

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

кафедра радіотехнічних систем

(повна назва кафедри)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка конструкції плоскої антени для систем супутникового зв'язку

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РРМ-61  
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

|                   |  |   |
|-------------------|--|---|
|                   | <br>(підпис)  | <u>Сендецький В.Б.</u><br>(прізвище та ініціали)  |
| Керівник          | <br>(підпис)  | <u>Дедів І.Ю.</u><br>(прізвище та ініціали)       |
| Нормоконтроль     | <br>(підпис)  | <u>Хвостівська Л.В.</u><br>(прізвище та ініціали) |
| Завідувач кафедри | <br>(підпис) | <u>Дунець В.Л.</u><br>(прізвище та ініціали)      |
| Рецензент         | <br>(підпис)  | <u>Джуравський В.В.</u><br>(прізвище та ініціали) |

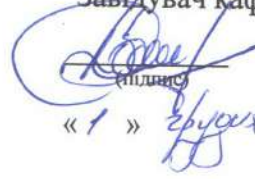
Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри



Дунець В.Л.

(прізвище та ініціали)

« 1 » грудня

2023 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

за здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Гендецькому Владиславу Богдановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка конструкції плоскої антени для систем супутникового зв'язку

Керівник роботи Дедів Ірина Юріївна, к.т.н., доцент

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

Затверджені наказом ректора від « 01 » грудня 2023 року № 4/7-1135

2. Термін подання студентом завершеної роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Технічне завдання, системи супутникового зв'язку

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітична частина

2. Основна частина

3. Науково-дослідна частина

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)


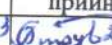

1. Антенні системи супутникового зв'язку

2. Вибір типу антени

3. Конструкція плоскої антени для систем супутникового зв'язку

4. Дискові

## 6. Консультанти розділів роботи

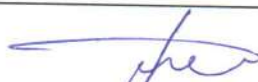
| Розділ  | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата  |   |
|---|---|---|---|
|   |   | завдання видав  | завдання прийняв  |
| Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | Стручок В.С., ст. викл. каф. ОХ           |  |  |
|   | Клепчик В.М., ст. викл. каф. ОХ           |  | 26.12.23  |
|   |   |   |   |
|   |   |   |   |
|   |   |   |   |
|   |   |   |   |
|   |   |   |   |

7. Дата видачі завдання 06 вересня 2023 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


| № з/п | Назва етапів роботи                      | Термін виконання етапів роботи | Примітки |
|-------|--|--------------------------------|----------|
| 1     | Аналіз завдання на кваліфікаційну роботу | 06.09.2023                     | Виконано |
| 2     | Написання розділу 1                      | 05.10.2023                     | Виконано |
| 3     | Написання розділу 2                      | 21.10.2023                     | Виконано |
| 4     | Написання розділу 3                      | 04.10.2023                     | Виконано |
| 5     | Написання розділу 4                      | 18.11.2023                     | Виконано |
| 6     | Попередній захист                        | 15.12.2023                     | Виконано |
| 7     | Захист                                   | 28.12.2023                     | Виконано |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |
|       |  |                                |          |

Студент


  
 (підпис)

 Сендецький Владислав Богданович  
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи


  
 (підпис)

 Дедів Ірина Юріївна  
 (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Розробка конструкції плоскої антени для систем супутникового зв'язку // Кваліфікаційна робота магістра // Сендецький Владислав Богданович // ТНТУ ім. І.Пулюя // Тернопіль, 2023 // с. - 98, рис. - 30, дод. - 1, бібл. - 22.

Ключові слова: ПЛОСКА АНТЕНА, ДИФРАКЦІЙНА РЕШІТКА, МІКРОСМУЖКОВИЙ ЕЛЕМЕНТ.

В роботі проведено розробку конструкції плоскої антени для систем супутникового зв'язку. Проведено аналіз систем супутникового зв'язку, принципів їх роботи та основних складових елементів. Проаналізовано типові конструкції приймальних антен для супутникового зв'язку та додаткових елементів, що при цьому застосовуються. Вибрано за основу проектованої конструкції дзеркальну антену із плоским рефлектором, створену на основі мікросмужкових дифракційних решіток. Проведено моделювання елементів дифракційних решіток, коли більшість елементів центральної області перебуває у майже однакових умовах, і з припущенням, що усі мікросмужкові елементи решітки мають ідеальну провідність.

Спроековано та описано конструкцію антени з плоским рефлектором. Розроблено технологічний процес та проаналізовано основні етапи виготовлення рефлектора методом травлення. Розроблено конструкцію опромінювача.

## ANNOTATION

Development of a planar antenna design for satellite communication systems // Master's qualification work // Sendetsky V.B. //TNTU // Ternopil, 2023 // p. - , tabl. - 30, appl. - 1, bibl. - 12.

Key words: FLAT ANTENNA, DIFFRACTION GRATING, MICROSTRIP ELEMENT.

In the master's thesis, the design of a flat antenna for satellite communication systems was developed. Analysis of satellite communication systems, principles of their operation and main constituent elements was carried out. Typical designs of receiving antennas for satellite communication and additional elements used in this case are analyzed. A mirror antenna with a flat reflector created on the basis of microstrip diffraction gratings was chosen as the basis of the designed design. The simulation of the diffraction grating elements was carried out, when most of the elements of the central region are in almost identical conditions, and with the assumption that all microstrip grating elements have ideal conductivity.

The design of the antenna with a flat reflector is designed and described. The technological process was developed and the main stages of the reflector manufacturing by the etching method were analyzed. The design of the irradiator has been developed.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 8  |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....  | 11 |
| 1.1. Принципи супутникового зв'язку.....                                   | 11 |
| 1.2. Принцип роботи антен супутникового зв'язку.....                       | 16 |
| 1.3. Принцип роботи основних типів елементарних антен.....                 | 23 |
| 1.4. Антени для супутникового зв'язку.....                                 | 27 |
| 1.5. Висновки до розділу 1.....  | 37 |
| РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....   | 38 |
| 2.1. Аналіз прототипів.....  | 38 |
| 2.2. Антена Френеля.....   | 42 |
| 2.3. Доцільність виконання розробки.....                                   | 51 |
| 2.4. Обґрунтування вибору аналога.....                                     | 53 |
| 2.5. Обґрунтування вихідних даних.....                                     | 54 |
| 2.6. Висновки до розділу 2.....  | 56 |
| РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....                                    | 58 |
| 3.1. Моделювання мікросмужкових дифракційних решіток.....                  | 58 |
| 3.2. Додаткові задачі.....   | 63 |
| 3.3. Застосування умови періодичності МСЕ у решітках.....                  | 72 |
| 3.4. Конструкція проекрованої антени.....                                  | 78 |
| 3.5. Аналіз безпеки та надійності антени під час експлуатації.....         | 84 |
| 3.6. Заходи щодо підвищення надійності та забезпечення безпеки антени..... | 87 |
| 3.7. Висновки до розділу 3.....  | 87 |
| РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ<br>СИТУАЦІЯХ.....        | 89 |
| 4.1. Охорона праці.....  | 89 |

|  |    |
|--|----|
|  | 7  |
| 4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях..... | 91 |
| 4.3. Висновки до розділу 4.....            | 95 |
| ВИСНОВКИ.....                              | 96 |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....           | 97 |
| ДОДАТКИ                                    |    |

## ВСТУП

Сьогодні інтенсивно розвивається ринок засобів супутникового зв'язку (СЗ). Щорічне збільшення обсягу виробництва становить понад 30%. Розробка антени для прийому сигналів із штучних супутників землі є найважливішою частиною наземної системи СЗ, що є одним із найбільш складних та дорогих пристроїв, що входять до складу приймальної установки. Тому питанням розробки антен та пошуку оптимальних технологічних рішень при їх виробництві приділяється велика увага.

Сьогодні найбільш поширені параболічні однодзеркальні антени, процес виробництва дзеркальних рефлекторів яких є дуже складний. Але з розвитком технологій дедалі помітніше місце займають плоскі антени, зокрема фазовані антенні решітки, що містять велику кількість випромінювачів. Кожен випромінювач збуджується від окремого фазованого генератора або підсилювача потужності, а також містить окремий керований фазообертач. При цьому вартість таких антен є високою. Одним із способів зниження вартості антеної решітки є застосування оптичної схеми живлення відкритого типу. Найбільш широко відомі решітки з оптичним збудженням випромінювачів, побудовані за аналогією із дзеркальними та лінзовими антенами. Також, в мікросмужкових дифракційних решітках плоский рефлектор повинен при відбиванні сферичної або циліндричної хвилі опромінювача забезпечити вирівнювання фазового фронту. Досягається це запровадженням додаткової фазової затримки в випромінювачах решітки. Таким чином, основним для проектування плоских рефлекторів з дискретних елементів є питання вибору способу реалізації необхідної затримки фази. Застосування мікросмужкових елементів як випромінювачів решітки дозволяє цю проблему вирішити зручнішим способом, шляхом правильного вибору геометрії випромінювача та його конструктивних розмірів. При цьому



особливий інтерес представляють такі дзеркальні антени з інтегральними модулями, що включають випромінювач антеної решітки і керований фазообертач. Відсутність традиційних фазообертачів забезпечує хороші вартісні, технологічні та конструктивні показники.

Таким чином, антени наземних станцій систем зв'язку та радіотелемовлення через штучні супутники землі є складними технічними пристроями. Основні проблеми, що зустрічаються під час створення таких антен, полягають у тому, що необхідно досягти максимально можливого зменшення рівня бічних пелюсток діаграми направленості антени, що досягається вибором відповідної форми та конструкції дзеркал, а також точністю їх виготовлення. Також важливим є підвищення якості антенних систем шляхом збільшення коефіцієнта корисної дії.

В роботі розглядається задача проектування конструкції плоскої антени для систем супутникового зв'язку.

**Метою роботи** є розроблення конструкції плоскої антени для систем СЗ.  
Задачі:

- аналіз принципів супутникового зв'язку;
- аналіз конструкцій антен для супутникового зв'язку;
- аналіз конструкції плоскої антени;
- моделювання роботи плоскої антени та виведення основних розрахункових залежностей;
- проектування конструкції плоскої антени.

*Об'єкт дослідження:* процес проектування плоскої антени для супутникового зв'язку.

*Предмет дослідження:* конструкція плоскої антени.

**Наукова новизна.** Проведено моделювання елементів дифракційних решіток плоскої антени, коли більшість елементів центральної області перебуває у майже однакових умовах, і з припущенням, що усі мікросмушкові елементи

решітки мають ідеальну провідність.

**Практичне значення** полягає в можливості застосування результатів для проектування ефективних плоских антен.

## РОЗДІЛ 1

### АНТЕННІ СИСТЕМИ ДЛЯ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

#### 1.1 Принципи супутникового зв'язку

Перший штучний супутник Землі, оснащений радіоапаратурою, був запущений 1957 року, а 12 серпня 1960 року служби США вивели на орбіту в 1500 км космічний апарат «Ехо-1», що виконував роль пасивного ретранслятора.

Перший активний супутник "Телстар", який транслював одну телепрограму або підтримував двосторонній телефонний зв'язок 60 каналами, був запущений 10 липня 1962 року.

Договір про створення міжнародної організації Intelsat з питань супутникового зв'язку був підписаний 11 країнами 20 серпня 1964 року.

Перший супутник комерційного призначення Early Bird компанії COMSAT, який міг забезпечити вже до 240 каналів зв'язку, був запущений на орбіту 6 квітня 1965 року. Він мав смугу пропускання, що дорівнює 50 МГц, а створений пізніше Intelsat IX - 3456 МГц.

Розвиток супутникових технологій почався з використання простих відбивачів радіосигналу – пасивних ретрансляторів. Подібні супутники, представлені металевими сферами без приймального обладнання, не набули поширення на відміну від сучасних активних ретрансляторів. Останні оснащені спеціальною апаратурою, яка здійснює приймання, обробку, підсилення сигналу з подальшою ретрансляцією.

Ретранслятори поділяються на:

- нерегенеративні. Приймають сигнал наземної станції, змінюють його частоту, потім підсилюють, а потім транслюють іншій наземній станції. Нерегенеративні супутники використовують кілька транспондерів (автономних

каналів), кожен із яких працює з конкретною частиною спектра.

- регенеративні. Додаткова властивість даного виду супутників - демодуляція прийнятого сигналу з наступною новою модуляцією, що забезпечує подвійне виправлення помилок передачі. Контроль здійснюється на супутнику, а потім помилки усуває наземна станція. Мінусами методу – складність та збільшений час затримки сигналу.

Орбіти ретрансляторів. Орбіти для розміщення супутникових ретрансляторів класифікуються як:

1. Екваторіальні (нахил дорівнює  $0^\circ$ ).

Орбіта, де розташовані супутники-ретранслятори, називається геостаціонарною.

Переваги геостаціонарної орбіти:

- обмежена ємність, яка не дозволяє розмістити всі бажані супутники;
- велика висота (35 786 м), що призводить до значних витрат при виведенні на неї супутника, а також затримок при передачі даних;
- неможливість обслуговування супутниками приполярних наземних станцій через падіння щільності потоку потужності в точці прийому сигналу у напрямку від екватора до полюсів.

2. Похилі (нахил, відмінний від  $0^\circ$ )

Дозволяють усунути недоліки, характерні для геостаціонарної орбіти.

3. Полярні (нахил складає  $90^\circ$ )

Граничний варіант похилої орбіти, що передбачає обладнання наземних станцій системами стеження, що застосовуються для наведення антени на супутник та його супровід.

Зони покриття СЗ

Частина наземної поверхні (або зони видимості), яка може забезпечити рівень супутникових сигналів, що необхідний для їх якісного прийому, носить назву зони покриття.

Ця характеристика залежить від кількості, позиції, потужності передачі, діапазону роботи супутників, і навіть діаграми направленості (ДН) транспондерів. Для забезпечення зони безперебійного прийому компанії використовують кілька супутників.

Частоти для СЗ ділять на декілька діапазонів:

С-діапазон

Використовується у фіксованому супутниковому зв'язку з частотою 4-6 ГГц. Забезпечує високу потужність передачі на широких географічних зонах. Приймання вимагає великої кількості додаткового наземного обладнання.

Ku-діапазон

Також застосовується для фіксованого супутникового зв'язку, що працює на частотах 11-14 ГГц. Використовується для менших географічних областей, ніж попередній діапазон, зберігаючи високу потужність передачі без необхідності використання численного стороннього обладнання.

L-діапазон

Частота, з якою проводиться робота в даному діапазоні, становить 1.5 ГГц. Незамінний для рухомого супутникового зв'язку, що використовується на судах, в авіації із застосуванням різних типів наземного обладнання.

Ka-діапазон

Частотний спектр діапазону тягнеться від 26.5 до 40 ГГц. Використовується у системах радіолокації, супутникового зв'язку, дорожніх радарах ДПС. Розділений на три піддіапазони, що визначають поділ Ku-конвертерів за типами.

S-діапазон

Діапазон частот 2-4 ГГц, який застосовується для РЛС, цифрового радіо, супутникових систем зв'язку, мобільних телекомунікацій, підтримки космічних апаратів. Поданий декількома піддіапазонами, що мають відмінності відповідно до регіону мовлення.

X-діапазон

Частотний діапазон займає смугу від 8 ГГц до 12 ГГц. Одна його частина використовується для фіксованого урядового, а також військового супутникового зв'язку, частина зайнята далеким космічним зв'язком. Широко поширений в радіолокації.

#### К-діапазон

Розміщується на частотах від 18 до 26.5 ГГц. Застосовується в радіолокації, супутниковому, військовому зв'язку. Використання діапазону для потреб радіозв'язку обмежене через наявність високого ступеня поглинання радіохвиль водяною парою, що утворюється в атмосфері.

#### Перешкодостійкість та модуляції

Для трансляції даних супутниковим каналом зв'язку потрібним є їх попереднє перетворення в радіосигнал конкретного діапазону частот, для чого застосовується метод модуляції. Останній є процесом зміни параметрів несучого сигналу за допомогою спеціального модулюючого сигналу. Він підсилюється на наземній станції, доводиться до потрібної частоти, а потім надходить до передавальної тарілки. Супутник приймає сигнал, потім підсилює його, змінюючи до необхідної частоти подальшої трансляції на землю.

Перешкодостійкість досягається шляхом використання спеціального коду, що виявляє і коригує помилки. При цьому, під час передачі до корисних даних додається надлишкова інформація, яка структурована спеціальним чином, а при прийомі вона використовується для виявлення та подальшого виправлення помилок.

Множинний доступ. Системи множинного доступу використовуються для забезпечення одночасного застосування супутникового ретранслятора безліччю користувачів.

Існує три види такого доступу:

- з частотним поділом — надання кожному користувачу окремого частотного діапазону;

- з часовим поділом — кожен абонент має певний часовий інтервал, коли здійснюється прийом і передача даних;

- з кодовим поділом — кожному клієнту надається кодова послідовність, що має ортогональність по відношенню до подібних послідовностей інших користувачів. При цьому сигнали інших абонентів на тих самих частотах не заважають один одному.

Супутниковий зв'язок представлений чотирма етапами передачі:

1. Трансляція сигналу на супутник з допомогою наземної станції чи іншого наземного устаткування;
2. Підсилення сигналу та зміна частоти супутником;
3. Зворотна передача сигналу супутником на Землю;
4. Отримання сигналу наземним устаткуванням.

Види супутників для супутникового зв'язку. Існують такі види супутників, представлені трьома типами служб:

- Фіксовані супутникові служби. Застосування наземного обладнання здійснюється у спеціально відведених місцях для приймання та трансляції сигналів. Сателіти FSS підтримують безліч послуг - від міжнародного інтернет-з'єднання до приватних корпоративних мереж.

- Рухомі супутникові служби. Надають послуги зв'язку морським, авіаційним, сухопутним рухомим системам за участю різних приймальних пристроїв.

- Мовні супутникові служби. Забезпечують високу потужність передачі прийому, використовуючи малу кількість наземного устаткування. Застосовуються для телебачення, а також широкосмугових програм.

Переваги супутникового зв'язку. Головною перевагою супутникового зв'язку є можливість здійснення зв'язку по всьому світу. Існуючі супутникові мережі надають надійний зв'язок, відрізняючись областю покриття, набором додаткових послуг, вартістю зв'язку та обладнання.

Цей вид зв'язку має такі недоліки, як:

Погана змішуваність. Зумовлена великими відстанями між супутником та наземними станціями, а також невеликим співвідношенням сигнал/шум на приймачі. Для забезпечення малої ймовірності помилки використовуються антени великого діаметра, малoshумливі компоненти, стійкі до перешкод коди.

Вплив тропосфери та іоносферних ефектів. Атмосфера здатна поглинати супутниковий сигнал залежно від частоти, а ефект завмирання (розсіювання радіохвиль) викликає різниця коефіцієнтів заломлення різних атмосферних шарів. Іоносферні ефекти, до яких відносять мерехтіння, затримку поширення, поглинання, дисперсію, обертання поляризаційної площини, зміну частоти, виникають через коливання розподілу вільних електронів.

Затримка сигналу. Найбільша затримка сигналу у супутникових систем, які використовують ретранслятор на геостаціонарній орбіті.

Сонячна інтерференція. Спотворення сигналу, що приймається наземною станцією, відбувається під впливом інтерференції в той час, коли Сонце наближається до осі «супутник-станція».

Залежність від природних перешкод. До ослаблення сигналу може призвести наявність на його шляху природних перешкод – високих дерев, будівель, особливостей рельєфу (наприклад, гірського масиву).

Високі ціни на обладнання та зв'язок. Супутникові технології вимагають значних витрат на купівлю обладнання, монтаж, послуги зв'язку. Це вирізняється високою вартістю підйому на орбіту, введення у експлуатацію, обслуговування супутників.

## 1.2 Принцип роботи антен супутникового зв'язку

Вибір супутникового телебачення - це можливість мати безліч каналів у відмінній роздільній здатності. На відміну від кабельного телебачення,



супутникове ТБ є скрізь. Потрібна лише супутникова антена та декодер. Монтаж та налаштування обладнання мають доступну ціну.

Телевізійна антена супутникового зв'язку використовується для прийому телесигналу з космічного супутника. Параметри самої тарілки та її конвертера великою мірою визначають ту якість зображення та звуку, що видасть супутниковий декодер на екрані телевізора. Розглянемо принцип їхньої дії.

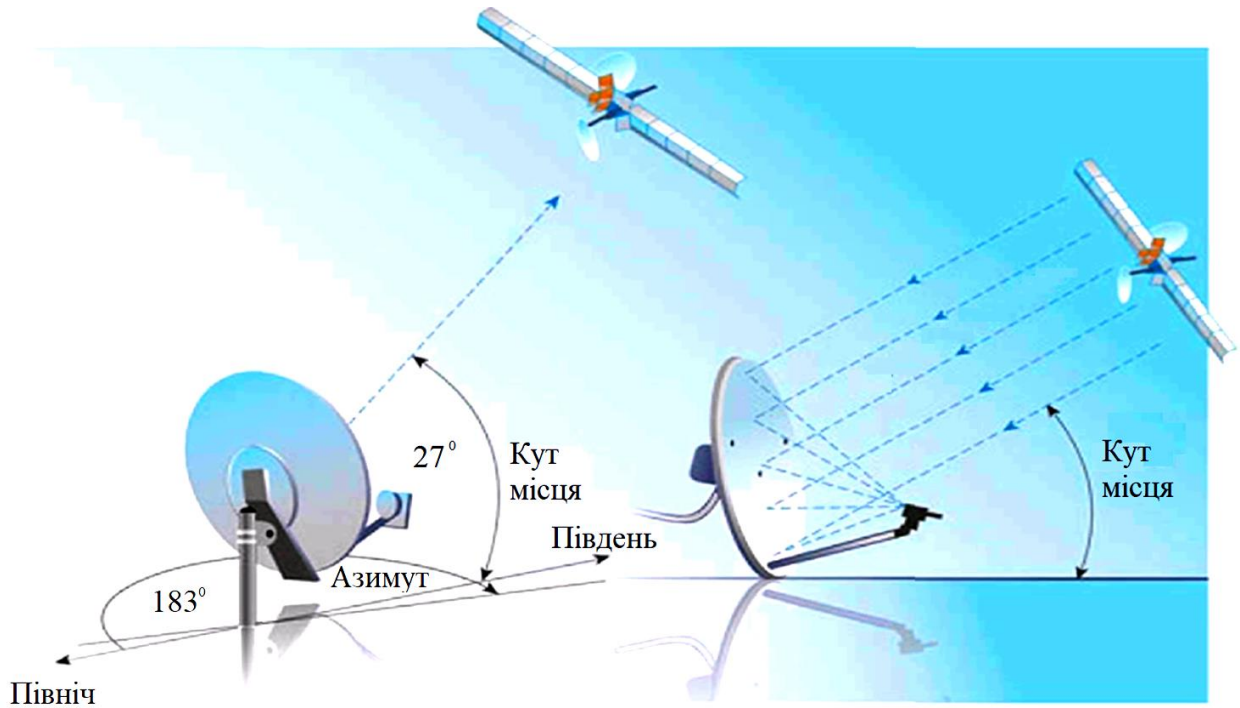


Рис. 1.1. Робота супутникової антени

Рівень сигналу, отриманого з супутника землі дуже малий в порівнянні з його вихідним рівнем: згасання порядку 200 дБ. Це і зрозуміло: відстань, що відокремлює землю від супутника, становить близько 36 000 км. Отримати сигнал такої сили, щоб дивитися програми, можна лише якщо максимально його сконцентрувати. Саме цю функцію виконує супутниковий хвильовий приймач, який є вигнутою поверхнею, що називається тарілкою.

Хвилі, що посилаються супутником на землю, відбиваються внутрішньою поверхнею антени, підкоряючись законам оптики, і зосереджуються в точці, яка називається фокусом. У цій точці розташована приймальна головка

перетворювача – пристрою для конвертації високочастотних коливань в кабельний сигнал.

З часів відкриття супутникового зв'язку було створено чимало різновидів хвильових приймачів для прийому та передачі сигналу. Кожен із видів знайшов своє наземне застосування залежно від призначення системи супутникового зв'язку: мобільний зв'язок; супутникова телефонія та радіомовлення; навігація через орбітальний зв'язок; інтернет; метеорологія; зв'язок із космічними апаратами; телебачення.



Рис. 1.2. Офсетна супутникова антена

Офсетна антена для супутникового ТБ нагадує чашу та має форму еліпсоїда. Сигнали від супутників, які відбиваються від робочого дзеркала, концентруються над геометричному центрі фігури, а її нижньому фокусі. Тарілка з нижнім фокусом не потребує великого кута підйому. Така конструкція дзеркала в офсетних супутникових антенах дозволила досягти стійкішого прийому, оскільки перетворювач сигналу не відкидає тінь на поверхню чаші і на викликає

шумів.

### Прямофокусна супутникова антена.



Рис. 1.3. Прямофокусна супутникова антена

Цей тип хвильового приймача має робочу дзеркальну поверхню у формі сплюсненого параболоїда. Така симетрична геометрія рефлектора дозволяє досягти хорошого уловлювання радіохвиль, що надходять на його поверхню, і максимального перенаправлення їх на перетворювач. Він кріпиться на консолях-тримачах безпосередньо над центральною точкою тарілки.



Рис. 1.4. Тороїдальна супутникова антена

Тороїдальна тарілка – різновид багатопроменевих антен – це прогресивне рішення, що прийшло на зміну дзеркалам на поворотних механізмах. У цій моделі два рефлектори (відбивачі) і це величезна перевага для прийому ТБ з різних супутників. До того, як радіохвилі потраплять на приймальну поверхню перетворюючої головки, вони двічі зазнають відбиття: первинно потрапляючи на велике дзеркало, а від нього заломлюючись на мале, де фокусуються на потрібному перетворювачі.

Виробники тороїдальних антен гарантують їхню комплектацію конвертерами в кількості до шістнадцяти штук. Це відкриває великі можливості для глядача: перенаведення такого пристрою на роботу з сигналом від різних супутників є простим.

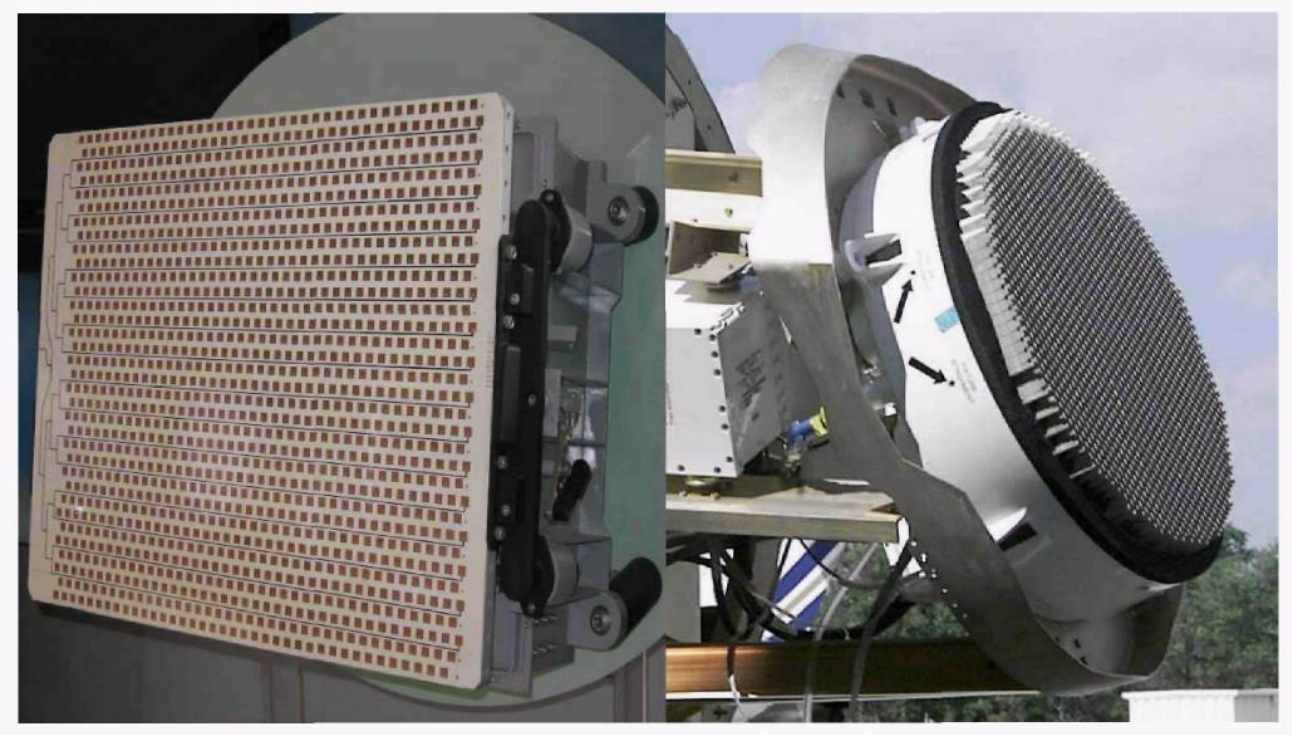


Рис. 1.5. Фазована антена

Фазовані антенні решітки - малозастосовний клас супутникового обладнання. Були популярні у 90-х роках минулого століття, чому завдячують фірмі Nokia.

За підсумками використання керованих ФАР проводяться розробки рухомих і портативних приймачів супутникового зв'язку.

Антена спрямованого типу.

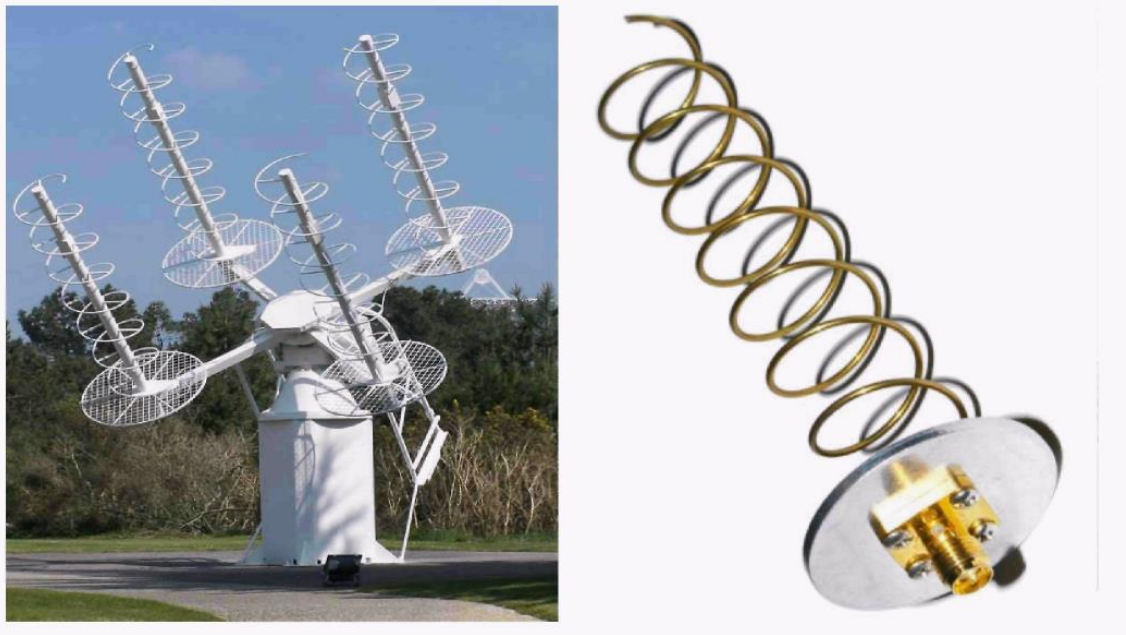


Рис. 1.6. Антена спрямованого типу

Це пристрій спрямованого типу. Сигнал у ньому поширюється у вигляді біжучої хвилі уздовж геометричної осі конструкції. За своєю будовою - це збірна лінія, на якій закріплено кілька рівновіддалених один від одного вібраторів. Така антена є широкопasmовою (VHF та UHF хвилі) і не потребує налаштування. Поширена у метеорологів та в аматорському радіозв'язку.



Рис. 1.7. Слабонаправлена хвильова антена

Слабоспрямовані хвильові приймачі знайшли своє застосування в тих місцях супутникового прийому, де відсутня можливість постійно перенаправляти положення приймального пристрою. Антена дає багато шуму через широкую діаграму направленості. Але для захоплення хвиль, що ретранслюються, з низькоорбітальних супутників це не критично.

### 1.3 Принцип роботи основних типів елементарних антен

Історія антен налічує трохи більше ста років. У 1877 р. німецький фізик Г. Герц у Карлсруе поставив класичні досліди для перевірки теорії поширення радіохвиль, запропонованої англійським фізиком Дж. Максвеллом. Передавальною антеною у його дослідах служив прямий провід з ємнісним навантаженням на кінці (кондуктор), а приймальною — квадратна дротяна петля.

Попередниками цих антен були дротяна антена Б. Франкліна, використана

ним у 1752 р. для доказу електричної природи блискавок, і спроектована Т. А. Едісон заземлена вертикальна антена, запатентована в 1885 р. для системи передачі повідомлень.

Термін «антена» запозичений із зоології, де латинським словом «antennae» називають довгі тонкі вусики комах. Спочатку антени мали й інші назви: лінійний осцилятор, повітряний провідник, дротяний датчик або збудник.

Антени можна поділяти на групи за різними ознаками:

- за формою – на електричні або магнітні;
- за видом поляризації - на антени горизонтальної, вертикальної або кругової поляризації;
- по ширині частотного діапазону - на вузькосмугові та широкосмугові;
- за частотними властивостями - на резонансні та аперіодичні;
- за напрямом випромінювання - на спрямовані та неспрямовані.
- за способом збудження та посилення - на прості випромінювачі (рис. 1.8), групові випромінювачі, випромінюючі структури, апертурні випромінювачі.

Така класифікація не завжди виявляється однозначною.

Випромінювачі складаються з окремих елементів. До них відносять найпростіші випромінювачі, а також антени: лінійні, фігурні, рамкові, щілинні, активні.

Найпростіші випромінювачі

Сферичний випромінювач, що називається також ізотропною антеною.

Являє собою антену без втрат, що рівномірно випромінює на всі боки або приймає з усіх напрямків. ДН антени є сфера. Така антена неможлива, але використовується як теоретичний зразок.



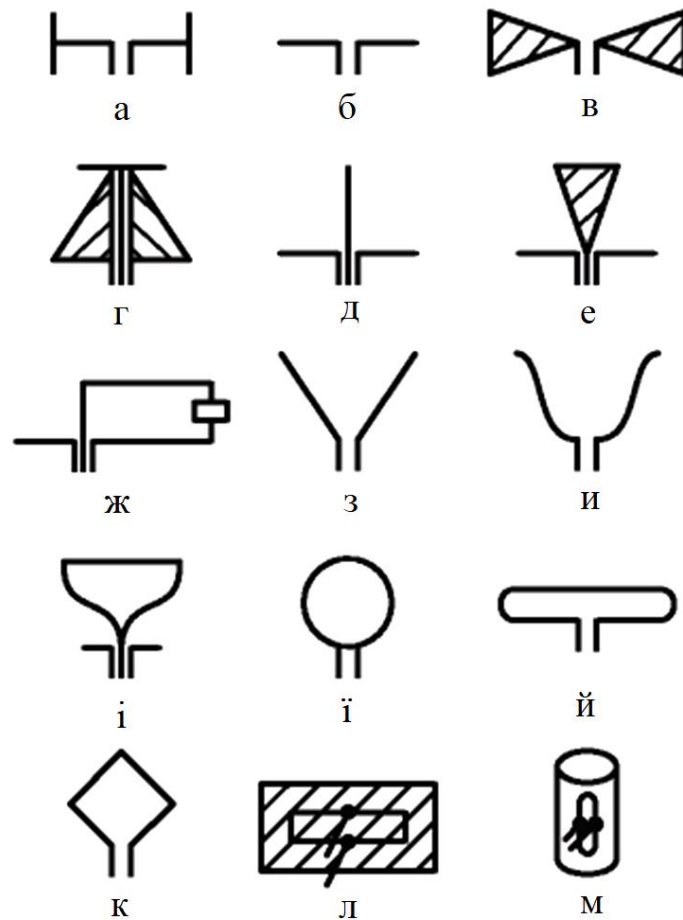


Рис. 1.8. Прості випромінювачі: а – вібратор Герца; б – вібратор; в – конічний вібратор; г – бисконусна антена; д – монополь; е – конічна антена; ж – однопровідна антена біжучої хвилі; з – кутників вібратор; и – антена типу «змах крила»; і – чашковий випромінювач; ї – петлева антена; й – петле вий вібратор; к – квадратна рамкова антена; л – щілинна антена; м – прубчасто-щілинна антена

Диполь Герца. Випромінювач носить ім'я німецького фізика Г. Р. Герца (1857-1894); його називають також елементарним електричним випромінювачем або елементарним електричним вібратором. Для реалізації диполя використовується вібратор з кінцевими ємностями, укорочений відносно довжини хвилі випромінювання. Порівняно з ізотропним випромінювачем він має спрямованість, перпендикулярну до осі вібратора. Діаграма направленості

має вигляд двох кіл з нульовими значеннями в напрямках осі диполя;

Діполь Фітцджеральда. Названий на честь ірландського фізика Ф. Дж. Фітцджеральда і також відомий як елементарний магнітний випромінювач або елементарний магнітний вібратор. Реалізується у вигляді струмової рамки, розмір якої менший за довжину хвилі. На відміну від ізотропного випромінювача характеризується спрямованістю, що відповідає площині рамки. ДН складається з двох кіл з двома нульовими значеннями в напрямках, перпендикулярних площині рамки.

Випромінювач Гюйгенса. Носить ім'я нідерландського фізика Х. Гюйгенса. Є поєднанням невеликої рамки (магнітна частина) і короткого вібратора в її площині (електрична частина). Такий пристрій застосовується для визначення напрямку при радіопеленгації. Діаграми направленості в горизонтальній/вертикальній площинах виглядають як кардіоїди і мають одну нульову точку.

До лінійних антен належать відкриті антени з прямолінійними елементами.

Фігурні антени - це антени з фігурними елементами.

Вироджений вібратор. Такі антени служать для забезпечення широкосмугового зв'язку (зокрема, циліндричний вібратор) або для отримання кругової діаграми направленості, наприклад, кутовий вібратор Squalo.

Вироджений монополь. Служить для забезпечення широкосмуговості, скажімо в подвійній конічній або циліндричній антенах.

Вигнутий вібратор. Забезпечує широкосмуговість, зокрема, у чашковому вібраторі. Використовується для оптимізації посилення як півторачного диполя по Ландсторферу — антена «змах крила».

Рамкові антени.

Рамковими називаються замкнуті антени основні складові яких виконані у вигляді рамок:

- мала рамка. Застаріла назва – магнітна антена. Її периметр є меншим за

довжину хвилі і становить приблизно  $1/10\lambda$ . Приклад антени — обмотка котушки чи феритова стержнева антена;

- велика рамка. Периметр великої рамки становить приблизно  $1/\lambda$ ; до таких антен відносяться петлевий вібратор, дискова та квадратна антени.

#### Щілинні антени

Щілинні антени - це замкнуті антени зі щілинними елементами на провідній поверхні. Довжина щілин становить від  $\lambda/2$  до  $\lambda$ , а самі вони бувають лінійними (щілини на площині або циліндрі) або хрестоподібними (наприклад, дискова щілинна антена).

#### 1.4 Антени для супутникового зв'язку

Структурну схему типового приймального супутникового комплексу представлено на рис. 1.9. Приймальна параболічна антена діаметром 0,6-20 м призначена для прийому сигналу з супутника.

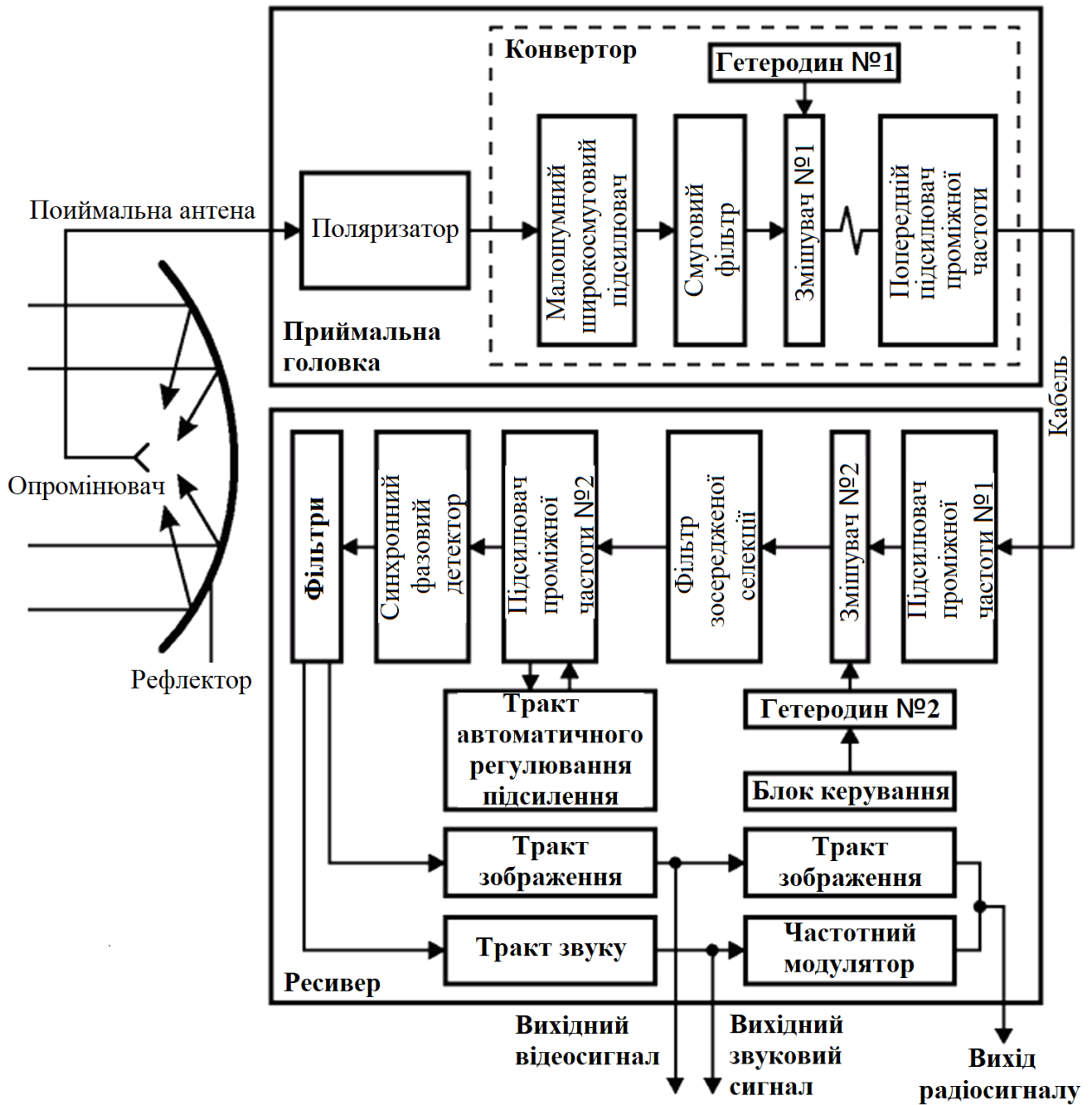


Рис. 1.9. Структурна схема супутникового комплексу

Форми приймальних антен СТ

Антени можуть бути прямофокусні та офсетні.

При «інших рівних умовах», офсетна тарілка має бути овальна і трохи більше прямофокусної (рис. 1.10).

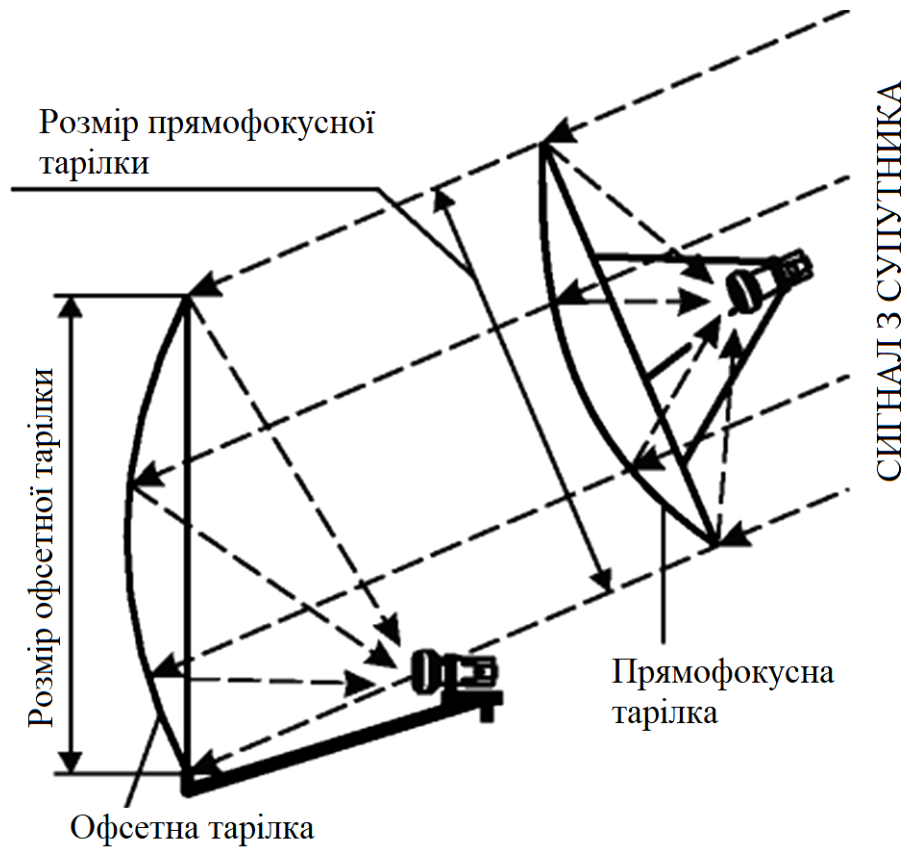


Рис. 1.10. Різниця в розмірах прямо фокусної і офсетної антен

Прямофокусні антени (рис. 1.11) включають приймальну головку, що кріпиться у фокусі над центром.

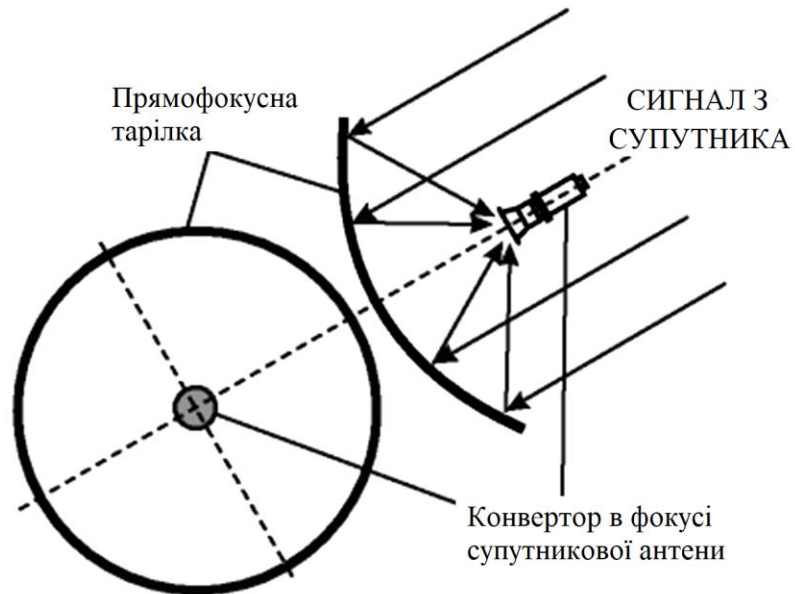


Рис. 1.11. Принцип роботи прямофокусної антени

В офсетних антенах конвертер зміщений до низу, тому потрібним є врахування ефекту від цього, що полягає в тому, що налаштування на супутник має бути дещо вищим ніж перпендикулярно площині антени. Принцип дії офсетної тарілки наведено на рис. 1.12.

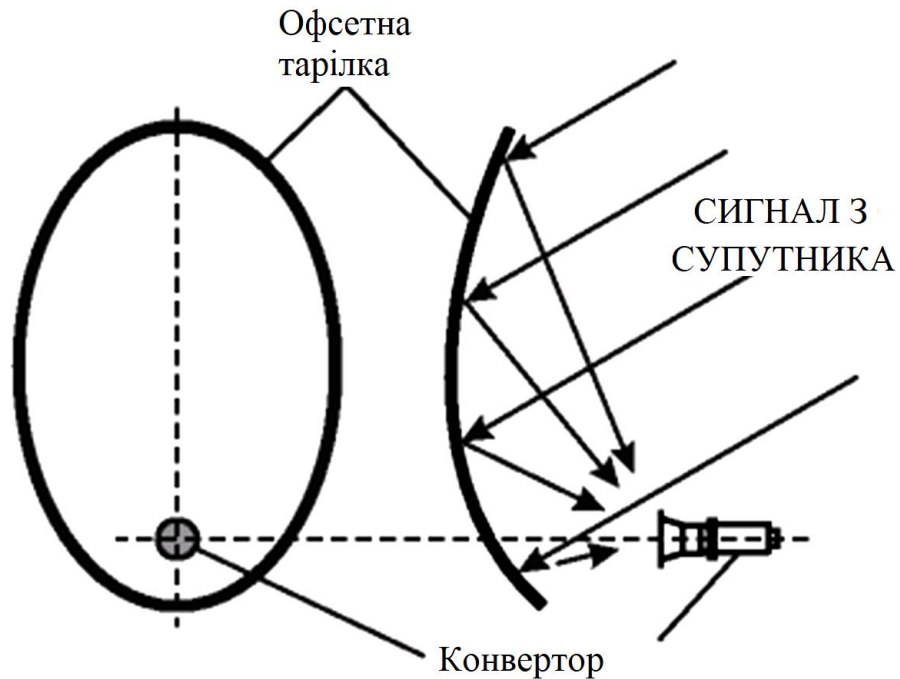


Рис. 1.12. Принцип роботи офсетної антени

Офсетні антени характеризуються зручністю установки вздовж стіни будинку. Винесення від стін при цьому є меншим, крім того, на них не затримується сніг, опромінювач не загороджує поверхню дзеркала. Розмір офсетної антени оптимальний до 1,5-1,8 м.

Прямофокусні антени мають хороші характеристики понад 1,8 м, тому що при такому розмірі антени опромінювач вже перестає «затіняти» поверхню дзеркала. У прямофокусної антени електромагнітна пляма на опромінювачі не має спотворень, відбита електромагнітна хвиля від будь-якої точки антени приходить в одній фазі до опромінювача.

Параболічні прямофокусні антени - це антени, які використовуються для

професійного прийому.

Плоска антена решітка зазвичай має квадратну форму, вона використовується замість параболічної антени, але найбільш використовуються параболоїдні антени.

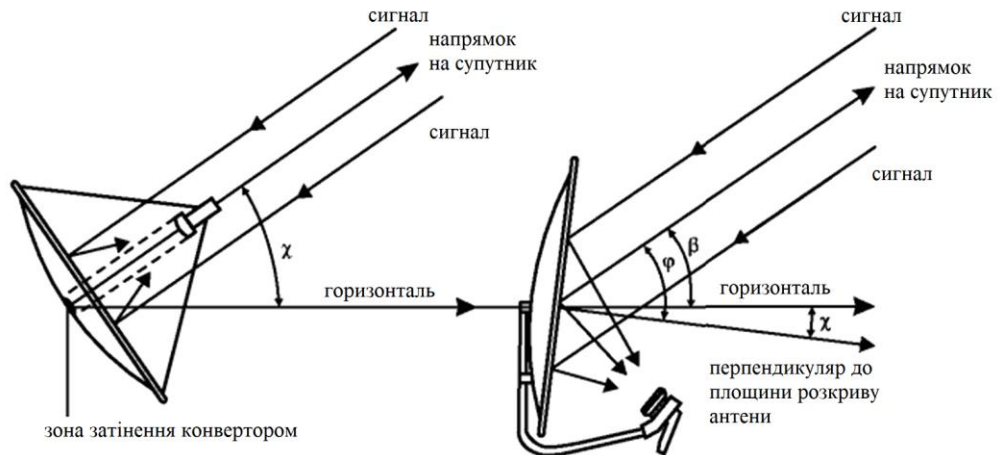


Рис. 1.13. Особливості установки прямофокусної та офсетної антен

Складові частини антени. Складання антени особливих труднощів не представляє (рис. 1.14). При складанні антени потрібно бути обережними, щоб не пошкодити її дзеркало.

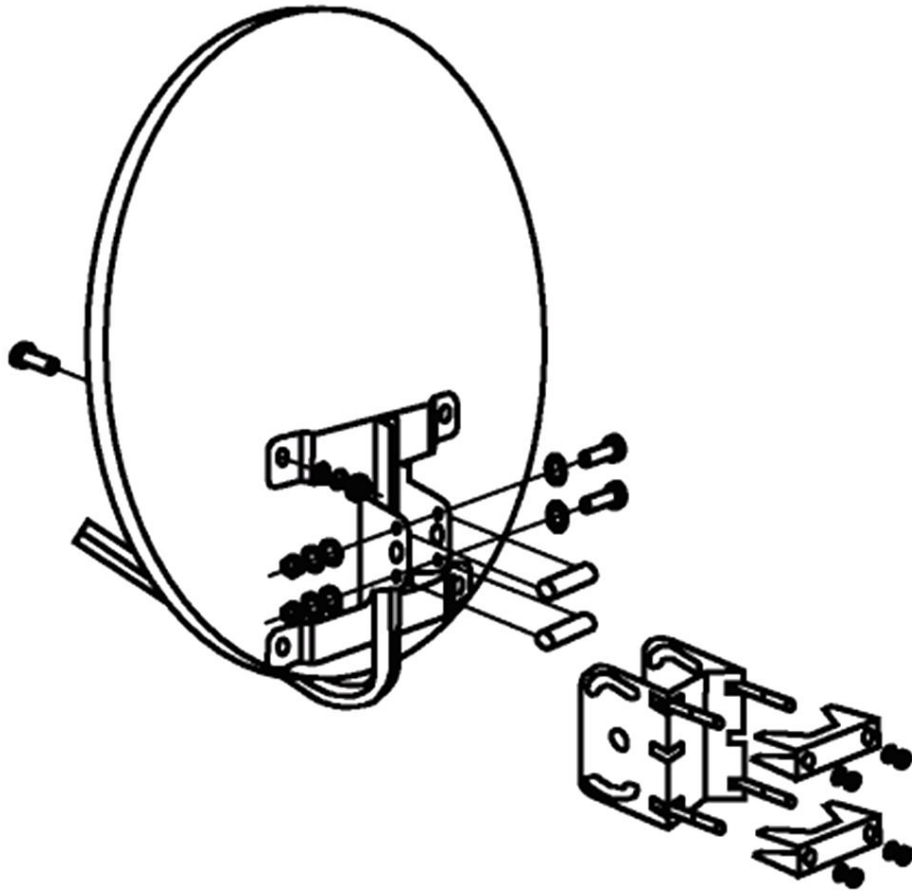


Рис. 1.14. Збірка супутникової антени

НВЧ тракт супутникової антени. Цей моноблок забезпечує прийом сигналу та його перетворення на сигнал зниженої (проміжної) частоти передачі його по кабелю на вхід ресивера для остаточної обробки.

Поляризатор та деполаризатор. Розрізняють два види поляризації ЕМ хвиль:

- лінійну поляризацію, внаслідок якої утворюються плоскі вертикальні та горизонтальні хвилі (рис. 1.15);

- кругову поляризацію, внаслідок якої утворюються кругові праві та ліві хвилі (рис. 1.16).

Можна сміливо сказати, що у конвертері є дві антени, кожна з яких приймає сигнал лише однієї поляризації: або вертикальну, або горизонтальну.



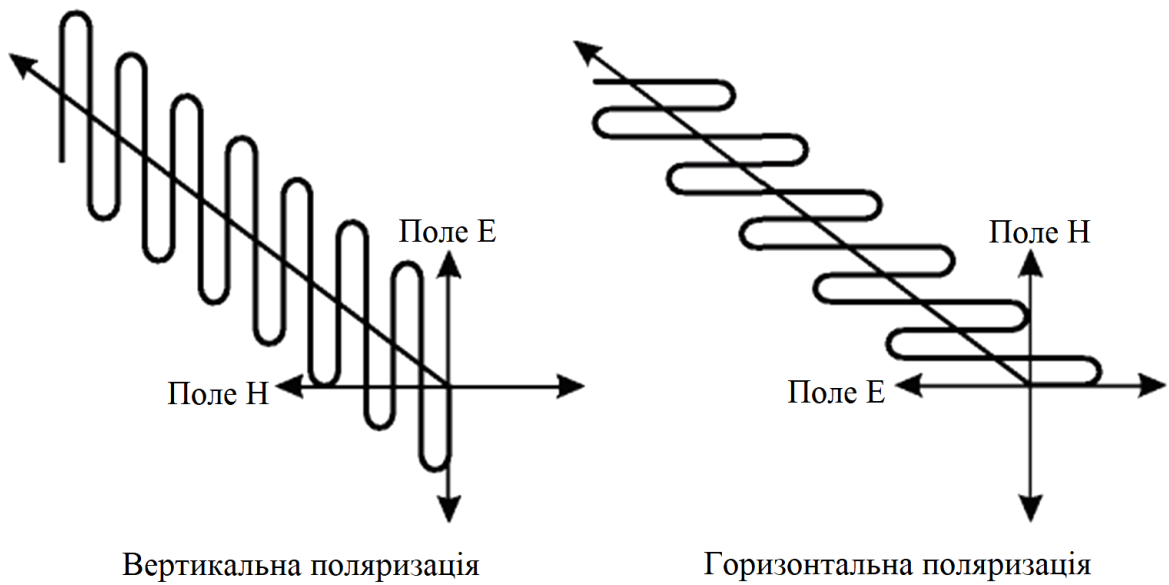


Рис. 1.15. Лінійна поляризація сигналу

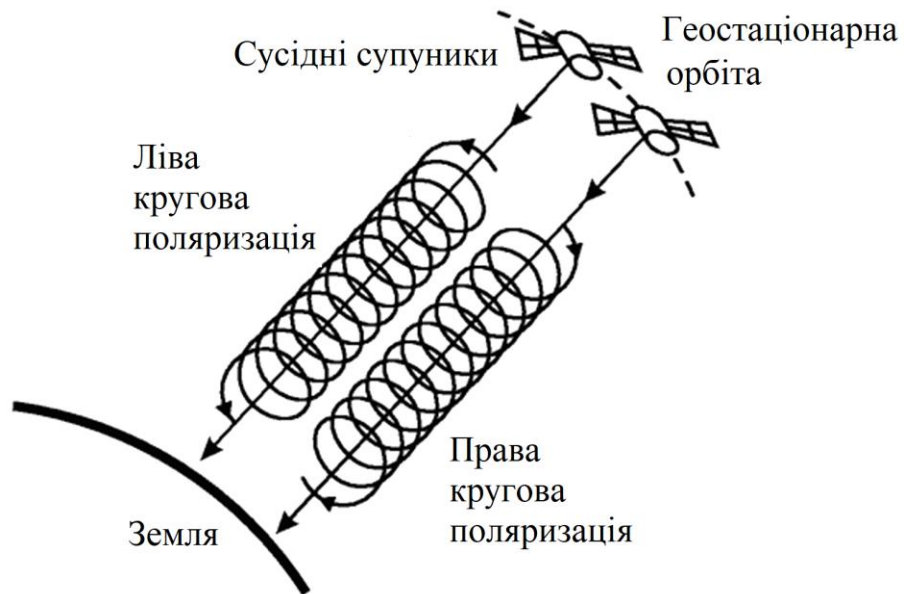


Рис. 1.16. Кругова поляризація сигналу

Якщо прийом здійснюється на Схід чи Захід, то через кривизну поверхні Землі площина поляризації більше нахилена до її поверхні.

Відповідно до цього поляризатор розміщується під більшим чи меншим кутом до Землі. Причини необхідності підстроювання конвертера показано на рис. 1.17.

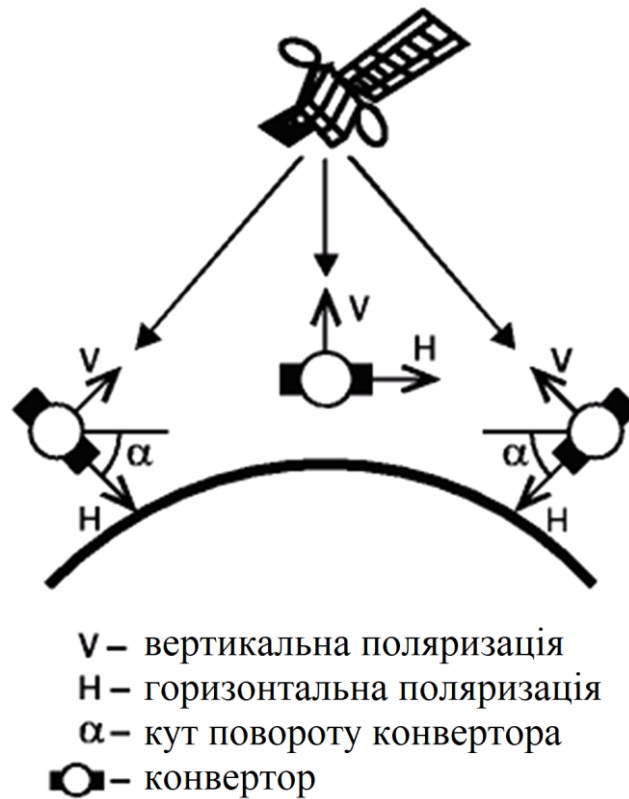


Рис. 1.17. Вплив географічного положення приймаючої антени і супутника

Особливості вибору поляризації. ЕМ хвиля включає електричну і магнітну компоненти. Вектор електричного поля перпендикулярний вектору поля магнітного, і обидва вони перпендикулярні напрямку поширення хвилі (рис. 1.18).

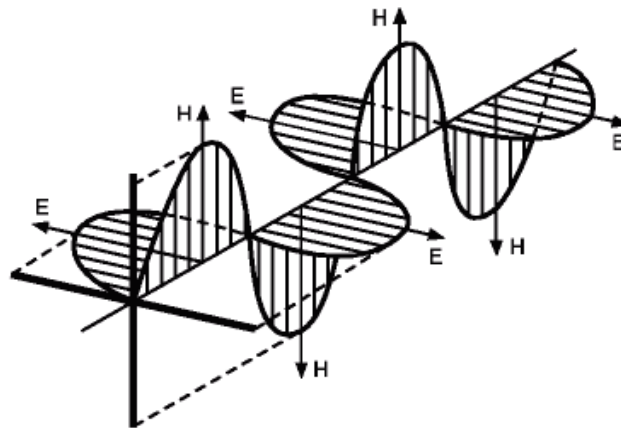


Рис. 1.18. Проекція ЕМ хвилі

Якщо між електричним і магнітним векторами не існує зсуву фази, то це лінійна поляризація. Вертикальною чи горизонтальною вона називається залежно від орієнтації електричного вектора стосовно площини екватора.

Зсув на  $90^\circ$  (позитивний або негативний) означає, що коли електричне поле досягає максимуму, магнітне поле буде рівним 0, або навпаки.

Залежно від знака перед  $90^\circ$ , поляризація буде правою круговою або лівою круговою.

Одним з відомих недоліків лінійної поляризації можна назвати необхідність точного підстроювання кута кріплення конвертера в залежності від географічного розташування приймальної антени. У випадку з круговою поляризацією ніякого підстроювання конвертера не потрібно робити, достатньо встановити його у фокус антени.

Менш відома, але набагато значуща чутливість сигналів з лінійною поляризацією до ротації Фарадея, що викликається магнітним полем Землі.

Однак ефект Фарадея значно зменшується зі зростанням частоти, і тому на відміну від С-діапазону, в Ку-діапазоні практично непомітний. Саме тому використання лінійної поляризації у С-діапазоні можна назвати ризикованим.

Значимість даного чинника зростає багаторазово за необхідності забезпечити сигналом території, що знаходяться поблизу магнітних полюсів Землі.

Вже зазначалося, що С-діапазон менш чутливий до опадів, на відміну від Ку-діапазону. А оскільки, навпаки, С-діапазон більш чутливий до ефекту Фарадея, кругова поляризація є найкращим варіантом.

Поляризатор та деполіризатор

Деполіризатор, що перетворює один вид поляризації поля у хвилі круглого перерізу в інший, представлений на рис. 1.19. Це відрізок хвилеводу, в якому є поздовжні неоднорідності у вигляді діелектричних пластин (матеріал тефлон або іп) і металевих стержнів (H або V).

Це і є поляризатор  $3,14/2$ . Якщо на такий поляризатор надходить сигнал з круговою поляризацією, він перетворюється на поля з лінійної поляризацією. Залежно від положення діелектричної пластини і штирів у хвилеводі здійснюється перетворення кругової поляризації у вертикальну або горизонтальну. Так, деполаризатор перетворює кругову поляризацію в лінійну.

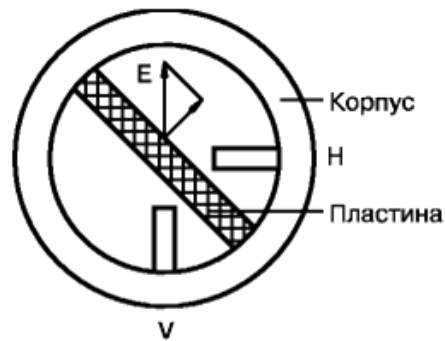


Рис. 1.19. Принцип роботи деполаризатора

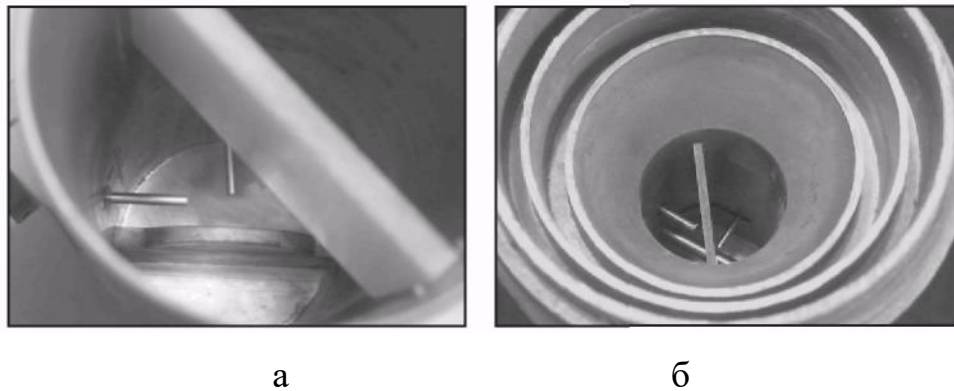


Рис. 1.20. Конвертори з деполаризатором: а – С-діапазону; б – Кі-діапазону

Цей пристрій є пластиною з тефлону, текстоліту склотекстоліту, фторопласту, скла тощо. Встановлюють пластину в опромінювач на певній відстані від антен конвертера, під кутом  $45$  градусів між ними (рис. 1.20).

Пластина може бути виконана або з монолітного матеріалу, або у вигляді решіток з фольгованого склотекстоліту (рис. 1.21). Як стверджують розробники цього виробу, завдяки такій формі та конструкції, збільшується якість сигналу

(якість деполаризації сигналу) при прийомі кругової поляризації сигналів С-діапазону.

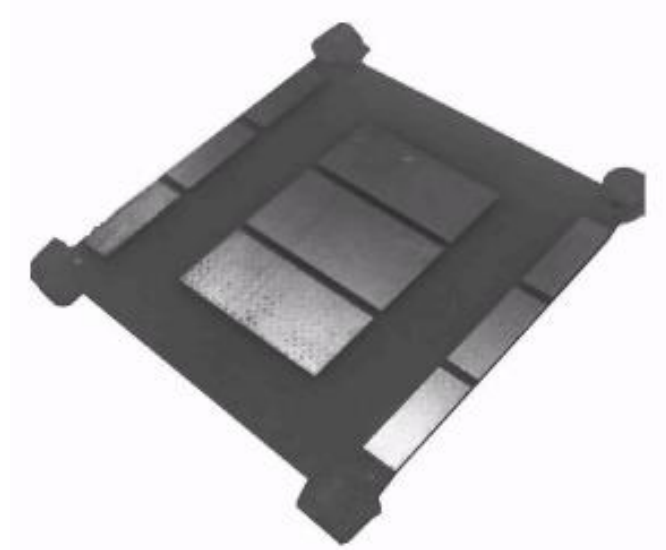


Рис. 1.21. Деполаризаційна пластина для конверторів С-діапазону

Фазові швидкості хвиль, у яких вектори напруженості електричного поля паралельні чи перпендикулярні пластинам чи стержням, різні. У цьому випадку буде програш 3 дБ у рівні кругового сигналу, що відповідає збільшенню необхідного діаметра антени в 1,4 рази.

### 1.5 Висновки до розділу 1

В розділі проведено аналіз систем супутникового зв'язку, принципів їх роботи та основних складових елементів. Проаналізовано типові конструкції приймальних антен для супутникового зв'язку та додаткових елементів, що при цьому застосовуються. Проаналізовано переваги та недоліки таких антен.

## РОЗДІЛ 2

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Аналіз прототипів

Антени наземних станцій систем зв'язку через штучні супутники землі (ШСЗ) є складними технічними пристроями. Основні проблеми, що зустрічаються під час створення таких антен, полягають у наступному. По-перше, необхідно досягти максимально можливого зменшення рівня бічних пелюсток ДН, що досягається вибором відповідної форми та конструкції дзеркал, а також точність їх виготовлення. По-друге, істотні труднощі є поділом різних типів поляризацій. І, нарешті, важливим є підвищення якості антенних систем шляхом збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД), оскільки збільшення ККД на 10 відсотків дозволяє знизити діаметр дзеркала на 15 відсотків. Таким чином, розвиток супутникового радіозв'язку призвів до створення виняткового розмаїття приймальних наземних антен НВЧ.

##### 2.1.1 Параболічні антени.

Розглянемо перспективні конструкції параболічних антен систем СЗ.

Відома параболічна антена для прийому СТ, зроблена зі скла з напівпрозорою металізацією. Як металізоване покриття може бути використаний напилений олов'яний або напівпровідниковий оксид. Покриття поглинає 10-30 відсотків падаючого світлового потоку. Перевагами антени є непомітність та естетичність конструкції при кріпленні на стінах будівель та споруд.

Також відомим є прототип, що відноситься до дзеркальних антен (ДА) для прийому сигналів від ШСЗ, розташованих на геостаціонарній орбіті. Такі ДА мають гостронаправлену ДН і можуть приймати сигнали тільки від одного ШСЗ або групи ШСЗ, що знаходяться одночасно у вузькому секторі кутів. Якщо ШСЗ

рознесені по кутах, доводиться повертати ДА і приймати сигнали по черзі. У запропонованому пристрої дзеркало розрізане діаметром на три частини, шарнірно з'єднані між собою. Це дозволяє орієнтувати у просторі кожен частину ДА незалежно. Для компенсації зменшення коефіцієнта поверхні (КП) ДА діаметр її повинен бути збільшений в 1,4 рази.

### 2.1.2 Антени із плоским дзеркалом.

Поряд із ДА з параболічним рефлектором, широкого поширення набули ДА з плоским рефлектором в системах супутникового зв'язку. Відома антена з плоским дзеркалом, що має форму гексаедра. Метою винаходу є оптимізація коефіцієнта підсилення та ДН антени. Для досягнення цієї мети дзеркало ділиться на дві частини. Центральна частина (радіус якої дорівнює 0,8 радіуса дзеркала) зміщена по відношенню до периферійної частини на відстань у напрямку опромінювача. У межах центральної та периферійної частин сформовано сітки рівносторонніх трикутників, значення довжин сторін яких рівні  $r/10$  і  $r/5$  відповідно, де  $r$  - радіус дзеркала.

Також відома антена система з частотним скануванням ДН, що складається з точкового опромінювача та плоского дзеркала у вигляді дифракційної решітки. Фокусування відбитих променів досягається вибором геометрії решітки, виконаної у вигляді періодичної структури вібраторів, нанесених на діелектричну основу, що має екран. Період структури вздовж дзеркала плавно змінюється, що дозволяє фокусувати першу хвилю. Розглянуто методи аналізу та розрахунку антеної системи. Результати аналізу показали, що досягається ефективне перетворення падаючого поля в дифраговану хвилю. На моделі антени із дзеркалом розміром двадцять довжин хвиль у діапазоні частот 9,5 - 10,5 ГГц досягнуто частотне сканування ДН на 90, коефіцієнт підсилення на центральній частоті діапазону - 33,7 дБ, що відповідає апертурному КВП - 56%. Антена може бути застосована для прийому сигналів ТБ з ШСЗ.

Також є можливість використання антени Френеля для індивідуального прийому ТВ-сигналу з геостационарного супутника. Антена даного типу є плоским діелектричним полотном, на одній з поверхонь якого виконані концентрично розташовані кільцеві плоскі провідники. У відбивному варіанті виконання антени на протилежний бік діелектричного полотна наноситься відбиваюче покриття. У фокусі антени розташовується прикріплений до полотна за допомогою кронштейнів опромінювач. При необхідності винести опромінювач за межі розкриття антени, плоскі провідники виконуються з яйцеподібною формою. Конструкція, що розглядається проста і дешева, легко сполучається з житловими будівлями, не вимагає налаштування та технічного обслуговування.

### 2.1.3 Плоскі антени.

Поряд із ДА, як параболічними, так і з плоским рефлектором, широкого поширення в системах СЗ набули плоскі антенні решітки.

Проведено огляд існуючих варіантів плоских антенн (ПА) прийому прямого супутникового ТВ. Перевагами ПА є малі габарити, зручність монтажу та встановлення, зокрема на стінах житлових будівель. В якості ПА застосовуються мікросмужкові решітки з вібраторними або іншими формами елементів. Після підсумовування прийняті сигнали направляються для подальшої обробки у вбудований малошумний конвертер.

Проаналізована конструкція ПА, яка використовується як приймальна антена в системі СТ. Метою її є забезпечення стійкості по відношенню до дії атмосферних опадів та збільшення КВП антени. Антена має тришарову конструкцію, проміжок між шарами заповнений пінистим полістиролом. До складу верхнього шару входять дві пластини. У верхній пластині прорізна система щілин, форма яких може бути різною (в даному випадку описана антена зі щілинами квадратної форми). На нижній пластині методом друкованого монтажу сформовано малюнок випромінювачів у вигляді системи смужок



фольги, що розташовані по діагоналях згаданих щілин. На середньому шарі розташовується фідерна лінія, нижній використовується як заземлена основа.

Також проаналізована тришарова антена решітка (АР), що містить плоску структуру живлення на смужкових фідерах, закріплену між двох плоских екранів, в яких періодично розташовані круглі отвори, що є апертурами. Апертури збуджуються двома ортогональними несиметричними вібраторами, що забезпечують кругову поляризацію хвилі, що випромінюється (приймається).

Також розглянуто вдосконалений варіант плоскої одношарової щілинної АР для безпосереднього прийому ТВ-сигналів з ШСЗ. Щілини розташовані по спіралі у верхній стінці радіального хвилеводу із центральним коаксіальним збудженням через нижню стінку. Для вирівнювання розподілу поля по круглій апертурі запропоновано зважувати довжини щілин, поперемінно нахилених до спіралі на  $+45^{\circ}$  і  $-45^{\circ}$  для підвищення ККД випромінювання замість поглинача на краю хвилеводу забезпечити режим радіальних біжучих хвиль за допомогою спіральної-зігнутої металевої стрічки на краю. У діапазоні 11,55 – 11,75 ГГц експериментальна АР діаметром 60 см мала КП 34,7 – 35,4 дБ. Коефіцієнт посилення підвищився на 0,2 дБ після запровадження спіральної стрічки. Ефективність антени 65%. Застосування узгоджуючої спіральної стрічки призводить до зниження шумової температури АР.

Також відома конструкція плоскої АР з дисковими мікросмужковими випромінювачами, що використовується для зв'язку з ШСЗ, яка дозволяє спростити технологію серійного виробництва таких АР і знизити їхню вартість. За допомогою прес-форми в металевих пластинах створюється безліч виступів, які рівномірно підтримують діелектричну підкладку з випромінювачами. Верхня або нижня пластини містять безліч отворів, які розташовані навпроти випромінювачів. Пластина без отворів є основою мікросмужкового випромінювача. Завдяки такій структурі значно спрощується процес виготовлення АР і досягається оптимальна частотна характеристика смуги 11 -

12 ГГц.

## 2.2 Антена Френеля

Зональні антени Френеля - це антени, що фокусують сигнал за рахунок фазового зсуву поверхні антени або її форми. Існує кілька типів зональних антен Френеля, а саме, зональні пластинчасті антени Френеля, зміщені зональні пластинчасті антени Френеля, фазово-коректуючі відбивні решітки або антени «Reflectarray» і тривимірні антени Френеля. Вони є класом дифракційних антен і використовуються в діапазонах від радіочастот до рентгенівських променів.

Зональні антени Френеля відносяться до категорії рефлекторних та лінзових антен. Однак, на відміну від традиційних рефлекторних та лінзових антен, ефект фокусування в зональній антені Френеля досягається за рахунок управління фазовим зсувом поверхні і дозволяє використовувати плоскі або довільні форми антени. Офсетна пластина зони Френеля може бути встановлена врівень зі стіною або дахом будівлі або надрукована на вікні.

Переваги зональної пластинчастої антени Френеля численні. Зазвичай вона дешева у виробництві та установці, її легко транспортувати та упаковувати, і вона може забезпечити високий коефіцієнт пісилення. Через свою плоску форму вітрове навантаження зонної пластини Френеля може становити всього 1/8 від сили звичайних суцільних або сітчастих відбивачів аналогічного розміру. При використанні на частотах міліметрових хвиль зональна антена Френеля може бути інтегрована з монолітною інтегральною схемою (ММІС) міліметрового діапазону і, таким чином, стає більш конкурентоспроможною, ніж друкована антенна решітка.

Найпростіша антена із зонною пластинною Френеля - це кругла напівхвильова зонна пластина, винайдена у XIX столітті. Тут потрібно розділити плоску апертуру на круглі зони відносно обраної точки фокусу, виходячи з того,

що все випромінювання кожної зони надходить у точку фокусування у фазі в діапазоні  $\pm\pi/2$ . Якщо випромінювання з зон, що чергуються, придушене або зсунуте по фазі на  $\pi$ , виходить приблизний фокус, і туди можна помістити джерело для ефективного збору отриманої енергії. Незважаючи на свою простоту, напівхвильова зонна пластина довгий час залишалася в основному оптичним пристроєм, в першу чергу через занадто низький ККД (менше 20%) і бічні пелюстки.

Порівняно зі звичайними рефлекторними та лінзовими антенами, опубліковані дослідження мікрохвильових та міліметрових зонних антен Френеля здаються обмеженими. У 1948 році Маддаус опублікував проект і експериментальну роботу з ступінчастих напівхвильових лінзових антен, що працюють на частоті 23 ГГц, і були досягнуті рівні бічних пелюсток близько -18 дБ. У 1961 році Бускірк і Хендрікс повідомили про експеримент з простими пластинчастими відбивними антенами з круговою зоною фази для радіочастот. На жаль, бічні пелюстки, яких вони досягли, сягали -7 дБ. У 1987 році Блек і Вілтсе опублікували свою теоретичну та експериментальну роботу по ступінчастій чвертьхвильовій зонній пластині на частоті 35 ГГц. Був досягнутий рівень бічних пелюсток близько -17 дБ. Через рік Худер і Мензель повідомили про пластинчастий відбивач із зонним врахуванням фази, що працює на частоті 94 ГГц, і були отримані ефективність 25% і рівень бічних пелюсток -19 дБ. Дослідники НАСА повідомили про експеримент з аналогічною антеною на частоті 11,8 ГГц у 1989 році. Були виміряні ширина смуги 5% 3 дБ та рівень бічних пелюсток -16 дБ.

До 1980-х років пластинчаста антена зони Френеля вважалася поганим кандидатом для мікрохвильових додатків. Однак після розвитку послуг DBS у вісімдесятих роках інженери з антен почали розглядати можливість використання зонних пластин Френеля як потенційні антени для прийому DBS, де важливим фактором є вартість антени. Це певною мірою дало комерційний

поштовх дослідженням зональних антен Френеля.

Проаналізуємо антену Френеля як різновид антен з плоским відбивачем, характеристики яких можна порівняти з характеристиками параболічних антен, що дозволяє використовувати їх при прийомі сигналів з потужних ШСЗ.

Фізико-механічні властивості приймальних антен дозволяють використовувати їх цілодобово на відкритому повітрі в будь-яких погодних умовах та впливах навколишнього середовища з умовами практично всіх кліматичних зон.

Принцип роботи антени Френеля відображено на рис. 2.1. Плоска хвиля поширюється у вільному просторі. Принцип Гюйгенса постулює, що електромагнітне поле в точці F може бути описане як суперпозиція нескінченного числа точкових випромінювачів сферичних хвиль на площині a. Наприклад, у точці F є вклад від джерела в точці A. Для будь-якої іншої точки на площині відстань до F буде більшою, ніж відстань AF, що означає, що фаза від вкладів цих точок різна. Фаза вкладу від точки B, наприклад, зсунута на деяку величину від вкладу від точки A. Відстань між A і B може бути обрана таким чином, що при даній частоті фази вклади від двох точок будуть різнитися на  $\pi$  радіан. Тоді вклади в поле в точці F від A і B будуть знаходитись у протифазі та інтерферувати з ослабленням. Подібним чином, точка може бути обрана так, що вклади від A і C будуть у фазі (тобто різні на  $2\pi$  радіан) і будуть складатися. Ця особливість повторюється, тобто на площині a, далі від точки A, є точки, вклади яких зрушені кратно  $2\pi$  радіан. Кожна з цих точок відзначає двонапівперіодну зону Френеля. Це означає, що на рис. 2.1 кожна точка між A і C знаходиться в одній і тій же двонапівперіодній зоні. Зрозуміло, геометричне місце точок, які відзначають межі кожної двонапівперіодної зони, є коло на площині a.

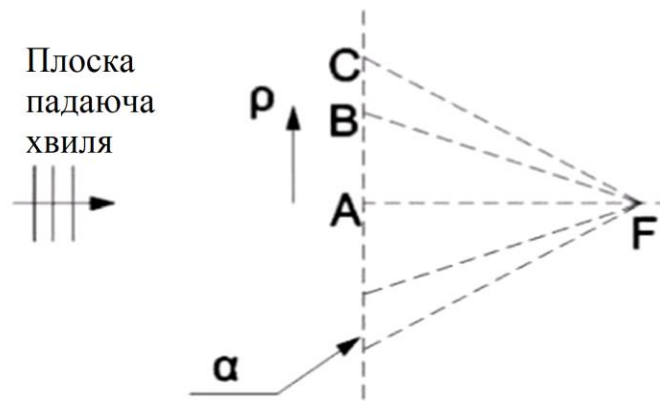
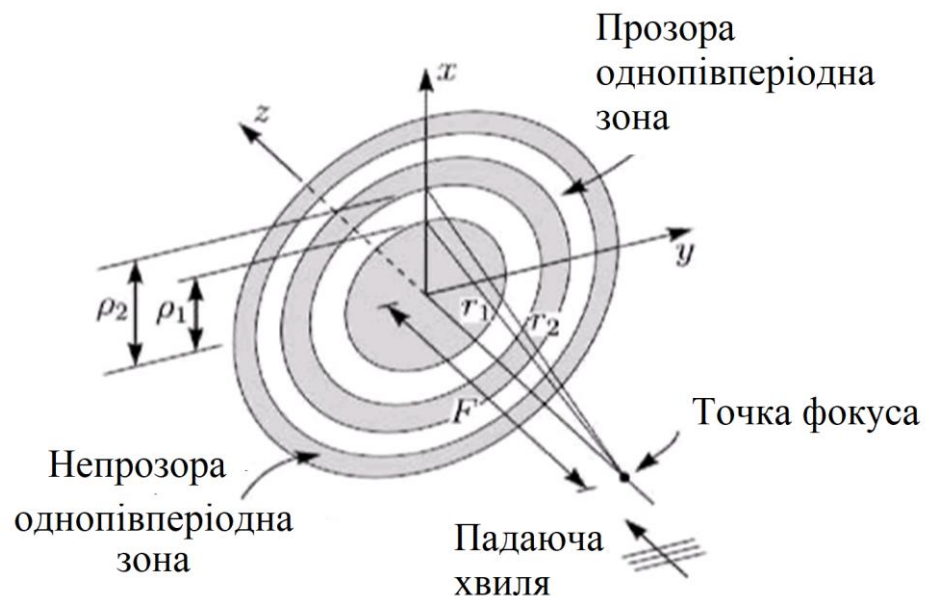


Рис. 2.1. Концепція зон Френеля

Кожна точка на площині має відповідну точку в межах тієї ж самої двонапівперіодної зони, внесок якої точно протилежний по фазі. Також кожна точка між A і B має відповідну протилежну по фазі точку між B і C. Жак-Луї Соре вказував, що якщо протилежні по фазі вклади можуть бути видалені, то вклади, що залишилися, будуть в точці F складатися з взаємним посиленням. Роблячи ділянки, що перемежуються, кожної зони на площині прозорими і непрозорими для електромагнітного випромінювання, зонна пластина може бути побудована так, що матиме фокусувальні властивості лінзи. Тому є дві однонапівперіодні зони на кожній двонапівперіодній зоні.



## Рис. 2.2. Геометрія зональної пластини Core

Найпростіший тип зонної пластини (зонна пластина Core) зроблений з кілець провідника (perfect electrical conductors — PEC), які блокують кожен другу однонапівперіодну зону, як і запропонував Core. Ця зонна пластина представлена на рис. 2.2. З нього видно, що частина поля, що падає, буде відображатися непрозорими (PEC) однонапівперіодними зонами, тоді як решта проходить крізь прозорі зони.

Однонапівперіодні зони конструюються так, що тільки та частина поля, яка буде з посиленням інтерферувати на відстані  $F$  перед зонною пластинною, відображатиметься непрозорими частинами зонної пластини. Подібна інтерференція з посиленням також матиме місце для поля, що проходить на відстані  $F$  за зонною пластинною. Тому ця конструкція має дві точки фокусу, і вона може бути використана або як відбиваюча зонна пластина, якщо споживання з тієї ж сторони від зонної пластини, що і падаюча хвиля, або як прохідна зонна пластина, якщо споживання організоване на протилежному боці зонної пластини.

Для забезпечення підсилюючої інтерференції радіуси зон обчислюються виходячи з вимоги, щоб відстань від точки фокусу до межі зони була на половину довжини хвилі більша, ніж відстань від точки фокусу до межі попередньої зони.

На рис. 2.2  $\rho_1$  і  $\rho_2$  обрані так, щоб  $r_2 = r_1 + \lambda/2$ .

Застосування цих вимог до кожної послідовної зони веде до добре відомої розрахункової формули для зонних пластин Core, зовнішній радіус для однонапівперіодної зони обчислюється за формулою

$$\rho_n = \sqrt{\left(\frac{n\lambda}{2}\right)^2 + n\lambda F}, \quad (2.1)$$

де  $n$  - номер однонапівперіодної зони;  $\lambda$  — необхідна довжина хвилі у

вільному просторі,  $m$ ;  $F$  — відстань до точки фокусування,  $m$ .

У загальну кількість однапівперіодних зон  $N_{soret}$  включені як прозорі, і непрозорі зони.

При обчисленні радіусів, які обмежують кожну однапівперіодну зону, ніколи не встановлюється, парна або непарна зона має бути зроблена непрозорою. Засновані на зонному принципі Френеля, ці доповнюючі одна одну конфігурації працюють однаково добре. Вибір, які зони мають бути зроблені непрозорими, залежить головним чином від призначення зонної пластини. Зазвичай парні зони непрозорі у прохідних зонних пластин. У цьому випадку загальна кількість однапівперіодних зон  $N_{soret}$  парна. Непарні зони непрозорі для відбивних зонних пластин, як на рис. 2.2, і  $N_{soret}$  непарні.

Методика розрахунку плоского друкованого відбивача Френеля представлена на рис. 2.3.

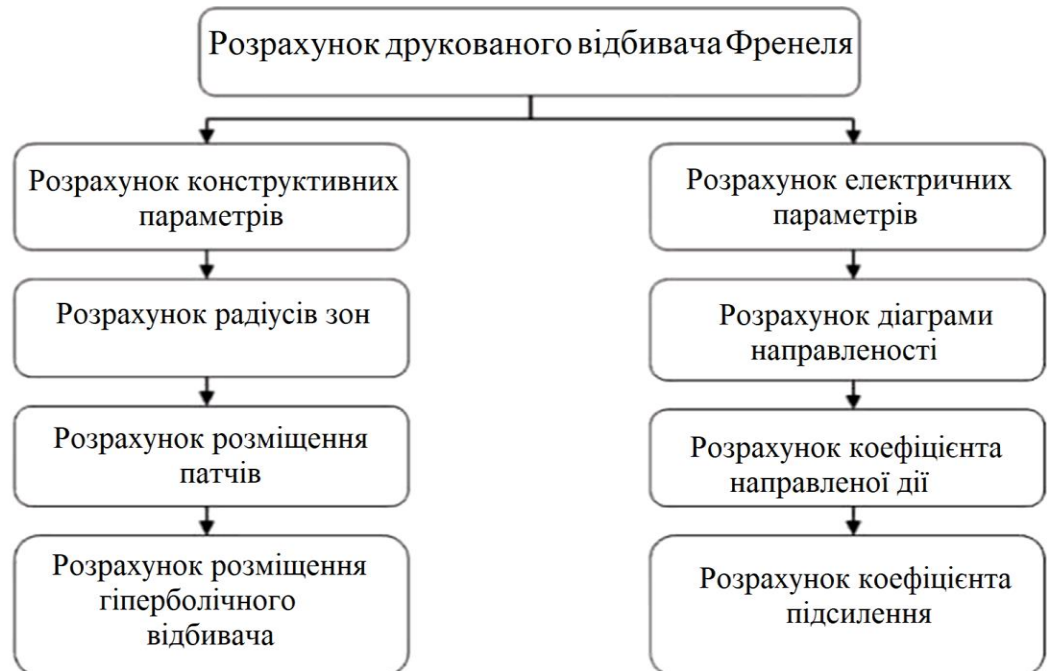


Рис. 2.3. Блок-схема етапів розрахунку плоского друкованого відбивача Френеля

Зовнішній радіус зон Френеля  $r_n$  визначено за формулою:

$$r_n = \sqrt{2nf \frac{\lambda}{P} + \left(n \frac{\lambda}{P}\right)^2}, \quad (2.2)$$

де  $r_n$  — зовнішній радіус фазокоректуючої зони, тобто підзони повнохвильової (двопівперіодної) зони Френеля, мм;

$n$  - номер зони, центральна зона має номер 1;

$f$  - фокусна відстань, мм;  $\lambda$  — довжина хвилі в мм, обчислюється за формулою  $\lambda = \frac{299792458}{\nu \cdot 1000000}$  при частоті  $\nu$  ГГц;

$P$  - число фазокоректуючих підзон у повнохвильовій зоні Френеля.  
Результати розрахунку та розташування патчів представлені на рис. 2.4.

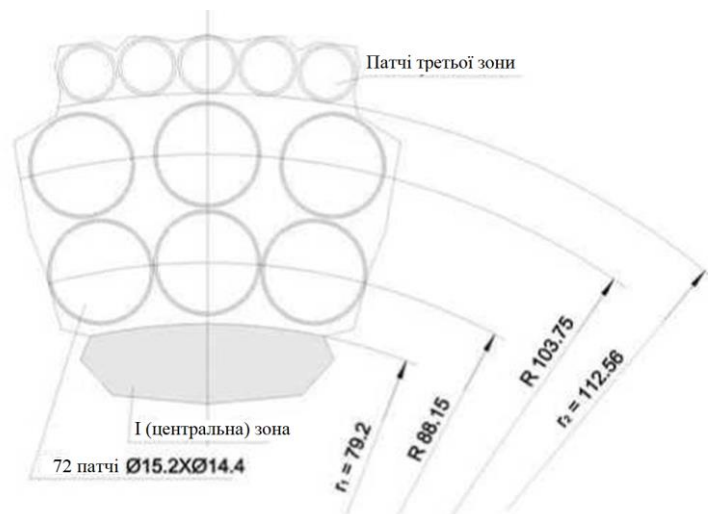


Рис. 2.4. Перша (повністю металізована) і наступна зони з сусідньою ділянкою

На рис. 2.5 наведено форму діаграми направленості та значення максимального коефіцієнта підсилення, коефіцієнт пісилення антени дано в декартових координатах у логарифмічному масштабі.



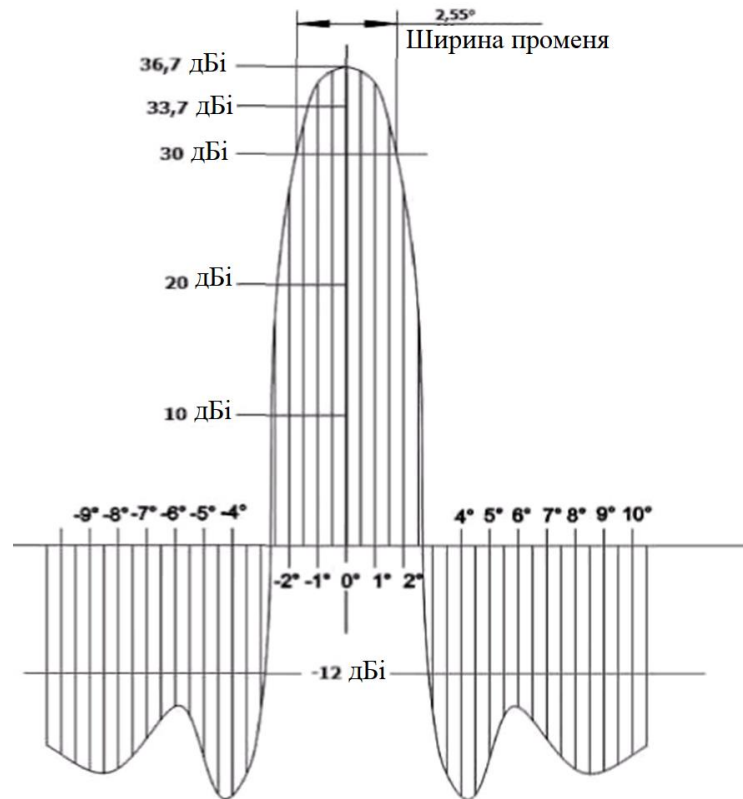


Рис. 2.5. ДН друкованої зональної антени Френеля

Розрахункове значення КНД:

$$D_0 = 36,45 \text{ дБи.}$$

При розрахунку апертурним методом, при коефіцієнті використання апертури  $e_a = 43\%$ , розрахунковий КП визначається за формулою

$$G = 10 \log \left( 4\pi \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot \frac{e_a}{\lambda^2} \right), \quad (2.3)$$

де  $G = 36,1$  дБи;  $D = 600$  мм - розрахунковий діаметр антени;  $e_a = 43\%$  - коефіцієнт використання апертури;  $\lambda = 26,23$  мм - довжина хвилі.

Розрахункова відносна смуга пропускання 3дБ за потужністю визначається

за формулою:

$$S_0 = \left(\frac{1}{N}\right) = 16\%, \quad (2.4)$$

де  $N = 6$  - Число напівхвильових зон.

На рис. 2.6 наведено залежність КП від частоти, звідки видно, що антена має смугу пропускання щонайменше 10 % лише на рівні 3 дБ.

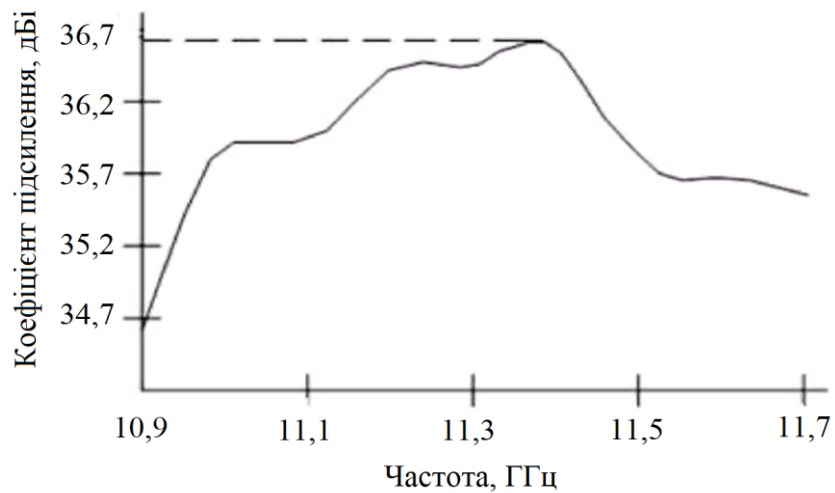


Рис. 2.6. Графік залежності КУ від частоти

Результати розрахунків представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

| Величина          | Ширина ДН | Рівень бокових пелюсток, дБі | $D_0$ , дБі | $G$ , дБі |
|-------------------|-----------|------------------------------|-------------|-----------|
| Отримане значення | 2,55      | -23                          | 36,45       | 36,1      |

З неї випливає, що запропонована антена має електричні характеристики, які можна порівняти з аналогічними характеристиками ДА і які відповідають вимогам, що висуваються до супутникових телевізійних систем.

### 2.3 Доцільність виконання розробки

З великої різноманітності антен систем супутникового ТБ найбільш поширені параболічні, плоскі ДА та плоскі АР.

Є цілий ряд конструкцій ДА, кожній з яких властиві певні переваги та недоліки. Параболічні антени, що застосовуються в даний час, здебільшого володіють симетрією обертання і заживлюються в центрі. Опромінювачі таких антен знаходяться у фокусі дзеркал, тобто на шляху поширення радіохвиль, тому ККД їх порівняно малий. До того ж є затіняюча дія системи живлення опромінювача, елементів його кріплення, і який зазвичай конструктивно поєднаний з опромінювачем перетворювача частоти. Дзеркала таких антен при великих розмірах виконуються з окремих сегментів, проте це погіршує електричні характеристики антен.

Вимоги до точності виготовлення дзеркал, що мають симетрію обертання, визначаються тим, наскільки важливо для конкретної антени досягти якості розсіювання косопадаючих електромагнітних хвиль. У простих антенах із відносно малими дзеркалами діаметром до 1,5 метра припустима помилка виготовлення їх поверхонь зазвичай становить частки міліметра. У великих антенах для досягнення необхідної точності поверхня дзеркал піддається додатковому обробленню, що не дуже зручно.

Деякі антени мають допоміжний рефлектор. Таке компонування дозволяє підвищити КП антени приблизно на десять відсотків порівняно з однодзеркальними антенами, проте при цьому рівень бічних пелюсток діаграми направленості зростають майже на десять децибелів, і дорогі у виготовленні.

Окрему групу антен для СЗ, складають антени зі зміщеним опромінювачем. Вони відрізняються тим, що для зменшення тіньового ефекту опромінювача, елементи його кріплення та заживлення винесені із зони поширення відбитих від

дзеркала хвиль. Високий ступінь придушення бічних пелюсток ДН в таких антенах забезпечується шляхом застосування рефлекторів спеціальної форми - раковиноподібних або рупорнопараболічних. Антенами зі зміщеним опромінювачем властиві і недоліки. Основним з них є менша ефективна площа розкриття у порівнянні з антенами, що мають центральний опромінювач. Пояснюється це тим, що радіохвилі падають на дзеркало не під прямим кутом, а під гострим, тому менша частина енергії сигналу, що приймається, фокусується дзеркалом на опромінювачі.

Рупорно-параболічні та раковиноподібні антени через несиметричну форму дзеркала мають погане подавлення крос-поляризації. Так як діапазон частот, що використовується в системах СЗ, розбитий на піддіапазони, що перекриваються, то поділ сигналів часто проводиться по поляризації радіохвиль. Тому на частотах 12 ГГц і вище для однакових розмірів кращим придушенням крос-поляризації володіють суцільнометалеві дзеркала.

З двох варіантів фокусуєчих антен великої площі (лінзових і дзеркальних) для прийому телевізійних програм через ШСЗ найбільшого поширення набули ДА, як найпростіші конструктивно. Недоліком однодзеркальної антени є необхідність застосування між опромінювачем і приймачем довгого хвилеводу або НВЧ-кабелю.

Основним недоліком всього типу параболічних антен є високі вимоги до точності виготовлення та відносно висока ціна.

Поряд з параболічними дзеркальними антенами широкого поширення набули ДА з плоским рефлектором і плоскі АР. Цей тип антен має такі переваги в порівнянні з параболічними антенами: мала маса, простота установки, малий аеродинамічний опір, виготовлення за інтегральною технологією дозволяє відносно легко досягти необхідної точності виготовлення, не вимагає очищення від метеопадів; але їх можна порівняти з параболічними антенами за характеристиками при розмірах трохи більше 0,6 метрів у діаметрі. У плоских

антенних решітках перший змішувач може бути встановлений безпосередньо в АР. Можливе електронне управління ДН. Дзеркальні антени з плоским рефлектором у деяких випадках виграють у плоских АР. Так як плоскі АР мають гірші електричні характеристики в порівнянні з ДА з плоским рефлектором, необхідність проведення налаштування та фазування при експлуатації, порівняно великий рівень бічного випромінювання, ще не вирішена проблема створення фазообертача для електронного управління ДН і загальна висока вартість.

Розвиток систем безпосереднього ТВ- мовлення зумовило широкий попит на абонентські приймальні антени, призначені для встановлення на стінах будівель.

Найбільшою мірою вимогам, які пред'являються до антени такого призначення, відповідають плоскі АР і ДА з плоским рефлектором. Останні мають найменшу вартість і вільні від недоліків властивих плоским АР та від основних недоліків параболічних антен, описаних вище. Цей факт дозволив вибрати основою конструкції ДА із плоским рефлектором, створену на основі мікросмужкових дифракційних решіток (МДР).

#### 2.4 Обґрунтування вибору аналога

Наступним етапом після вибору типу антени є пошук аналога пристрою. Аналіз результатів інформаційного пошуку та патентних досліджень, а також переваг та недоліків антен систем супутникового ТБ, тенденцією розвитку систем супутникового ТБ та інтересів широкого кола споживачів, описаних у попередньому розділі, дозволило обрати базову конструкцію аналога. Це антена Френеля для індивідуального прийому ТВ-сигналів із геостаціонарного супутника.

Конструкція являє собою ДА з плоским рефлектором, що має наступні характеристики: діаметр - 59 см, ПБП - 22 дБ, ККД - 43%, смуга частот за рівнем

3 дБ більше 10%, товщина підкладки 5 мм, діелектрична проникність підкладки 2,05. Антена також виконана методом коригування фази та є антеною для прийому супутникового ТБ.

Головною метою вдосконалення аналога є зменшення розмірів, виконання випромінюючих МСЕ у вигляді квадратних осередків, для зручності виготовлення, і, що найважливіше, зниження ціни виробу. Ця обставина дозволить використати цю антену широким верствам населення. Мала маса і габарити не складуть труднощів при транспортуванні та монтажі. При певному розташуванні будівель можливе використання антени з приміщень.

## 2.5 Обґрунтування вихідних даних

Для задання вихідних даних необхідно спиратися будь-яку фізичну модель, що дозволяє розрахувати задану конструкцію. Виберемо спочатку метод розрахунку.

Отримати необхідну корекцію фази, що реалізується МДР, можна двома методами. Метод фізичної оптики заснований на визначенні струму на освітленій поверхні рефлектора, що дорівнює полю падаючої електромагнітної хвилі. Метод геометричної оптики заснований на припущенні променевого поширення електромагнітних хвиль. Метод фізичної оптики точніший, проте, у разі розподілу фази поля вздовж рефлектора, фази полів, отримані обома методами, розрізняються незначно. Тому пояснення принципу корекції фази можна побудувати на більш простому з цих методів, саме методі геометричної оптики як показано на рис. 2.7 де  $f$  - фокус, розрахункове значення фазової затримки визначається різницею ходу променів  $3$  і  $3'$ . Як видно із рис. 2.7 для методу геометричної оптики потрібна наявність "еталонного" зразка. Цим еталоном виберемо параболічну дзеркальну антену, оскільки теорія розрахунку параболічних дзеркальних антен добре розроблена і отже теоретичні

характеристики ДН узгоджуються з експериментальними. Як прототип була використана параболічна дзеркальна антена, що має наступні характеристики:  $f/\lambda_0=3$  ,  $D/\lambda_0=7,5$  , де  $f$  фокусна відстань,  $D$ - діаметр рефлектора,  $\lambda_0$ - робоча довжина хвилі

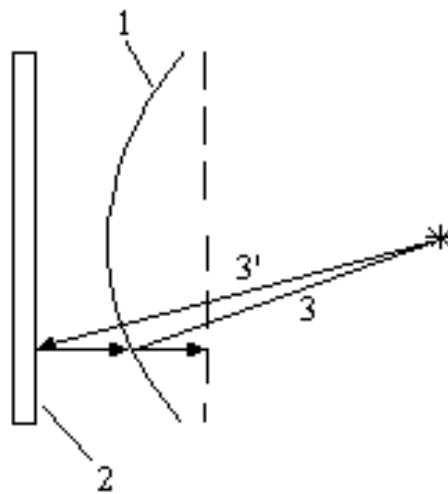


Рис. 2.7. Вимірювання фази методом геометричної оптики

Розмір дзеркальної антени з плоским рефлектором рівний 240 мм, фокусна відстань 96 мм, характеристики ДН: ширина ДН по нулях дорівнює 20 град, ПБП - 20 дБ були задані такими як у прототипу, що дозволяє порівняти отримані експериментально ДН параболічної ДА з плоским рефлектором з ДН параболічної ДА, взятої за еталон і представленої на рис.2.8.

Вибір товщини підкладки  $h$  заснований на збільшенні діапазону фазових затримок. Ряд залежностей зміни фази  $\varphi(l/\lambda)$  при різних значеннях наведено на рис. 2.9. Чим тонша підкладка, тим ширше діапазон фазових затримок, що реалізуються. Виходячи з викладеного  $h$  вибрано 1 мм.

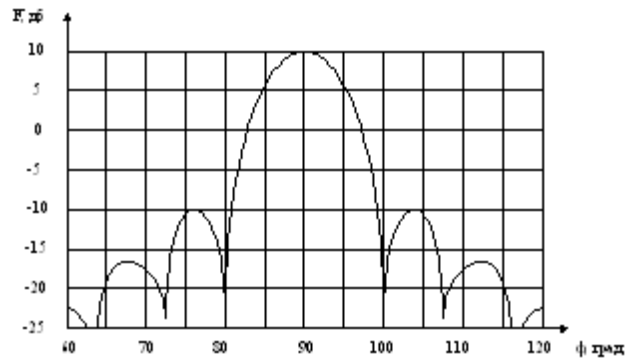


Рис. 2.8. ДН параболічної ЗА

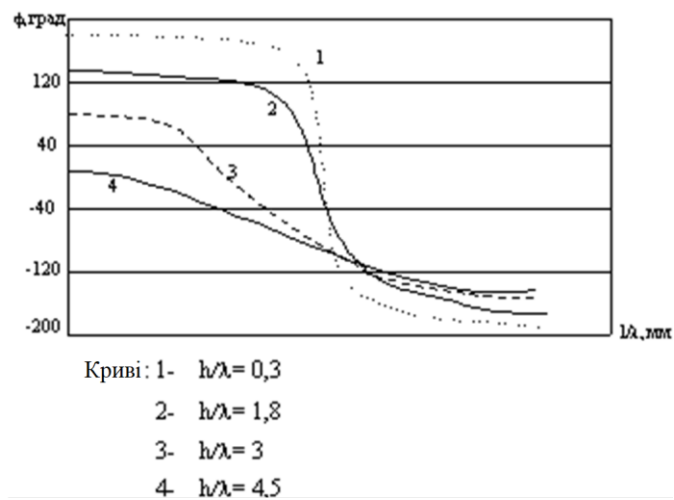


Рис. 2.9. Залежність затримки фази

У результаті при обґрунтуванні вихідних даних визначено необхідну кількість апріорних відомостей, які надалі будуть використані для розрахунку та аналізу конструкції, що розробляється.

## 2.6 Висновки до розділу 2

В розділі проведено аналіз прототипів типових антен, які застосовуються для систем супутникового зв'язку, їх конструкцій і характеристик, зокрема параболічних та плоских антен і антенних решіток. Також розглянуто принцип роботи антени Френеля.



Встановлено, що дзеркальні антени з плоским рефлектором відрізняються найменшою вартістю та відсутністю недоліків, які притаманні плоским антенним решіткам і параболічним антенам. На основі цього вибрано за основу проєктованої конструкції дзеркальну антену із плоским рефлектором, створену на основі мікросмужкових дифракційних решіток. Також було вибрано аналог, яз характеристиками якого будуть порівнюватись характеристики розробленої конструкції.

## РОЗДІЛ 3

### НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Моделювання мікросмужкових дифракційних решіток

Розглянемо крайову (граничну) задачу. Нехай над нескінченною ідеально провідною площиною розміщується шар магнітодіелектрика з товщиною  $d$  (область  $V_1$ ). На поверхні шару розташовані мікросмужкові елементи довільної форми. Нехай ці елементи решітки збуджуються плоскою хвилею довільної поляризації. Джерела збудження  $\vec{j}^{ест}, \vec{j}^{мст}$  розміщені в області  $V_j$ , що знаходиться в  $V_1$ . Параметри середовищ в областях  $V_1$  та  $V_2$  становлять  $\varepsilon_1, \mu_1, k_1, W_1$  і  $\varepsilon_2, \mu_2, k_2, W_2$ , де  $\varepsilon_{1,2}, \mu_{1,2}, k_{1,2}, W_{1,2}$  - діелектрична та магнітна проникності, постійна розповсюдження та хвильовий опір. Необхідно визначити розподіл векторної поверхневої щільності магнітного струму на поверхні решітки, на якій відсутні мікросмужкові елементи, а через неї розрахувати розсіяне решіткою поле та проаналізувати залежність характеристик розсіювання від форм мікросмужкових елементів, товщини та параметрів матеріалу підкладки.

Використаємо спосіб інтегральних рівнянь (ІР).

Вираз для полів для області  $V_1$  на основі леми Лоренца матиме вигляд:

$$\int_{\Sigma_1} \left\{ \vec{E}_1, \vec{H}_1^b \right\} - \left[ \vec{E}_1^b, \vec{H}_1 \right] \vec{n}_1 dS' = \int_{V_1} \left( \vec{j}_{b_1}^m \vec{H}_1 - \vec{j}_{b_1}^e \vec{E}_1 \right) dV' + \int_{V_j} \left( \vec{j}^{ест} \vec{E}_1^b - \vec{j}^{мст} \vec{H}_1^b \right) dV' , \quad (3.1)$$

Для  $V_2$ :

$$\int_{\Sigma_2} \left\{ [\vec{E}_2, \vec{H}_2^b] - [\vec{E}_2^b, \vec{H}_2] \right\} \vec{n}_2 dS' = \int_{V_2} (\vec{j}_{b_2}^m \vec{H}_2 - \vec{j}_{b_2}^e \vec{E}_2) dV' \quad (3.2)$$

В цих виразах  $\vec{E}_1, \vec{H}_1$  і  $\vec{E}_2, \vec{H}_2$  – відповідні поля для  $V_1$  та  $V_2$  областей;  $\vec{E}_1^b, \vec{H}_1^b$  та  $\vec{E}_2^b, \vec{H}_2^b$  – електронні та магнітні поля допоміжних джерел відповідно у  $V_1$  та  $V_2$ ;  $\vec{j}_{b_1, b_2}^m$  і  $\vec{j}_{b_1, b_2}^e$  – об'ємні густини струмів магнітного та електричного джерел відповідно у  $V_1$  і  $V_2$ .

Допоміжне поле відповідає граничній умові

$$[\vec{n}_1, \vec{E}_1^b]_{\Sigma_1} = 0 \quad (3.4)$$

Врахуємо той факт, що через умови випромінювання, інтеграл по нескінченній півсфері в області  $V_1$  дорівнює нулю.

Тоді вираз (1) набуде вигляду

$$\int_{S_0} [\vec{E}_1, \vec{H}_1^b] \vec{n}_1 dS' = \vec{H}_1(p) \vec{\nu} - \xi \vec{H}_1^b(q^0, p) \quad (3.5)$$

У ДСК з виразу (5) отримаємо

$$\int_{S_0} \{ E_{1y} H_{1x}^b - E_{1x} H_{1y}^b \} dS' = \vec{H}_1(p) \vec{\nu} - \xi \vec{H}_1^b(q^0, p) \quad (3.6)$$

У попередніх двох виразах  $S_0$  – поверхня решітки, що не зайнята мікросмушковими елементами. Перетворимо вираз (6):

$$\vec{H}_1(p) \vec{\nu} = \int_{S_0} \{ E_{1y}(q) H_{1x}^b(q, p) - E_{1x}(q) H_{1y}^b(q, p) \} dS_q + \xi \vec{H}_1^b(q^0, p) \quad (3.7)$$

В такий спосіб було виведено формулу магнітного поля для  $V_1$ .

Виведемо формулу магнітного поля  $V_2$ . Як і для попереднього випадку має задовольнятися умова:

$$\left[ \vec{n}_2, \vec{E}_2^b \right]_{\Sigma_2} = 0 \quad (3.8)$$

Врахуємо, що дотичні складові шуканого електричного поля  $\vec{E}_2$  на ідеально провідних межах, рівні нулю. Також врахуємо умови випромінювання. Тоді вираз (2) набуде вигляду

$$\int_{S_0} \left[ \vec{E}_2, \vec{H}_2^b \right] \vec{n}_2 dS' = \vec{H}_2(p) \vec{v} \quad (3.9)$$

Розкриваючи векторний добуток у ДСК, отримаємо

$$\int_{S_0} \left\{ E_{2y} H_{2x}^b - E_{2x} H_{2y}^b \right\} dS' = \vec{H}_2(p) \vec{v} \quad (3.10)$$

Перетворимо вираз (10):

$$\vec{H}_2(p) \vec{v} = - \int_{S_0} \left\{ E_{2y}(q) H_{2x}^b(q, p) - E_{2x}(q) H_{2y}^b(q, p) \right\} dS_q \quad (3.11)$$

В такий спосіб ми отримали формулу магнітного поля  $V_2$ .

З (7) і (11) отримаємо систему ІР відносно дотичних електричного поля  $E_x(q)$  і  $E_y(q)$  на  $S_0$ . Щоб виконувалась умова

$$H_{1x}|_{s_0} = H_{2x}|_{s_0}, H_{1y}|_{s_0} = H_{2y}|_{s_0}, \quad (3.12)$$

зобразимо залежності  $H_x$  і  $H_y$  окремо. Вводячи  $\vec{V}$  в (7) і (11), отримаємо для  $V_1$  і  $V_2$ :

$$\vec{H}_{1x}(p) = \int_{S_0} \{E_{1y}(q)\tilde{H}_{1x}^b(q, p) - E_{1x}(q)\tilde{H}_{1y}^b(q, p)\} dS_q + \vec{\xi}\tilde{H}_1^b(q^0, p), \quad (3.13)$$

$$\vec{H}_{2x}(p) = - \int_{S_0} \{E_{2y}(q)\tilde{H}_{2x}^b(q, p) - E_{2x}(q)\tilde{H}_{2y}^b(q, p)\} dS_q. \quad (3.14)$$

Запишемо тепер перше ІР:

$$\int_{S_0} \{E_y(q)[\tilde{H}_{1x}^b(q, p) + \tilde{H}_{2x}^b(q, p)] - E_{1x}(q)[\tilde{H}_{1y}^b(q, p) + \tilde{H}_{2y}^b(q, p)]\} dS_q = -\vec{\xi}\tilde{H}_1^b(q^0, p) \quad (3.15)$$

Аналогічним чином виведемо друге ІР:

$$\int_{S_0} \{E_y(q)[\hat{H}_{1x}^b(q, p) + \hat{H}_{2x}^b(q, p)] - E_{1x}(q)[\hat{H}_{1y}^b(q, p) + \hat{H}_{2y}^b(q, p)]\} dS_q = -\vec{\xi}\hat{H}_1^b(q^0, p), \quad (3.16)$$

В цих двох рівняннях  $\hat{H}_{1x}^b, \hat{H}_{2x}^b, \hat{H}_{1y}^b, \hat{H}_{2y}^b$  характеризують додаткові поля, які є результатом роботи елементарного магнітного вібратора, для якого характерним є момент, що рівний 1, і який діє в напрямку осі.

Допоміжні поля є розв'язками неоднорідного рівняння Гельмгольца для областей  $V_1$  і  $V_2$  за відсутності зв'язку між ними, тобто при металізації отворів  $S_0$

$$\nabla^2 \vec{A}_{1,2}^{m,b} + k_{1,2}^2 \vec{A}_{1,2}^{m,b} = -\vec{J}_{1,2}^{m,b} \quad (3.17)$$

та задовольняють граничним умовам

$$\left. \frac{\partial H_{1,2x}^b}{\partial n_{1,2}} \right|_{S_{1,2}} = 0 ; \quad \left. \frac{\partial H_{1,2y}^b}{\partial n_{1,2}} \right|_{S_{1,2}} = 0 \quad , \quad (3.18)$$

$$\vec{H}_{1,2}^b = -i\omega \varepsilon_{1,2} \vec{A}_{1,2}^{m,b} + \frac{1}{i\omega \mu_{1,2}} \text{grad div} \vec{A}_{1,2}^{m,b} \quad , \quad (3.19)$$

де  $\vec{H}_{1,2}^b$  - векторний магнітний потенціал;  $S_{1,2}$  - поверхні, що обмежують відповідно області  $V_1$  та  $V_2$ . Після підстановки у формулу (17) вирази для  $\vec{J}_{1,2}^{m,b}$  з виразу (3) та переходу в ДСК отримаємо два допоміжні завдання для складових векторного магнітного потенціалу  $\vec{A}_{1,2x}^{m,b}$  і  $\vec{A}_{1,2y}^{m,b}$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \vec{A}_{1,2x}^{m,b} + k_{1,2}^2 \vec{A}_{1,2x}^{m,b} &= -\delta(q-p) \\ \left. \frac{\partial \vec{A}_{1,2x}^{m,b}}{\partial z} \right|_{S_{1,2}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad , \quad (3.20)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \vec{A}_{1,2y}^{m,b} + k_{1,2}^2 \vec{A}_{1,2y}^{m,b} &= -\delta(q-p) \\ \left. \frac{\partial \vec{A}_{1,2y}^{m,b}}{\partial z} \right|_{S_{1,2}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad . \quad (3.21)$$

При цьому допоміжні поля  $\vec{H}_{1,2x}^b, \vec{H}_{1,2y}^b$  і  $\vec{H}_{1,2x}^b, \vec{H}_{1,2y}^b$  визначаються виразами, такими (19):

$$\left. \begin{aligned} \tilde{H}_{1,2x}^b &= \frac{1}{i\omega\mu_{1,2}} \left( k_{1,2}^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) A_{1,2x}^{m,b} \\ \tilde{H}_{1,2y}^b &= \frac{1}{i\omega\mu_{1,2}} \frac{\partial^2 A_{1,2x}^{m,b}}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{H}_{1,2y}^b &= \frac{1}{i\omega\mu_{1,2}} \left( k_{1,2}^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) A_{1,2y}^{m,b} \\ \hat{H}_{1,2x}^b &= \frac{1}{i\omega\mu_{1,2}} \frac{\partial^2 A_{1,2y}^{m,b}}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Таким чином, необхідно вирішити наступну систему двох скалярних ІР

$$\int_{S_0} \left\{ E_y(q) [\tilde{H}_{1x}^b(q,p) + \tilde{H}_{2x}^b(q,p)] - E_{1x}(q) [\tilde{H}_{1y}^b(q,p) + \tilde{H}_{2y}^b(q,p)] \right\} dS_q = -\bar{\xi} \tilde{H}_1^b(q^0, p),$$

$$\int_{S_0} \left\{ E_y(q) [\hat{H}_{1x}^b(q,p) + \hat{H}_{2x}^b(q,p)] - E_{1x}(q) [\hat{H}_{1y}^b(q,p) + \hat{H}_{2y}^b(q,p)] \right\} dS_q = -\bar{\xi} \hat{H}_1^b(q^0, p),$$

де  $E_x(q)$ ,  $E_y(q)$ - компоненти дотичної складової електричного поля в отворах, що є функціями, що шукаються;  $\tilde{H}_{1x}^b(q,p)$ ,  $\tilde{H}_{1,2y}^b(q,p)$ - допоміжні поля, які можна знайти з (20) та рівнянь зв'язку (22);  $\hat{H}_{1,2x}^b(q,p)$ ,  $\hat{H}_{1,2y}^b(q,p)$ - допоміжні поля, що визначаються з вирішення граничного завдання (21) та рівнянь зв'язку (23);  $q$ -довільна точка, що має координати  $(x, y, z)$ ;  $p$ -точка спостереження з координатами  $(x, y, z)$ ;  $q^0$ - точка, в якій розміщено стороннє джерело, з координатами  $(x^0, y^0, z^0)$ .

### 3.2 Додаткові задачі

Для визначення допоміжних полів в області  $V_1$  необхідно вирішити задачу збудження електромагнітним вібратором напівпростору  $Z > 0$  з межею, що ідеально проводить  $Z = 0$ .

Використаємо метод дзеркальних зображень. Оскільки рішення для вільного простору відоме, то неважко отримати рішення за наявності ідеально провідної межі. Векторний потенціал струму допоміжного джерела  $\vec{J}_1^{m,b}$  - має єдину складову, що визначається виразами

$$A_{1x}^{m,b} \equiv \int_{V_j} j_{1x}^{m,b}(q)G(q, p)dV_q, \quad (3.24)$$

$$A_{1y}^{m,b} \equiv \int_{V_j} j_{1y}^{m,b}(q)G(q, p)dV_q. \quad (3.25)$$

Використовуємо згорнуте уявлення функції Гріна  $G(q,p)$  і враховуючи розташування реального та дзеркального джерел, підставляючи (3) (3.24) і (3.25) відповідно отримаємо

$$A_{1x}^{m,b} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{1}{R_1} \exp(-ik_1 R_1) + \frac{1}{R_2} \exp(-ik_1 R_2) \right), \quad (3.26)$$

$$A_{1y}^{m,b} = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{1}{R_1} \exp(-ik_1 R_1) + \frac{1}{R_2} \exp(-ik_1 R_2) \right), \quad (3.27)$$

$$R_1 = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2},$$

$$R_2 = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2}.$$

Для визначення складових допоміжних полів скористаємося функціями зв'язку (3.22) та (3.23). Тут необхідно зупинитися на питанні про те, коли можна подати допоміжне поле у вигляді "добутку" диференціального оператора на векторний потенціал, а коли необхідно вплинути цим диференціальним оператором на векторний потенціал (3.26), (3.27). При вирішенні цього питання необхідно керуватися такими міркуваннями. У тому випадку, коли поля ,



визначені з вирішення допоміжних завдань  $\tilde{H}_{1,2x}^b(q, p)$ ,  $\tilde{H}_{1,2y}^b(q, p)$ ,  $\hat{H}_{1,2x}^b(q, p)$ ,  $\hat{H}_{1,2y}^b(q, p)$  підставляються в ліву частину системи інтегральних рівнянь (3.15) і (3.16), точки  $q$  і  $p$  належать поверхні  $S_0$ , тобто поверхні, на якій задовольняється гранична умова (3.12). І тут поле допоміжних завдань (3.20), (3.21) можна доводити до появи векторних потенціалів, а допоміжні поля представляти як (3.22) і (3.23). Тоді компоненти тензорного ядра системи IP (3.15), (3.16) можна буде представити у вигляді рядів, що абсолютно сходяться, по IP рівнянь (3.15) та (3.16) точки спостереження допоміжних полів  $\hat{H}_1^b(q^0, p)$  і  $\tilde{H}_1^b(q^0, p)$  необхідно поєднувати з тією точкою на півпросторі з розміщенням стороннього джерела. В цьому випадку поля допоміжних завдань (3.20), (3.21) необхідно доводити до визначення полів, тобто діяти диференціальним оператором (3.22), (3.23) на векторні потенціали.

Для аналізу правих частин IP (3.15) потрібно визначити  $\tilde{H}_{1x}^b(q^0, p)$  та  $\tilde{H}_{1y}^b(q^0, p)$ . Для того, щоб оцінити праву частину (3.16) потрібно визначити  $\hat{H}_{1x}^b(q^0, p)$ ,  $\hat{H}_{1y}^b(q^0, p)$ . Ці складові знаходяться з (3.22) та (3.23) з урахуванням (3.26) і (3.27). Отримаємо з (3.22) і (3.23) наступні співвідношення:

$$\tilde{H}_{1x}^b = \frac{2iG}{k_1 W_1} \left[ \frac{D}{Rq^0 p} - EA^2 - k_1^2 \right], \quad (3.28)$$

$$\tilde{H}_{1y}^b = -\frac{2iG}{k_1 W_1} ABE, \quad (3.29)$$

$$\hat{H}_{1x}^b = -\frac{2iG}{k_1 W_1} ABE, \quad (3.30)$$

$$\hat{H}_{1y}^b = \frac{2iG}{k_1 W_1} \left[ \frac{D}{Rq^0 p} - EA^2 - k_1^2 \right], \quad (3.31)$$

$$A = \frac{x^0 - x}{Rq^0 p}, \quad B = \frac{y^0 - y}{Rq^0 p}, \quad D = \frac{1 + jk_1 Rq^0 p}{Rq^0 p},$$

$$E = D^2 - \frac{D}{Rq^0 p} + \frac{1}{R^2 q^0 p}; \quad G = \frac{1}{4\pi} \frac{\exp(-1k_1 Rq^0 p)}{R^2 q^0 p}; \quad Rq^0 p = \sqrt{(x^0 - x)^2 + (y^0 - y)^2 + z^2}.$$

Припустимо, що стороннє джерело розміщене в дальній зоні,  $Rq^0 p \rightarrow \infty$ .  
Вираз відстані  $Rq^0 p$  можна представити у вигляді

$$R_{q^0 p} = R - \sin \theta_i (x \cos \phi_i + y \sin \phi_i) \quad (3.32)$$

Вирази для коефіцієнтів А, В, Д, Е, G, що входять до (3.28) - (3.31), у цьому випадку також спростяться і вирази (3.28) - (3.31) набудуть вигляду

$$\tilde{H}_{1x}^b(q^0, p) = \frac{2iG^0}{W_1} k_1 [(\sin \theta_i \cos \phi_i)^2 - 1] \quad (3.33)$$

$$\tilde{H}_{1y}^b(q^0, p) = \frac{2iG^0}{W_1} k_1 \sin^2 \theta_i \cos \phi_i \sin \phi_i \quad (3.34)$$

$$\hat{H}_{1x}^b(q^0, p) = \frac{2iG^0}{W_1} k_1 \sin^2 \theta_i \cos \phi_i \sin \phi_i \quad (3.35)$$

$$\hat{H}_{1y}^b(q^0, p) = \frac{2iG^0}{W_1} k_1 [(\sin \theta_i \cos \phi_i)^2 - 1] \quad (3.36)$$

$$G_0 = \frac{e^{-ik_1 R}}{4\pi R} e^{ik_1 \sin \theta_i (x \cos \phi_i + y \sin \phi_i)} \quad (3.37)$$

Тепер, щоб оцінити праві частини IP (3.15) і (3.16) тобто скалярні добутки  $\vec{\xi} \tilde{\hat{H}}_1^b(q_0, p)$  та  $\vec{\xi} \hat{H}_1^b(q_0, p)$ , необхідно знайти вектор  $\vec{\xi}$ . Задавши вектор  $\vec{\xi}$

отримаємо такі висловлювання для правих частин (3.15) та (3.16).

Випадок горизонтальної поляризації

$$\tilde{H}_1^b(q_0, p) = -2H_0 \cos \phi_i \cos \theta_i \exp(ik_1 \sin \theta_i (x \cos \phi_i + y \sin \phi_i)), \quad (3.37)$$

$$\hat{H}_1^b(q_0, p) = -2H_0 \sin \phi_i \cos \theta_i \exp(ik_1 \sin \theta_i (x \cos \phi_i + y \sin \phi_i)), \quad (3.38)$$

Випадок вертикальної поляризації

$$\tilde{H}_1^b(q_0, p) = -2H_0 \sin \phi_i \exp(ik_1 \sin \theta_i (x \cos \phi_i + y \sin \phi_i)), \quad (3.39)$$

$$\hat{H}_1^b(q_0, p) = 2H_0 \cos \phi_i \exp(ik_1 \sin \theta_i (x \cos \phi_i + y \sin \phi_i)). \quad (3.40)$$

Отже, виведені залежності для правих складових суми скалярних IP (3.15) та (16), що відповідають випадкам порушення мікросмужкових ґрат плоскою хвилею горизонтальної та вертикальної поляризації. Визначення допоміжних полів  $\tilde{H}_{1x}^b(q, p)$ ,  $\tilde{H}_{1y}^b(q, p)$ ,  $\hat{H}_{1x}^b(q, p)$ ,  $\hat{H}_{1y}^b(q, p)$ , входять до лівої частини суми скалярних IP (3.15) та (3.16).

Використовуємо представлення функції Гріна вільного простору  $G(p, q)$  у ДСК та врахуємо струми реального та дзеркального джерел. Тоді з (3.24) та (3.25) отримаємо

$$A_{1x}^{mb}(p, q) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\chi_1(x-x')-i\chi_2(y-y')}}{\gamma_1} \left\{ e^{\pm\gamma_1(z-z')} + e^{-\gamma_1(z+z')} \right\} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.41)$$

$$A_{1y}^{mb}(p, q) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\chi_1(x-x')-i\chi_2(y-y')}}{\gamma_1} \left\{ e^{\pm\gamma_1(z-z')} + e^{-\gamma_2(z+z')} \right\} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.42)$$

де  $\gamma_1 = \sqrt{\chi_1^2 + \chi_2^2 - k_1^2}$ . Як зазначалося вище, при визначенні допоміжних полів, що входять до лівої частини суми (3.15) і (3.16), точки  $p$  і  $q$  слід помістити на поверхню  $S_0$ . Тому в (3.41) і (3.42) вважаємо, в результаті отримаємо

$$A_{1x}^{mb}(p, q) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y')}}{\gamma_1} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.43)$$

$$A_{1y}^{mb}(p, q) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y')}}{\gamma_1} d\chi_1 d\chi_2. \quad (3.44)$$

Підставляючи (3.43) і (3.44) у (3.22) і (3.23) відповідно, отримуємо складові допоміжних полів

$$\tilde{H}_{1x}^b(q, p) = \frac{1}{8\pi^2} \frac{1}{ik_1 W_1} \left( k_1^2 + \frac{\partial^2}{(\partial x')^2} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_1} e^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y')} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.45)$$

$$\tilde{H}_{1y}^b(q, p) = \frac{1}{8\pi^2} \frac{1}{ik_1 W_1} \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_1} e^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y')} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.46)$$

$$\hat{H}_{1y}^b(q, p) = \frac{1}{8\pi^2} \frac{1}{ik_1 W_1} \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_1} e^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y')} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.47)$$

$$\hat{H}_{1x}^b(q, p) = \frac{1}{8\pi^2} \frac{1}{ik_1 W_1} \left( k_1^2 + \frac{\partial^2}{(\partial y')^2} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_1} e^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y')} d\chi_1 d\chi_2. \quad (3.48)$$

Визначення допоміжних полів області  $V_2$ :  $\tilde{H}_{2x}^b(q, p)$ ,  $\tilde{H}_{2y}^b(q, p)$ ,  $\hat{H}_{2x}^b(q, p)$ ,  $\hat{H}_{2y}^b(q, p)$ . Для визначення допоміжних полів області  $V_2$  необхідно вирішити допоміжні завдання (3.20) і (3.21). Необхідно врахувати таке допоміжне завдання: збудження елементарним магнітним вібратором плоскопаралельного хвилеводу (рис. 2.4), при цьому вирази (3.20) та (3.21) набудуть вигляду

$$\left. \begin{aligned} \Delta A_{2x}^{m,b} + k_2^2 A_{2x}^{m,b} &= -\delta(q-p) \\ \frac{\partial A_{2x}^{m,b}}{\partial z} \Big|_{z=0, z=-d} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3.49)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta A_{2y}^{m,b} + k_2^2 A_{2y}^{m,b} &= -\delta(q-p) \\ \frac{\partial A_{2y}^{m,b}}{\partial z} \Big|_{z=0, z=-d} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.50)$$

Загальне рішення диференціальних рівнянь, що входять до (3.49) і (3.50), має вигляд

$$G_0(q, p) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{\gamma_2}^{\infty} \frac{1}{\gamma_2} e^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y') \pm \gamma_2(z-z')} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.51)$$

де  $\gamma_2 = \sqrt{\chi_1^2 + \chi_2^2 - k_1^2}$ , знак "плюс" у показнику експоненти береться за  $(z - z') < 0$ , а знак "мінус" при  $(z - z') > 0$ .

Оскільки в задачах (3.49) і (3.50) дві граничні поверхні  $z=0$  і  $z=-d$ , то їх розв'язання будемо шукати у вигляді суми загального рішення (3.51) та двох окремих рішень:

$$A_{2\left\{\begin{smallmatrix} x \\ y \end{smallmatrix}\right\}}^{mb}(p, q) = G_0(p, q) + A_2^{(1)}(p, q) + A_2^{(2)}(p, q), \quad (3.52)$$

$A_2^{(1)}(p, q)$  - перше частинне рішення (3.49) та (3.50),  $A_2^{(2)}(p, q)$  - друге частинне рішення (3.49) та (3.50). Вираз (3.52) є скороченим записом двох рішень:

$A_{2x}^{mb}(p, q)$  - рішення завдання (3.49) та  $A_{2y}^{mb}(p, q)$  - розв'язання задачі (3.50).

Представимо часткові вирішення  $A_2^{(1)}(p, q)$  і  $A_2^{(2)}(p, q)$  у вигляді інтегралів Фур'є з невідомими спектральними щільностями  $A_2^{(1)}(\chi_1, \chi_2, z')$  і  $A_2^{(2)}(\chi_1, \chi_2, z')$ :

$$A_2^{(1)}(q, p) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} A_2^{(1)}(\chi_1, \chi_2, z') e^{-\gamma_2 z} \frac{1}{\gamma_2} e^{-i\chi_1(x-x')-i\chi_2(y-y')} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.53)$$

$$A_2^{(2)}(q, p) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} A_2^{(2)}(\chi_1, \chi_2, z') e^{\gamma_2 z} \frac{1}{\gamma_2} e^{-i\chi_1(x-x')-i\chi_2(y-y')} d\chi_1 d\chi_2. \quad (3.54)$$

Підставляючи (3.51), (3.53) і (3.54) (3.52), отримаємо

$$A_{2\left\{\begin{matrix} x \\ y \end{matrix}\right\}}^{m,b}(q, p) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_2} e^{-i\chi_1(x-x')-i\chi_2(y-y')} \cdot \left\{ e^{\pm\gamma_2(z-z')} + A_2^{(1)}(\chi_1, \chi_2, z') e^{-\gamma_2 z} + A_2^{(2)}(\chi_1, \chi_2, z') e^{\gamma_2 z} \right\} d\chi_1 d\chi_2. \quad (3.55)$$

Невідомі спектральні густини  $A_2^{(1)}(\chi_1, \chi_2, z')$  і  $A_2^{(2)}(\chi_1, \chi_2, z')$  визначаються з граничних умов допоміжних завдань (3.49) та (3.50). Кожна з цих граничних умов призводить до системи рівнянь алгебри щодо шуканих спектральних щільностей

$$\left. \begin{aligned} e^{\gamma_2 z'} - A_2^{(1)}(\chi_1, \chi_2, z') + A_2^{(2)}(\chi_1, \chi_2, z') &= 0 \\ e^{\gamma_2(d+z')} - A_2^{(1)}(\chi_1, \chi_2, z') e^{\gamma_2 d} + A_2^{(2)}(\chi_1, \chi_2, z') e^{-\gamma_2 d} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3.56)$$

З рішення системи рівнянь (3.56) отримаємо

$$A_2^{(1)}(\chi_1, \chi_2, z') = \frac{ch\gamma_2(d+z')}{sh\gamma_2 d} - e^{\gamma_2 z'}, A_2^{(2)}(\chi_1, \chi_2, z') = \frac{ch\gamma_2(d+z')}{sh\gamma_2 d}. \quad (3.57)$$

Підстановка (3.57) (3.55) дозволяє визначити рішення (3.49) і (3.50)

$$A_{2\left\{\begin{smallmatrix} x \\ y \end{smallmatrix}\right\}}^{m,b}(q,p) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_2} e^{-i\chi_1(x-x')-i\chi_2(y-y')} \cdot \left\{ e^{\gamma_2(z-z')} + \frac{ch\gamma_2(d+z')}{sh\gamma_2 d} e^{\gamma_2 z'} + \left( \frac{ch\gamma_2(d+z')}{sh\gamma_2 d} - e^{\gamma_2 z'} \right) e^{-\gamma_2 z} \right\} d\chi_1 d\chi_2. \quad (3.58)$$

Оскільки при підстановці допоміжних полів  $\hat{H}_{2x}^b(q,p)$ ,  $\hat{H}_{2y}^b(q,p)$ ,  $\tilde{H}_{2x}^b(q,p)$ ,  $\tilde{H}_{2y}^b(q,p)$  в систему IP (3.15) і (3.16) вважають, що точки  $p$  і  $q$  належать поверхні  $S_0$  і, то в цьому (3.58) набуде вигляду

$$A_{2\left\{\begin{smallmatrix} x \\ y \end{smallmatrix}\right\}}^{m,b}(q,p) = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_2} e^{i\chi_1(x-x')+i\chi_2(y-y')} \cdot cth(\gamma_2 d) d\chi_1 d\chi_2. \quad (3.59)$$

Підставляючи (3.59) (3.22) і (3.23) відповідно, отримаємо вираз для складових допоміжних полів в області  $V_2$

$$\tilde{H}_{2x}^b(q,p) = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{ik_2 W_2} \left( k_2^2 + \frac{\partial^2}{(\partial x')^2} \right) \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_2} e^{i\chi_1(x-x')+i\chi_2(y-y')} \cdot cth(\gamma_2 d) d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.60)$$

$$\tilde{H}_{2y}^b(q,p) = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{ik_2 W_2} \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_2} e^{i\chi_1(x-x')+i\chi_2(y-y')} \cdot cth(\gamma_2 d) d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.61)$$

$$\hat{H}_{2y}^b(q,p) = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{ik_2 W_2} \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_2} e^{i\chi_1(x-x')+i\chi_2(y-y')} \cdot cth(\gamma_2 d) d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.62)$$

$$\hat{H}_{2x}^b(q,p) = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{ik_2 W_2} \left( k_2^2 + \frac{\partial^2}{(\partial y')^2} \right) \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_2} e^{i\chi_1(x-x')+i\chi_2(y-y')} \cdot cth(\gamma_2 d) d\chi_1 d\chi_2. \quad (3.63)$$

Відповідно, виведені залежності допоміжних полів області  $V_2$ . Підстановка їх, а також (3.45)-(3.48) (3.15) і (3.16), дозволяє визначити всі компоненти тензорного ядра суми скалярних інтегральних рівнянь (3.15) і (3.16).

### 3.3 Застосування умови періодичності МСЕ у решітках

У попередньому підрозділі з вирішення допоміжних завдань було визначено праві частини та компоненти тензорного ядра системи з двох скалярних інтегральних рівнянь (3.15) та (3.16).

Оскільки розглядається періодична решітка МСЕ, то поверхня  $S_0$  є періодичними ґратами апертур  $S_A$ , що трактуються як не зайнята МСЕ частина поверхні одиничної ділянки решітки. Враховуючи це (3.15) та (3.16) набудуть вигляду

$$\sum_{N=-\infty}^{\infty} \int_{S_A} \{E_y(x' + Md_1, y' + Nd_2) [\tilde{H}_{1x}^b(x' + Md_1, y' + Nd_2/x, y) + \tilde{H}_{2x}^b(x' + Md_1, y' + Nd_2/x, y)] - E_x(x' + Md_1, y' + Nd_2) [\tilde{H}_{1y}^b(x' + Md_1, y' + Nd_2/x, y) + \tilde{H}_{2y}^b(x' + Md_1, y' + Nd_2/x, y)]\} dx' dy' = -\tilde{\xi} \tilde{H}^b(q^0/x, y), \quad (3.64)$$

$$\sum_{N=-\infty}^{\infty} \int_{S_A} \{E_y(x' + Md_1, y' + Nd_2) [\hat{H}_{1x}^b(x' + Md_1, y' + Nd_2/x, y) + \hat{H}_{2x}^b(x' + Md_1, y' + Nd_2/x, y)] - E_x(x' + Md_1, y' + Nd_2) [\hat{H}_{1y}^b(x' + Md_1, y' + Nd_2/x, y) + \hat{H}_{2y}^b(x' + Md_1, y' + Nd_2/x, y)]\} dx' dy' = -\hat{\xi} \hat{H}^b(q^0/x, y), \quad (3.65)$$

де  $d_1$  і  $d_2$  - періоди ґрат по осях  $X$  і  $Y$  відповідно;  $M$ ,  $N$ -індекси поелементного підсумовування.

Оскільки решітка збуджується плоскою хвилею, то, отже, з виразів (3.37)-



(3.40), елементи решітки збуджуються рівноамплітудно, а зміна фази збуджуючого поля від елемента до елемента підпорядковується лінійному закону. Вважаючи (3.37), (3.38)  $x=Md_1$ ,  $y=Nd_2$ , отримуємо, що комірка решітки з номером  $M$ ,  $N$  збуджується полем

$$F \cdot \exp(+ih_1Md_1 + ih_2Nd_2),$$

де  $F$  - комплексна амплітуда збудливого поля на комірни з номером  $0,0$ ;

$$h_1 = k_1 \sin\theta_i \cos\phi_i; \quad h_2 = k_1 \sin\theta_i \sin\phi_i;$$

$$k_1 = \omega\sqrt{\varepsilon_1\mu_1}$$

$k$  - стала поширення в області  $V_1$ ;

$\theta_i$  - кут падіння збудливої плоскої хвилі, що відраховується щодо осі  $Z$ ;

$\phi_i$  - кут між площиною падіння і віссю  $X$ , що відраховується в площині  $XOY$  (рис. 2.2).

Очевидно, що всі елементи нескінченних решіток знаходяться в однакових умовах. Тому, якщо періодичну структуру, що має нескінченну довжину, змістити уздовж її осі на відстань, що дорівнює одному періоду, то нічого не повинно змінитися. Звідси випливає, що електричне поле в одному поперечному перерізі відрізняється від електричного поля в іншому поперечному перерізі на відстані одного періоду структури тільки комплексною постійною

$$E_{\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}}(x' + Md_1, y' + Nd_2) = E_{\begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix}}(x', y') e^{ih_1Md_1 + ih_2Nd_2}, \quad (3.66)$$

де  $E_x(x', y')$  и  $E_y(x', y')$  - компоненти дотичної до осі ХОУ складової електричного поля в центральній (сумісній з початком координат) комірни решітки.

Цей факт відомий у літературі під назвою теореми Флоке, яка є по суті узагальненням теорії рядів для періодичних функцій. Вона дозволяє отримати гармонійне розкладання будь-якої функції, значення якої періодично повторюються з точністю до експоненціального множника. Саме цією функцією описуються шукані електричні поля на елементі нескінченних періодичних ґрат, збудження якої має постійний по амплітуді і розподіл, що лінійно змінюється по фазі.

Підставляючи вираз (3.66) (3.64) і (3.65), отримаємо

$$\int_{S_A} \{E_y(x', y')K_{11}(x' - x, y' - y) - E_x(x', y')K_{12}(x' - x, y' - y)\} dx' dy' = -\bar{\xi} \tilde{H}^b(q^0/x, y), \quad (3.67)$$

$$\int_{S_A} \{E_y(x', y')K_{21}(x' - x, y' - y) - E_x(x', y')K_{22}(x' - x, y' - y)\} dx' dy' = -\bar{\xi} \hat{H}^b(q^0/x, y), \quad (3.68)$$

Праві частини  $-\bar{\xi} \tilde{H}^b(q^0/x, y)$  и  $-\bar{\xi} \hat{H}^b(q^0/x, y)$  визначаються співвідношеннями (3.37)-(3.40). З урахуванням виразів для допоміжних полів (3.45)-(3.48) та (3.60)-(3.63) компоненти тензорного ядра системи інтегральних рівнянь (3.67) та (3.68) можна подати у вигляді

$$\vec{H}^b(x' - x, y' - y) = K_{lp}^{(1)}(x' - x, y' - y) + K_{lp}^{(2)}(x' - x, y' - y), \quad (3.69)$$

де  $l = 1$  або  $2$ ,  $p = 1$  або  $2$ . У виразі (3.69) прийняті такі позначення:

$$K_{11}^{(s)}(x' - x, y' - y) = \frac{1}{ik_s W_s} \left( k_s^2 + \frac{\partial^2}{(\partial x')^2} \right) G_s(x' - x, y' - y), \quad (3.70)$$

$$K_{12}^{(s)}(x' - x, y' - y) = \frac{1}{ik_s W_s} \left( \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \right) G_s(x' - x, y' - y), \quad (3.71)$$

$$K_{21}^{(s)}(x' - x, y' - y) = \frac{1}{ik_s W_s} \left( \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} \right) G_s(x' - x, y' - y), \quad (3.72)$$

$$K_{22}^{(s)}(x' - x, y' - y) = \frac{1}{ik_s W_s} \left( k_s^2 + \frac{\partial^2}{(\partial y')^2} \right) G_s(x' - x, y' - y), \quad (3.73)$$

$$S = 1; 2$$

$$\tilde{H}^b(x' - x, y' - y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\chi_1, \chi_2) \frac{1}{\gamma_1} e^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y')} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.74)$$

$$\hat{H}^b(x' - x, y' - y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\chi_1, \chi_2) \frac{1}{\gamma_2} \text{cth} \gamma_2 de^{-i\chi_1(x-x') - i\chi_2(y-y')} d\chi_1 d\chi_2, \quad (3.75)$$

$$\Phi(\chi_1, \chi_2) = \Phi_1(\chi_1) \Phi_2(\chi_2), \quad (3.76)$$

$$\Phi_1(\chi_1) = \sum_{M=-\infty}^{\infty} e^{-i(\chi_1 - h_1)Md_1}, \quad (3.77)$$

$$\Phi_2(\chi_2) = \sum_{M=-\infty}^{\infty} e^{-i(\chi_2 - h_2)Nd_2}, \quad (3.78)$$

Суми  $N$  і  $M$  у співвідношеннях (3.77), (3.78) являють собою нескінченні геометричні прогресії зі знаменником, рівним одиниці. Для того, щоб ряди в цих виразах були схожими, можна застосувати формулу суми нескінченної геометричної прогресії. Інтервали по  $\chi_1$  і  $\chi_2$  у співвідношеннях (3.74), (3.75) можна обчислити за допомогою теорії відрахувань. Однак, кращим є шлях заснований на перетворенні рядів у формулі (3.77), (3.78) за допомогою формули підсумовування Пуассона

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} f(\sigma m) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma} \sum_{m=-\infty}^{\infty} F\left(\frac{2\pi m}{\sigma}\right), \quad (79) \quad F(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{i\nu x} dx \quad (3.79)$$

Розглянемо ряд  $M$  у формулі (3.77)

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} f(\sigma M) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-i(\chi_1 - h_1) M d_1}, \quad (3.80)$$

де  $\sigma = -i(\chi_1 - h_1) d_1$ .

Застосовуючи до функції  $f(x)$  перетворення Фур'є (3.80) та використовуючи формулу підсумовування Пуассона (3.79) отримаємо

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-i(\chi_1 - h_1) M d_1} = \frac{2\pi}{d_1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(\chi_1 - h_1 - \frac{2\pi m}{d_1}\right). \quad (3.81)$$

Аналогічно може бути перетворений ряд  $N$  у формулі (3.78)

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{-i(\chi_2 - h_2) M d_2} = \frac{2\pi}{d_2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(\chi_2 - h_2 - \frac{2\pi m}{d_2}\right). \quad (3.82)$$

Підставляючи вирази (3.82) і (3.83) (3.78), а потім (3.74) і (3.75) і обчислюють в отриманих співвідношеннях інтеграли по  $\chi_1$  і  $\chi_2$ , за допомогою формул (3.70)-(3.73) та (3.69) знайдемо компоненти тензорного ядра суми скалярних інтегральних рівнянь

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{1x}^b(x'-x, y'-y) = & -i \left\{ \frac{1}{k_1 W_1} \left( k_1^2 + \frac{\partial^2}{(\partial x')^2} \right) G_1^{AR}(x'-x, y'-y) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{k_2 W_2} \left( k_2^2 + \frac{\partial^2}{(\partial x')^2} \right) G_2^{AR}(x'-x, y'-y) \right\}, \end{aligned} \quad (3.83)$$

$$\begin{aligned} \tilde{H}_{1y}^b(x'-x, y'-y) = & -i \left\{ \frac{1}{k_1 W_1} \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} G_1^{AR}(x'-x, y'-y) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{k_2 W_2} \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} G_2^{AR}(x'-x, y'-y) \right\}, \end{aligned} \quad (3.84)$$

$$\begin{aligned} \hat{H}_{2x}^b(x'-x, y'-y) = & -i \left\{ \frac{1}{k_1 W_1} \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} G_1^{AR}(x'-x, y'-y) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{k_2 W_2} \frac{\partial^2}{\partial x' \partial y'} G_2^{AR}(x'-x, y'-y) \right\}, \end{aligned} \quad (3.85)$$

$$\begin{aligned} \hat{H}_{2y}^b(x'-x, y'-y) = & -i \left\{ \frac{1}{k_1 W_1} \left( k_1^2 + \frac{\partial^2}{(\partial y')^2} \right) G_1^{AR}(x'-x, y'-y) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{k_2 W_2} \left( k_2^2 + \frac{\partial^2}{(\partial y')^2} \right) G_2^{AR}(x'-x, y'-y) \right\}. \end{aligned} \quad (3.86)$$

Тут позначено

$$G_1^{AR}(x'-x, y'-y) = \frac{1}{d_1 d_2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_{1mn}} \exp(i\alpha_m(x-x') + i\alpha_n(y-y')) \quad , \quad (3.87)$$

$$G_2^{AR}(x'-x, y'-y) = \frac{1}{d_1 d_2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\gamma_{2mn}} \exp(i\alpha_m(x-x') + i\alpha_n(y-y')) \quad , \quad (3.88)$$

$$\alpha_m = \frac{2\pi m}{d_1} + h_1, \alpha_n = \frac{2\pi n}{d_2} + h_2, \gamma_{1mn} = \sqrt{\alpha_m^2 + d_n^2 - k_1^2}, \gamma_{2mn} = \sqrt{\alpha_m^2 + \alpha_n^2 - k_2^2} \quad . \quad (3.89)$$

Таким чином можна аналізувати одну апертуру замість їх безконечної

періодичної кількості.

Аналізуючи виведені вище формули можна сказати, що поля розсіювання безкінечних решіток мікросмужкових елементів зображуються як подвійні безкінечні суми за просторовими гармоніками. Загальна кількість цих гармонік (для нижчих значень  $m$  і  $n$ ) є такою, що вони розповсюджуються вздовж осі  $z$ , і нескінченна кількість гармонік (для великих значень  $m, n$ ) є загасаючими.

### 3.4 Конструкція проектованої антени

У цьому розділі спроектовано конструкцію антени з плоским рефлектором. Вона представлена на рис. 3.1.

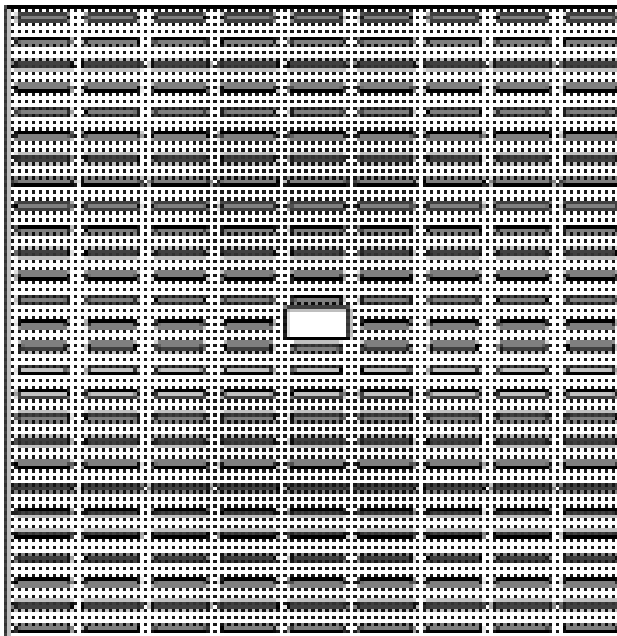


Рис. 3.1. Плоский рефлектор

Для виготовлення плоского дзеркала рекомендується використовувати технологію друкованих плат – нанесення рисунка на металеву плівку фольгованого діелектрика. Селективне видалення фольги здійснюють

механічним гравіюванням або хімічним травленням. При хімічному травленні поверхню фольгованого матеріалу необхідно підготувати з метою забезпечення гарної адгезії фоторезиста до фольги за рахунок видалення оксидів та жирових забруднень. Перед нанесенням рисунка поверхня фольги зачищається та знежирюється. Підготовка поверхні включає механічну та хімічну обробку. При механічній обробці абразивним порошком руйнується окисна плівка та досягається необхідна шорсткість поверхні. Остаточне видалення оксидів відбувається при обробці заготовок у розчинах кислот. Жирові забруднення видаляються з допомогою розчинів лугів. Розроблено багато варіантів підготовки поверхні фольгованих заготовок, наведемо один із них. Поверхня фольги зачищається наждачним папером до металевого блиску. Потім промивається холодною проточною водою 1-2 хвилини. Далі обробляємо заготовку в розчині наступного складу:

- сірчана кислота 30 г/л;
- кислота мурашина 15 г/л;

Промити заготовку у теплій воді (50 - 60<sup>0</sup>С) 1..2 хвилини. Промити заготовку проточною холодною водою 2..3 хвилини.

За цією процедурою слід нанесення захисного позитивного чи негативного рисунка – фоторезиста. Фоторезист – органічні речовини, що містять світлочутливі компоненти. Після нанесення на заготовку, експонування та проявлення фоторезиста утворюють захисний рисунок, який не розчиняється у воді, кислотах, травниках та лугах. Фоторезисти бувають рідкі та сухі. Розглянемо нанесення рідкого фоторезиста, який може використовуватися під час виготовлення даного рефлектора.

На підготовлену поверхню заготовки поливом наноситься перший шар фоторезиста. Коливаючи плату треба домогтися, щоб фоторезист розтікся по всій поверхні. Плата поміщається в центрифугу на 10 хвилин, яка обертається зі швидкістю 90 об/хв. Температура в центрифугі з підігрівом має бути 40 – 50<sup>0</sup>С.

після закінчення зазначеного часу центрифуга вимикається і обережно, не торкаючись руками поверхні, витягується заготовка. Потім наноситься другий шар фоторезиста і знову вміщується в центрифугу з підігрівом на 15 - 20 хвилин. Після цього плата витягується.

При експонуванні негативних фоторезистів відбувається їх полімеризація і вони набувають кислотолужностійких властивостей. Експонування проводиться ультрафіолетовим випромінюванням із довжиною хвилі близько 365 нм. У процесі експонування фоторезиста двохромовоокислий амоній, що входить до його складу, розкладається під дією світла з виділенням атомарного кисню і тривалентного хрому. Кисень, що виділяється, і тривалентний хром сприяють утворенню зв'язків між молекулами і перетворенню його в полімерне з'єднання, нерозчинне у воді і травниках. Полімеризація під дією світла починається з верхніх шарів і поступово поширюється по всій товщині, доходючи до основи. Тому при малому часі експонування недополімеризований шар може легко відокремлюватися від основи при проявленні.

Під час експонування необхідно виконувати наступні переходи:

- увімкнути установку для експонування та прогріти лампи протягом 15 хвилин;
- накласти фотошаблон на плату емульсією до емульсії, поєднуючи реперні знаки, та помістити у копіювальну рамку;
- помістити копіювальну рамку в установку. Експонувати заготовки, покриті фоторезистом, протягом 10...15 хвилин.

Далі роблять прояв та закріплення захисного рисунка. Після експонування незасвічені ділянки негативних фоторезистів не змінюють своїх властивостей та легко розчиняються у воді чи проявниках. Плата поміщається в ванну з теплою дистильованою водою на 1 хв. При цьому візуально спостерігається прояв рисунка. Після вилучення заготовки з води поверхня фарбується розчином метилвіолету і промивається холодною водою. Необхідно перевірити якість



малюнка, на пробільних місцях не повинно бути барвника. При неповному прояві плати знову помістити у ванну з підігрітою до 35-45<sup>0</sup>С дистильованою водою. Потім проводиться хімічне закріплення рисунка шляхом занурення деталі в розчин хромового ангідриду (30-35 г/л) на 1..2 хвилини і промивається проточною водою. Для термічного закріплення (дублення) рисунка заготовка поміщається в термошафу, швидкість підйому температури не повинна перевищувати 3<sup>0</sup>С/хв. Сушіння проводиться при температурі 90-100<sup>0</sup>С протягом 45 хвилин.

При хімічному дубленні в фоторезист захисного рисунка додатково вводяться іони хрому, які сприяють продовженню реакції полімеризації. При термічному дубленні відбувається видалення молекул води із шару, що сприяє ущільненню шару та підвищенню адгезії до плати. Все це призводить до покращення хімічної стійкості захисного рисунка.

Основним етапом виготовлення рефлектора є безпосереднє травлення міді. Це складний окислювально-відновний процес, в якому окислювачем є травильний розчин, що переводить мідь із металевого стану в іонний. Найбільшого поширення набули травильні розчини на основі хлорного заліза (FeCl<sub>3</sub>), хлорної міді (CuCl<sub>2</sub>), персульфату амонію (Nh<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. Вибір травильного розчину залежить від наступних факторів: типу резиста, що застосовується, так як резист може бути нестійким в даному розчині; швидкості травлення; величини фактора підтравлювання, і вирішується стосовно конкретних умов виробництва.

Швидкість травлення для кожного травника залежить від концентрації розчину, температури та методу травлення. Концентрація розчину повинна бути оптимальною, тому що при більших і менших концентраціях швидкість травлення зазвичай зменшується. Зі зростанням температури швидкість травлення зростає, але максимальна температура не має перевищувати 40-50<sup>0</sup>С, оскільки за високих температурах спостерігається корозія устаткування й великі

випаровування.

Завершальним етапом є видалення фоторезисту. Розчин складається з:

- щавлева кислота 150-200 г/л;
- сіль кухонна (NaCl) 50-100 г/л.

У фарфоровій склянці розчин підігрівається до температури 70-80<sup>0</sup>С і переливається у ванну. Туди опускається заготівля на 3.5 хвилини. Фоторезист видаляється поролоною губкою або ватним тампоном і промивається теплою та холодною водою. Після цього плату потрібно просушити.

Можна скористатися тонкоплівковою або спеціальними технологіями, але вони досить дорогі.

Опромінювач виконаний наступним чином. На латунній пластині за допомогою електродриля свердлиться отвір для кріплення активного вібратора, виконаного у вигляді дроту необхідного діаметра - 3 мм. Розміри пластини визначаються при налаштуванні опромінювача. У хвилеводі паралельно широкій стінці робиться пропи́л для кріплення та налаштування вібраторної антени. Після налаштування пропи́л запаюється. Паяння здійснюється припоєм ПОС-60, флюсом, електропаяльником потужністю 60 Вт. Конструкція опромінювача зображена на рис. 3.2

Загальний вигляд ФКР з опромінювачем подано на рис. 3.3

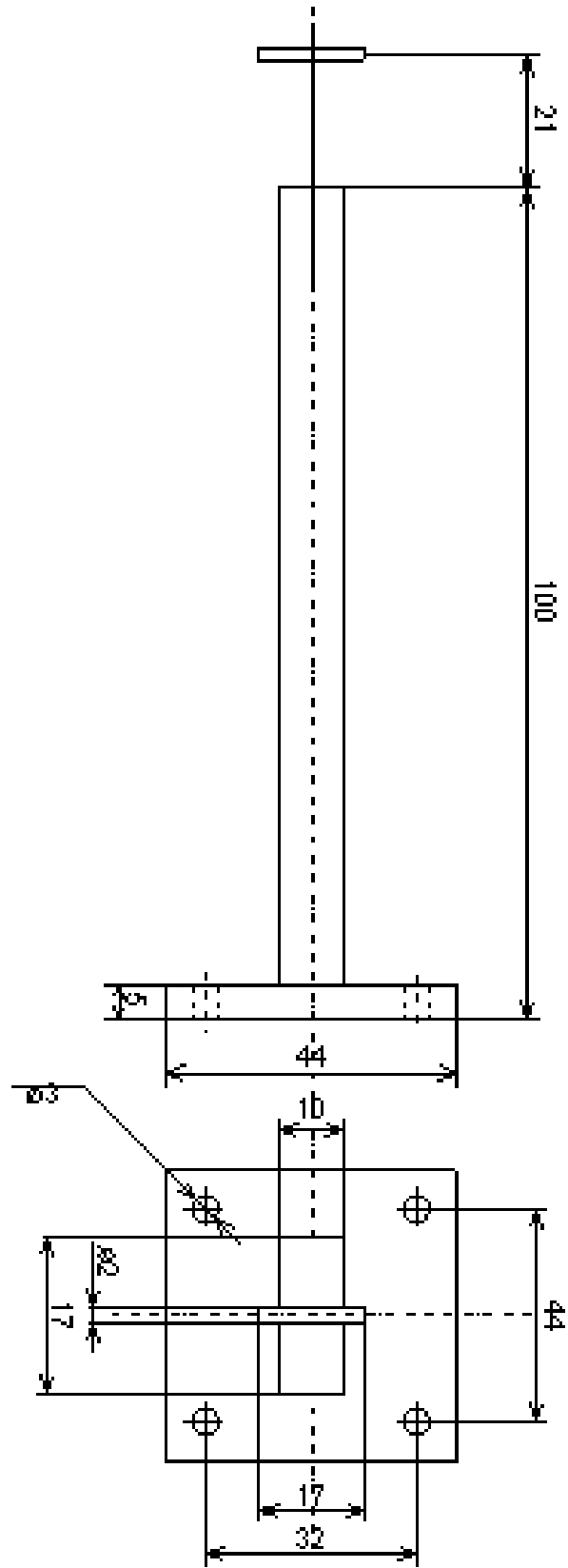


Рис. 3.2. Загальний вид опромінювача

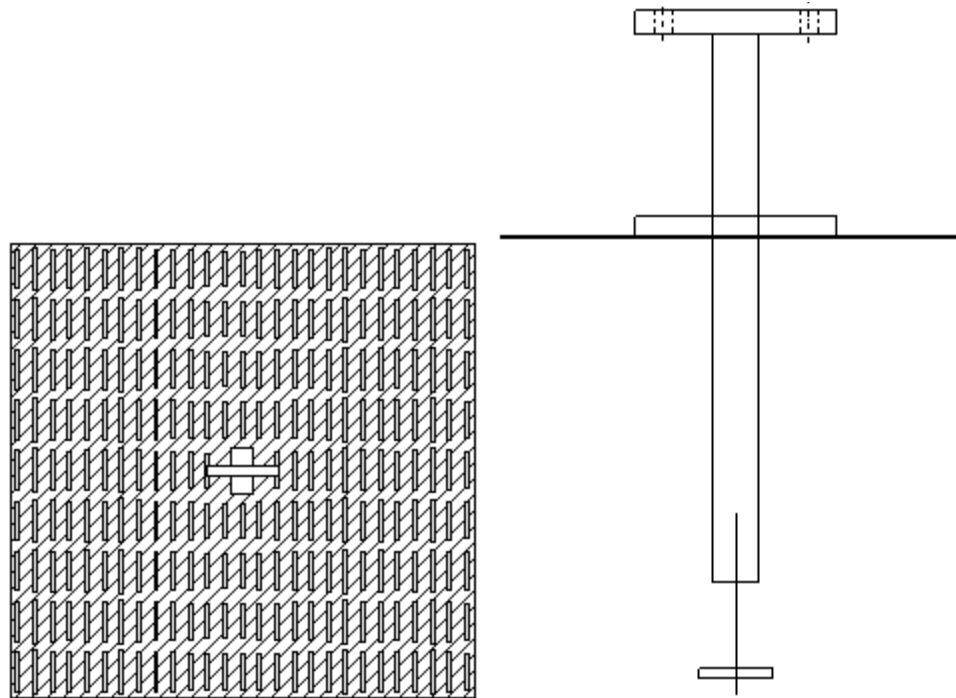


Рис. 3.3. Загальний вигляд ФКР

### 3.5 Аналіз безпеки та надійності антени під час експлуатації

Різноманітність причин аварійності та травматизму дозволяє стверджувати, що найбільш підходящими для аналізу та оцінки виробничих небезпек є моделі, що становлять процес появи та розвитку ланцюга передумов (причин) у вигляді діаграм.

Найбільшого поширення останнім часом набули діаграми у вигляді розгалужених структур-дерев.

Проаналізуємо потенційні причини відмови проектованої антени, а результати представимо як дерево причин.

Як головна подія візьмемо відсутність сигналу на виході антени.

Розглянемо, які причини можуть призвести до цієї події:

- 1 відмова опромінювача,
- 2 збій рефлектора,
- 3 відсутність напруги живлення.

Кожна з цих причин може бути викликана своїми подіями. Зокрема, до відмови опромінювача може призвести порушення вимог експлуатації, дефекти при виготовленні елементів опромінювача, дефекти складання. У свою чергу, до порушення вимог експлуатації можна віднести: недотримання температурного режиму, підвищена вологість повітря, підвищена напруга живлення та інші причини. Ці події вважатимуться вихідними, тобто ті, які можуть спричинити відмову антени.

Розглянемо іншу подію, яка може призвести до відмови опромінювача – дефект під час виготовлення.

Причинами утворення дефекту можуть бути: несправності обладнання, неякісний матеріал та неякісне паяння. Їх також вважатимемо вихідними. Неякісна пайка - це подія, недостатньо детально розроблена, тому, складаючи дерево причин і користуючись стандартними символами, було поміщено цю подію в ромб.

Зазначимо події, які можуть спричинити дефект складання: удар, зазори у з'єднаннях та інші випадки.

Аналізуючи збій рефлектора, можна сказати, що причини цього подібні до причин при відмові опромінювача. Тому, щоб уникнути ускладнення схеми і дерева скористаємося стандартними символами переходу, які позначаються у вигляді трикутника перенесення «з» і трикутника перенесення «в».

Відсутність напруги живлення може бути спричинена різними факторами, які в загальному випадку врахувати важко.

Нижче наведено дерево причин, складене згідно з цим аналізом.

Дерево причин

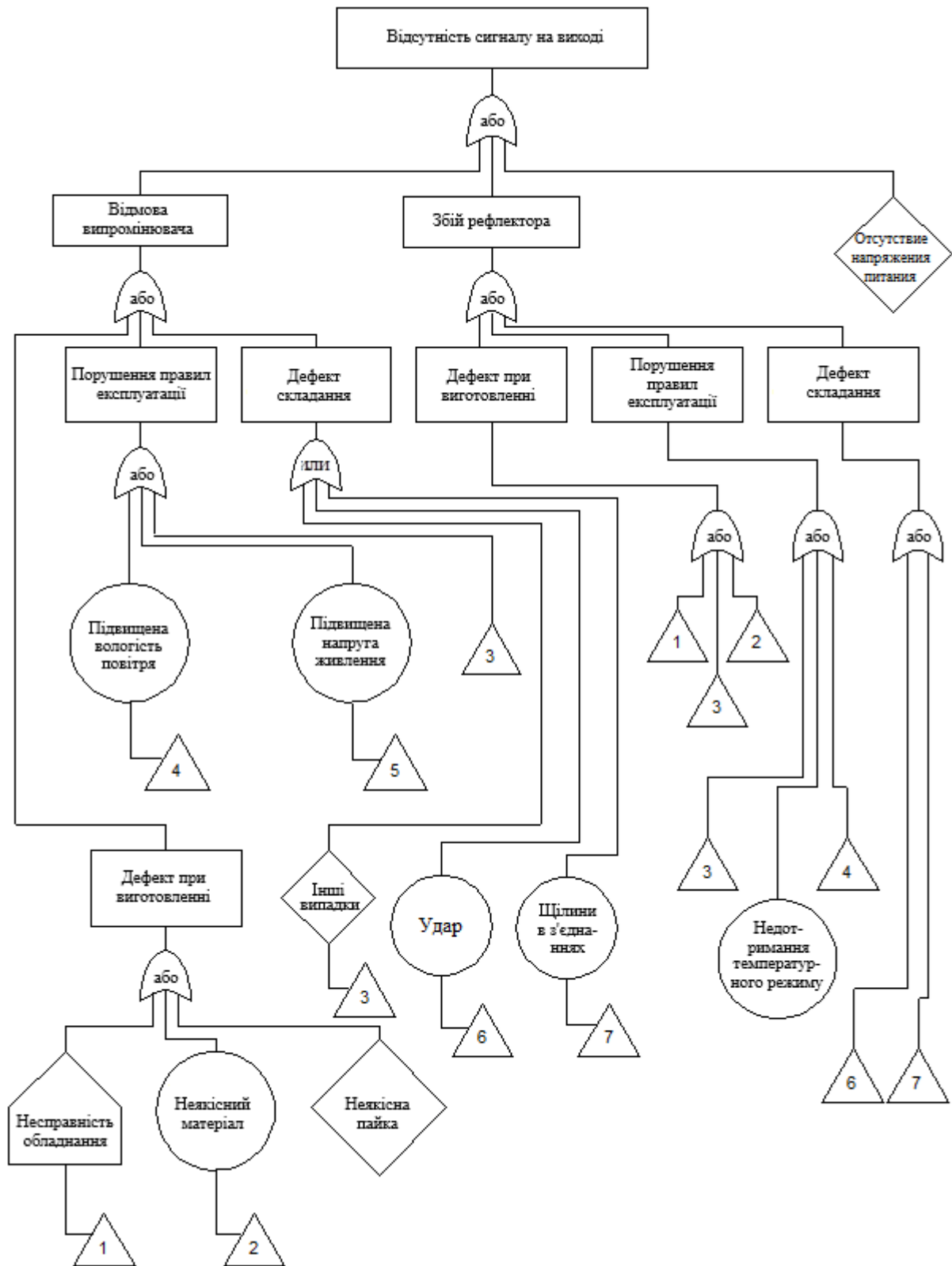


Рис. 3.4. Дерево причин відмов антени

### 3.6 Заходи щодо підвищення надійності та забезпечення безпеки антени

Для визначення заходів щодо підвищення екологічності та забезпечення безпеки антени скористаємося деревом причин.

Як відомо, щоб запобігти головній події, треба запобігти появі вихідних подій.

У нашому випадку вихідними подіями вважаються: недотримання температурного режиму, підвищена вологість повітря, підвищена напруга живлення, неякісний матеріал, удари, перегини, перегріву тощо.

Розглянемо заходи, які необхідно здійснити, для невиникнення цих подій.

Основне, чого необхідно дотримуватись, це порушення експлуатації антени. Виконуючи ці вимоги, ми зможемо уникнути значної кількості небажаних подій. Необхідно проводити інструктаж із обслуговуючим персоналом, наймати на роботу кваліфікованих працівників. Для дотримання температурного та повітряного режимів необхідно, щоб антена розташовувалася у відповідних кліматичних умовах, для яких була спроектована, тобто у кліматичних умовах середніх широт. Не рекомендується встановлювати антену в умовах крайньої півночі, оскільки зледеніння та низька температура можуть призвести до механічних пошкоджень.

### 3.7 Висновки до розділу 4

В розділі проведено моделювання елементів дифракційних решіток, коли більшість елементів центральної області перебуває у майже однакових умовах, і з припущенням, що усі мікросмужкові елементи решітки мають ідеальну провідність

Спроектовано та описано конструкцію антени з плоским рефлектором. Розроблено технологічний процес та проаналізовано основні етапи виготовлення

рефлектора методом травлення. Розроблено конструкцію опромінювача.

Проведено аналіз безпеки та надійності антени під час експлуатації та розроблено дерево причин відмов розробленої антени. Запропоновано заходи щодо підвищення надійності та забезпечення безпеки антени.



## РОЗДІЛ 4

## ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

## 4.1. Охорона праці

Відповідно до ст. 13 розд. III Закону України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 р. № 2694-XII роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці.

Заходи щодо виконання вимог електробезпеки офісних працівників регламентують наступні нормативні документи:

- Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці (НПАОП 0.00-4.12-05), затверджене наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці України від 26 січня 2005 р. № 15;
- Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Міністерства палива та енергетики України від 25 липня 2006 р. № 258 (*далі* — ПТЕЕС);
- Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, затверджені наказом Міністерства праці та соціальної політики України, Комітету по нагляду за охороною праці від 9 січня 1998 р. № 4;
- Правила пожежної безпеки в Україні, затверджені наказом Міністерства внутрішніх справ України від 30 грудня 2014 р. № 1417.

Відповідно до п. 2.2 розд. II Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджених наказом Міністерства надзвичайних ситуацій [від 25 січня 2012 р. № 67](#), роботодавець має

забезпечити повну і вичерпну інформацію працівників та їх уповноважених представників з питань охорони праці про можливі небезпечні ситуації, про вжиті заходи для їх запобігання або їх ліквідації та про дії працівників у аварійних ситуаціях.

Електробезпека — система організаційних та технічних заходів і засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого та небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики.

Тобто електробезпека — це відсутність будь-яких факторів з боку електроустановки, які можуть створити загрозу і небезпеку життю і здоров'ю людини. Не варто під терміном «електроустановка» розуміти щось таке, що може знаходитись поза межами офісу. Адже, наприклад, настільна лампа це також електроустановка. Тобто пристрій, в якому є перетворення електричної енергії в той чи інший вид енергії (світлову, механічну, теплову), і буде вважатись електроустановкою.

Заходи електробезпеки, на які необхідно звернути особливу увагу:

1. Облаштування електромережі, зокрема:

- правильний розподіл навантаження на всі приміщення офісу;
- правильний розподіл електромережі за призначенням (наприклад: освітлення — це одна група, робоча зона — інша);
- якість самих комплектуючих електромережі (розетки, вимикачі, лампи, світильники);
- чи є потенціал для збільшення навантаження (на випадок створення додаткових робочих місць чи розширення компанії);
- використання офісного обладнання, в якому електроенергія застосовується за призначенням згідно з технічними рекомендаціями виробника.

2. Виважений підхід до питання використання стаціонарних або мобільних електрогенераторів для зменшення енергозалежності:

- консультація зі спеціалістом електротехнічного фаху (якщо не призначений відповідальний за електрогосподарство) щодо вибору генератора відповідно до потреб енергоспоживання;
- якщо електрогенератор стаціонарний — необхідно виконати вимоги, зазначені в п. 9.1-9.20 розд. VIII ПТЕЕС;
- якщо електрогенератор мобільний (бажано з вмонтованою автоматикою введення резерву) — правильно виконати підключення з урахуванням можливих наслідків у випадку появи струму в зовнішній електромережі.

#### 4.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

*Забезпечення техногенної безпеки на об'єктах зв'язку, радіомовлення і телебачення.*

Техногенна безпека — це відсутність ризику виникнення аварій та/або катастроф на потенційно небезпечних об'єктах, а також у суб'єктів господарювання, що можуть створити реальну загрозу їх виникнення.

Техногенна безпека характеризує стан захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Діяльність із забезпечення техногенної безпеки є складником виробничої, експлуатаційної та іншої діяльності відповідних посадових осіб і працівників підприємств, установ та організацій.

Забезпечення техногенної безпеки на об'єктах зв'язку, радіомовлення і телебачення покладають на його керівника. А забезпечення техногенної безпеки під час проєктування, будівництва об'єктів, будівель і споруд — на орган архітектури, замовників, забудовників, проєктні та будівельні організації.

Вимоги щодо дотримання техногенної безпеки мають відповідати нормам захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій, забезпечення

санітарно-епідеміологічного благополуччя, охорони навколишнього середовища, екологічної, пожежної та промислової безпеки, охорони праці, будівництва, а також національним стандартам.

Загальні вимоги до організації техногенної безпеки на об'єктах зв'язку, радіомовлення і телебачення, в установах, організаціях і на небезпечних територіях регламентують Правила техногенної безпеки, затверджені наказом МВС від 05.11.2018 № 879 (далі — Правила техногенної безпеки).

Забезпечення техногенної безпеки на об'єктах здійснюється на випадок:

- наявності будівель і споруд із порушенням умов експлуатації;
- наявності об'єктів із критичним станом виробничих фондів і порушенням умов експлуатації;
- можливості впливу зовнішніх чинників — природних, терористичних, соціальних тощо — на діяльність і безпеку об'єкта;
- виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру внаслідок порушення умов експлуатації на небезпечних об'єктах, ядерних установках.

Щоб забезпечити техногенну безпеку, суб'єкти господарювання:

- виконують вимоги КЦЗ, Правил техногенної безпеки, норм і стандартів щодо забезпечення техногенної безпеки, а також приписів, розпоряджень та постанов посадових осіб Державної служби України з надзвичайних ситуацій;
- розробляють організаційно-розпорядчі документи щодо забезпечення техногенної безпеки та постійно контролюють, чи їх дотримують;
- забезпечують працівників засобами колективного й [засобами індивідуального захисту](#);
- навчають працівників діям у надзвичайних ситуаціях;
- організовують розроблення інженерно-технічних заходів цивільного захисту під час будівництва, реконструкції, технічного переоснащення на об'єктах, що входять до Переліку об'єктів, що належать суб'єктам господарювання, проектування яких здійснюється з урахуванням вимог

інженерно-технічних заходів цивільного захисту, затвердженого постановою КМУ від 09.01.2014 № 6;

- проводять навчання працівників порядку укриття в захисних спорудах цивільного захисту та навчання персоналу з обслуговування захисних споруд цивільного захисту їх утриманню відповідно до Вимог щодо утримання та експлуатації захисних споруд цивільного захисту, затверджених наказом МВС від 09.07.2018 № 579;

- проводять об'єктові тренування і навчання з питань цивільного захисту з урахуванням вимог техногенної безпеки.

Навчання з питань техногенної безпеки, навчання діям і способам захисту населення та територій від надзвичайних ситуацій техногенного характеру організовують, щоб підготувати населення, сили цивільного захисту й органи управління до дій в умовах надзвичайних ситуацій відповідно до Порядку здійснення навчання населення діям у надзвичайних ситуаціях, затвердженого постановою КМУ від 26.06.2013 № 444.

За результатами навчань працівники підприємства повинні знати:

- вимоги щодо власної безпеки та безпеки підприємства, встановлені на території підприємства, і виконувати їх;

- основні номери телефонів оперативних чергових аварійно-рятувальних формувань і негайно повідомляти їх про можливу небезпеку, якщо виявили порушення;

- правила поведінки у разі аварійних ситуацій та аварій і не вчиняти дій, які можуть призвести до виникнення або поширення аварії чи надзвичайної ситуації;

- основні заходи та способи захисту від шкідливого впливу небезпечних речовин і наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, порядок домедичної допомоги потерпілим, правила користування засобами радіаційного, хімічного захисту та захисними спорудами.

Працівників допускають до роботи тільки після того, як вони пройдуть [навчання, інструктажі та перевірку знань із питань цивільного захисту](#), зокрема з техногенної безпеки.

У разі надзвичайної ситуації техногенного характеру відповідальні особи підприємства повинні:

- за загрози життю якнайшвидше залишити можливу зону надзвичайної ситуації з використанням за необхідності засобів індивідуального захисту;
- оповістити працівників за допомогою технічних засобів оповіщення, передбачених на об'єкті;
- за загрози життю працівників негайно організувати їх рятування за допомогою наявних сил і засобів;
- вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, яких не залучають до локалізації аварії;
- вжити заходів, щоб припинити роботу в цехах, на ділянках, інших місцях виникнення аварії (надзвичайної ситуації) з урахуванням технологічних особливостей виробництв, крім робіт, пов'язаних із заходами з ліквідації аварії;
- організувати зустріч аварійно-рятувальних служб, що прибувають для локалізації або ліквідації аварії, надати їм допомогу у виборі найбезпечнішого шляху для під'їзду до джерела небезпеки або інших необхідних місць, поінформувати про основні небезпеки об'єкта, конструктивні особливості будівель і обладнання;
- за необхідності ознайомити керівника робіт із ліквідації наслідків надзвичайної ситуації техногенного характеру з планом локалізації і ліквідації аварій на об'єкті підвищеної небезпеки та забезпечити виконання цього плану.

Щоб організувати техногенну безпеку, на підприємстві розробіть, затвердіть і впровадьте основні організаційно-розпорядчі документи відповідно

до орієнтовного переліку документів із техногенної безпеки.

Повне або часткове копіювання будь-яких матеріалів сайту, цитування, публікація їх анотованих оглядів допускаються лише за письмового дозволу редакції сайту Служба охорони праці

#### 4.3. Висновки до розділу

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано питання з охорони праці, а також забезпечення техногенної безпеки на об'єктах зв'язку, радіомовлення і телебачення.

## ВИСНОВКИ

Проведено аналіз систем супутникового зв'язку, принципів їх роботи та основних складових елементів. Проаналізовано типові конструкції приймальних антен для супутникового зв'язку та додаткових елементів, що при цьому застосовуються. Проаналізовано переваги та недоліки таких антен.

Проведено аналіз прототипів типових антен, які застосовуються для систем супутникового зв'язку, їх конструкцій і характеристик, зокрема параболічних та плоских антен і антенних решіток. Також розглянуто принцип роботи антени Френеля.

Встановлено, що дзеркальні антени з плоским рефлектором відрізняються найменшою вартістю та відсутністю недоліків, які притаманні плоским антенним решіткам і параболічним антенам. На основі цього вибрано за основу проєктованої конструкції дзеркальну антену із плоским рефлектором, створену на основі мікросмужкових дифракційних решіток. Також було вибрано аналог, яз характеристиками якого будуть порівнюватись характеристики розробленої конструкції.

Проведено моделювання елементів дифракційних решіток, коли більшість елементів центральної області перебуває у майже однакових умовах, і з припущенням, що усі мікросмужкові елементи решітки мають ідеальну провідність.

Спроектовано та описано конструкцію антени з плоским рефлектором. Розроблено технологічний процес та проаналізовано основні етапи виготовлення рефлектора методом травлення. Розроблено конструкцію опромінювача.

Проведено аналіз безпеки та надійності антени під час експлуатації та розроблено дерево причин відмов розробленої антени. Запропоновано заходи щодо підвищення надійності та забезпечення безпеки антени.



## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Minoli Daniel. Innovations in satellite communication and satellite technology : the industry implications of DVB-S2X, high throughput satellites, Ultra HD, M2M, and IP: New York: Secure Enterprise Systems Inc, 2015. 420p.
2. Staff, “Geostationary, LEO, MEO, HEO Orbits Including Polar and Sun-Synchronous orbits with Example System and a brief section on Satellite History”, 2001, <http://www.geo-orbit.org>.
3. Satellite Internet Inc., “Satellite Physical Units and Definitions”, <http://www.satellite-internet.ro/satellite-internet-terminology-definitions.htm>.
4. D. Jefferies, “Microwaves: Satcoms Applications”, MSc in Satcoms Notes, University of Surrey, Department of Electronic Engineering, School of Electronics and Physical Sciences, Guildford, Surrey, UK, GU2 7XH, 18th March 2004.
5. J. E. Laube, Hughes Net, “Introduction to the Satellite Mobility Support Network, Hughes Net User Guide”, 2005–2007.
6. Staff, “The View from Jupiter: High-Throughput Satellite Stems”, White Paper by Hughes, July 2013. Retrieved at [www.hughes.com/resources/the-view-from-jupiter-high-throughput-satellite-systems](http://www.hughes.com/resources/the-view-from-jupiter-high-throughput-satellite-systems).
7. Breynaert D., D’Oreye M. Analysis of the bandwidth efficiency of DVB-S2 in a typical data distribution network. <http://www.newtec.eu/>
8. Ліпатов А.О., Могильченко М.О., Коломицев М.О. Основи супутникових телекомунікаційних систем: навчальний посібник. К.: ВІТІ НТУУ “КПІ”, 2004. 220 с.
9. Інмарсат. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.upwiki.one/wiki/Inmarsat>. 15.04.2022.
10. Розробка та дослідження системи супутникового радіозв’язку

стандарту Iridium [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uchika.in.ua/rozrobka-ta-doslidjennya-sistemi-suputnikovogo-radiozvyazkust.html?page=3>. 15.04.2022.

11. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022. – 150 с.

12. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної бо та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

13. Дозорський В.Г., Дозорська О.Ф., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Паньків І. М., Яворська Є.Б. Структура системи відбору біосигналів для задачі відновлення комунікативної функції людини. Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – Хмельницький: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету". – 2019. - №2(271) – с. 183-186.

14. Хвостівська Л.В., Осухівська Г.М., Хвостівський М.О., Шадріна Г.М., Дедів, І. Ю. Розвиток методів та алгоритмів обчислення періоду стохастичних біомедичних сигналів для медичних комп'ютерно-діагностичних систем. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. /Категорія В/ 2019. Вип. 79. С. 78-84. doi: 10.20535/RADAR.2019.79.78-84.

15. Дозорська О.Ф., Яворська Є.Б., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є. і Дедів І.Ю. Метод виявлення ознак основного тону в структурі електроміографічних сигналів для задачі компенсації порушеної комунікативної функції людини», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (81), с. 56-64. doi: 10.20535/RADAR.2020.81.56-64.

16. Дедів І.Ю. Структурний синтез вібромасажної апаратури / О.В. Гевко, В.Г. Дозорський, Л.Є. Дедів, І.Ю. Дедів, О.Ф. Дозорська // Перспективні технології та прилади, № 20, Луцьк, 2022. – с. 23-31.

17. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. L. Khvostivska, M. Khvostivsky, V. Dunets, I. Dediv. CEUR Workshop Proceedings. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022 Ternopil 22- 24 November 2022. Том 3309, с. 314-318.

18. Дедів І.Ю., Сверстюк А.С., Дедів Л.Є., Дозорський В.Г., Хвостівський М.О. Математичне моделювання, методи та програмне забезпечення опрацювання дихальних шумів у комп'ютерних аускультативних діагностичних системах: наукова монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. 126 с. ISBN 978-617-574-219-8.

19. Дедів Л.Є., Сверстюк А.С., Дедів І.Ю., Хвостівський М.О., Дозорський В.Г., Яворська Є.Б. Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу: наукова монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. 120 с. ISBN 978-617-574-218-1.

20. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. (2023) Matematychnе, alhorytmichne ta prohramne zabezpechennia synfaznoho vyjavlennia radiosyhnaliv v elektronnykh komunikatsiinykh merezhakh iz zavadamy [Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises]. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 111, no 3, pp. 48-57 [in Ukrainian].

21. Dozorskyi V., Dediv I., Sverstiuk S., Nykytyuk V., Karnaukhov A. The Method of Commands Identification to Voice Control of the Electric Wheelchair. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.233-240. ISSN 1613-0073. CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine.

22. Liliya Khvostivska, Iryna Dediv, Mykola Khvostivsky, Leonid Dediv.

Computer Tool for generating of Test Radio Signals for verification of the Radio Computer Systems Software. ADVANCED APPLIED ENERGY and INFORMATION TECHNOLOGIES 2021. Proceedings of the International Conference (Ternopil, 15-17 of December 2021.) / Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil Ivan Puluj National Technical Universtiy [and other.]. – Ternopil: TNTU, Zhytomyr : «Publishing house “Book-Druk”» LLC, 2021. – P.200-205.

# ДОДАТКИ

**УДК 621.396.621.2**

**В.Б. Сендецький, М.Ю. Степанюк, В.С. Форгель, І.Ю. Дедів, к.т.н., доц.**  
(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

### **ЗАДАЧА ПРОЕКТУВАННЯ АНТЕН ДЛЯ СИСЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

**V.B. Sendetskyi, M.Yu. Stepaniuk, V.S. Forgel, I.Yu. Dediw, Ph.D., Assoc. Prof.**

### **THE TASK OF DESIGNING ANTENNAS FOR SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS**

Сьогодні інтенсивно розвивається ринок засобів супутникового зв'язку. Щорічне збільшення обсягу виробництва становить понад 30%. Розробка антени для прийому сигналів із штучних супутників землі є найважливішою частиною наземної системи супутникового зв'язку. Вона є одним із найбільш складних та дорогих пристроїв, що входять до складу приймальної установки. Тому питанням розробки антен та пошуку оптимальних технологічних рішень при їх виробництві приділяється велика увага.

Сьогодні найбільш поширені параболічні однодзеркальні антени, процес виробництва дзеркальних рефлекторів яких є дуже складний. Але з розвитком технологій дедалі помітніше місце займають плоскі антени, зокрема фазовані антенні решітки, що містять велику кількість випромінювачів. Кожен випромінювач збуджується від окремого фазованого генератора або підсилювача потужності, а також містить окремий керований фазообертач. При цьому вартість таких антен є високою. Одним із способів зниження вартості антеної решітки є застосування оптичної схеми живлення відкритого типу. Найбільш широко відомі решітки з оптичним збудженням випромінювачів, побудовані за аналогією із дзеркальними та лінзовими антенами. Також, в мікросмушкових дифракційних решітках плоский рефлектор повинен при відбиванні сферичної або циліндричної хвилі опромінювача забезпечити вирівнювання фазового фронту. Досягається це запровадженням додаткової фазової затримки в випромінювачах решітки. Таким чином, основним для проектування плоских рефлекторів з дискретних елементів є питання вибору способу реалізації необхідної затримки фази. Застосування мікросмушкових елементів як випромінювачів решітки дозволяє цю проблему вирішити зручнішим способом, шляхом правильного вибору геометрії випромінювача та його конструктивних розмірів. При цьому особливий інтерес представляють такі дзеркальні антени з інтегральними модулями, що включають випромінювач антеної решітки і керований фазообертач. Відсутність традиційних фазообертачів забезпечує хороші вартісні, технологічні та конструктивні показники.

Таким чином, антени наземних станцій систем зв'язку та радіотелемовлення через штучні супутники землі є складними технічними пристроями. Основні проблеми, що зустрічаються під час створення таких антен, полягають у тому, що необхідно досягти максимально можливого зменшення рівня бічних пелюсток діаграми направленості антени, що досягається вибором відповідної форми та конструкції дзеркал, а також точністю їх виготовлення. Також важливим є підвищення якості антенних систем шляхом збільшення коефіцієнта корисної дії.

Таким чином, розвиток систем супутникового зв'язку призвів до створення значного розмаїття приймальних наземних антен. Власне в дослідженнях і проводиться проектування конструкцій антен для зазначеного виду зв'язку.