

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

УДК 621.37

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях


« 19 » 12 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження вимірювача напруженості поля для
телекомунікаційних систем»

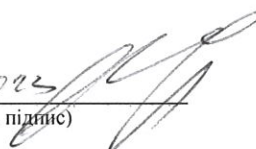
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітній ступінь «магістр»

Виконавець роботи
студент 2 курсу, гр.ТРм-22-1

19. 12. 2023 
(дата, підпис)

Герасимчук П.Л.

Керівник роботи
к.т.н., доц.

19. 12. 2023 
(дата, підпис)

Ципоренко В.В.

Житомир
2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МЕДИЦИНІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної магістерської роботи

на тему: «Дослідження вимірювача напруженості поля для телекомунікаційних систем»

Виконав: студент 2 курсу,
групи ТРм-22-1 спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Грасимчук П.Л.

Керівник Ципоренко В.В.

Рецензент Чухов В.В.

Житомир
2023

«Затверджено»

Завідувач кафедри комп'ютерних
технологій у медицині та
телекомунікаціях

 Владислав ЧУХОВ

« 19 » 12 2023 р.

Завдання на кваліфікаційну магістерську роботу

Герасимчука Петра Леонідовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Дослідження вимірювача напруженості поля для телекомунікаційних систем».

Затверджено наказом по університету від «22» листопада 2023 р. № 679

2. Мета дослідження: дослідження методів вимірювання напруженості поля та моделювання елементів вимірювальної антенної решітки вимірювальної антени.

3. Вихідні дані (характеристики об'єкта, умов дослідження та ін.): Тип антени для вимірювача напруженості – мікросмужкова.

4. Основні задачі дослідження :

– провести дослідження та моделюванню елементів вимірювальної антенної решітки;

– розробка рекомендацій щодо використання та вдосконалення засобів вимірювання напруженості електричного поля;

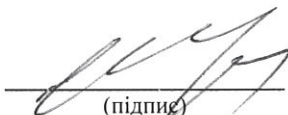
– проведення аналізу антен різноманітних застосувань, зокрема в радіомоніторингу.

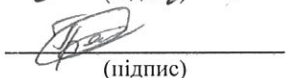
5. Термін подання роботи до захисту грудень 2023 р.

6. Дата видачі завдання «21» 01 2023 р.

Науковий керівник

Завдання прийняв
до виконання


(підпис)


(підпис)

Ципоренко В. В.
(прізвище, ініціали)

Герасимчук П. Л.
(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дослідження засобів вимірювання напруженості електричного поля в електроустановках є актуальною та важливою науковою проблемою, оскільки електричні поля є невід'ємною частиною сучасного життя та інфраструктури. Зростання використання електричної енергії супроводжується збільшенням електричних полів у навколишньому середовищі, що може впливати на здоров'я людей, стан приладів та ефективність технічних систем.

У ході дослідження буде проведено аналіз та розробка антен для різноманітних застосувань, зокрема в радіомоніторингу. Розглянуто різні типи антен, включаючи портативні антени для мобільних систем та кільцеві мікросмушкові елементи для антенних решіток.

Окрім того, у роботі буде розглянуті антени, які можуть бути успішно використані в системах радіомоніторингу для отримання точних та достовірних вимірювань радіосигналів. Визначити які антени мають переваги у портативності, ефективності та можливостях розширення їхніх характеристик для задоволення конкретних вимог вимірювань.

Також у ході дослідження буде з'ясована ефективність портативних антен радіомоніторингу, переконатися у тому, що вони надають широкий динамічний діапазон завдяки можливості вимірювання сигналів у двох режимах: активному та пасивному, а також в горизонтальному та вертикальному положенні. А також визначити та охарактеризувати переваги портативних антен над іншими видами.

Встановити, які антени характеризуються великим коефіцієнтом підсилення, але попри це, частіше використовуються для моніторингу.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи “Вимірювач напруженості поля для мобільних систем”: сторінок – 70, рисунків – 27, таблиць – 5, джерел посилань – 39.

Об'єкт дослідження: процес конструювання антенної решітки вимірювальної антени вимірювача напруженості поля.

Мета роботи: дослідження методів вимірювання напруженості поля та моделювання елементів вимірювальної антенної решітки вимірювальної антени.

Проведена робота по моделюванню елементів вимірювальної антенної решітки.

Ключові слова: антени мобільних систем радіомоніторингу, вимірювач напруженості поля, колова поляризація, кільцева вимірювальна антенна система, антенна решітка, діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення, коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт спрямованої дії.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ПОЛЯ	11
1.1. Вимоги до рівнів напруженості поля випромінювання	11
1.2. Методи вимірювання параметрів поля випромінювання	16
1.3. Засоби вимірювання напруженості поля.....	26
1.4. Антени для мобільних систем радіомоніторингу.....	31
РОЗДІЛ 2. ВИМІРЮВАЧ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ КОЛОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ	40
2.1. Теоретичні засади побудови вимірювача напруженості поля	40
2.2. Структурна схема кільцевої вимірювальної антенної системи.....	45
2.3. Структурна схема двокільцевої вимірювальної антенної системи.....	49
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК ВИМІРЮВАЛЬНОЇ АНТЕНИ ВИМІРЮВАЧА НАПРУЖЕНОСТІ ПОЛЯ	55
3.1. Огляд програмних продуктів для моделювання антенних систем	55
3.2. Моделювання елементів вимірювальної антенної решітки.....	57
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЖЕРЕЛ.....	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

ГДР – граничнодопустимий рівень;
НЧ – низькі частоти;
СЧ – середні частоти;
ВЧ – високі частоти;
ДВЧ – дуже високі частоти;
УВЧ – ультра високі частоти;
НВЧ – надвисокі частоти;
ЕМП – електромагнітне поле;
ПЧ – підсилювач частоти;
ПВЧ – підсилювач високої частоти;
ЕРС – електрорушійна сила;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі;
АР – антенна решітка;
ДС – діаграма спрямованості;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КП – коефіцієнт підсилення;
КСД – коефіцієнта спрямованої дії;

ВСТУП

Починаючи з XIX століття, вимірювання постійних та низькочастотних електромагнітних полів широко використовувалися в різних галузях, таких як кліматичні дослідження, геологія, атмосферні системи захисту від розряду у промисловості. Незважаючи на давню історію та різноманіття застосувань, вимірювання електростатичних полів не завжди мають достатнє забезпечення пристроями та стандартами.

Науковці вже здавна проявляли інтерес до вимірювання електромагнітних полів в атмосфері. Зокрема, М.В. Ломоносов та Г.В. Ріхман використовували механічні електроскопи для таких вимірювань. У атмосфері виникають явища, які призводять до розділу електричних зарядів внаслідок зміни метеорологічних умов, таких як хмари, опади, тумани і т.д. Це призводить до утворення позитивного об'ємного заряду в атмосфері та негативного на поверхні Землі [1]. Електричне поле Землі в основному спрямоване вертикально, і його середня напруженість становить приблизно $130 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$.

Вимірювання напруженості електромагнітних полів в атмосфері вказало на те, що це значення залежить від часу вимірювання (день або ніч), висоти та географічного положення вимірювань. Задача вимірювання електромагнітного поля виникає в різних галузях промисловості, зокрема при застосуванні ненатуральних матеріалів, де може накопичуватися електричний заряд, що може мати непередбачувані наслідки. На деяких об'єктах, наприклад, на літаках під час польоту, електричні поля можуть досягати небезпечних значень при наближенні літака до землі чи інших об'єктів з протилежним зарядом [2]. Останнім часом це також стало актуальним для космічної галузі через небезпеку електричних полів на місцях запуску ракет. Поява ліній електропередачі з великими рівнями напруги, які можуть сягати 1000 кВ, також призвела до необхідності вивчення впливу низькочастотних полів на людей та довкілля.

Підприємства, які займаються виробництвом промислових виробів, телекомунікаційні споруди та схожі об'єкти, становлять джерела різних видів

випромінювань, зокрема електромагнітного випромінювання в радіочастотному діапазоні [3]. Діапазон радіочастот електромагнітних хвиль, які випускаються різними випромінювачами, може значно відрізнятись, охоплюючи інтервал від 3 кГц до 3000 ГГц, і їхні довжини також можуть варіюватися в інтервалі від 100 тисяч метрів до 0,1 міліметра.

Якщо частота і довжина хвиль досягають великих значень, вони можуть становити загрозу для здоров'я населення, яке змушене піддаватися їхньому впливу. Законодавчі акти, що діють в Україні, визначають максимально допустимі норми впливу кожного виду випромінювання [1]. Власники промислових, телекомунікаційних та інших об'єктів повинні дотримуватися цих норм, інакше до їхнього підприємства можуть бути застосовані різноманітні санкції.

Оскільки ці поля нероздільно пов'язані між собою, їх називають електромагнітними. На сьогоднішній день антропогенне електромагнітне випромінювання значно перевищує природний фон і стає все більш негативним чинником, вплив на людину та довкілля якого зростає з кожним роком [4].

Тривалий безперервний вплив електромагнітного поля високої інтенсивності на організм людини може викликати серйозні порушення, які навіть після припинення впливу важко піддаються коригуванню. Найбільш вразливими є центральна нервова та серцево-судинна системи [2]. Проблеми в цих областях можуть виявлятися різними симптомами - від підвищеної втомлюваності та головних болів до серйозних порушень координації, пам'яті та кровообігу.

Виникнення побічного електромагнітного випромінювання від електронних пристроїв пов'язано зі зміною струму і напруги в електричних ланцюгах.

Існуючі наближені формули для оцінки рівня випромінювання від окремих елементів часто призводять до значних похибок порівняно з реальними вимірами у зв'язку з тим, що вони не враховують всі параметри досліджуваного об'єкта. Крім того, існуючі моделі прогнозування побічного електромагнітного випромінювання від електронних засобів і їх компонентів ґрунтуються на припущенні, що всі параметри відомі та враховуються, що часто є недосяжним на практиці. Таким чином, основним підходом для вивчення електромагнітного випромінювання від

електронних засобів залишається експериментальний метод [5].

Однак проведення експериментальних вимірювань побічного електромагнітного випромінювання від електронних засобів стикається з труднощами через необхідність виконання їх на спеціальних відкритих майданчиках, де можна оцінити абсолютне значення напруженості електричного поля від об'єкта дослідження.

Метою цієї роботи є розробка елементів вимірювальної антенної решітки для антени вимірювача напруженості поля.

Об'єкт дослідження: процес конструювання антенної решітки вимірювальної антени вимірювача напруженості поля.

Предмет дослідження - характеристики, принципи роботи, ефективність та точність засобів вимірювання напруженості електричного поля.

Наукова новизна полягає в оцінці сучасних засобів вимірювання напруженості електричного поля з урахуванням новітніх технологій, стандартів та вимог безпеки.

Задачі для досягнення мети роботи:

- вивчення теоретичних основ формування та вимірювання електричних полів. Аналіз сучасних засобів вимірювання напруженості електричного поля.
- порівняння характеристик різних засобів та їхню ефективність у реальних умовах;
- визначення можливих обмежень та недоліків існуючих методів вимірювання.
- розробка рекомендацій щодо використання та вдосконалення засобів вимірювання напруженості електричного поля;
- проведення аналізу антен різноманітних застосувань, зокрема в радіомоніторингу;
- розглянути різні типи антен, включаючи портативні антени для мобільних систем та кільцеві мікросмужкові елементи для антенних решіток.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ПОЛЯ

1.1 Вимоги до рівнів напруженості поля випромінювання

Сучасне життя неможливо уявити без електрики та пристосувань, що працюють за її допомогою. Електрика стала одним із найзначущих винаходів людства, використовуючи який ми повсякденно користуємося електричними приладами. Від приготування сніданку на електроплиті до робочих годин, проведених за персональним комп'ютером, електрична енергія оточує нас на кожному кроці: лінії електропередач, електропроводка, телекомунікаційні пристрої, комп'ютери, мобільні телефони та багато інших [6].

Для визначення впливу радіомагнітних хвиль на людину необхідні фахові прилади для вимірювання електромагнітних полів та випромінювань. З урахуванням того, що джерела електромагнітного випромінювання оточують нас щоденно, важливо визначити рівень цього впливу [7].

Різноманітні джерела електромагнітного випромінювання стають неотдільною частиною нашого життя, як, наприклад:

- Лінії електропередач (ЛЕП);
- Електропроводка;
- Телекомунікаційні пристрої;
- Комп'ютери та мобільні телефони;
- Електричні побутові прилади;
- Пристрої для теле- і радіомовлення;
- Прилади радіозв'язку та інші.

Таким чином, електромагнітне випромінювання оточує нас вдома, на роботі та під час відпочинку, вносячи свій внесок у наше повсякденне існування.

Гранично-допустимий рівень (ГДР) - це напруженість електромагнітного поля (ЕМП) на робочому місці, яка при звичайній роботі не викликає захворювань чи патологій у працівників, що підтверджено сучасними методами дослідження під час професійної практики або в довгостроковій перспективі. Для ГДР встановлені

конкретні значення напруженості ЕМП, при яких вплив вважається безпечним [8]:

- Всередині житлових будинків: 0.5 кВ/м;
- На території зони житлової забудови: 1 кВ/м;
- У населеній місцевості, поза зоною житлової забудови: 5 кВ/м;
- На ділянках перетину ліній електропередач з автомобільними дорогами

I-IV категорій: 10 кВ/м;

- У ненаселеній місцевості: 15 кВ/м;
- У важкодоступній місцевості та на площах, обмежених для виключення

доступу населення: 20 кВ/м.

Гранично-допустимі рівні встановлені для ЕМП, яке не піддається викривленню внаслідок присутності людини. Напруженість ЕМП вимірюється на висоті 1,8 м від рівня ґрунту або від рівня підлоги для приміщень [7].

Для забезпечення високої якості життя і аналізу електромагнітної обстановки важливо обчислити інтенсивність ЕМП. Вимірювання електромагнітного поля повинно здійснюватися акредитованою лабораторією з відповідною галуззю акредитації та належним приладовим парком. Приладовий парк повинен систематично перевірятися в спеціалізованих організаціях для забезпечення точності вимірювань.

Електромагнітне випромінювання може впливати на організм людини через різні механізми, і його ефекти залежать від частоти і інтенсивності випромінювання.

1. Низькочастотні електромагнітні поля:

- Взаємодія з організмом через електричні струми, що виникають при подачі напруги до пристроїв та установок.

- Може впливати на центральну нервову систему та серцево-судинну систему.

2. Високочастотні електромагнітні поля:

- Іонізація атомів та молекул, що може викликати утворення радикалів та пошкодження ДНК.

- Загроза нагрівання тканин при великих інтенсивностях випромінювання.

Зазвичай природне електромагнітне випромінювання на низькому рівні не

завдає шкоди здоров'ю. Проте, умови робочих місць, де високочастотне випромінювання може бути вище стандартних норм, вимагають уваги.

Для оцінки впливу електромагнітного випромінювання на людину важливо враховувати конкретні умови експозиції, тривалість взаємодії, інтенсивність випромінювання та інші фактори. Регулярні вимірювання та дотримання нормативів можуть забезпечити безпеку на робочому місці.

Якщо ви працюєте на промисловому підприємстві, де є можливість високочастотного випромінювання, рекомендується використовувати заходи захисту, такі як екранування, дистанціювання від джерел випромінювання, та регулярні медичні огляди для визначення можливих впливів на здоров'я.

Якщо ви випадково опинилися під впливом високочастотних електромагнітних полів на своєму робочому місці на промисловому підприємстві, дотримання правил техніки безпеки та використання засобів особистого захисту стає важливим. Методи вимірювання електромагнітного поля (ЕМП) детально описані у спеціалізованій технічній документації.

Інструментальні виміри електромагнітних випромінювань проводяться за допомогою спеціальних пристроїв, розташованих на висотах 0,5 м, 1,0 м і 1,7 м від поверхні землі або підлоги приміщення, де розміщено обладнання. Параметри електричного і магнітного поля вимірюються на відстані 0,5 м від джерела електромагнітного випромінювання.

Якщо вимірювання інтенсивності ЕМП проводяться в рамках виконання правил охорони праці, то електромагнітне випромінювання вимірюється безпосередньо на робочому місці працівника, який піддається впливу ЕМП, з урахуванням особливостей умов праці.

Для вимірювання напруженості електромагнітних випромінювань застосовується високоточна техніка ненаправленого прийому, оснащена ізотропними датчиками з дозволеною відносною похибкою $\pm 20\%$. Отримані значення інтенсивності електромагнітного випромінювання не повинні перевищувати встановлені санітарно-гігієнічні нормативи, які визначені законодавством.

Граничнодопустимі рівні (ГДР) напруженості електричного поля і рівень

поверхневої густини потоку енергії (ГПЕ), що визначаються середньоквадратичним та середнім значеннями відповідно, розраховуються відповідно до частоти і режиму випромінювання. Граничнодопустимі рівні електромагнітного поля (ЕМП), утворені радіостанціями, визначаються відповідно до встановленої таблиці.

Таблиця 1.1

Граничнодопустимі рівні електромагнітного випромінювання

N діапазону	Метричний розподіл діапазонів	Частоти*	Довжини хвиль	ГДР
5	Кілометрові хвилі (низькі частоти, НЧ)	30 - 300 КГц	10 - 1 км	25 В/м
6	Гектометрові хвилі (середні частоти, СЧ)	0,3 - 3 МГц	1 - 0,1 км	15 В/м
7	Декаметрові хвилі (високі частоти, ВЧ)	3 - 30 МГц	100 - 10 м	$31\lg\lambda$ В/м
8	Метрові хвилі (дуже високі частоти, ДВЧ)	30 - 300 МГц	10 - 1 м	3 В/м
9	Дециметрові хвилі (ультрависокі частоти, УВЧ)	300 - 3000 МГц	1 - 0,1 м	2,5 мкВт/см ²
10	Сантиметрові хвилі (надвисокі частоти, НВЧ)	3 - 30 ГГц	10 - 1 см	
11	Міліметрові хвилі (надзвичайно високі частоти, НЗВЧ)	30 - 300 ГГц	1 - 0,1 см	

Граничнодопустимі рівні електромагнітного поля (ЕМП), які генерують телевізійні та радіостанції у діапазоні частот від 48 до 1000 МГц, визначаються формулою:

$$E_{ГДР} = 21 \cdot f^{-0,37},$$

де $E_{ГДР}$ - граничнодопустимий рівень ЕМП, В/м;

f - несуча частота оцінюваного каналу зображення або звукового супроводу, МГц.

Обчислення електричних компонентів електромагнітного поля, що генерується кожною з антен, визначається за наступною формулою:

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G \cdot \eta}}{R} \cdot K\phi \cdot F(\varphi) \cdot F(\alpha) \cdot K\Gamma,$$

де P - потужність на вході фідерного тракту, Вт;

G - коефіцієнт підсилення антени відносно ізотропного випромінювача; η - коефіцієнт втрат в антенно-фідерному тракті;

R - відстань від геометричного центру антени до розрахункової точки;

$K\phi$ - коефіцієнт, що враховує вплив відбиваючих поверхонь в умовах міської забудови (прийнято $K\phi = 1,25$);

$F(\varphi)$ - значення нормованої діаграми спрямованості антени у вертикальній площині. Для антени, для якої розраховується, і для антен, дія яких враховується, $F(\varphi)$ характеризується на підставі діаграми спрямованості у вертикальній площині відповідних антен;

$F(\alpha)$ - значення нормованої діаграми спрямованості антени в горизонтальній площині. Для антени, для якої розраховується, $F(\alpha) = 1$. Для антен, дія яких враховується, $F(\alpha)$ сформулюється на підставі діаграми спрямованості у горизонтальній площині;

$K\Gamma$ - коефіцієнт, що враховує нерівномірність діаграми спрямованості антени в горизонтальній площині (прийнято $K\Gamma = 1,0$) [9].

Густина потоку енергії, що генерується антеною, розраховується за формулою:

$$\Gamma_{ПЕ} = E^2/3,77.$$

У випадку наявності декількох джерел випромінювання, що працюють у радіочастотних діапазонах 5-8, з однаковим ГДР, напруженість електричного поля, яка формується всіма цими джерелами на межі санітарно-захисної зони, повинна відповідати такому співвідношенню:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i)^2} = E_{\text{гдр}},$$

де E_i – напруженість електричного поля, створюваного i -антеною;

$E_{\text{гдр}}$ – граничнодопустиме значення напруженості поля для всіх антен цього діапазону.

У випадку присутності декількох джерел випромінювання у радіочастотних діапазонах 9-11, також з однаковим ГДР, поверхнева густина потоку енергії, яка формується всіма цими джерелами на межі санітарно-захисної зони, повинна відповідати такому співвідношенню:

$$\text{ГПЕ} = \sum_{i=1}^n \text{ГПЕ}_i = \text{ГПЕ}_{\text{гдр}},$$

де ГПЕ_i – густина потоку енергії, створюваного i -антеною;

$\text{ГПЕ}_{\text{гдр}}$ – граничнодопустиме значення густини потоку енергії для всіх антен цього діапазону [10].

У випадку наявності декількох джерел випромінювання в радіочастотних діапазонах 5-11, з різними ГДР, відносний рівень ЕМП, створений всіма цими джерелами на межі санітарно-захисної зони, повинен відповідати такій умові:

$$S_{\text{відн}} = \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{E_i}{E_{\text{гдр}i}} \right)^2 + \frac{\text{ГПЕ}_i}{\text{ГПЕ}_{\text{гдр}i}} \right) = 1,$$

де E_i - напруженість електричного поля, створюваного i -антеною;

$E_{\text{гдр}i}$ - граничнодопустиме значення напруженості поля для цього діапазону;

ГПЕ_i - густина потоку енергії, створюваного i -антеною;

$\text{ГПЕ}_{\text{гдр}i}$ - граничнодопустиме значення густини потоку енергії для цього діапазону [11].

1.2 Методи вимірювання параметрів поля випромінювання

Методи вимірювання параметрів поля випромінювання засновані на характеристиках електромагнітного поля (ЕМП), яке є взаємодійним фізичним полем з електрично зарядженими тілами та тілами, обладнаними дипольними та мультипольними електричними та магнітними моментами [12]. ЕМП представляється як сукупність електричного та магнітного полів, які можуть

генерувати один одного за певних умов, суттєво взаємодіючи [9].

Характеристики ЕМП включають наступні параметри:

1. Період і частота:

- Період (Т): Це найменший проміжок часу, після завершення якого повторюються значення всіх величин, що визначають коливання:

$$f = 1/T$$

- Частота (f): Кількість повних коливань за одиницю часу Т визначає частоту електромагнітних коливань, вимірювану в герцах [13].

- Кругова частота (ω): Це число коливань, які виникають за 2π одиниць часу:

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi/T.$$

2. Швидкість і довжина хвилі:

- Довжина хвилі: Характеризує хвилю, що поширюється в просторі змінного електромагнітного поля.

Технічно використовується електротехнічна шкала джерел ЕМП, яка включає:

- Низькочастотні (НЧ): від 0 до 60 Гц;
- Середньочастотні (СЧ): від 60 Гц до 10 кГц;
- Високочастотні (ВЧ): від 10 кГц до 300 МГц;
- Надвисокочастотні (НВЧ): від 300 МГц до 300 ГГц [14].

Методи вимірювання ЕМП враховують ці характеристики для забезпечення надійних та точних результатів в оцінці впливу електромагнітного випромінювання.

1. Швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі:

- Швидкість розповсюдження (v) електромагнітної хвилі визначається за допомогою характеристик середовища, в якому вона поширюється. Формула для швидкості визначається відношенням абсолютної діелектричної проникності (ϵ) та абсолютної магнітної проникності (μ):

$$v = 1/\sqrt{\epsilon \cdot \mu}$$

де ϵ - абсолютна діелектрична проникність середовища, що має розмірність Фарада на метр (Ф/м) [15];

μ - абсолютна магнітна проникність середовища, що має розмірність Генрі на метр (Гн/м) [9].

2. Довжина хвилі:

- Довжина хвилі (λ) визначається як відстань, на яку розповсюджується фронт електромагнітної хвилі за час T (період коливань в джерелі). Формула для довжини хвилі:

$$\lambda = v/f$$

3. Інтенсивність. E - середньоквадратичне значення напруженості електричного поля, що має розмірність в вольтах на метр (В/м); H - середньоквадратичне значення напруженості магнітного поля [13], що виражається в ампер на метр (А/м), або B - магнітна індукція, з розмірністю в тесла (Тл).

У повітрі на відстанях від джерела, великі довжини хвилі (в далекій зоні), напруженості E і H пов'язані простим рівнянням:

$$\frac{E}{H} = Z_0,$$

де Z_0 - хвильовий опір вільного простору, рівний 377 Ом.

В діапазоні частот 300 МГц...300 ГГц інтенсивність ЕМП характеризується щільністю потоку енергії, що вимірюється в ватах на квадратний метр (Вт/м²).

У далекій зоні, відстань від джерела ЕМП вже досить велика, і можна використовувати спрощені вирази для характеристик поля [10]:

$$S = \frac{E^2}{377} = 377 \cdot H^2.$$

1. Дальня зона:

- У дальній зоні, випромінювання характеризується співвідношенням, яке пов'язує щільність потоку енергії (S), напруженість електричного поля (E), та хвильовий опір вільного простору (Z_0) [10].

В даному випадку, E - напруженість електричного поля, а S - щільність потоку енергії, обчислювана в ватах на квадратний метр (Вт/м²) [10].

2. Близня зона (зона індукції):

- У ближній зоні (зоні індукції) випромінювання слабо виражене, і її характеристики залежать від відстані до джерела. Напруженість електричного поля

(E) можна оцінити, використовуючи сумарне значення квадратів напруженостей поля від кожного джерела (E_i): [16]:

$$E_{\Sigma}^2 = \sum_{i=1}^N E_i^2,$$

де N - кількість джерел, що працюють паралельно.

Ці формули використовуються для оцінки характеристик електромагнітного випромінювання в далеких і близьких зонах навколо джерела ЕМП.

Поляризація електромагнітних хвиль: Поляризація електромагнітних хвиль визначається орієнтацією вектора напруженості електричного поля хвилі. Існують три основні види поляризації:

1. Лінійна поляризація: Вектор напруженості електричного поля здійснює лінійний рух вздовж певного напрямку.
2. Кругова поляризація: Вектор напруженості електричного поля рухається по колу навколо напрямку поширення хвилі.
3. Еліптична поляризація: Вектор напруженості електричного поля описує еліпс у площині, перпендикулярній напрямку поширення хвилі.

Характеристики поляризації в антенах: Характеристики поляризації електромагнітних хвиль в антенах визначаються конструкцією антени. Наприклад, антени з вертикальних провідників випромінюють вертикально поляризовані хвилі, тоді як антени з горизонтальних провідників випромінюють горизонтально поляризовані хвилі.

Вектори характеристик ЕМП: У контексті електромагнітного поля (ЕМП), вектори характеристик включають: [17].

Напруженість електромагнітного поля (ЕМП) характеризується векторами:

- $\vec{P}$ - Вектор Умова-Пойнтінга, щільність потоку енергії (Вт/м²);
- $\vec{E}$ - Напруженість електричного поля в напрямку поширення хвилі (В/м);
- $\vec{H}$ - Напруженість магнітного поля, перпендикулярна напрямку поширення хвилі (А/м).

Ці вектори перпендикулярні один одному і пов'язані між собою формулами

[18]:

$$\vec{P} = \vec{E} \cdot \vec{H}$$
$$\frac{\vec{E}}{\vec{H}} = W = \sqrt{\mu/\epsilon}$$

Вони пов'язані за допомогою векторного та скалярного добутків, де W - хвильовий опір вільного простору:

$$W = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120 \cdot \pi = \frac{E}{H},$$

$$P = \frac{E^2}{120\pi} = H^2 \cdot 120\pi.$$

Ці взаємозв'язки допомагають визначати характеристики поля в різних середовищах та на великих відстанях від джерела [19].

Щільність потоку потужності: Щільність потоку потужності (P) визначається взаємодією електромагнітної хвилі з поверхнею. Формула для обчислення потужності (P) через щільність потоку потужності (Π) та площу (S) виглядає так:

$$P = \Pi \cdot S.$$

Вимірювання напруженості ЕМП: Щоб виміряти напруженість електромагнітного поля (ЕМП), можна скористатися формулою:

$$E = \sqrt{\frac{120\pi \cdot D}{S_{\text{эф.}}}},$$

де $S_{\text{эф.}}$ - ефективна площа антени.

Методи вимірювання ЕМП: Для вимірювання напруженості електромагнітного поля застосовують два основних методи:

1. Метод еталонної антени: Вимірювання проводиться за допомогою еталонної антени, яка відома і використовується для калібрування вимірювальних приладів.

2. Метод порівняння: Застосовується для вимірювання слабких полів і використовує вимірювальні прилади, такі як вимірювальні пристрої типу П5 та вимірників напруженості поля і щільності потоку потужності типу ПЗ.

Поляризація ЕМП: Орієнтація векторів $\vec{E}$ і $\vec{H}$ у просторі важлива для вимірювання, оскільки визначає площину поляризації електромагнітного поля. Поляризація може бути лінійною, круговою або еліптичною.

Два типи лінійної поляризації відносно земної поверхні:

- 1) Вертикальна поляризація: вектор перпендикулярний земній поверхні;
- 2) Горизонтальна поляризація: вектор паралельний земній поверхні.

1.2.1 Метод порівняння. Вимірювальні приймачі і вимірювачі напруженості поля

Опис процесу вимірювання напруженості поля за допомогою вимірювального приймача:

1. Попередня настройка:

- Встановлення вимірювача на попередню настройку перед вимірюванням.
- Підключення однієї з вимірювальних антен в залежності від частоти джерела поля.

- Настройка антени на частоту джерела, яку планують вимірювати.

2. Калібрування:

- Підключення відомої напруги від генератора-калібратора до вхідного ПЧ (попереднього підсилювача).
- Зміна посилення вхідного ПЧ для установки стрілки вольтметра на певне значення.
- Налаштування атенюатора ПЧ на попередньо визначене значення ослаблення.

3. Вимір:

- Проведення вимірювання напруженості поля зазначеним вимірювальним приймачем.
- Зміна частоти гетеродина для отримання максимального значення вольтметра при довільних положеннях атенюаторів (вхідного і проміжного частотного).

Процедура вимірювання напруженості поля методом порівняння:

1. Перемикач в положення "1":

- Встановлення перемикача в положення "1".
- Регулювання ослаблення, поки стрілка вольтметра не досягне будь-якого зручного для відліку положення.

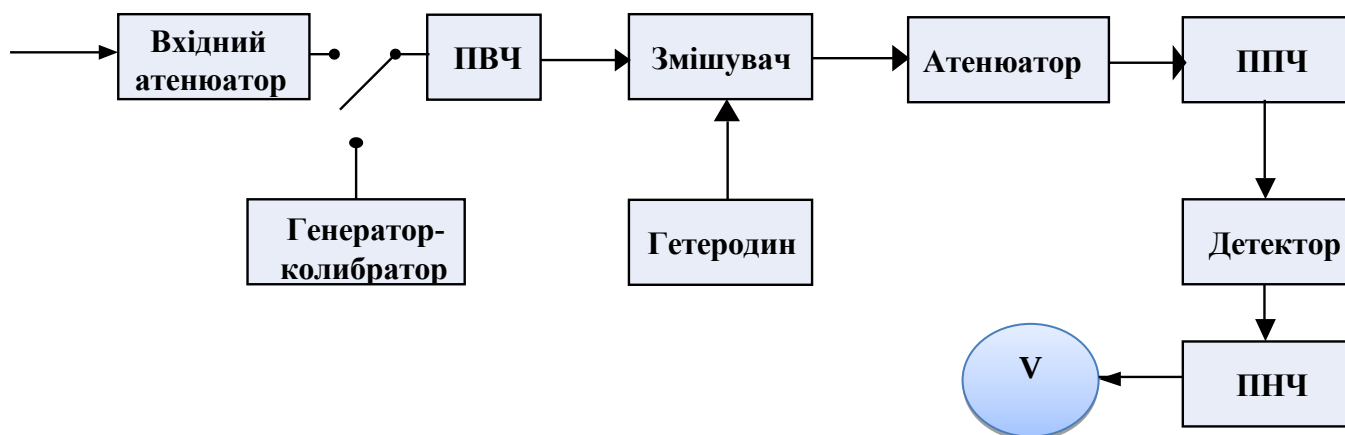


Рис. 1.1. Структурна схема вимірювального приймача

2. Вимірювання напруги:

- Завдання відомої напруги від генератора-калібратора.
- Регулювання ослаблення для установки стрілки вольтметра на певне значення.

- Запис напруги U .

3. Розрахунок напруженості поля:

- Використання формули:

$$U = E \cdot h_d \cdot \alpha_{\text{вх}} \cdot \alpha_{\text{пч}}$$

з котрого можемо знайти значення E :

$$E = \frac{U}{h_d \cdot \alpha_{\text{вх}} \cdot \alpha_{\text{пч}}}$$

- Розрахунок значення напруженості поля.

4. Межі зміни напруженості поля:

- Закладені від часток мкВ/м до сотень мВ/м, а щільності потоку

потужності - від сотих часток мкВт/см² до десятків мВт/см².

5. Розрахунок похибки вимірювань:

- Врахування похибки застосованої вимірювальної антени, її орієнтування, неузгодженості, похибки атенюатора і вольтметра.
- Сумарна похибка може складати $\pm 30\%$.

1.2.2 Метод вимірювання напруженості поля за принципом еталонної

антени

1. Розташування вимірювальної антени в площині, паралельній поляризації хвилі:

- Розташування антени в площині, паралельній поляризації хвилі.
- Індукція ЕРС в антені:

$$\varepsilon = A \cdot h_a,$$

де h_a - діюча висота антени.

2. Розрахунок напруженості поля:

- Використання отриманого значення ЕРС та діючої висоти для розрахунку напруженості поля.

Ці процедури визначені для отримання точних вимірів і постійного моніторингу ЕМП в заданому діапазоні частот.

Метод вимірювання напруженості поля за принципом еталонної антени (продовження):

6. Визначення напруженості поля за принципом еталонної антени:

- Застосування вимірювальної антени типу П6 з відомими параметрами.
- Вимірювання значення напруги за допомогою вольтметра.
- Використання формули:

$$E[\text{мкВ/м}] = U[\text{мкВ}] \cdot k[1/\text{м}],$$

де E - напруженість електричного поля,

U - напруга сигналу,

k - коефіцієнт перерахунку.

У другому випадку, зважаючи співвідношення між потужністю сигналу та напругою:

$$P = U^2 / R,$$

7. Використання простих вимірювальних приладів:

- Використання індикаторів поля виду П2 для визначення напруженості сильних полів близько джерел випромінювання.

8. Вимірювання напруженості електричного поля прямим методом:

- Використання вимірювального радіоприймача або аналізатора спектра.

- Вимірювання напруги радіочастотного сигналу на виході еталонної приймальної антени.

9. Перерахунок у напруженість електричного поля:

- Автоматичний перерахунок у напруженість електричного поля з врахуванням коефіцієнтів перерахунку та втрат у кабелі.

10. Формула для перерахунку:

- За першим методом:

$$e[\text{мкВ/м}] = 4.9 \cdot 10^{10} \cdot p[\text{мВт}] \cdot k[1/\text{м}].$$

- За другим методом: Визначення за напругою u або потужністю сигналу p на виході кабелю каліброваної приймальної вимірювальної антени та значенням коефіцієнта перерахунку k .

Беручи до уваги співвідношення одиниць вимірювань:

$$P[\text{дБмВт}] = 10 \cdot \log p[\text{мВт}], p[\text{мВт}] = 10^{\frac{P[\text{дБмВт}]}{10}},$$

$$U[\text{дБмкВ}] = 20 \cdot \log u[\text{мкВ}], u[\text{мкВ}] = 10^{\frac{U[\text{дБмкВ}]}{20}},$$

$$E[\text{дБмкВ/м}] = 20 \cdot \log e[\text{мкВ/м}], e[\text{мкВ/м}] = 10^{\frac{E[\text{дБмкВ/м}]}{20}},$$

11. Діапазон вимірювань:

- Від частот мкВ/м до сотень мВ/м для напруженості поля.
- Від сотих часток мкВт/см² до десятків мВт/см² для щільності потоку потужності.

12. Похибка вимірювань:

- Сумарна похибка може досягати значення $\pm 30\%$.

13. Автоматичний режим перерахунку:

- Використання автоматичного режиму перерахунку у вимірювальному обладнанні.

Метод вимірювання напруженості поля за принципом еталонної антени є ефективним і точним способом визначення напруженості електричного поля

електромагнітного випромінювання в різних діапазонах частот. Застосування вимірювальних приладів і методів дозволяє визначити параметри поля з високою точністю та автоматично перерахувати їх у відповідні одиниці вимірювань.

Формули та рівняння для розрахунків напруженості електричного поля електромагнітного випромінювання можна виразити на основі співвідношень між потужністю сигналу, напругою та іншими параметрами. З урахуванням цього, нова формула може бути записана у вигляді:

$$E[\text{дБмкВ/м}] = U[\text{дБмкВ}] + K[\text{дБ} \cdot 1/\text{м}],$$

де:

- E – рівень напруженості електричної складової електромагнітного поля в одиницях вимірювання дБмкВ/м;
- U – рівень напруги сигналу на виході кабелю каліброваної приймальної вимірювальної антени в одиницях вимірювання дБмкВ;
- K – коефіцієнт перерахунку в одиницях дБ 1/м.;

У випадку перерахунку через потужність сигналу, рівень напруженості електричного поля електромагнітного випромінювання обчислюється за формулою:

$$E[\text{дБмкВ/м}] = P[\text{дБмВт}] + K[\text{дБ} \cdot 1/\text{м}] + 106.9 \text{ дБ}.$$

де P – потужність сигналу в дБмВт

Коефіцієнт перерахунку k характеризується як:

$$k = k_{\text{ант.}} + L_{\text{каб.}},$$

де $k_{\text{ант.}}$ – антенний фактор, який залежить від частоти f і коефіцієнту підсилення антени G_i ;

$L_{\text{каб.}}$ – затухання в кабелі, обчислене за формулою;

У поголовному випадку коефіцієнт перерахунку K розраховується за формулою:

$$K = 20 \cdot \log_{10}(f) - G_i - 29.774,$$

де f – частота в МГц;

G_i – коефіцієнт підсилення антени відносно ізотропного випромінювача (дБ)

[20].

Затухання в кабелі $L_{\text{каб.}}$ знаходиться за формулою:

$$L_{\text{каб.}} = \gamma \cdot l,$$

де γ – питоме затухання в кабелі в одиницях дБ/м; l – довжина кабелю.

У поголовному випадку коефіцієнт перерахунку розраховується за формулою:

$$K = 20 \cdot \log_{10}(f) - G_i - 29.774 + L_{\text{каб.}}.$$

Ці формули дозволяють врахувати взаємозв'язок між різними параметрами при розрахунках напруженості електричного поля в радіотехніці.

1.3 Засоби вимірювання напруженості поля

В ході еволюції біосфери безперервно перебувала і перебуває під впливом електромагнітного поля (ЕМП) природного походження: електричне і магнітне поле Землі, космічні електромагнітні випромінювання, в першу чергу ті, що генеруються Сонцем. Природа електромагнітного випромінювання поєднана з вихровими електричними і магнітними полями [21].

В результаті того, що ці поля неподільно пов'язані між собою, тому вони отримали загальну назву – електромагнітні. В нинішній час ЕМП антропогенного походження сильно перевищують природний фон і є тим незручним чинником, чия дія на людину і довкілля з року в рік більшає [22].

Джерелами, що породжують ЕМП антропогенного походження є [23]:

- лінії електропередач (ЛЕП) надвисокої напруги;
- телевізійні та радіотрансляційні станції;
- електростанції;
- радіолокаційні та радіонавігаційні станції;
- пристрої, що забезпечують мобільний та сотовий телефонні зв'язки та ін.

[5];

Електричне поле – часткова форма виявлення (нарівні з магнітним полем) електромагнітного поля, яка характеризує дію на електричний заряд (з боку поля) сили, що не залежить від швидкості руху заряду. Визначальною кількісною характеристикою електричного поля є напруженість електричного поля [24].

В тропосфері здійснюються явища, що викликають поділ електричних зарядів в результаті зміни метеорологічних умов – хмар, опадів, туманів тощо [25]. В результаті чого в атмосфері з'являється позитивний об'ємний заряд, на поверхні Землі – негативний. Отже, електричне поле Землі цілеспрямоване приблизно вертикально: напруженість його являє собою в середньому $130 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$ [26].

Магнітне поле визначається його дією на заряджену частинку, що рухається з силою, пропорційною заряду та її швидкості. Дію магнітного поля на рухомий заряд визначають магнітною індукцією. Магнітне поле характеризується також вектором напруженості магнітного поля, який пов'язаний з вектором магнітної індукції [15]:

Магнітне поле визначається його дією на рухомий електричний заряд, викликаючи силу, пропорційну заряду та його швидкості. Магнітне поле характеризується магнітною індукцією, що пов'язана з вектором напруженості магнітного поля. Для повітря, вакууму та немагнітних матеріалів, магнітна проникність μ дорівнює 1. Одиницею магнітної індукції є тесла (Тл), а одиницею напруженості магнітного поля є ерстед (Е) [27].

Для вимірювання параметрів електричного та магнітного поля використовується пристрій "В&Е – метр" типу А002м (рис. 1.2). Технічні характеристики цього пристрою представлені в таблиці 1.2.

Згідно з даними [28], напруженість електричного поля в тропосфері в середньому становить приблизно 130 В/м , і вона орієнтована приблизно вертикально. Магнітне поле, в свою чергу, породжується дією на рухливий електричний заряд, викликаючи силу, яка пропорційна заряду та його швидкості. Дію магнітного поля на рухливий заряд характеризує магнітна індукція, яка виражається формулою:

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H},$$

де: μ – магнітна проникність речовини, що визначає зміну магнітної індукції середовища під впливом магнітного поля; μ_0 – магнітна стала ($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$) [29].

Для повітря, вакууму та немагнітних матеріалів $\mu = 1$. Одиницею магнітної індукції є одна тесла (Тл). $1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Г}$. Одиницею напруженості магнітного поля є

один ерстед (Е). $1 \text{ Е} = 79,5775 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$. Середня величина магнітної індукції неподалеку земної поверхні становить $\approx 5 \cdot 10^5 \text{ Тл}$, а напруженість магнітного поля складає від магнітних полюсів ($55,7 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$) до магнітного екватора ($33,4 \text{ А} \cdot \text{м}^{-1}$) [30].

Для вимірювання параметрів електричного і магнітного полів використовується пристрій "В&Е – метр" типу А002м (рис. 1.2). Цей прилад призначений для проведення експрес-вимірювань середньоквадратичного значення осциляції електричної та магнітної складових електромагнітного поля в житлових і робочих приміщеннях [17]. Він може бути використаний для санітарно-гігієнічного обстеження приміщень з електрообладнанням, а також для аналізу електромагнітного фону джерел інтенсивного електромагнітного випромінювання [9].



Рис. 1.2. Загальний вигляд пристрою "В&Е – метр"

Технічні характеристики “В&Е – метр”

Межі вимірювання електричного поля в діапазоні частот 5 Гц- 2 кГц	2-500 В/м
Межі вимірювання електричного поля в діапазоні частот 2 кГц - 400 кГц	0.2 - 50 В/м
Межі вимірювання магнітного поля в діапазоні частот 5 Гц-2 кГц	0.04 - 5 мкТл
Межі вимірювання магнітного поля в діапазоні частот 2 кГц - 400 кГц	5 - 500 нТл
Нерівномірність АЧХ в зазначених діапазонах не більше, дБ	3
Основна похибка вимірювання	10%
Тривалість непр. роботи приладу без підзарядки акумуля. батареї, ч, не менше	15
Габарити датчика-вимірювача, мм	210x100x60
Вага, г	450

Вимірювач напруженості електромагнітного поля (ВНП) «ПЗ-21» призначений для вимірювання середньо-квадратичних значень напруженості електричної та магнітної складової електромагнітного поля в режимах неперервної генерації, амплітудної, частотної і імпульсної модуляцій [31]. Вимірювач "ПЗ-21" застосовується для просторового обстеження інтенсивності ВЧ-випромінювань в широкій смузі частот, для контролю небезпечних рівнів ВЧ-випромінювань на практичних місцях колективу, обслуговуючих радіотехнічне обладнання і системи, які випромінюють ЕМП [32]. На рис. 1.3. показано загальний вигляд приладу «ПЗ-21». Технічні характеристики вказані в Таблиці 1.2.

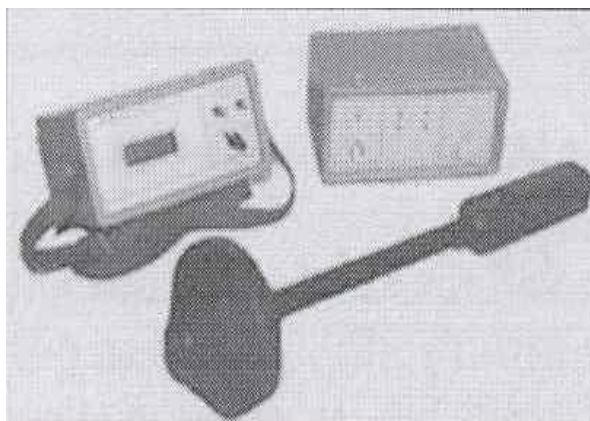


Рис. 1.3. Загальний вигляд приладу «ПЗ-21».

Технічні характеристики «ПЗ-21»

Діапазон частот за електричною складовою ЕМП, Гц	$10^5 - 3 \cdot 10^8$
Діапазон частот за магнітною складовою ЕМП, Гц	$10^5 - 3 \cdot 10^7$
Границя вимірювання середньоквадратичних значень: електричної складової, $V \cdot m^{-1}$ магнітної складової, $A \cdot m^{-1}$	1-1000 0,5-16
Основна похибка вимірювання напруженості ЕМП, %	$\pm 2,5$
Похибка, обумовлена відхиленням від ізотропної діаграми направленості АП при частоті більш ніж 10^5 Гц, дБ	не більше 1,5
Додаткова похибка вимірювача, обумовлена відхиленням температури оточуючого від нормальної на кожні $10^\circ C$, дБ	не більше $\pm 1,0$

Призначені для ізотропного вимірювання рівнів високочастотних електричних полів, народжених різними джерелами: телевізійними передавачами, медичним обладнанням, радаром, передавачами систем, радіо- і сотового зв'язку, мікрохвильовими печами і т.п. [33] В таблиці 1.4 наведені технічні характеристики приладу EMR-30.

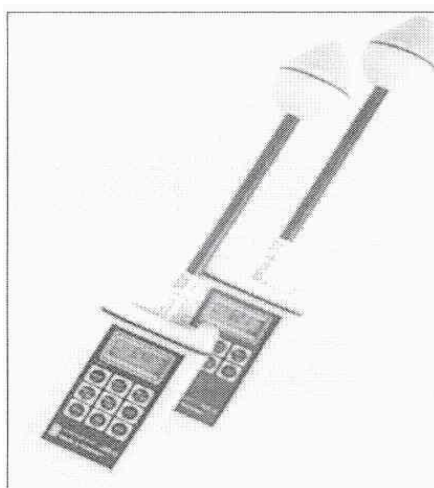


Рис. 1.4. Загальний вигляд пристрою EMR-30.

В пристрій вмонтований мікропроцесорний прилад для обрахування результатів вимірювань, пам'ять мікропроцесорного приладу здатна запам'ятовувати 1500 результатів [34]. В пристрої завбачений оптичний модуль інтерфейсу V.24 (RS

232). Вимоги експлуатації: температура оточуючого середовища, °C – від 0 до 50; відносна вологість, % – від 25 до 75 [17]. Обробка наданих результатів відбувається за допомогою широко доступних програм (наприклад, Microsoft® Excel) [35].

Таблиця 1.4

Технічні характеристики приладу EMR-30

Діапазон частот	від 100 кГц до 3 ГГц
Діапазон вимірювання середньоквадратичного значення напруженості змінного електричного поля	від 1 до 800 В·м ⁻¹
Діапазон вимірювання середнього значення щільності потоку енергії	від 0,27 до 170000 мкВт·см ⁻²
Приведена похибка вимірювання	±1дБ
Габаритні розміри (з датчиком)	96×64×465 мм
Вага (з елементами живлення)	450 г

Зазначений уривок тексту описує аналізатор, який має ряд важливих можливостей для радіомоніторингу. Деякі з цих можливостей включають автоматичне проведення вимірювань протягом до 24 годин, здатність запам'ятовувати 4095 результатів вимірювань (у випадку EFA-2, EFA-3), а також фільтрацію сигналів за допомогою смугових фільтрів для всіх промислових частот та їх гармонік. Аналізатор також включає частотомір [36].

1.4. Антени для мобільних систем радіомоніторингу

Антени для станцій радіомоніторингу повинні відповідати високим вимогам до експлуатаційних та технічних параметрів, а також мати надійну конструкцію. Антени класифікуються за функціональним призначенням на антени виявлення, вимірювальні антени, пеленгаторні антени та антенні комплекси. Наведений поділ є відносним, оскільки антени можуть виконувати різні функції в залежності від умов [37].

Текст надає інформацію про різницю у вимогах до антен моніторингу короткохвильового (КХ) та дуже високочастотного/надвисокочастотного (ДВЧ/НВЧ) діапазонів. Станції радіоконтролю КХ, зазвичай, розташовуються вдалині від населених пунктів через їхні великі габарити, тоді як для ДВЧ та НВЧ

станцій вимагається більш жорстка електромагнітна сумісність (ЕМС). Зазначається також, що станції радіоконтролю ДВЧ та НВЧ можуть встановлюватися на відстані 5-10 км від передавача з вихідною потужністю понад 1 кВт.

1. Антени КХ станції радіоконтролю:

- Рамковий радіопеленгатор для смуги частот до (2-3) МГц, обертається.
- Пеленгаторна антена з апертурою до 300 метрів.
- Ненаправлена антена для смуги частот від 2 МГц до 30 МГц.
- Гостроспрямована антенна система для отримання прямо поляризованих хвиль.
- Гостро направлена антенна система для одержання горизонтально поляризованих хвиль.

Кількість антен у комплекті ДВЧ або НВЧ станції може варіюватися від 2 до 10, призначені для різних діапазонів частот [38].

2. Вимоги до антен:

- Контрольні антени (антени виявлення) не потребують калібрування, і вони використовуються для виявлення радіовипромінювання.
- Вимірювальні антени піддаються калібруванню і використовуються для вимірювання параметрів радіовипромінювань.
- Пеленгаторні антени використовуються як контрольні та вимірювальні, і вони можуть працювати в широкому діапазоні частот, незважаючи на нерівномірність амплітудно-частотної характеристики.

3. Ознаки вимірювальних антен:

- Діапазон робочих частот.
- Діаграма спрямованості.
- Коефіцієнт стоячої хвилі (КСХ).
- Рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості.
- Ефективна поверхня або діюча висота та їх похибка.
- Коефіцієнт підсилення антени на різних частотах або в смузі частот.

Зазначається, що антени виявлення (контрольні антени) не підлягають калібруванню через неможливість його проведення та необхідність отримання

об'єктивних результатів в умовах впливу чужорідних радіовипромінювань [22][23].

В даному фрагменті тексту надається інформація про мобільні станції радіомоніторингу та критерії, які використовуються для антен цих станцій. Також надається приклади конструкцій антен для мобільних станцій.

1. Мобільні станції радіомоніторингу:

- Використовуються для реалізації радіомоніторингу, аналогічно стаціонарним станціям, але мають особливі критерії для антен.

- Антени повинні задовольняти технічні характеристики, при цьому мінімізується розмір, вага та збільшуються вимоги до вібростійкості.

2. Приклади антен для мобільних станцій:

- Антена R&S®HF907OM:
- Широкопasmована неспрямована високочутлива антена.
- Діапазон робочих частот: від 800 МГц до 26,5 ГГц.
- Використовується для отримання, виявлення та вимірювання GSM-сигналів і радіохвиль у НВЧ діапазоні.

- Коефіцієнт підсилення може змінюватися від 1 дБі до 5 дБі в діапазоні частот.

- Антена HL050:

- Логоперіодична антена з лінійною поляризацією.
- Діапазон частот: 850 МГц – 26,5 ГГц.
- Застосовується як окрема вимірювальна антена і опромінювач для дзеркальної антени AC008.

3. Зовнішній вигляд та характеристики антен:

- Представлення стислої широкопasmової антени R&S®HF907OM на рисунку 1.5.

- Представлення зовнішнього вигляду та характеристик логоперіодичної антени HL050 на рисунку 1.6.

- Антена HL050 використовується для вимірювання параметрів радіосигналів у НВЧ/ВВЧ діапазонах.



Рис. 1.5. Антена HF9070M



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд та ХС антени HL050

1. Широкосмугові антенні системи для НВЧ/ВВЧ діапазонів:

- Застосовуються для вимірювання параметрів радіосигналів у НВЧ/ВВЧ діапазонах.
- Мають конструкцію направлених рефлекторних антен з винесеним опромінювачем [39].
- Рефлектор реалізується у вигляді вирізки з параболоїда обертання, а опромінювачі можуть бути рупорними хвильоводами або логоперіодичними направленими антенами.

2. Антенна система AC008:

- Зображена на рисунку 1.7.
- Використовує рефлектор у вигляді параболоїда обертання та опромінювачі, такі як рупорні хвильоводи.
- Може використовуватися як зі стаціонарними, так і з портативними станціями радіомоніторингу.



Рис. 1.7. Антенна система AC008

3. Переваги:

- Можливість використання як зі стаціонарними, так і з портативними станціями.

- Великий вибір антен для ДВЧ/НВЧ діапазонів, представлений компанією "Rohde&Schwarz".

4. Портативні засоби для радіоконтролю:

- Включають в себе вимірювальний пристрій, калібровану вимірювальну антену та ВЧ кабель.

- Використовуються для вимірювання параметрів радіосигналів та радіоелектронних засобів.

- Вимірювальний пристрій може бути вимірювальним радіоприймачем, аналізатором спектра чи аналізатором сигналів.

5. Калібрування антенно-фідерного тракту в ДВЧ/НВЧ діапазонах:

- Є необхідним у зв'язку зі значним затуханням радіосигналів у цих діапазонах.

- Великий вибір вимірювальних антен для ДВЧ/НВЧ діапазонів представлений антенами компанії "Rohde&Schwarz".

- Антена R&S®HE200 - один із варіантів для вимірювань у ДВЧ/НВЧ діапазонах.

1. Антенна система з рукояткою та 4-ма змінними модулями:

- Формується із рукоятки та набору з 4-ох змінних модулів.

- Перекриває діапазон робочих частот від 10 кГц до 3 ГГц [25].

- Рукоятка містить підсилювач з перемикачем активного/пасивного

режимів, реле перемикання режимів і компас.

- Антени гарантують вимірювання параметрів радіохвиль в вертикальному та горизонтальному стані при обертанні антени на 90° .
- Рамкові антени для смуг частот 20 МГц - 200 МГц і 200 МГц - 500 МГц утворюють кардіоїдні ДС, антени для смуги частот 500 МГц - 3 ГГц утворюють чітко виражену ДС.
- КСХ антен не перевищує 2,5 (ном.).
- Можливість використання двох режимів – активного та пасивного, що надає антені широкий динамічний діапазон.
- Активний режим використовується для вивчення малопотужних сигналів, пасивний – для радіоконтролю недалеко потужних радіопередавачів.

2. Широкосмугова активна направлена антенна R&S-HE300:

- Застосовується для локалізації ДРВ в діапазоні частот від 9 кГц до 7,5 ГГц.
- Використовується разом з місткими приймачами, наприклад, PR100 чи EB200.
- Забезпечує роботу в діапазоні частот від 9 кГц до 7,5 ГГц за допомогою 4-х змінних широкосмугових антенних модулів.

3. Характеристики направленості:

- Напрямок характеризується за найбільшим рівнем сигналу при обертанні антени в азимутальній площині.
- Зміна кутового положення антени може застосовуватися для радіоконтролю як вертикально, так і горизонтально поляризованих радіохвиль.

Вимірювальні антени R&S HE300 (рис 1.8.):



10 кГц – 20 МГц



20 МГц – 200 МГц



200 МГц – 500 МГц



500 МГц – 7,5 ГГц

Рис.1.8. Вимірювальні антени R&SHE300

Місткі засоби радіомоніторингу:

1. Логоперіодичні антени HyperLOG компанії Aaronia:

- HyperLOG 6080:
- Діапазон: 680 МГц – 8 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення: 5 дБі.
- HyperLOG 60100:
- Діапазон: 680 МГц – 10 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення: 5 дБі.
- HyperLOG 60180:
- Діапазон: 680 МГц – 18 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення: 5 дБі.

2. Направлені антени HyperLOG X:

- HyperLOG 4025X:
- Діапазон: 400 МГц – 2,5 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення: 44 дБі.
- HyperLOG 4040X:
- Діапазон: 400 МГц – 4 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення: 44 дБі.

- HyperLOG 4060X (рис. 1.9.):
- Діапазон: 400 МГц – 6 ГГц.
- Коефіцієнт підсилення: 44 дБі.

3. Логоперіодична антена Hyperlog 7025:

- Зовнішній вигляд на рис. 1.10.
- Характеристики деталізовані в Таблиці 1.5.

Характеристики логоперіодичної антени Hyperlog 7025 (Таблиця 1.5):



Рис.1.9. HyperLOG 4025X



Рис.1.10. Hyperlog 7025

Таблиця 1.5

Діапазон частот	700 МГц – 2,5 ГГц
Максимальна потужність передачі	100 Вт
Імпеданс	50 Ом
WSVR	<1:2
Коефіцієнт підсилення	4 дБі
Антенний фактор	23 – 34 дБ/м
Розміри	340 x 200 x 25 мм

Звідси випливає, що портативні антени є найбільш ефективними в станціях радіомоніторингу. Вони дозволяють проводити вимірювання в широкому динамічному діапазоні, використовуючи режими активного та пасивного сканування, а також в горизонтальному і вертикальному положенні. Можливість розташовувати їх на різних відстанях і в складно доступних місцях сприяє отриманню точних результатів. Здатність формувати чітко виражену діаграму спрямованості, високе узгодження з фідерним трактом і великий коефіцієнт підсилення робить їх особливо ефективними. Портативні антени також здатні зменшити завади та максимізувати дальність зв'язку в конкретних напрямках. Використання здвоєних спрямованих антен в паралель може підвищити коефіцієнт підсилення для отримання більшого дальнього зв'язку. В цілому, портативні антени є важливим елементом в системах радіомоніторингу та радіоконтролю.

РОЗДІЛ 2

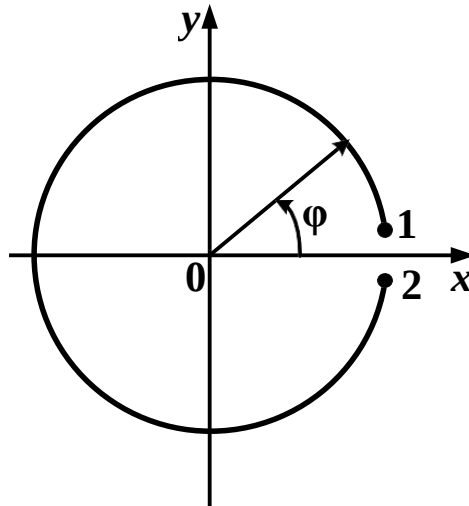
ВИМІРЮВАЧ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ КОЛОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

У діапазоні НВЧ антенні системи, що використовують симетричні вібратори або рупори, є поширеними, але вони мають значний недолік. Вимірювання параметрів поляризації у цих системах супроводжується великими похибками через конструктивні особливості випромінювачів.

У діапазонах НВЧ і ДВЧ для компактного випромінювача з коловою поляризацією ідеально підходить кільцева антена. Опускаючись до одного випромінювача, кільцева антена дозволяє вимірювати будь-яку електромагнітну хвилю в коловому ортогональному поляризаційному базисі. На відміну від симетричного вібратора, для кільцевої антени потрібен лише один випромінювач, що уникає потреби у співпадінні фазових центрів випромінювачів у складній антені. Крім того, кільцева антена має менші габарити порівняно з рупоровими і турнікетними антенами та володіє жорсткою конструкцією. Внаслідок обтікання хвилею струму T_1 [15], кільцева антена випромінює електромагнітні хвилі із круговою поляризацією в напрямку осі кільця.

2.1. Теоретичні засади побудови вимірювача напруженості поля

Кільцева антена (рис. 2.1) представляє собою металеве коло радіусом a з розривом між точками 1-2, які є її затискачами. У разі використання антени як передавальної, струм підводиться до точок 1-2, а в приймальній антені напруга знімається з цих точок і направляється в провідник кільцевої форми [4].



Розглядаємо роботу антени в режимі приймання радіохвиль. У полярній системі координат вектор напруженості електричного поля у коловому поляризаційному базисі записується наступним чином [24]:

$$e(t) = \begin{cases} \vec{\rho}_{\sigma} \cdot E_1 + \vec{\varphi}_{\sigma} \cdot (\omega t + \phi_1); \\ \vec{\rho}_{\sigma} \cdot E_2 + \vec{\varphi}_{\sigma} \cdot (-\omega t + \phi_2), \end{cases} \quad (2.1)$$

де $\vec{\rho}_{\sigma}$, $\vec{\varphi}_{\sigma}$ — орти полярної системи координат; ω — колова частота обертання вектора напруженості електричного поля; t — момент часу; E_1 , E_2 — амплітуди напруженості поля хвиль колової поляризації правого і лівого напрямку обертання;

ϕ_1 , ϕ_2 — початкові фази вектора $\vec{\varphi}_{\sigma}$ в момент часу $t = 0$, які характеризують початкові положення векторів E_1 і E_2 в полярній системі координат відносно полярної осі $0x$ [25].

У прямокутній системі координат той самий вектор $e \rightarrow$ записується як [24]:

$$\dot{e} = \vec{x}_0 \cdot \dot{E}_x + \vec{y}_0 \cdot \dot{E}_y, \quad (2.2,a)$$

або у часовій площині:

$$\vec{e}(t) = \vec{x}_0 \cdot E_x \cdot \cos(\omega t) + \vec{y}_0 \cdot E_y \cdot \cos(\omega t + \psi), \quad (2.2, б)$$

де $\vec{x}_{\sigma}$, $\vec{y}_{\sigma}$ — орти прямокутної системи координат, ψ — фазовий зсув складової E_y відносно E_x .

Застосовуючи ортогональний коловий поляризаційний базис, вираз (2.2,б) репрезентуємо таким чином [25]:

$$\left. \begin{aligned} \vec{e}_x &= \left\{ \begin{aligned} \overrightarrow{e_{\text{пр}}^x} &= \vec{x}_0 \cdot \frac{E_x}{2} \cdot \cos(\omega t) + \vec{y}_0 \cdot \frac{E_x}{2} \cdot \sin(\omega t); \\ \overrightarrow{e_{\text{лів}}^x} &= \vec{x}_0 \cdot \frac{E_x}{2} \cdot \cos(\omega t) - \vec{y}_0 \cdot \frac{E_x}{2} \cdot \sin(\omega t). \end{aligned} \right. \\ \vec{e}_y &= \vec{y}_0 \cdot E_y \cdot \cos(\omega t + \psi) = \left\{ \begin{aligned} \overrightarrow{e_{\text{пр}}^y} &= -\vec{x}_0 \cdot \frac{E_y}{2} \cdot \sin(\omega t + \psi) + \vec{y}_0 \cdot \frac{E_y}{2} \cos(\omega t + \psi); \\ \overrightarrow{e_{\text{лів}}^y} &= -\vec{x}_0 \cdot \frac{E_y}{2} \cdot \sin(\omega t + \psi) + \vec{y}_0 \cdot \frac{E_y}{2} \cdot \cos(\omega t + \psi). \end{aligned} \right. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Запровадимо такі позначення:

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{E_y}{E_x}; \\ b_1 &= \sqrt{1 - 2 \cdot m \cdot \sin(\psi + m^2)}; \\ b_2 &= \sqrt{1 + 2 \cdot m \cdot \sin(\psi + m^2)}; \\ \sin(\psi_1) &= \frac{m \cdot \cos(\psi)}{b_1}; \cos(\psi_1) = \frac{1 - m \cdot \sin(\psi)}{b_1}; \\ \sin(\psi_2) &= \frac{m \cdot \cos(\psi)}{b_2}; \cos(\psi_2) = \frac{1 + m \cdot \sin(\psi)}{b_2}; \end{aligned} \right\}$$

За допомогою позначень (2.4) з виразів (2.3) знаходимо вектори напруж (2.4) електричного поля правого і лівого обертання [25]:

$$\left. \begin{aligned} \vec{e}_{\text{пр}} &= \overrightarrow{e_{\text{пр}}^x} + \overrightarrow{e_{\text{пр}}^y} = E_1 \cdot [\vec{x}_0 \cdot \cos(\omega t + \phi_1) + \vec{y}_0 \cdot \sin(\omega t + \phi_1)]; \\ \vec{e}_{\text{лів}} &= \overrightarrow{e_{\text{лів}}^x} + \overrightarrow{e_{\text{лів}}^y} = E_2 \cdot [\vec{x}_0 \cdot \cos(-\omega t + \phi_2) + \vec{y}_0 \cdot \sin(-\omega t + \phi_2)], \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Де:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{E_x \cdot b_1}{2}; \\ E_2 &= \frac{E_x \cdot b_2}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Зрівнюючи вирази (2.1) і (2.5), можемо підвести підсумок, що це тотожні значення векторів $\vec{e}_{\text{пр}}^{\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow}$ і $\vec{e}_{\text{л}}^{\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow}$ і $\vec{e}_{\text{в}}^{\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow}$, але зафіксовані в різних системах координат [32].

Для переходу від напруженості електричного поля хвилі, що припадає на антену, до напруги на затискачах антени, потрібно знайти діючу довжину кільця. Приймаємо, що на кільцеву антену падає в напрямі осі хвиля з коловою поляризацією [24]. В такому разі напруга на затискачах кільця визначатиметься як скалярний добуток вектора напруженості поля кільця: $\vec{e}_{\text{пр}}^{\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow}$ і вектора діючої довжини

$$U_{\text{пр}} = (\vec{e}_{\text{пр}}, \vec{l}_{\text{д}}^{\text{к}}). \quad (2.7)$$

Математичний суть діючої довжини кільця у виразі (2.7) збігається з

формулюванням діючої довжини приймальної антени [24]. Але діючу довжину будь-якої антени уподібнюють з довжиною вібратора з рівномірним розподілом струму, який формує в напрямі максимального випромінювання ту ж напруженість електричного поля, що і практична антена за умови однакових струмів на затискачах [5]. Через те що кільце підпорядковується принципу взаємності, то таке формулювання є справедливим і для приймальної антени.

Тобто, діюча довжина є параметр, який у доцільності до основного формулювання може характеризувати антену лише для складових, одержаних при розкладанні хвилі довільної поляризації у лінійному ортогональному поляризаційному базисі [7].

Застосовуючи праву частину першого рівняння системи (2.5), вираз (2.7) напишемо у вигляді [16]:

$$U_{\text{пр}} = E_1 \cdot [\vec{x}_0 \cdot \cos(\omega t + \phi_1) + \vec{y}_0 \cdot \sin(\omega t + \phi_1)], \vec{l}_D^k. \quad (2.8)$$

З виразу (2.8) витікає, що при лінійній поляризації $\vec{l}_D^k = \vec{x}_0 \cdot l_D$ або $\vec{l}_D^k = \vec{y}_0 \cdot l_D$,

де l_D – діюча довжина кільця за умови, що хвиля, яка падає на антену, лінійно поляризована [13]. Якщо ж поляризація колова, то діюча довжина кільця визначається як:

$$\vec{l}_D^k = \vec{x}_0 \cdot l_D + \vec{y}_0 \cdot l_D = l_D \cdot (\vec{x}_0 + \vec{y}_0). \quad (2.9)$$

Приставаючи значення l_D^k з (2.9) у вираз (2.8), знайдемо напругу на затискачах антени польової поляризації при прийманні хвилі правої поляризації:

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{2} \cdot E_1 \cdot l_D \cdot \cos(\omega t + \phi_1 - \frac{\pi}{4}). \quad (2.10)$$

При прийманні антеною хвилі лівої поляризації:

$$U_{\text{лів}} = \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot l_D \cdot \cos(\omega t - \phi_1 + \frac{\pi}{4}). \quad (2.11)$$

З формул (2.8), (2.10) і (2.11) бачимо, що кільцева антена у порівнянні з симетричним вібратором, діюча довжина якого l_D , створює напругу на затискачах в $\sqrt{2}$ разів більшу [26].

З рівняння (2.1) бачимо що в деякі моменти часу вектори напруженості електричного поля правого і лівого обертання будуть збігатися. Зрозуміло, що в ці

моменти часу кутові координати векторів дорівнюватимуть одному і тому ж куті інакше кажучи [21]:

$$\left. \begin{aligned} \omega t_s + \phi_1 - 2 \cdot \pi \cdot s &= \gamma; \\ -\omega t_s + \phi_1 + 2 \cdot \pi \cdot s &= \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Де:

$t_s = t_1 + (s - 1)T$, $s = \overline{1, \infty}$, t_1 – перший момент часу, при якому реалізуються рівняння (2.12), T – період електромагнітних коливань (час, за який вектор $\vec{e} \rightarrow(t)$ обходить поляризаційний еліпс), γ – кут, який відраховується від осі Ox і при якому модуль вектора $\vec{e} \rightarrow(t)$ здобуває максимального значення. Тобто, в моменти часу ts вектори $\vec{e}_{\text{пр}}(t)$ і $\vec{e}_{\text{лів}}(t)$ розміщуються на великій пів-осі поляризаційного еліпса [8]. З виразів (2.12) випливає, що кут нахилу великої осі поляризаційного еліпса визначається як [8]:

$$\gamma = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}. \quad (2.13)$$

Зсув фаз ϕ напруг правого (2.10) і лівого (2.11) напрямку обертання дорівнюватиме:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \frac{\pi}{2}. \quad (2.14)$$

Зрівнюючи вирази (2.13) і (2.14), виявляємо, що:

$$\gamma = \frac{\phi + \frac{\pi}{2}}{2}. \quad (2.15)$$

Залишок параметрів поляризаційного еліпса знаходимо таким чином. Велика піввісь поляризаційного еліпса $a_v = E_1 + E_2$, а мала піввісь – $b_v = E_1 - E_2$. Тобто, знак і величина коефіцієнта еліптичності виявляється так [4]:

$$K_v = \frac{b_v}{a_v} = \frac{E_1 - E_2}{E_1 + E_2}. \quad (2.16)$$

Через те що амплітуди напруг (2.10) і (2.11) однозначно залежать від напруженостей полів E_1 і E_2 [36]:

$$\begin{aligned} U_{\text{пр}}^A &= \sqrt{2} \cdot E_1 \cdot l_d; \\ U_{\text{лів}}^A &= \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot l_d, \end{aligned} \quad (2.17)$$

то коефіцієнт еліптичності можемо порахувати і за амплітудами напруг на затискачах антени [29]:

$$K_{\text{в}} = \frac{U_{\text{пр}}^A - U_{\text{лів}}^A}{U_{\text{пр}}^A + U_{\text{лів}}^A}. \quad (2.18)$$

Вирази (2.15) і (2.18) обґрунтовують, що всі параметри поляризаційного еліпса однозначно можна порахувати за напругами на затискачах кільцевої антени [16].

2.2. Структурна схема кільцевої вимірювальної антенної системи.

Визначимо структурну схему кільцевої вимірювальної антенної системи. Проблема створення вимірювальної антени у формі кільця полягає у виокремленні напруг (струмів) правого та лівого обертання векторів напруженості електричного поля. На затискачах 1 і 2 кільця спрямовується напруга, яка представляє собою суму напруг хвиль правої і лівої колової поляризації [18].

Структурна схема (рис. 2.2) показує, як створюються напруги та як вони розділяються. Використовуючи електромагнітні хвилі обертової поляризації в провіднику кільцевої форми, можна відокремити напруги на затискачах антени. Хвиля струму правого обертання проходить по колу від затискача 1 до затискача 2, тоді як хвиля струму лівого обертання проходить в протилежному напрямі – від затискача 2 до затискача 1.

Для виокремлення струмів правого та лівого обертання використовуються циркулятори. Ця схема розділення сигналів на циркуляторах (рис. 2.2) відносно нескладна.

Рисунок 2.2 демонструє схему розділення сигналів кільцевої антени за допомогою циркуляторів. У цій схемі шестиполюсні У-циркулятори побудовані в мікросмужковому виконанні на феритах, і вони працюють таким чином, що хвиля електричного струму, яка прибуває в плече 1, проходить в плече 2, з плеча 2 - тільки в плече 3, а із плеча 3 - тільки в плече 1.

При правильному напрямі розповсюдження хвилі струму, шлях $I_{\text{пр}}$ тягнеться від затискача 1 кільця до затискача 2. Струм $I_{\text{пр}}$ потім проходить через плече 2 циркулятора Ц2 і приєднаний опір R_4 . Через те що всі опори з'єднані між собою одним кінцем, струм $I_{\text{пр}}$ через опір R_2 і циркулятор Ц1 прибуває до затискача 1.

Таким чином, контур струму $I_{\text{пр}}$ замкнений, не дозволяючи струму проходити іншими шляхами.

Аналогічно, струм лівого обертання $I_{\text{лів}}$ проходить через кільце від затискача 2 до затискача 1 за допомогою циркулятора Ц1, направляється у навантаження плеча 2 - опір R_1 , через шину нульового потенціалу, опір R_3 плеча 3 циркулятора Ц2 повертається до затискача 2.

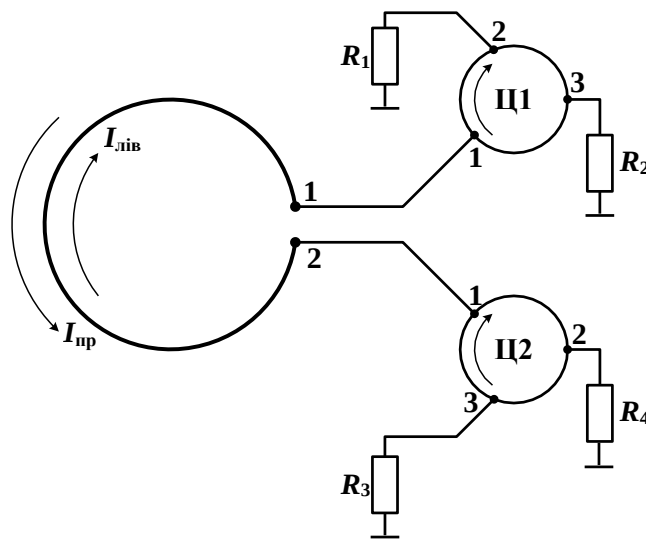


Рис. 2.2. Схема розділення сигналів кільцевої антени на циркуляторах

Отже, структурна схема кільцевої антенної системи виглядає так: схема (рис. 2.2.) дозволяє розподілити хвилі струму та напруги правого та лівого обертання. Навантаження на кільцеву антену повинне бути узгоджене з вхідним опором, тобто опором випромінювання $R\Sigma$. З'єднувальні лінії повинні мати хвильовий опір $W_{\text{лп}} = R\Sigma/2$. Циркулятори налаштовані так, щоб їх вхідні опори плечей також дорівнювали $R\Sigma/2$, а всі опори, що навантажують плечі циркуляторів, повинні бути рівні за величиною і дорівнювати $R\Sigma/2$. Зазначається, що при цих умовах всі елементи структурної схеми взаємно відповідні, і в теорії досягається повний розподіл хвиль правого і лівого обертання. [29].

Наступна обробка сигналів може задовольнити вимірювання всіх необхідних величин. Повна структурна схема такої антени наведена на рис. 2.3.

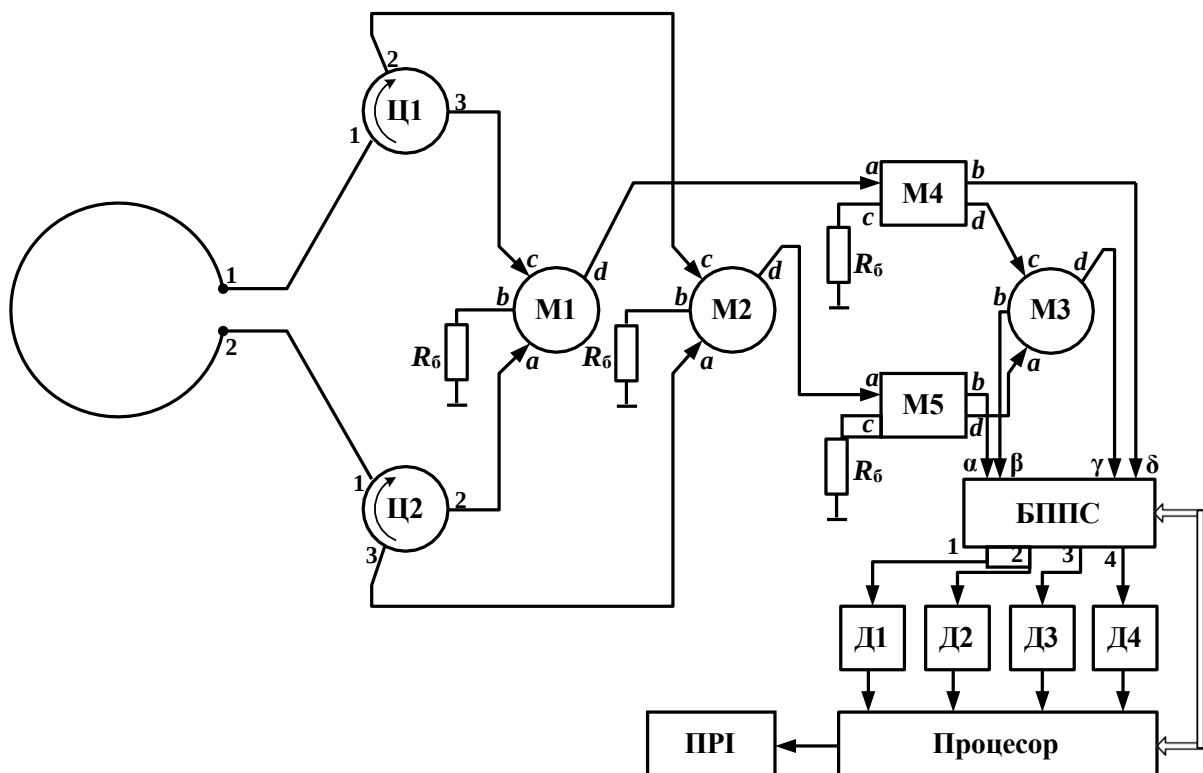


Рис. 2.3. Структурна схема вимірювача параметрів електромагнітного поля на кільцевій антені

Для подальшої обробки сигналів використовуються три кільцевих моста, два квадратних моста, чотири детекторні секції, чотири баластних опори, процесор і пристрій реєстрації та індикації результатів вимірювань (ПРІ). Функції опорів R_1 - R_4 попередньої схеми забезпечують входні опори мостів M_1 і M_2 . Напруги правого обертання на виході 3 циркулятора Π_1 і на виході 2 циркулятора Π_2 виявляються у протифазі. Отже, в плечах d кільцевого моста M_1 сформується ціле значення напруги, а в плечах b виникне різниця напруг. Така схема забезпечує ефективний розподіл хвиль правого і лівого обертання. [30].

Оскільки стосовно горизонтальної осі (осі $0x$) і антена і схема обробки сигналів симетричні, то значення амплітуд напруг на входах a і c мостів M_1 і M_2 однакові, а їх різниця (сума протифазних напруг) в плечах b кільцевих мостів дорівнюватиме нулю. Тобто, в принципі через балансні опори R_6 струм не проходитиме.

Для знаходження фазового зсуву Φ потужностей хвиль правого і лівого обертання застосовують мости M_4 і M_5 , які поділяються на дві рівні частини. Одна з цих частин, що виходить з плеч b , використовується для створення сигналів з напругами правого і лівого обертання. Інші частини потужностей хвиль подаються

на входи α і β кільцевого моста МЗ. Для точного вимірювання фази необхідно, щоб шляхи струмів від затискачів 1 і 2 кільцевої антени до плечей α і β кільцевого моста МЗ мали однакову довжину. На виході плеча β МЗ формується сума високочастотних напруг $\dot{U}_{права} + \dot{U}_{лів}$ з точністю до множника $1/\sqrt{2}$, а в плечі δ - різниця напруг з тим самим коефіцієнтом пропорційності.

Для обробки сигналів високої частоти вони піддаються частотному перетворенню та підсиленню в блоку перетворення і підсилення сигналів (БППС).

Структурна схема БППС містить чотири канали перетворення напруг і кола корекції їх коефіцієнтів передач (рис. 2.4.).

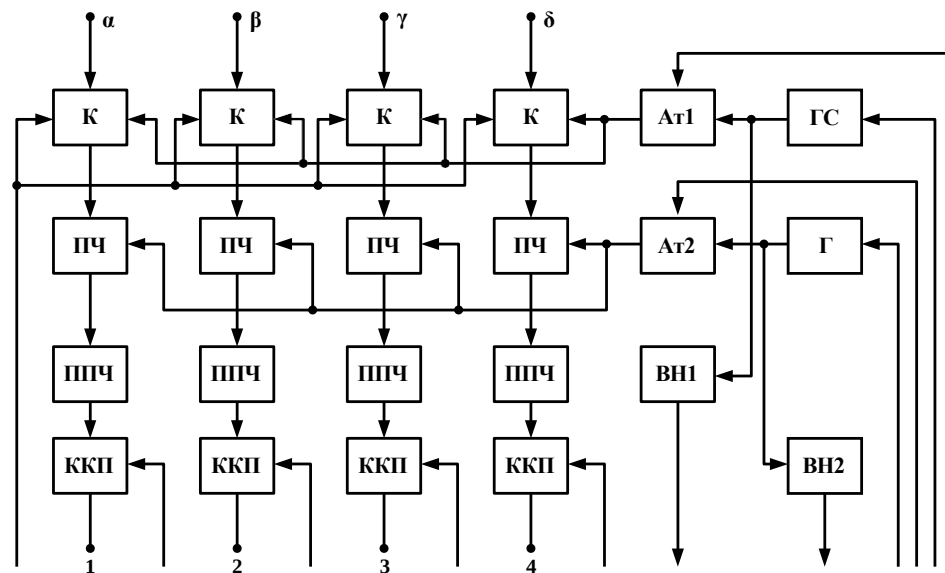


Рис. 2.4. Структурна схема блока перетворення і підсилення сигналів

На вході БППС отримують сигнали з мостів МЗ, М4 і М5. Комутатори К в режимі "Вимірювання" об'єднують входи БППС з входами перетворювачів частоти ПЧ, що працюють з одним гетеродином Г, що забезпечує збереження фазових співвідношень напруг. Атенюатор Ат2 підтримує стабільну напругу гетеродина, яка вимірюється вимірювачем напруги ВН2.

Перетворені за частотою напруги підсилюються підсилювачами проміжної частоти (ППЧ) і через коректори коефіцієнтів передач (ККП) каналів прибувають на виходи 1, 2, 3 і 4 БППС. За допомогою генератора контрольного сигналу (ГС), атенюатора Ат1 і вимірювача напруги ВН1 забезпечується однаковий рівень коефіцієнтів передач у кожному каналі. У режимі "Контроль" процесор відключає

входи БППС від перетворювачів частоти за допомогою комутаторів, вмикає ГС і налаштовує потрібний рівень напруги узгоджено з даними вимірювача ВН1. Вихідні напруги кожного каналу після детектування детекторами Д1-Д4 прирівнюються між собою, і заздалегідь заданий рівень коефіцієнта передачі кожного каналу досягається за допомогою коректорів ККП. [39].

Тобто, в режимі «Вимірювання» на входах детекторів Д1-Д4 появляються високочастотні напруги. Через те що мостами М4 і М5 потужності хвиль струму діляться надвоє, то значення випрямлених напруг після детекторів будуть розходитися з значеннями [11]. З виходу детектора Д1 на вході процесора буде діяти напруга:

$$U'_{\text{лів}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_{\text{лів}}^A = E_2 \cdot I_{\text{д}}.$$

На виході детектора Д2 появиться напруга:

$$U'_{\Sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |U_{\text{пр}} + U_{\text{лів}}| = \sqrt{(U'_{\text{пр}})^2 + (U'_{\text{лів}})^2 + 2 \cdot U'_{\text{пр}} \cdot U'_{\text{лів}} \cdot \cos(\phi)}.$$

На виході детектора Д3 - амплітуда різниці високочастотних напруг:

$$U'_{-} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |U_{\text{пр}} - U_{\text{лів}}| = \sqrt{(U'_{\text{пр}})^2 + (U'_{\text{лів}})^2 - 2 \cdot U'_{\text{пр}} \cdot U'_{\text{лів}} \cdot \cos(\phi)}.$$

На виході детектора Д4 – напруга, пропорційна напруженості поля правого обертання:

$$U'_{\text{пр}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_{\text{пр}}^A = E_1 \cdot I_{\text{д}}.$$

Фазовий зсув за результатами амплітудних вимірювань обчислюємо як:

$$\cos(\phi) = \frac{(U'_{\Sigma})^2 - (U'_{-})^2}{4 \cdot U'_{\text{пр}} \cdot U'_{\text{лів}}}.$$

Коефіцієнт еліптичності і його знак виявляються за формулою (2.18).

2.3. Структурна схема двокільцевої вимірювальної антенної системи

Вимірювання азимуту напрямку розповсюдження радіохвиль зобов'язує застосування або гостронаправленої антени, або декількох приймальних антен. Через те що кільцева антена є слабонаправленою, то потрібно виконувати

пеленгацію джерел випромінювання системою кільцевих антен [30]. На рис. 2.5. відображена функціональна схема антенної системи, за сприяння якої можемо з'ясувати як параметри електромагнітного поля, так і напрям приходу електромагнітних хвиль.

З двох кільцевих антен AK_1 і AK_2 через блоки формування напруг БФН₁ і БФН₂ струми приходять до трьох кільцевих мостів КМ₁, КМ₂ і КМ₃. Зрозуміло, що через вхідні плечі кожного моста 1 та 3 проходять струми від першого і другого кільця і будуть пропорційні відповідно модулям векторів напруженості електричного поля правого та лівого обертання, а також сумарному вектору напруженості [30]. Тобто, на виході 2 кільцевого моста КМ₁ з'явиться напруга:

$$\dot{U}'_{\text{пр}} = \dot{U}'_{\text{пр1}} + \dot{U}'_{\text{пр2}},$$

а на виході 4:

$$U''_{\text{пр}} = U_{\text{пр1}} + U_{\text{пр2}},$$

де $U_{\text{пр1}}$ – напруга на виході блока формування напруг антени AK_1 ; $U_{\text{пр2}}$ – напруга на виході БФН₂ антени AK_2 .

На виходах моста КМ₂ виникнуть напруги:

$$\begin{aligned}\dot{U}'_{\text{пр}} &= \dot{U}_{\text{лів1}} + \dot{U}_{\text{лів2}}; \\ \dot{U}''_{\text{лів}} &= \dot{U}_{\text{лів1}} - \dot{U}_{\text{лів2}}.\end{aligned}$$

На виходах 2 і 4 моста КМ₃ створяться такі напруги:

$$\begin{aligned}\dot{U}'_{\Sigma} &= \dot{U}_{\Sigma1} + \dot{U}_{\Sigma2}; \\ \dot{U}''_{\Sigma} &= \dot{U}_{\Sigma1} - \dot{U}_{\Sigma2}.\end{aligned}$$

Сумарні і різницеві напруги приходять на входи комутатора К, за допомогою ^{пр} якого утрамбовується лінія передачі, що складається з конвертера Кн., перетворювача частоти ПЧ, підсилювача проміжної частоти ППЧ і блока виокремлення каналів БВК. Дякуючи такому способу обробки сигналів можна з більшою точністю зберегти всі амплітудні співвідношення між прийнятими антенами сигналами [31]. Після відокремлення сигналів перетворені за частотою і ідентично підсилені напруги приходять до блоку детекторів (БД), на виході якого одержимо постійні напруги пропорційні амплітудам високочастотних напруг $\dot{U}'_{\text{пр}}$, $\dot{U}''_{\text{пр}}$, $\dot{U}'_{\text{лів}}$, $\dot{U}''_{\text{лів}}$, $\dot{U}'_{\Sigma}$ та $\dot{U}''_{\Sigma}$.

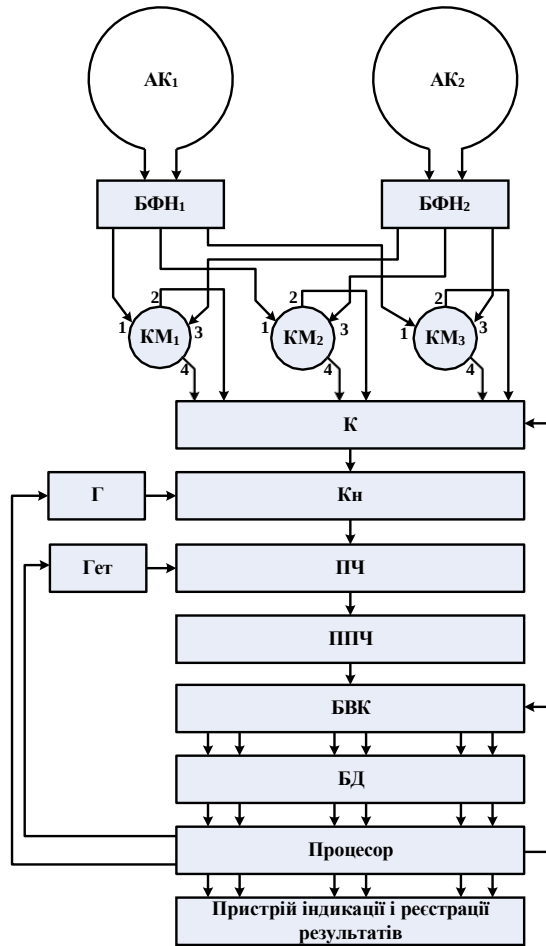


Рис. 2.5. Функціональна схема антенної системи

В процесорі обраховується значення напруженості електричного поля (модулів векторів) $E_{\text{пр}}$, $E_{\text{лів}}$, E_{Σ} ; параметрів поляризації ($\pm K_e$, γ) і напрям приходу хвилі (азимутальний кут φ). Наслідок обчислень виводяться на екран пристрою індикації, а за потрібністю, можуть бути зареєстрованими.

Програми обробки сигналів ґрунтуються на таких твердженнях. Нехай відстань між випромінювачами AK_1 і AK_2 дорівнює d . Якщо хвиля падає на антенну систему під кутом φ до перпендикуляра, проведеного в горизонтальній площині відносно прямої, що з'єднує центри кілець AK_1 і AK_2 [37], то на затискачах створюються напруги:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\text{пр}1} &= \dot{U}_{\text{пр.m1}} \cdot e^{ik_2^d \sin(\varphi)}; \\ \dot{U}_{\text{пр}2} &= \dot{U}_{\text{пр.m2}} \cdot e^{-ik_2^d \sin(\varphi)}; \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

де прийнято, що джерело електромагнітних хвиль знаходиться зліва відносно антени (рис.2.5.), $U_{\text{пр.m1}}$, $U_{\text{пр.m2}}$ – комплексні амплітуди напруг на затискачах. Приймаємо,

що фронт хвилі в місці розташування антенної системи локально плоский. Тоді:

$$\dot{U}_{np.m1} = \dot{U}_{np.m2} = \dot{U}_{np.m}. \quad (2.20)$$

Враховуючі рівняння (2.20) і значення напруг (2.19), розраховуємо суму напруг:

$$\dot{U}'_{np} = 2 \cdot \dot{U}'_{np.m} \cdot \cos(k \frac{d}{2} \sin \varphi), \quad (2.21)$$

та їх різницю:

$$\dot{U}''_{np} = i \cdot 2 \cdot \dot{U}_{np.m} \cdot \sin(k \frac{d}{2} \sin \varphi). \quad (2.22)$$

На виході блоку детекторів одержуємо модулі виразів (2.21) і (2.22):

$$\begin{aligned} U'_{np} &= 2 \cdot U_{np.m} \cdot \cos\left(k \frac{d}{2} \sin \varphi\right); \\ U''_{np} &= 2 \cdot U_{np.m} \cdot \sin\left(k \frac{d}{2} \sin \varphi\right). \end{aligned} \quad (2.23)$$

Процесор обраховує за величинами (2.23) напруженість електричного поля з коловою поляризацією правого напрямку обертання:

$$E_{np} = K_{o.c} \cdot U_{np.m} = K_{o.c} \cdot \frac{\sqrt{(U'_{np})^2 + (U''_{np})^2}}{2}, \quad (2.24)$$

де $K_{o.c}$ – коефіцієнт пропорційності між вихідними напругами і напруженістю поля; та азимут напрямку приходу хвилі:

$$\varphi = \arctg \frac{U''_{np}}{U'_{np}}. \quad (2.25)$$

Так само обчислюється напруженість електричного поля лівого напрямку обертання:

$$E_{лів} = K_{o.c} \cdot U_{лів.m} = K_{o.c} \cdot \frac{\sqrt{(U'_{лів})^2 + (U''_{лів})^2}}{2}, \quad (2.26)$$

і таке ж саме значення азимута:

$$\varphi = \arctg \frac{U''_{лів}}{U'_{лів}}. \quad (2.27)$$

Тим же чином знаходиться сумарна напруженість поля:

$$E_{\Sigma} = K_{o.c} \cdot U_{\Sigma} = K_{o.c} \cdot \frac{\sqrt{(U'_{\Sigma})^2 + (U''_{\Sigma})^2}}{2}, \quad (2.28)$$

і напрям приходу хвилі:

$$\varphi = \arctg \frac{U''_{\Sigma}}{U'_{\Sigma}}. \quad (2.29)$$

Значення азимута (2.25), (2.27) і (2.29) знаходяться з певними похибками, тому

похибка вимірювання азимута знижується, якщо застосувати середнє арифметичне кута φ [31].

Коефіцієнт еліптичності і його знак обчислюється за формулою:

$$K_e = \frac{E_{\text{пр}} - E_{\text{лів}}}{E_{\text{пр}} + E_{\text{лів}}}. \quad (2.30)$$

Щоб знайти кут нахилу поляризаційного еліпса, потрібно розкрити залежність сумарної напруги U_{Σ} від напруг складових лівого і правого обертання.

Зрозуміло, що сумарна напруженість електричного поля являє собою суму векторів напруженостей складових електричного поля правого і лівого напрямку обертання [32], тобто:

$$\vec{E}_{\Sigma} = \vec{E}_{\text{пр}} + \vec{E}_{\text{лів}}. \quad (2.31)$$

Переключаючись від комплексних значень векторів до напруг на затискачах антени в часовій площині, можемо записати:

$$U_{\Sigma}(t) = \sqrt{2} * l_d \left[E_{\text{пр.м}} * \cos\left(\omega t + \Phi_1 - \frac{\pi}{4}\right) + E_{\text{лів.м}} * \cos\left(\omega t + \Phi_2 + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (2.32)$$

де Φ_1 і Φ_2 – початкові фазові зсуви (для моменту часу $t=0$); $\sqrt{2} * l_d$ – діюча довжина кільцевої антени (l_d – діюча довжина антени, що знаходиться в режимі приймання хвилі з лінійною поляризацією) [32].

Зважаючи на те, що $U_{\text{пр.м}} = \sqrt{2} * l_d * E_{\text{пр.м}}$ і $U_{\text{лів.м}} = \sqrt{2} * l_d * E_{\text{лів.м}}$, визначимо амплітуду сумарної напруги:

$$U_{\Sigma\text{м}} = \sqrt{U_{\text{пр.м}}^2 + U_{\text{лів.м}}^2 + 2 * U_{\text{пр.м}} * U_{\text{лів.м}} * \cos(\Phi)}, \quad (2.33)$$

де $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - 2\frac{\pi}{4}$.

Отже, за відомими значеннями напруг (2.24), (2.26) і (2.28) обрахуємо фазовий зсув між напрямками правого і лівого обертання [32]:

$$\cos(\Phi) = \frac{U_{\Sigma\text{м}}^2 - U_{\text{пр.м}}^2 - U_{\text{лів.м}}^2}{2 * U_{\text{пр.м}} * U_{\text{лів.м}}}. \quad (2.34)$$

Кут нахилу поляризаційного еліпса γ визначається за формулою:

$$\gamma = \frac{\Phi + \frac{\pi}{2}}{2}.$$

Відраховується кут γ від прямої, що проходить по діаметру кільця (АК1 або

АК2) через середину проміжку між затискачами антени [21].

Висновки дослідження поляризаційних характеристик кільцевої антени свідчать, що цей тип антени можна використовувати для розкладання електромагнітних хвиль будь-якої поляризації на компоненти у круговому ортогональному поляризаційному базисі. Використання двокільцевої антени дозволяє визначити напрям приходу хвилі і її поляризаційні властивості. Розроблена схема розділення струмів антени для обертання вектора напруженості електричного поля праворуч та ліворуч є досить простою, використовуючи пасивні лінійні елементи високих частот, що забезпечує стабільність параметрів і надійність функціонування. Параметри поляризації електромагнітних хвиль автоматично розраховуються, і для забезпечення точності вимірювань необхідно лише вирівнювати напрям приходу хвилі з віссю антени. Для точного визначення параметрів поляризації важливо передбачити роботу антени у двох режимах: пеленгації та вимірювання. Режим пеленгації вимагає прив'язки антени до обраної системи координат місцевості. Режим вимірювання використовується після режиму пеленгації, і для його реалізації важливо передбачити можливість механічного повороту площин кільцевих антен для вирівнювання їхніх осей з напрямком приходу хвилі на кут φ від перпендикуляра до лінії розташування центрів. Також слід відзначити простір для функціональних зв'язків між результатами вимірювань та параметрами поляризації електромагнітного поля.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ВИМІРЮВАЛЬНОЇ АНТЕНИ ВИМІРЮВАЧА

НАПРУЖЕНОСТІ ПОЛЯ

3.1. Огляд програмних продуктів для моделювання антенних систем.

На сьогодні існує ряд програм для моделювання випромінюючих систем, і серед них слід висвітлити три, які завоювали найбільший розповсюдження.

MmanaGal: Ця програма використовує метод моментів для моделювання випромінюючих лінійних елементів [35-37] (рис. 3.1). Серед її функцій виділяються розрахунок різних типів антен, представлених як набір дрітків, можливість розрахунку антени при будь-якій частоті, а також створення та редагування опису антени як у цифровому, так і у графічному форматі та інші.

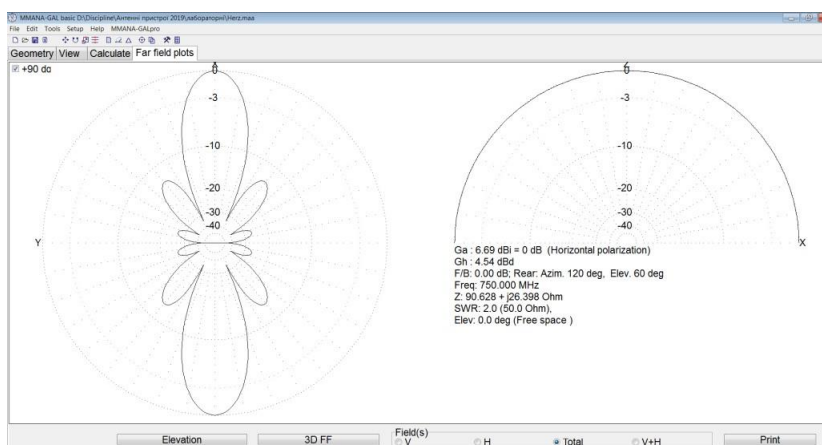


Рис. 3.1. Інтерфейс програми MmanaGal

Незважаючи на переваги MmanaGal, її слабкістю є складність побудови антен з апертурою.

Ansoft HFSS: Це програмне забезпечення, яке розраховує багатомодові S-параметри та електромагнітні поля у тривимірних пасивних структурах довільної форми [38]. Розрахунок ґрунтується на методі кінцевих елементів з адаптивним формуванням та розподілом ґраток. Цей метод включає чисельні процедури для розв'язання завдань, виражених у вигляді диференціальних рівнянь або варіаційних

принципів.

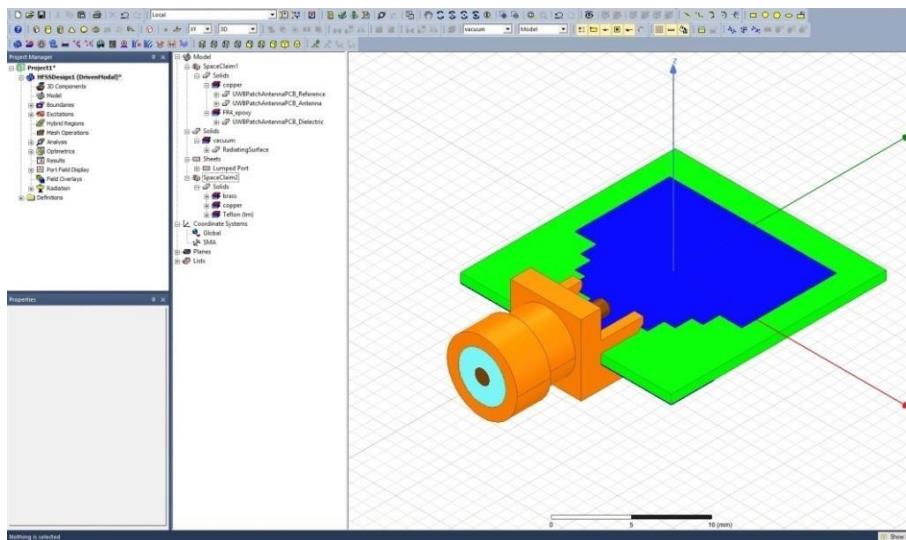


Рис. 3.2. Інтерфейс програми HFSS

HFSS надає широкі можливості для моделювання різних типів антен, подільників потужності, схем комутації, хвильоводних елементів, фільтрів НВЧ і тривимірних неоднорідностей. Опис структур зводиться до створення точного креслення і властивостей структури.

FEKO (рис. 3.3.) є програмою, спрямованою на вирішення широкого спектру завдань, пов'язаних з проектуванням НВЧ пристроїв і антен, розсіюванням електромагнітних хвиль та поширенням радіохвиль в різних середовищах і умовах. Особливістю FEKO є використання методу моментів в поєднанні з аналітичними методами, такими як метод фізичної оптики і теорія дифракції. Це дозволяє ефективно моделювати об'єкти з розмірами, що значно перевищують довжину хвилі, вирішуючи завдання, такі як розсіювання радіохвиль на літаках чи кораблях та поширення радіохвиль в міських умовах.

Базовим методом FEKO є метод моментів, який вирішує інтегральні рівняння. Відмінною рисою цього методу є те, що, на відміну від методу скінченних елементів, він не обмежує розмір простору обчислень.

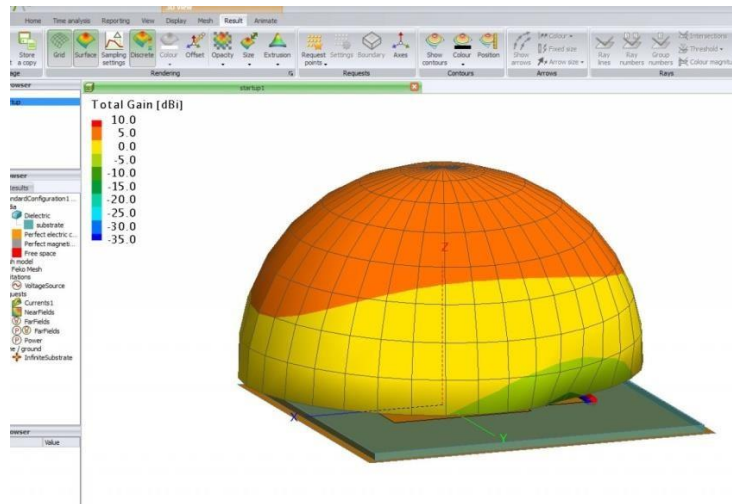


Рис. 3.3. Інтерфейс програми FEKO

3.2. Моделювання вимірювальної антенної решітки

Вимірювальні антенні системи працюють виключно в режимі прийому. При падінні електромагнітної хвилі на кільцевий елемент антенної решітки вздовж неї утворюється біжуча хвиля струму. Для вивчення характеристик кільцевого елементу необхідно змоделювати кільцеву антену з біжучою хвилею. Мікросмушковий кільцевий елемент двоелементної антенної решітки на рис. 3.4 працює в режимі передачі і живиться несиметричною смужковою лінією для утворення режиму біжучих хвиль вздовж кільця.

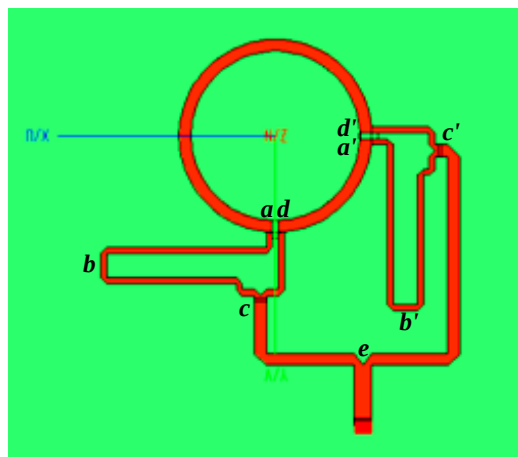


Рис. 3.4. Схема друкованої кільцевої антени з біжучою хвилею струму

Для розрахунку розмірів конструкції двокільцевої антенної решітки

використаємо наступні співвідношення:

1. Середній радіус кільця [5]:

$$r = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1,7726 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}},$$

$$\text{де } F = \frac{8,791 \cdot 10^9}{f \sqrt{\epsilon_r}}, \quad \epsilon_r$$

ϵ_r – відносна діелектричною проникністю підкладки; h – товщина діелектричної підкладки; f – центральна частота роботи.

2. Принцип побудови мікросмужкових ліній живлення (рис. 3.5) можуть бути описані наступними співвідношеннями:

$$abc = a'b'c' = cd + \Lambda/2 = c'd' + \Lambda/2;$$

$$ce = c'e + \Lambda/4,$$

де $\Lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$ – довжина хвилі в діелектрику.

3. Ширина смужкових ліній живлення розраховується за наступними відомими формулами [4]. Перш за все, обчислюються три допоміжні величини.

Наступним кроком є обчислення ширини смужки w :

$$\frac{w}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & \text{якщо } \frac{w}{h} < 2; \\ 2\pi \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} C \right], & \text{якщо } \frac{w}{h} > 2, \end{cases}$$

де $Z_{\text{вх.}}$ – вхідний опір мікросмужкової лінії живлення.

Модель друкованої антени була досліджена для частот 2,2-2,6 ГГц. Підкладка вибрана з товщиною 0,25 см і з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 4,4$, тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta = 0,017$. Середній радіус кільця дорівнює 1,7 см. На рис. 3.5-3.8 представлені основні характеристики роботи кільцевого елемента антенної решітки.

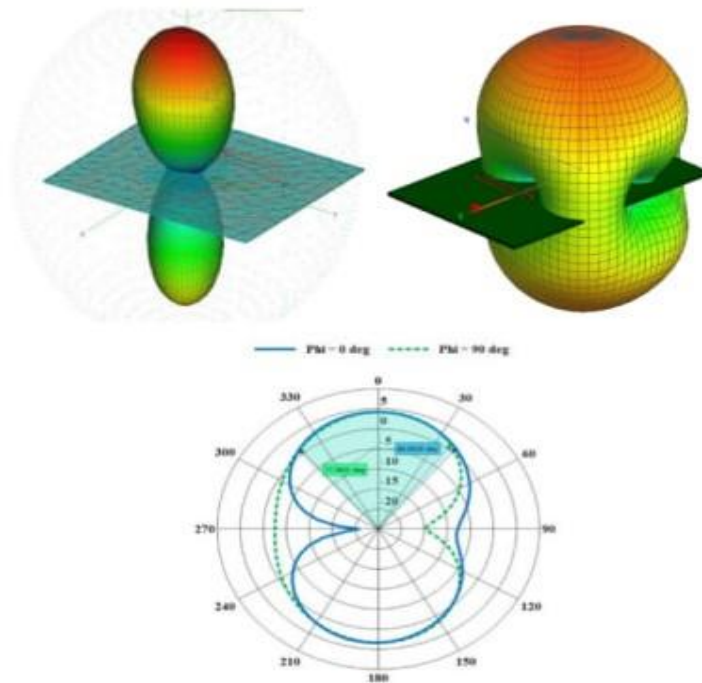


Рис. 3.5. Діаграма спрямованості (ДС) кільцевого елементу антенної решітки

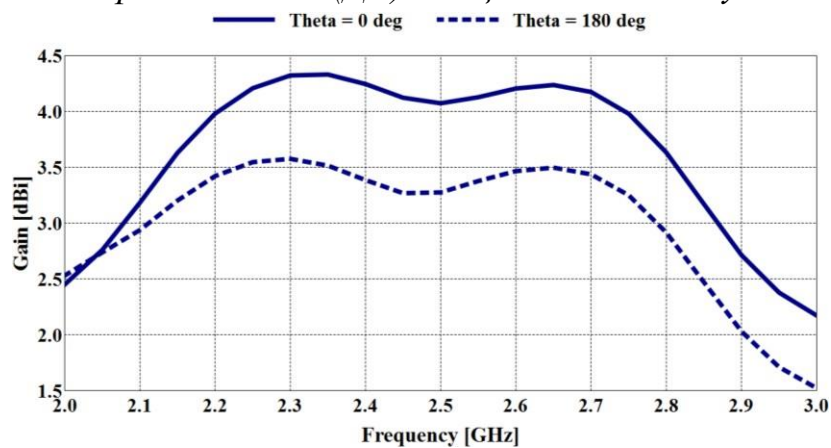


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнту підсилення мікросмужкової кільцевої антени від частоти роботи

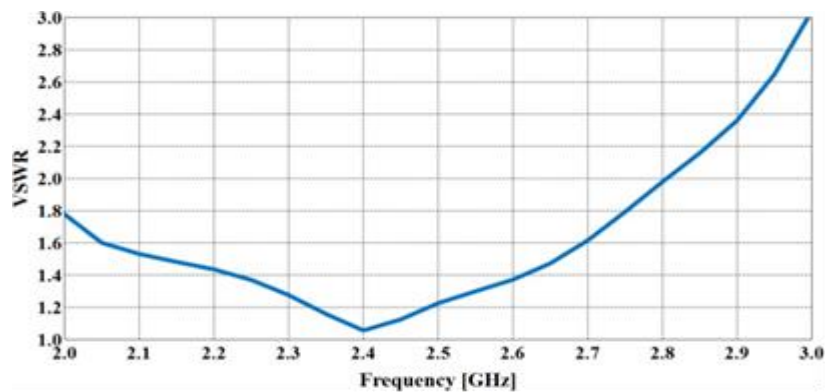


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнту стоячої хвилі за напругою мікросмужкової кільцевої антени від частоти роботи

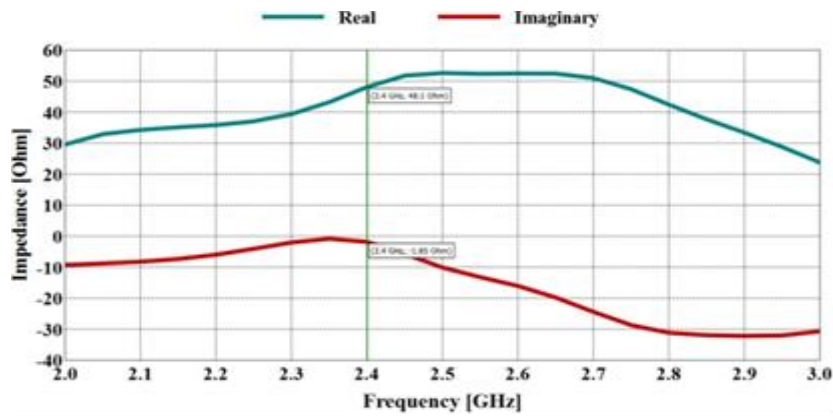


Рис. 3.8. Залежність вхідного опору мікросмужкової кільцевої антени від частоти роботи

Наступним кроком даного дослідження буде поєднання двох кільцевих мікросмужкових елементів в антенну решітку (АР). Відстань між центрами кільцевих елементів дорівнює середній робочій довжині хвилі з врахуванням впливу діелектрика підкладки.

На рис. 3.9-3.11 представлені основні характеристики роботи двокільцевої антенної решітки.

Для розрахунку коефіцієнту корисної дії (ККД) одиничного кільцевого елемента і двоелементної кільцевої антенної решітки необхідно порівняти графіки для коефіцієнта підсилення (КП) і коефіцієнта спрямованої дії (КСД), які показані на рис. 3.12.

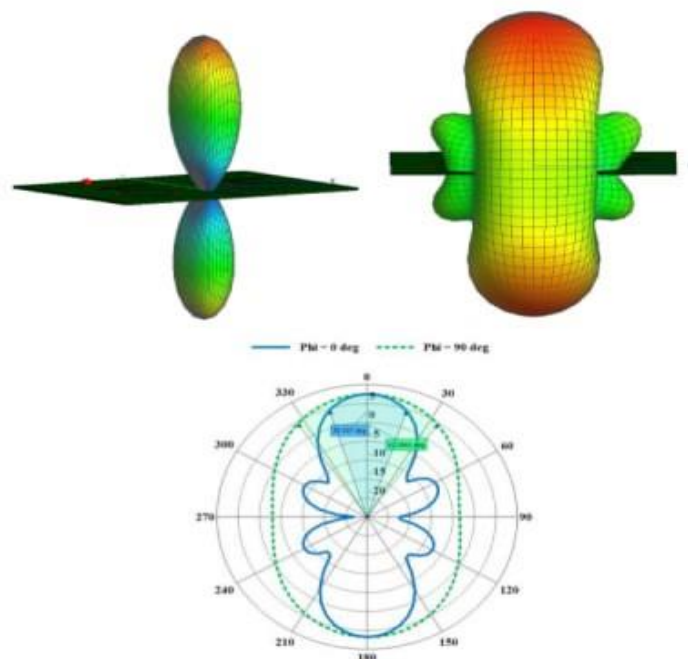


Рис. 3.9. Діаграма спрямованості двокільцевої антенної решітки

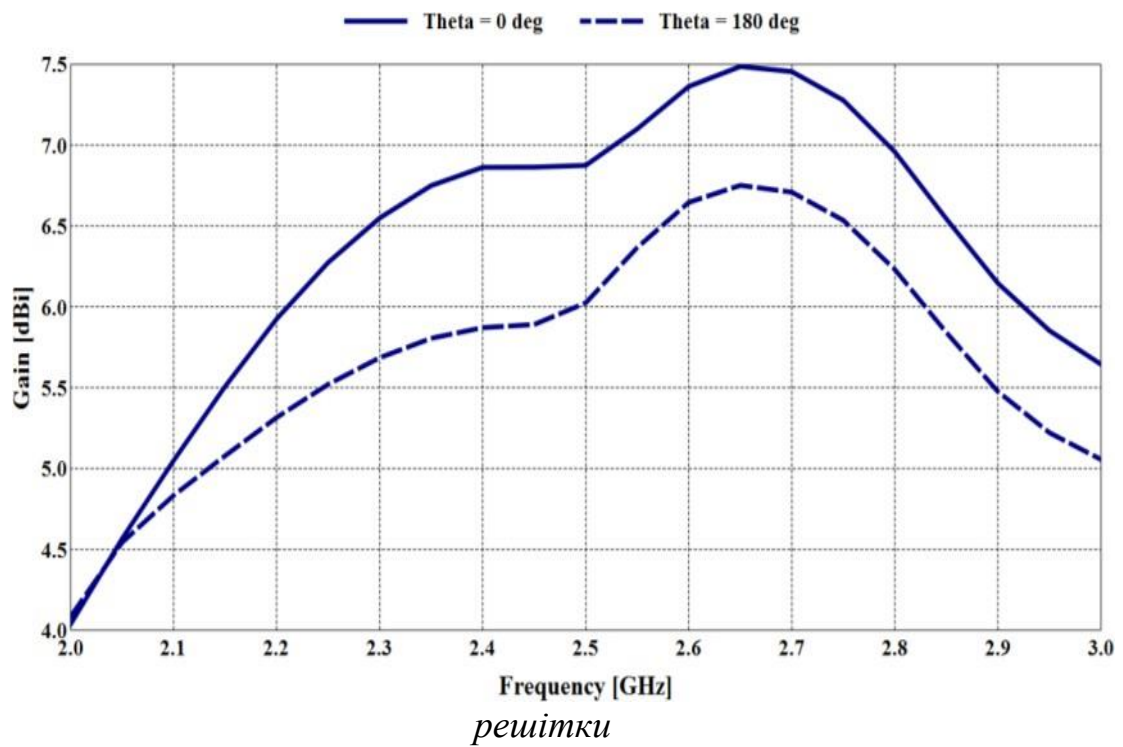


Рис. 3.10. Залежність коефіцієнту підсилення мікросмушкової двокільцевої антенної решітки від частоти роботи

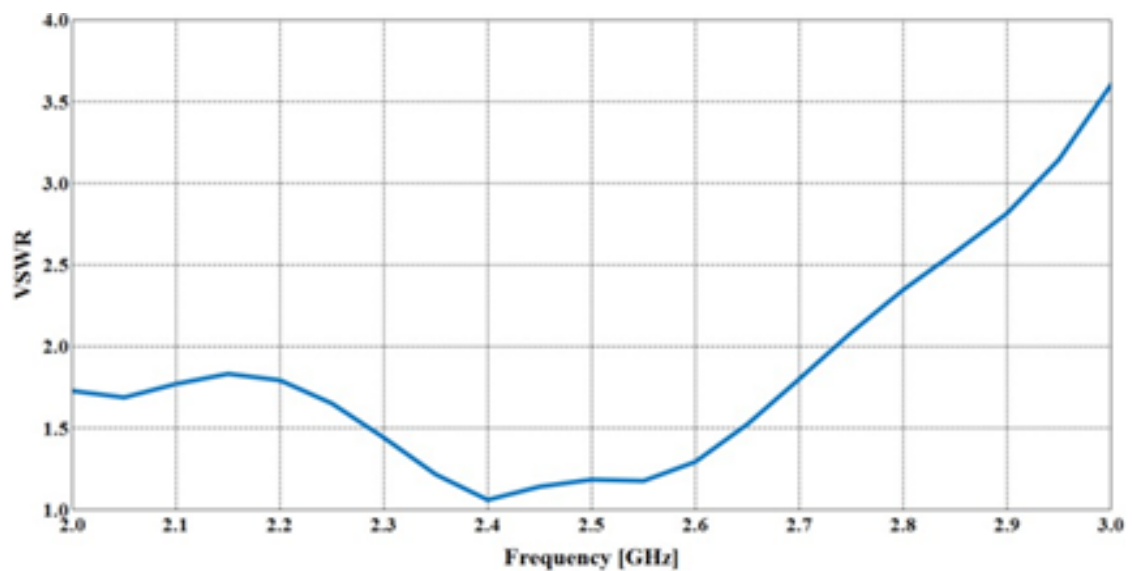
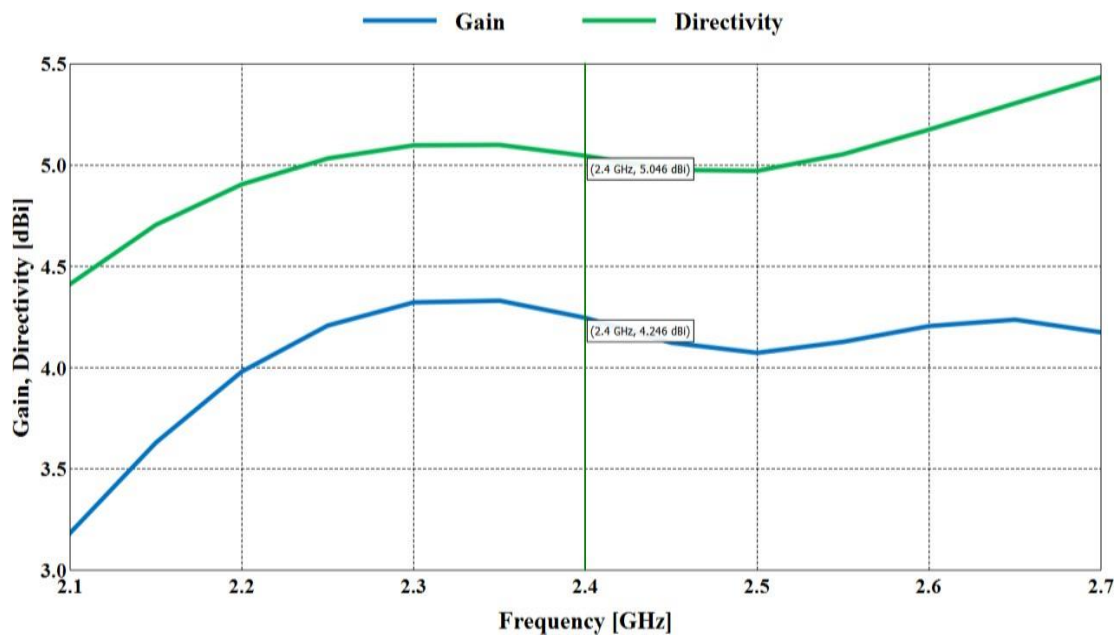
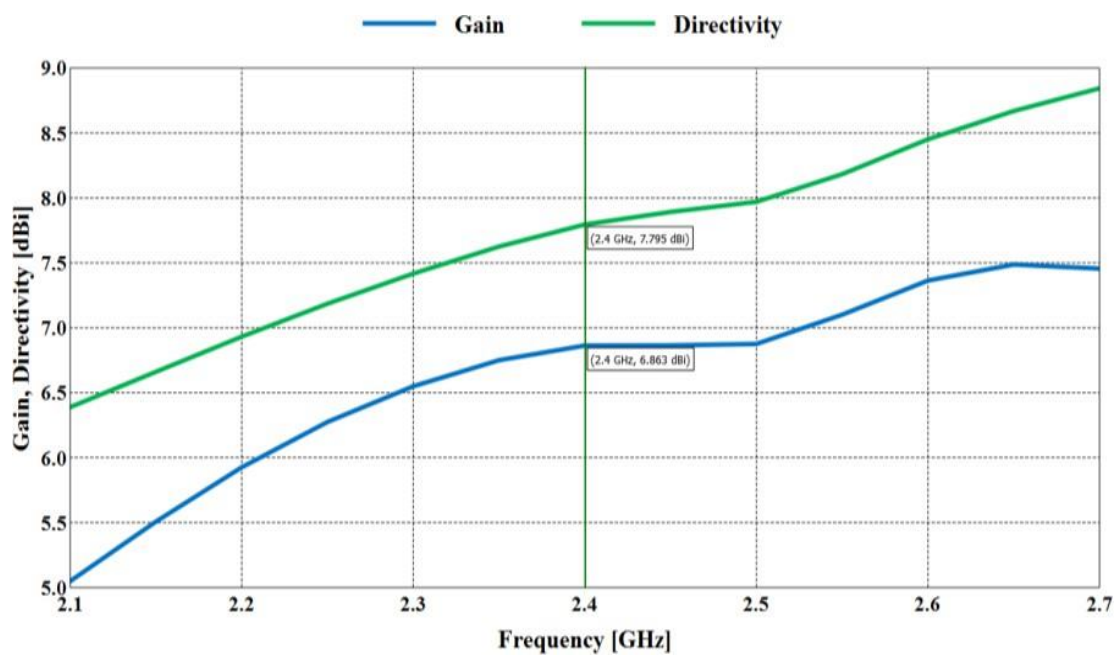


Рис. 3.11. Залежність коефіцієнту стоячої хвилі за напругою мікросмушкової двокільцевої антенної решітки від частоти роботи



a



б

Рис. 3.12. Залежність КП та КСД від частоти роботи: *a* – для одного кільцевого елемента антенної решітки; *б* – для двоелементної кільцевої антенної решітки

Коефіцієнт корисної дії обчислюється за формулою:

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)}$$

Отримуємо ККД на центральній частоті роботи:

для одного кільця:

$$\eta_{\text{к}} = \frac{4,246}{5,046} = 0,84;$$

для антенної решітки

$$\eta_{\text{АР}} = \frac{6,863}{7,795} = 0,88.$$

Висновки

У цьому розділі були розраховані параметри узгодження і характеристики випромінювання двоелементної антенної решітки з кільцевих мікросмужкових елементів, яка може служити в якості вимірювальної антени для системи радіомоніторингу. Моделювання показало ефективне узгодження як одного кільцевого елемента, так і двоелементної конструкції зі стандартною лінією живлення в 50 Ом. Коефіцієнт стоячої хвилі в робочому діапазоні частот не перевищує значення 1,1.

Порівнявши діаграми спрямованості одного кільця та кільцевої антенної решітки, зауважили звуження діаграми спрямованості антенної решітки в площині розміщення двох елементів. Ширина діаграми спрямованості за половинною потужністю випромінювання становила 81 градус і 36 градусів відповідно для одного елемента і системи з двох кільцевих елементів.

Коефіцієнт підсилення при використанні двоелементної кільцевої антенної решітки практично збільшується до 7 дБі від 5 дБі одного кільцевого елемента, що суттєво може розширити радіус дії антени. Збільшення кількості кільцевих елементів у антенній решітці, наприклад, до чотирьох елементів (2 x 2), може призвести до звуження діаграми спрямованості у двох площинах і, відповідно, підвищення коефіцієнта підсилення щонайменше на 2 дБі.

Коефіцієнти корисної дії кільцевого елемента і антенної решітки, виготовленої за допомогою друкованих технологій, є високими і становлять відповідно 84% і 88%.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження було проведено аналіз та розробка антен для різноманітних застосувань, зокрема в радіомоніторингу. Розглянуто різні типи антен, включаючи портативні антени для мобільних систем та кільцеві мікросмужкові елементи для антенних решіток.

1. Портативні антени: Проведено аналіз портативних антен, що використовуються для радіомоніторингу. Визначено їхню ефективність у вимірюванні сигналів в різних режимах та положеннях. Портативні антени надають можливість широкого вимірювального діапазону та забезпечують високу точність результатів вимірювань.

2. Кільцеві мікросмужкові елементи: Розроблено антенну решітку на основі кільцевих мікросмужкових елементів. Моделювання показало ефективність узгодження та підвищення коефіцієнта підсилення в порівнянні з одиночними елементами.

3. Діаграма спрямованості: Досліджено діаграму спрямованості для двоелементної антенної решітки. Зафіксовано звуження діаграми та підвищення коефіцієнта підсилення, що розширює можливості вимірювань та моніторингу сигналів.

4. ККД та узгодження: Коефіцієнти корисної дії та узгодження для розглянутих антен підтверджують їхню високу продуктивність та ефективність у вимірюваннях.

Висновок полягає в тому, що розглянуті антени можуть бути успішно використані в системах радіомоніторингу для отримання точних та достовірних вимірювань радіосигналів. Такі антени мають переваги у портативності, ефективності та можливостях розширення їхніх характеристик для задоволення конкретних вимог вимірювань.

1. Ефективність портативних антен радіомоніторингу: Робота підкреслює, що портативні антени є найбільш ефективними для станцій радіомоніторингу. Вони надають широкий динамічний діапазон завдяки можливості вимірювання сигналів у

двох режимах: активному та пасивному, а також в горизонтальному та вертикальному положенні.

2. Переваги портативних антен над іншими видами: Портативні антени виявляються зручними для розстановки на різних відстанях, в складно доступних місцях та їх можна використовувати як антени різних станцій. Вони формують чітко виражену діаграму спрямованості, мають високе узгодження з фідерним трактом та значний коефіцієнт підсилення.

3. Характеристики стаціонарних антен: Зазначається, що стаціонарні антени, як правило, мають великі розміри та масу, що може обмежувати їх застосування. Такі антени характеризуються великим коефіцієнтом підсилення, але частіше використовуються для моніторингу.

4. Використання спрямованих антен: Для портативних станцій застосовуються спрямовані антени, які вказують на напрямок прийому сигналу та зменшують завади від інших систем зв'язку. Ці антени застосовуються, де дальність та достовірність передачі інформації є пріоритетними.

5. Моделювання широкосмугових портативних антен: Автор вбачає важливість моделювання та конструювання широкосмугових портативних антен, що може підняти коефіцієнт підсилення.

6. Поляризаційні властивості кільцевої антени: Кільцеві антени виявляються ефективними для розкладання електромагнітних хвиль з будь-якою поляризацією. Використання двокільцевих антен може виявитися корисним для визначення напрямку приходу хвилі та її поляризаційних властивостей.

7. Схема відокремлення напрямів обертання вектора напруженості: Робота вказує на можливість використання пасивних лінійних елементів надвисоких частот для створення схем відокремлення напрямів обертання вектора напруженості з високою стабільністю та надійністю функціонування.

8. Синтез поляризаційних параметрів: Для точного визначення параметрів поляризації потрібно передбачити роботу антени у двох режимах: пеленгації та вимірювання, а також передбачити можливість механічного повороту площин кільцевих антен.

Робота висвітлює важливі аспекти та переваги різних видів антен для радіомоніторингу, що може бути корисним у розробці та використанні систем радіочастотного моніторингу.

1. Узгодження антенної решітки: Розраховано узгодження як для одиночного кільцевого елементу, так і для двоелементної антенної решітки. Моделювання вказує на гарне узгодження обох конфігурацій зі стандартною лінією живлення в 50 Ом.

2. Коефіцієнт стоячої хвилі: Коефіцієнт стоячої хвилі у смузі робочих частот не перевищує значення 1,5, що свідчить про ефективність узгодження антени з лінією живлення.

3. Діаграма спрямованості: Порівняння діаграм спрямованості одного кільця та кільцевої антенної решітки показало звуження діаграми спрямованості для системи з двох кільцевих елементів. Ширина діаграми спрямованості за половинною потужністю випромінювання склала 36 град. для двоелементної решітки, що дозволяє збільшити точність напрямку антени.

4. Підвищення коефіцієнта підсилення: Використання двоелементної кільцевої антенної решітки призвело до практичного підвищення коефіцієнта підсилення до 7 дБі, порівняно з 5 дБі для одиночного кільцевого елементу. Це значно розширює радіус дії антени.

5. Можливість розширення: Збільшення кількості кільцевих елементів у решітці може призвести до додаткового підвищення коефіцієнта підсилення та звуження діаграми спрямованості.

6. ККД антени: ККД кільцевого елементу та антенної решітки виготовлені за допомогою друкованих технологій високі і становлять 84% і 88%, відповідно.

Загальною висновком є те, що використання кільцевих мікросмужкових елементів у вигляді антенної решітки може бути досить ефективним в рамках антенної системи радіомоніторингу. Така конструкція може забезпечити потрібний коефіцієнт підсилення та діаграму спрямованості, необхідні для точного вимірювання та моніторингу сигналів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Balanis C.A. Antenna Theory Analysis / John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005. - 1073 p.
2. ANSYS HFSS: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>
3. Батлук В.А. Гогіташвілі Г.Г., Уваров Р.В., Смердова Т.А. Охорона праці в галузі телекомунікацій. Навч. посібник – Львів: Афіша, 2003. – 320 с.
4. Благодарний В. Г., Ступак В. С. Основні терміни у сфері користування радіочастотним ресурсом: Словник-довідник / За редакцією Слободянюка П. В. - Ніжин: ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф", 2006.
5. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. Гігієнічні нормативи ГН 3.3.5-8-6.6.1 2002 р. Видання офіційне Київ, 2001 рік – 46 с.
6. ДБН В.1.1 – 7- 2002. Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. – К.: 2002. – 41 с.
7. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування . -К.: Мінрегіон України, 2013.-147 с
8. ДБН.В.2.5 – 28-2006 . Природне і штучне освітлення. – К.: Мінбуд України, - 2008 – 74 с.
9. Дмитренко В. П. Пристрої НВЧ. Основи теорії / Дмитренко В. П., Бугрова Т. І., Логачова Л. М. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 280 с.
10. Доля П. Г. Основи моделювання в COMSOL Multiphysics / Доля П. Г.; ХНУ ім. Каразіна. – Електрон. текст. дані (14,58 МБ). – Х.: ХНУ ім. Каразіна, 2019 р. – 529 с. – Режим доступу: http://geometry.karazin.ua/-resources/documents/20191219182458_3cc8431d.pdf
11. ДСанПін 3.3.2.007– 98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. – К.: ГСЕУ України, 1998 – 21 с.
12. ДСанПіН 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з

джерелами електромагнітних полів.

13. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

14. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

15. ДСТУ ISO14001 - 97 – 14012-97. Система управління оточуючим середовищем – К.:ДЕРЖСТАНДАРТ УКРАЇНИ – 225 с.

16. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 1: Підручник для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усин, В. С. Вунтесмері, Д. В. Грецьких . – Харків: ХНУРЕ; Колігіум, 2010. – 416 с.

17. Електродинаміка та поширення радіохвиль. Ч. 2: Підручник для студентів ВНЗ / В. М. Шокало, В. І. Правда, В. А. Усин, В. С. Вунтесмері, Д. В. Грецьких. – Харків: ХНУРЕ; Колігіум, 2010. – 435 с

18. Житецький В.Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Львів: Афіша, 2002. – 320 с.

19. Житецький В.Ц. Охорона праці користувачів комп'ютерів. – Львів: Афіша, 2000.-176с.

20. Закон України "Про радіочастотний ресурс України" від 01.06.2000 р. N 1770-III - в редакції Закону України "Про внесення змін до Закону України "Про радіочастотний ресурс України" від 24.06.2004 р. N 1876-IV.

21. Закон України “Про охорону навколишнього природного середовища” – К.: Україна. – 1991. - 59 с. (з усіма редакціями до 2017 року)

22. Закон України “Про охорону праці” / Законодавство України про охорону праці. - К. Нова редакція 2002 р.

23. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку».

24. Закон України «Про охорону праці».

25. Закон України «Про пожежну безпеку».

26. Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л.В. «Антени та пристрої надвисоких частот»: Підручник для ВНЗ/ За ред. Л.Я. Ільницького. – К: Укртелеком, 2003.

27. Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Слоболлдянюк П.В., Благодарний В.Г.

«Анени телекомунікаційних та моніторингових систем», За ред Л.Я. Ільницького. – К., 2012.

28. Ільницький Л.Я., Сібрук Л.В., Щербина О.А. «Пристрої надвисоких частот та антени»: Навч. посібник. – К: НАУ, 2013.

29. Квицинський А.О., Новини енергетики, № 2, Нормування електромагнітних полів (ЕМП) в Україні. – 2009.

30. НАПБ А.01.001-2004 Правила пожежної безпеки в Україні.

31. НАПБ Б.03.002 – 2007 Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Наказ МНС від 03.12.2007 №883.

32. НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин». Наказ Держгірпромнагляду від 26.03.2010р. № 65.

33. НПАОП 0.00-1.28-10 Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин/ Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 19 квітня 2010 р. за N 293/17588

34. НПАОП 0.00-1.29-97 «Правила захисту від статичної електрики». Наказ Держнаглядохоронпраці України від 22.04.1997 р. № 103.

35. НПАОП 0.00-4.15-98 «Положення про розробку інструкцій з охорони праці». Наказ Держнаглядохоронпраці від 29.01.1998 р. № 9.

36. Постанова Кабінету Міністрів України від 27.06.2003 р. № 994. «Перелік заходів та засобів з охорони праці, витрати на здійснення и придбання яких включаються до валових витрат».

37. Правила улаштування електроустановок. ПУЕ. – Харків.: Форт – 2011 – 728с.

38. Рекомендації щодо побудови, впровадження та удосконалення системи управління охороною праці. Затверджено Головою Держгірпромнагляду 07.02.2008р.

39. Цалієв Т.А. Анени та пристрої НВЧ. Частина 1. Термінологія та методи теорії антен : Посібник /Цалієв Т.А. – Одеса: ОНАЗ, 2005 – 56 с.