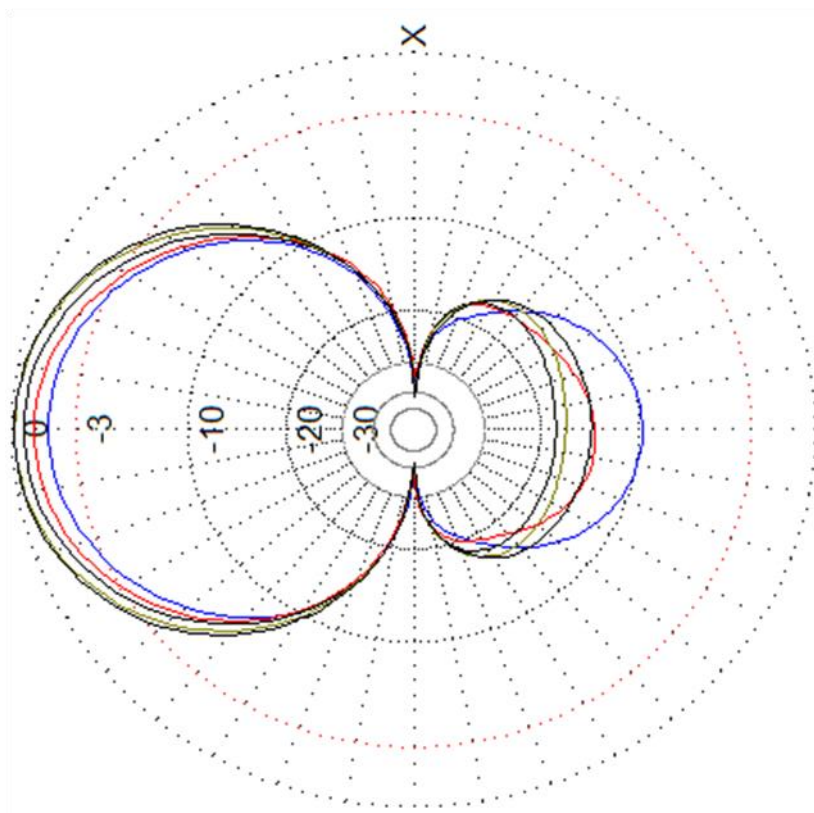
2700 МГц



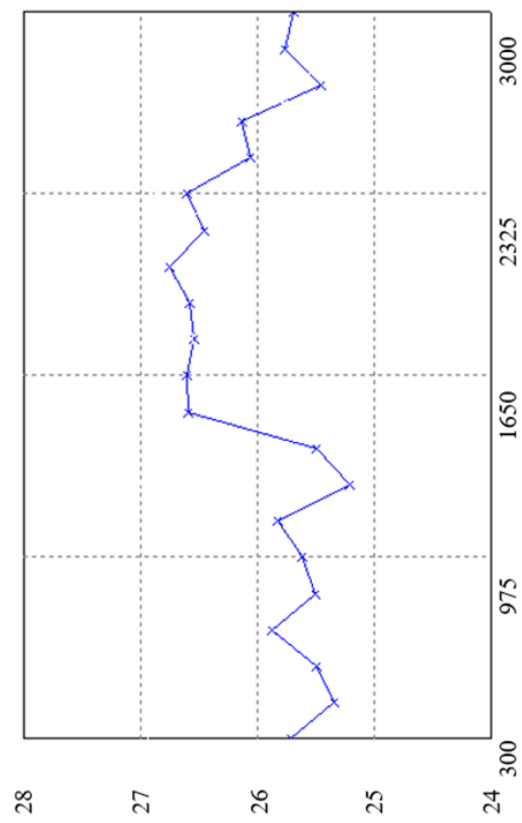
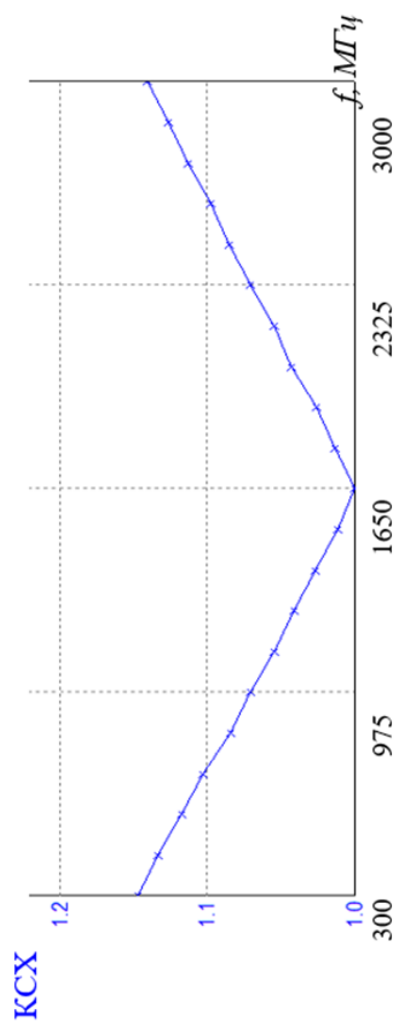
3000 МГц



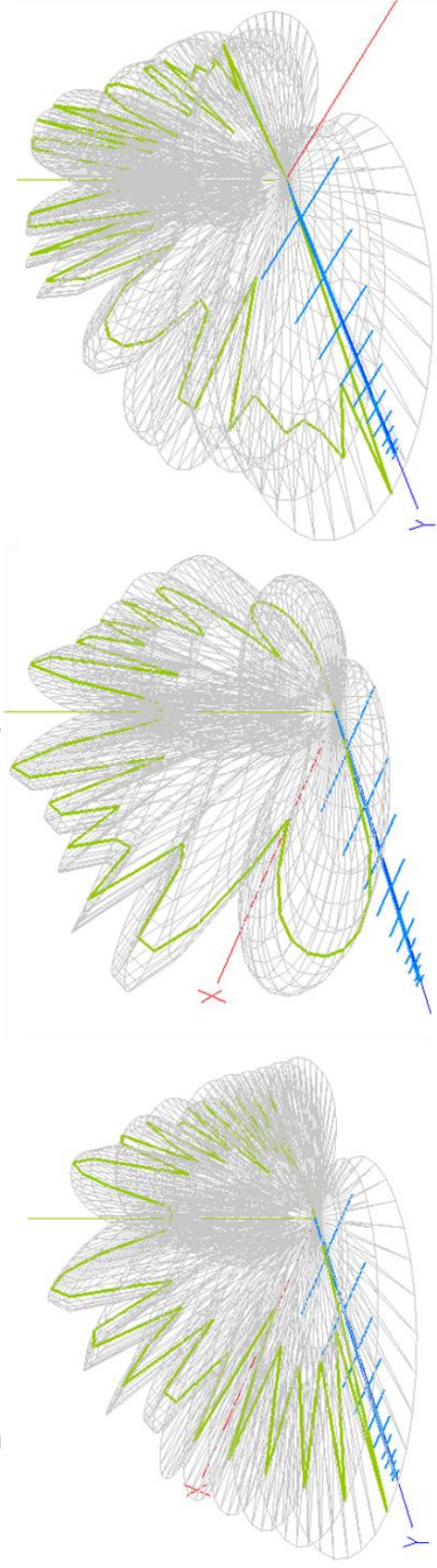
## Порівняння діаграм спрямованості в межах робочого діапазону частот



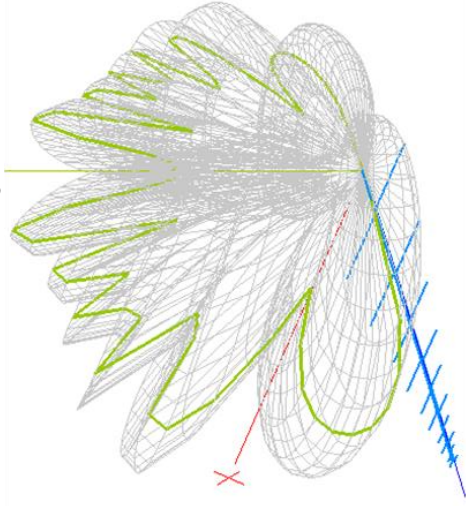
## Дослідження залежності КСХ і КП антени від частоти



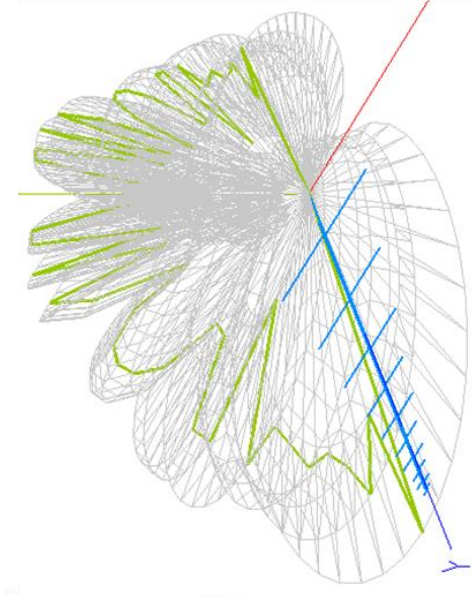
**Дослідження впливу поверхні землі на просторову діаграму спрямованості від висоти підвісу антени на частоті 300 МГц**



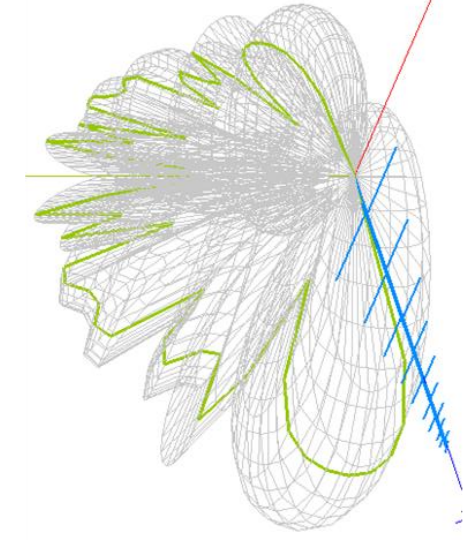
$h = 5$  м



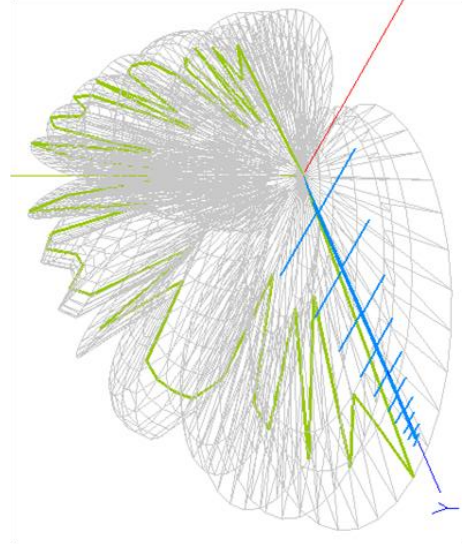
$h = 10$  м



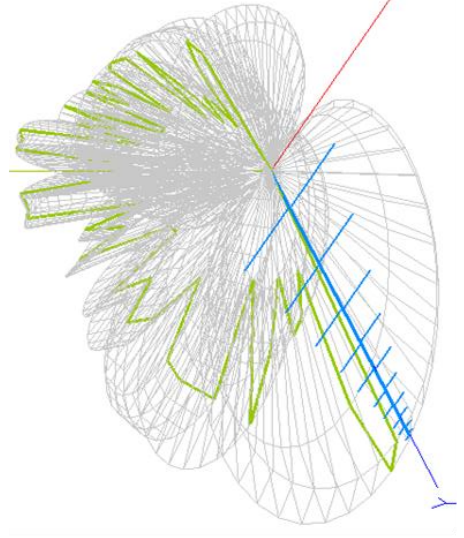
$h = 15$  м



$h = 20$  м



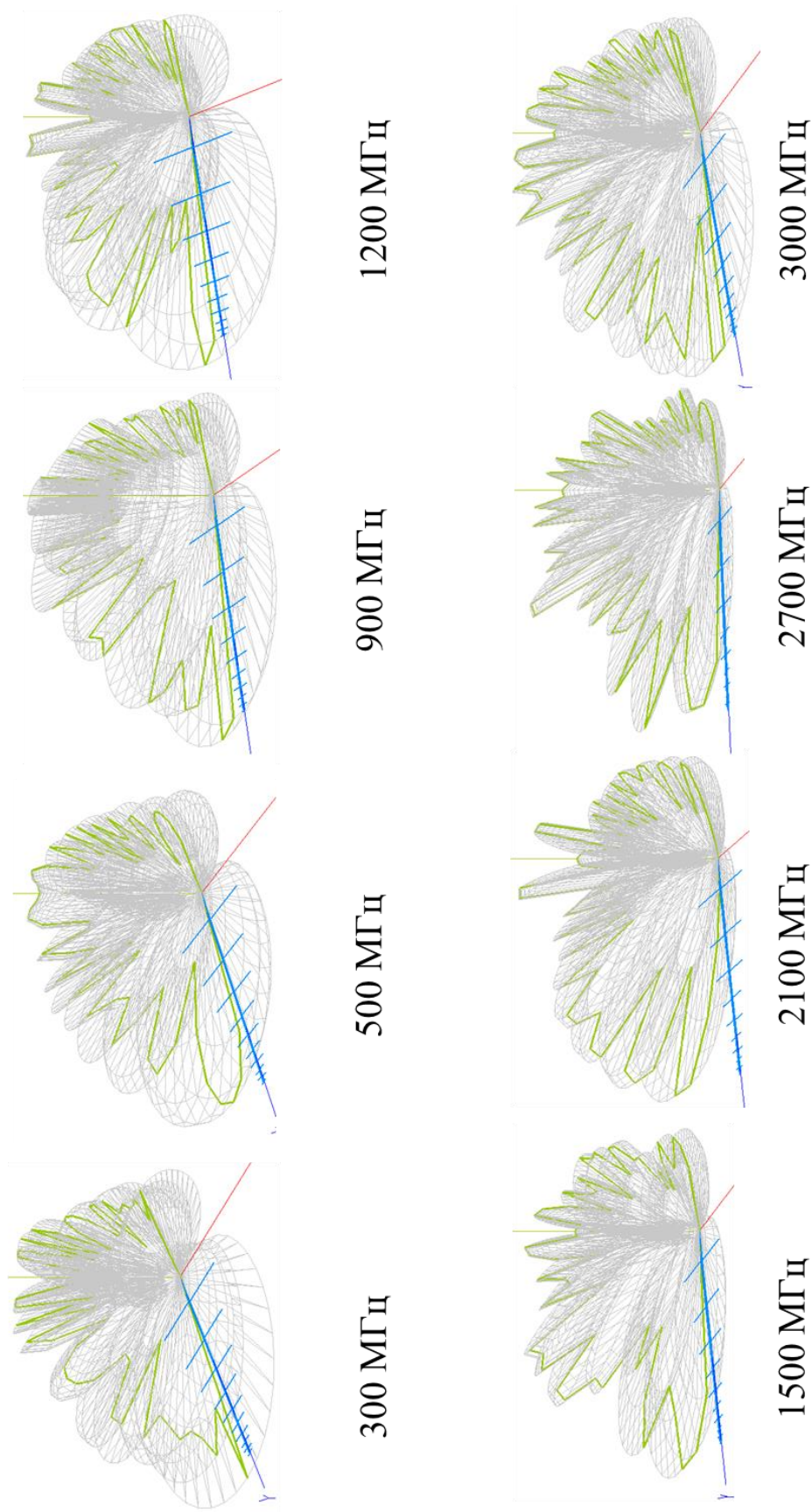
$h = 25$  м



$h = 60$  м



**Дослідження впливу поверхні землі на просторову діаграму спрямованості від частоти підвісу антени 15 м**



Додаток Б  
(обов'язковий)

**ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ**  
**НАДШИРОКОСМУГОВА ЛОГОПЕРІОДИЧНА**  
**ПЛОСКА ВІБРАТОРНА АНТЕНА**

**ПРОТОКОЛ  
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ**

Назва роботи: «Надширокосмугова логоперіодична плоска вібраторна антена»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР. МКР)

Підрозділ кафедра ІРТС  
(кафедра, факультет)

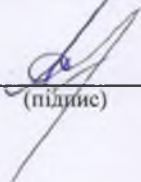
**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність 92,96%      Схожість 7,04%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібно):

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)

Звягін О.С.  
(прізвище, ініціали)

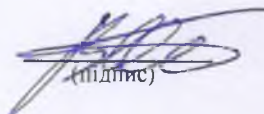
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

  
(підпис)

Орлов Н. М.  
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Осадчук В. С.  
(прізвище, ініціали)