

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри

_____ В. М. Шутко

“ _____ ” _____ 2020 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА
ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ «ЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ ТА ПРИСТРОЇ»**

Тема: «Мікросмужкова антенна решітка для Wi-Fi систем»

Виконавець: _____ А.О. Бойчук

Керівник: _____ О.А. Щербина

Консультант розділу «Охорона праці» _____ О.О. Козлітін

**Консультант розділу «Охорона
навколишнього середовища»** _____ С.М. Маджд

Нормоконтролер: _____ Р.Б. Сініцин

Київ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей
Освітньо-професійна програма «Електронні пристрої та системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.М. Шутко

« _____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи (проекту)

Бойчук Антон Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема дипломної роботи (проекту): «Мікросмужкова антенна решітка для Wi-Fi систем»

затверджена наказом ректора від «02» жовтня 2020 р. № 1900/ст.

2. Термін виконання роботи (проекту): 05.10.2020 р. по 27.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту): принципи побудови спрямованих та всеспрямованих антен для Wi-Fi систем.

4. Зміст пояснювальної записки: огляд технологій бездротового зв'язку; аналіз принципів побудови і моделювання одинарної мікросмужкової антени прямокутної форми; дослідження мікросмужкової антенної решітки для Wi-Fi систем.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: таблиці, рисунки, графіки.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Аналітичний огляд літературних джерел з тематики диплому	05.10-11.10	Виконано
2	Огляд технологій бездротового зв'язку	12.10-22.10	Виконано
3	Аналіз принципів побудови і моделювання одинарної мікросмужкової антени прямокутної форми	22.10-31.10	Виконано
4	Дослідження мікросмужкової антенної решітки для Wi-Fi систем	01.11-10.11	Виконано
5	Охорона праці	11.11-17.11	Виконано
6	Охорона навколишнього середовища	18.11-27.11	Виконано
7	Висновки	28.11-31.11	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	01.12-27.12.2020	Виконано

7. Консультація з окремих розділів

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	ст. в. Козлітін О.О.		
Охорона навколишнього середовища	доц. Маджд С.М.		

8. Дата видачі завдання: “ 05 ” жовтня 2020 р.

Керівник дипломної роботи (проекту) _____ Щербина О.А.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Бойчук А.О.
(підпис випускника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи “Мікросмужкова антенна решітка для Wi-Fi систем”: сторінок – 99, рисунків – 39, таблиць – 10, джерел посилань – 70.

Об'єкт дослідження: процес конструювання мікросмужкових антен.

Мета роботи: дослідження принципів конструювання та розробка чотирьохелементної антенної решітки на основі друкованої технології.

Проведена робота по розробці мікросмужкової чотирьохелементної антенної решітки з прямокутними елементами.

Ключові слова: антени для систем Wi-Fi, мукросмужкові антени, мікросмужкові лінії, діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення, коефіцієнт стоячої хвилі, коефіцієнт відбиття.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ	11
1.1. Мережева модель OSI	11
1.2. Стандарти IEEE для Wi-Fi мережі.....	16
1.3. Низькопрофільні та планарні антени для бездротових систем.....	19
1.4. Приклади реалізації антен Wi-Fi.....	27
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ОДИНАРНОЇ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ	33
2.1. Принципи побудови мікросмужкової патч-антени.....	33
2.2. Програмні пакети для моделювання електродинамічних середовищ.....	35
2.3. Моделювання одинарної мікросмужкової патч-антени.....	41
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ ДЛЯ WI-FI СИСТЕМ	46
3.1. Проектування мікросмужкової антенної решітки	46
3.2. Моделювання мікросмужкової антенної решітки.....	48
3.3. Дальність дії розробленої мікросмужкової антенної решітки.....	51
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ	53
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	76
ВИСНОВКИ	92
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЖЕРЕЛ	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АР – антенна решітка

ДС – діаграма спрямованості

КП – коефіцієнт підсилення

КСД – коефіцієнт спрямованої дії

DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum

FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum

LTE – Long Term Evolution

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OSI – Open Systems Interconnection

WWAN – Wireless Wide Area Network)

WMAN – Wireless Metropolitan Area Networks

WLAN – Wireless Local Area Network

WPAN – Wireless Personal Area Network

ВСТУП

Майже всі комерційні пристрої бездротового зв'язку, що випускаються у сучасному світі, такі як смартфони, планшети, ноутбуки та переносні пристрої, повинні підтримувати різні стандарти зв'язку (WiFi, Bluetooth та LTE).

Ідея Інтернету речей, де кожен комунікаційний пристрій поєднується з іншими в одну систему, реалізується швидким розвитком нових бездротових стандартів з метою забезпечення більш високої швидкості передачі даних, безперебійного зв'язку та низької вартості впровадження. Для підтримки існуючих бездротових мереж, а також стандартів майбутнього покоління, таких як 5G, життєво важливими є дослідження щодо розумних та ефективних конфігурацій антен.

Численні наукові праці у літературі з проектування антен охоплюють різні типи застосувань, починаючи від зв'язку та закінчуючи програмами ідентифікації та виявлення. Кілька компактних конструкцій багатосмугових антен було запропоновано використовувати в мобільних телефонах [1, 2]. Компактність та багатосмугові характеристики запропонованих конструкцій є основними вимогами, які необхідно реалізувати для бездротових пристроїв. В роботах [3, 4] представлена реконфігурована антена зі зменшеною кількістю антенних елементів в системі, що дає змогу поступитись місцем дешевим компонентам і зменшити загальний розмір. Окрім згаданої антени, прогрес у проектуванні антен для мобільних базових станцій має першорядне значення для загальної продуктивності системи зв'язку. Мобільна базова станція та бездротовий маршрутизатор повинні забезпечувати краще покриття, щоб обслуговувати якомога більше мобільних користувачів з високою швидкістю передачі даних і без будь-яких перерв. Антени, що використовуються в цих системах, повинні мати високий коефіцієнт підсилення та високу ефективність, щоб забезпечити споживачам належне обслуговування.

Одним із методів підвищення ефективності роботи антени є синтез антенної решітки (АР). Загальновідомо, що завдяки поєднанню декількох антен у

конфігурації решітки її продуктивність значно зростає у порівнянні із одноелементною структурою антени [5]. Наведемо деякі переваги антенної решітки: високий коефіцієнт підсилення, висока спрямованість і здатність забезпечити можливість сканування. Інтеграція фазообертача в антенну решітку забезпечує можливість керування головною пелюсткою антени, а, отже, робить її більш ефективною при споживанні меншої кількості енергії. У літературі можна знайти численні проекти фазованих антенних решіток, особливо для радіолокаційних та супутникових програм [6, 7].

Існує кілька спроб застосувати концепцію AP до основних мобільних стандартів, таких як Wi-Fi та LTE. Конфігурація AP з 8 елементів, яка була реалізована в 3-гранній структурі AP, була представлена в [8]. Представлена AP призначена для роботи на робочій частоті 2,5 ГГц. Було показано, що ця конфігурація решітки змогла покращити кут сканування антени в порівнянні з криволінійною та двохгранною реалізаціями. Однак, використання 8 елементів у AP, а також обмежена пропускна здатність робить її непридатною для використання в якості антени в багатосмугових компактних бездротових маршрутизаторах.

Меандрова рамкова антена із всеспрямованим випромінюванням була представлена в роботі [9]. Однак, робоча частота запропонованої AP обмежена тільки додатком Wi-Fi через її вузьку пропускну здатність. Двоспрямована монопольна AP, що охоплює стандарти Wi-Fi і LTE, була запропонована в [10]. Антенна решітка була розроблена для обслуговування довгих і вузьких областей, таких як довгі коридори та тунелі. Однак про можливості сканування обох AP у статтях не повідомлялося.

Розвиток технологій антен в області мікросмужкових патч-антен та AP, які побудовані на їх основі, варіюється в широкому діапазоні методологій проектування. Однією з вимог до сучасної системи зв'язку – низькопрофільна проста антена з плоскою структурою і, отже, економічно вигідна у виробництві. Всі ці характеристики задовольняються мікросмужковою антеною [11]. Мікросмужкові патч-антени можуть без проблем використовуватись в області стільникового зв'язку, супутникового зв'язку, на борту повітряних та космічних апаратів [12]. Різними

способами поліпшення характеристик мікросмужкової патч-антени є порівняльний аналіз шляхом зміни форми патч-елементу, матеріалу підкладки та використання різних методів живлення. Ефективність мікросмугової патч-антени може бути додатково підвищена шляхом проектування АР з патч-елементів.

Але мікросмужкова патч-антена має також деякі недоліки, такі як низька ефективність, вузька смуга пропускання, робота з низькою потужністю та паразитне випромінювання [11]. Існують різні способи розширення смуги частот мікросмужкової патч-антени, серед них найвідомішими є наступні: збільшення товщини підкладки, покращення узгодження вхідного опору, використання підкладок з меншим значенням ефективної діелектричної проникності, використання багаточастотних режимів роботи [13]. Для антен, що працюють на частотах менше 10 ГГц, слід використовувати підкладки з меншою товщиною та низькою відносною діелектричною проникністю [14]. Для мікросмужкових патч-антен з більш товстими підкладками, при використанні коаксіального живлення, необхідна довша довжина фідерної лінії, і, отже, це викликає проблеми із узгодженням, оскільки вхідний опір набуває більш індуктивного характеру [15]. Апертурно зв'язане живлення може бути використане для збільшення смуги пропускання. При апертурному зв'язку з використанням перехрещених щілин можна отримати колову поляризацію зі збільшеною смугою пропускання [16].

В одному з літературних джерел була використана фрактальна геометрія патч-антени для багатосмугових додатків, таких як Wi-Fi, яка забезпечує збільшення коефіцієнту спрямованості зі зменшенням розміру патч-елементу [17]. В іншій запропонованій антені був представлений порівняльний аналіз двохсмугової різнорідної патч АР з двох, чотирьох, восьми та шістнадцяти елементів, який показує покращені характеристики з точки зору підсилення та пропускну здатності зі збільшенням елементів масиву [18].

Мікросмужкова АР з патч-елементів використовується для отримання діаграми спрямованості (ДС), яку неможливо отримати за допомогою однієї мікросмужкової патч-антени, а також збільшує спрямованість та коефіцієнт підсилення антени [11]. Метод послідовного живлення при використанні для

побудови АР дає низький коефіцієнт підсилення та більші зворотні втрати, але вимагає меншої площі, тоді як паралельне живлення елементів АР забезпечує порівняно високу ефективність випромінювання, низькі зворотні втрати, але вимагає більшої площі для реалізації. Поєднання цих двох методів живлення в АР є оптимальним способом живлення, який забезпечує помірні зворотні втрати та середню площу для реалізації [14].

В мікросмужковій АР з патч-елементів збільшення інтервалу між елементами звужує головну пелюстку в ДС і збільшує кількість бічних пелюсток, а положення напрямку основного випромінювання можна регулювати шляхом введення різниці фаз на вході в патч-елементи АР. Лінійна мікросмужкова АР збільшує коефіцієнт підсилення та спрямованість випромінювання, але промінь може бути керованим лише в одному вимірі. Планарні мікросмужкові АР забезпечують порівняно більшу спрямованість та коефіцієнт підсилення, ніж одинарна мікросмужкова антена, але менші, ніж у лінійних АР, але це дозволяє антені керувати промінем в будь-якому напрямку [19].

У цій дипломній роботі буде представлений порівняльний аналіз характеристик одинарної мікросмужкової антени з мікросмужковою АР 2×2 . Метод живлення, який буде використовуватись для однієї мікросмужкової патч-антени – коаксіальне живлення, тоді як у АР чотири елементи будуть живитися за допомогою мікросмужкової лінії передачі, а вся АР – коаксіальним кабелем.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1. мережева модель OSI

Всі протоколи для бездротової передачі даних можна класифікувати за топологією мережі, швидкістю роботи або алгоритмами безпеки. Як приклад, наведемо класифікацію за максимальним радіусом дії бездротової мережі (рис. 1.1).

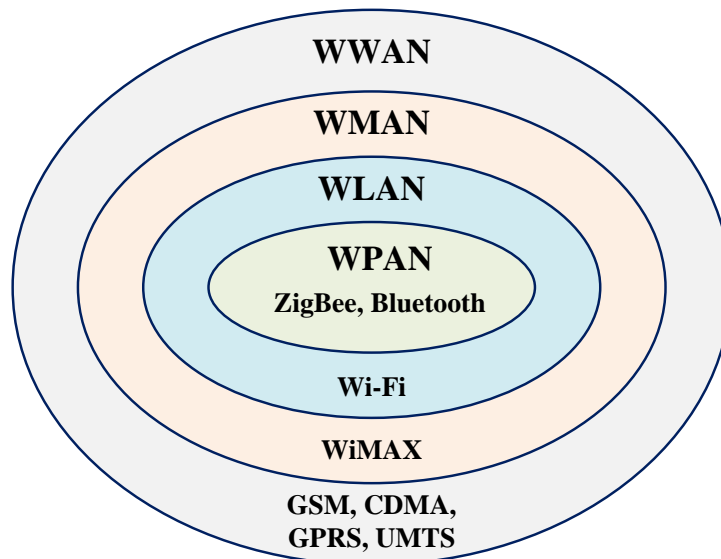


Рис. 1.1. Класифікація протоколів бездротової передачі даних за радіусом дії

1. **WWAN** (Wireless Wide Area Network) – мережі стільникового зв'язку з радіусом дії в десятки кілометрів (протоколи GSM, CDMA, iDEN, PDC, GPRS і UMTS);
2. **WMAN** (Wireless Metropolitan Area Networks) – бездротові мережі масштабу міста, радіус дії яких кілька кілометрів (протокол WiMAX);
3. **WLAN** (Wireless Local Area Network) – бездротова локальна мережа з радіусом дії кілька сотень метрів (протоколи: UWB, Wi-Fi);

4. WPAN (Wireless Personal Area Network) застосовується для зв'язку різних пристроїв, наприклад комп'ютерів, побутових приладів, оргтехніки, засобів зв'язку і т. д., радіус дії яких становить від кількох метрів до кількох десятків метрів (протоколи ZigBee, RuBee, X10, Insteon, Bluetooth, Z-Wave, ANT, RFID).

Крім радіусу дії мереж при визначенні рівнів в мережевій моделі OSI (Open Systems Interconnection) важливу роль грають протоколи. Еталонна модель OSI (стек OSI) передбачає 7-рівневу мережеву ієрархію, яка була розроблена Міжнародною організацією по стандартам (International Standardization Organization – ISO). Табл. 1.1 показує розподіл рівнів і задачі, що вирішуються на цих рівнях.

Таблиця 1.1

Рівні в мережевій моделі OSI

1	Фізичний	Власне кабель або фізичний носій
2	Канальний	Передача і прийом пакетів, визначення апаратних адрес
3	Мережевий	Маршрутизація і ведення обліку
4	Транспортний	Забезпечення коректної наскрізної пересилки даних
5	Сеансовий	Аутентифікація і перевірка
6	Подання даних	Інтерпретація і стиснення даних
7	Прикладний	Надання послуг на рівні кінцевого користувача: пошта, реєстрація і т.д.

Розглянемо більш детально декілька протоколів, які було розроблено IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Група протоколів IEEE 802.X описує мережеві специфікації і дає стандарти, рекомендації та інформаційні документи для мереж і телекомунікацій. Рекомендації IEEE пов'язані з двома нижніми рівнями моделі OSI – фізичним і канальним. Ці рекомендації ділять канальний рівень на два підрівні: нижній – MAC (управління доступом до середовища) і верхній – LLC (управління логічним каналом).

Bluetooth – протокол передачі інформації бездротовою технологією Bluetooth, який був розроблений групою компаній Ericsson, IBM, Intel, Toshiba і Nokia. Bluetooth забезпечує обмін інформацією між такими пристроями, як персональні

комп'ютери, мобільні телефони, ноутбуки, принтери, цифрові фотоапарати, мишки, клавіатури, тощо на надійній, недорогій та доступній радіочастоті для ближнього зв'язку. Зв'язок цих пристроїв здійснюється в радіусі від 10 до 100 метрів один від одного.

UWB – протокол, який був розроблений альянсом компаній WiMedia, а потім затверджений в якості міжнародного стандарту ISO/IEC26907. UWB є стандартом широкосмугового бездротового зв'язку на коротких відстанях. Протокол керує аспектами взаємодії між пристроями на фізичному рівні (PHY) і підрівні доступу до середовища (MAC). Пристрої працюють в діапазоні частот від 3,1 до 10,6 ГГц. Протокол UWB конкурує з протоколом Bluetooth.

ZigBee – стандарт для недорогих, малопотужних бездротових мереж з топологією чарунок, низька вартість якого дозволяє широко застосовувати дану технологію для бездротового контролю і спостереження, а завдяки малій потужності сенсори мережі здатні працювати довгий час завдяки використанню автономних джерел живлення. Нижні рівні для даного стандарту визначаються стандартами IEEE 802.15.4-2006.

X10 – міжнародний відкритий індустріальний стандарт, який застосовується для зв'язку електронних пристроїв в системах домашньої автоматизації. Цей стандарт визначає методи і протокол передачі сигналів управління електронними модулями, до яких підключені побутові прилади, з використанням звичайної електропроводки або бездротових каналів.

WI-FI – стандарт IEEE 802.11 передачі цифрових потоків даних по радіоканалах, який є доцільним для побудови мереж, де розгортання кабельної системи є неможливим або економічно недоцільним. Користувачі можуть пересуватись між точками доступу на території покриття мережі, використовуючи мобільні пристрої, які оснащені клієнтськими приймально-передавальними пристроями Wi-Fi та отримувати доступ в Інтернет.

WiMAX – телекомунікаційна технологія, яка була розроблена з метою надання універсального бездротового зв'язку на великих відстанях для широкого спектру

пристроїв (від робочих станцій до мобільних телефонів). Ця технологія заснована на стандарті IEEE 802.16.

GSM – глобальний цифровий стандарт для мобільного стільникового зв'язку з розділенням частотного каналу за принципом TDMA та середнім ступенем безпеки.

GPRS – надбудова над технологією мобільного зв'язку GSM, що здійснює пакетну передачу даних і дозволяє користувачеві мережі стільникового зв'язку здійснювати обмін даними з іншими пристроями в мережі GSM і із зовнішніми мережами, включаючи Інтернет.

Всі бездротові мережі працюють в одному або комбінованому варіантах топології (рис. 1.2).

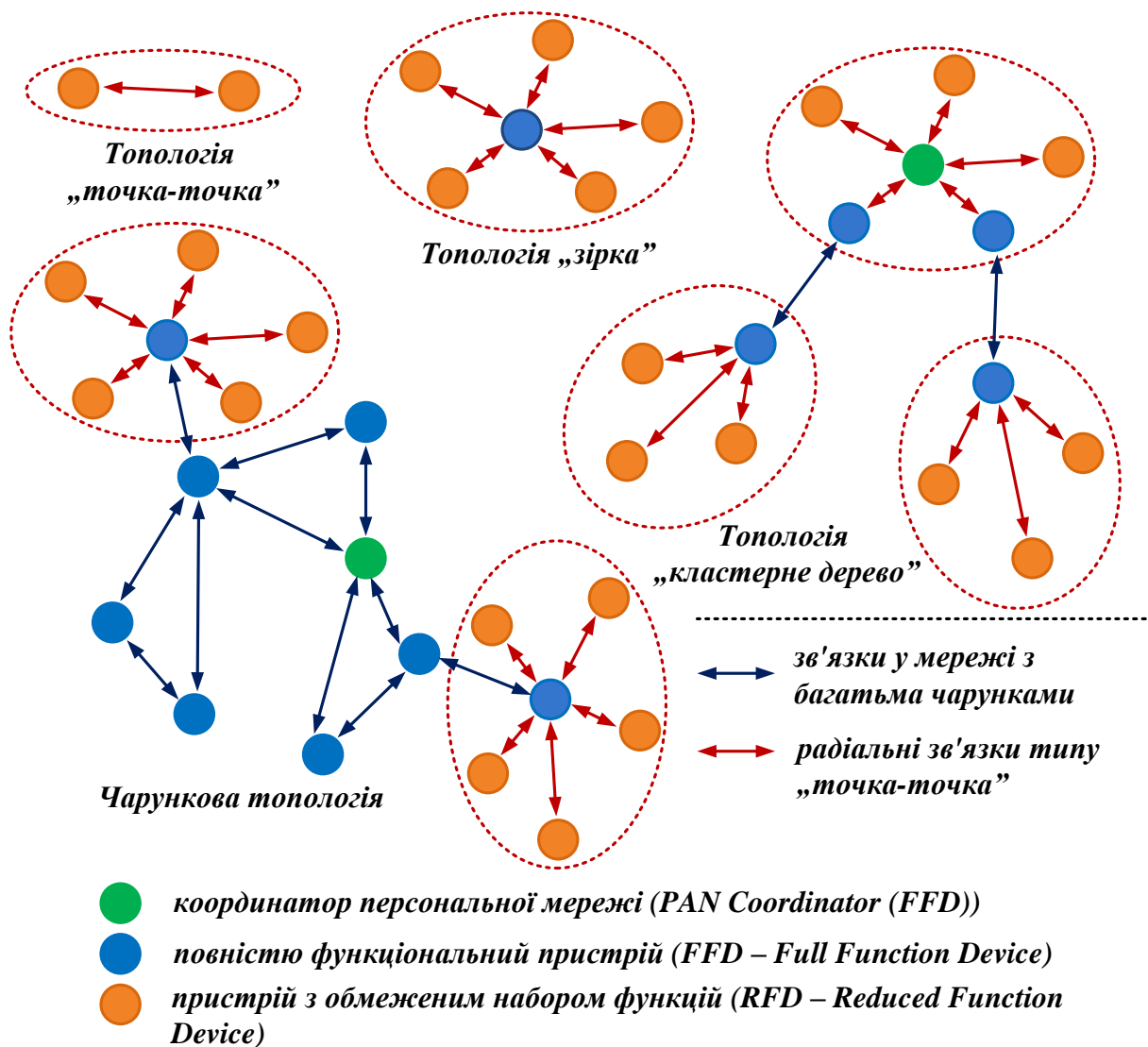


Рис. 1.2. Топології бездротових мереж різних конфігурацій

Топологія "точка-точка". Це є режим незалежної конфігурації, який називають незалежним базовим набором служб (Independent Basic Service Set, IBSS). Ця топологія – найпростіший варіант організації мережі з двох пристроїв. Як правило, вузли цієї мережі є рівноправними, тобто мережа однорангова. Топологія "точка-точка" характерна для протоколів Bluetooth, ANT, RFID, RuBee, PDC, WI-FI, Insteon, UWB, ZigBee та інших.

Топологія «зірка». Ця топологія є основою для організації всіх сучасних мереж зв'язку та обчислювальних мереж. Всі комп'ютери мережі приєднані до центрального вузла (комутатора), утворюючи фізичний сегмент мережі, який може функціонувати як окремо, так і в складі складної мережевої топології (наприклад, «дерево»). Топологію "зірка" використовують протоколи WI-FI, Insteon, ZigBee, UWB, IDEN, CDMAOne, WIMAX, GSM, GPRS, UTMS.

Чарункова топологія є базовою топологією для комп'ютерних мереж і мереж зв'язку, в яких кожна робоча станція мережі з'єднується з усіма іншими робочими станціями цієї ж мережі. Чарункова топологія характеризується високою стійкістю до відмов, складністю налаштування і надмірною витратою кабелю в провідних мережах. Кожен вузол має кілька можливих шляхів сполучення з іншими вузлами, за рахунок цього така топологія дуже стійка. Так як зникнення одного з каналів не призводить до втрати з'єднання між двома комп'ютерами, то ця топологія допускає з'єднання великої кількості вузлів і характерна для великих мереж. Чарункова топологія може бути застосована для мереж з протоколами UWB, WI-FI, Insteon, ZigBee, UWB, IDEN, CDMAOne, WIMAX, GSM, GPRS, UTMS.

Топологія «класстерне дерево» утворюється в основному як комбінація топологій мереж, які були розглянуті вище. Основа дерева обчислювальної мережі розташовується в точці (корінь), в якій збираються комунікаційні лінії інформації (гілки дерева). Обчислювальні мережі з деревоподібної структурою будуються там, де неможливо безпосередньо застосувати базові мережеві структури в чистому вигляді.

1.2. Стандарти IEEE для Wi-Fi мережі

Найбільш швидко розвиваючим сегментом телекомунікації сьогодні є бездротова локальна мережа Wi-Fi. В останні роки видно все більше зростання попиту на мобільні пристрої, побудовані на основі бездротових технологій. Варто відзначити, що Wi-Fi додатки передають і отримують інформацію за допомогою радіохвиль. Для здійснення передачі інформації Wi-Fi пристрої повинні «накласти» дані на радіохвилю, також відому як несуча хвиля. Цей процес називається модуляцією. Існують різні типи модуляції, які ми розглянемо далі. Кожен тип модуляції має свої переваги і недоліки з точки зору ефективності та вимог до вживання. Робочий діапазон і тип модуляції визначають фізичний рівень даних (PHY) для стандартів передачі даних. Продукти сумісні з PHY в тому випадку, коли вони використовують один діапазон і один тип модуляції.

Перший стандарт бездротових мереж 802.11 був схвалений Інститутом інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) в 1997 році і підтримував швидкість передачі даних до 2-х Мбіт\с (табл. 1.1). Модуляції, що використовується за цим стандартом: псевдовипадкова перебудова робочої частоти (FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum) і метод прямої послідовності для розширення спектру (DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum).

В 1999 році IEEE схвалила ще два стандарти бездротових мереж Wi-Fi: 802.11a і 802.11b. Стандарт 802.11a працює в частотному діапазоні 5 ГГц зі швидкістю передачі даних до 54 Мбіт\с [20-22]. Даний стандарт побудований на основі технології цифрової модуляції ортогонального мультиплексування з поділом частот (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Стандарт 802.11b використовує діапазон частот 2.4 ГГц і досягає швидкостей передачі даних до 11Мбіт\с. На відміну від стандарту 802.11a, схема стандарту 802.11b побудована за принципом DSSS.

Оскільки реалізувати схему DSSS легше, ніж чим OFDM, то і продукти, що використовують стандарт 802.11b, почали з'являтися на ринку раніше (з 1999 року).

Стандарти IEEE для Wi-Fi мережі

Стандарт	802.11	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Дата сертифікації стандарту	1997	1999	1999	2003	2009	2013
Частота операцій	2 ГГц	5 ГГц	2 ГГц	2.4 – 2.4835 ГГц	2 ГГц або 5,0 ГГц	5 ГГц
Типи модуляції	DSSS, FHSS	OFDM	DSSS	DSSS, OFDM	OFDM, MIMO	QAM256
Швидкість передачі даних по каналу	2,1 Мбит/с	до 54 Мбит/с	до 11 Мбит/с	до 54 Мбит/с	до 150 Мбит/с (1 антенна) до 600 Мбит/с (4 антени)	до 6,77 Гбит/с при 8x MU-MIMO-антенах

На всіх продуктах, які пройшли сертифікацію альянсу сумісності бездротового обладнання Ethernet (WECA - Wireless Ethernet Compatibility Alliance) є відмітка з офіційно зареєстрованим логотипом Wi-Fi. Альянс WECA включає в себе всіх основних виробників бездротових пристроїв на основі технології Wi-Fi. Альянс займається тим, що сертифікує, маркує і тестує на сумісність обладнання, яке використовує технології Wi-Fi.

На початку 2001 року Федеральна Комісія з Комунікацій Сполучених Штатів (FCC – Federal Communications Commission) ратифікувала нові правила, завдяки яким дозволяється додаткова модуляція в діапазоні 2.4 ГГц. Це дозволило IEEE розширити стандарт 802.11b, що призвело до підтримки більш високих швидкостей передачі даних. Таким чином, з'явився стандарт 802.11g, який працює зі швидкістю передачі даних до 54 Мбіт/с і розроблявся з використанням технології OFDM.

Роутер Wi-Fi це маршрутизатор, який "приймає рішення" з пересилання пакетних даних для різних модульних сегментів мережі. Стандартна схема бездротового маршрутизатора передбачає не менше одного з'єднання. Роздача інтернету відбувається на різних частотах.

Фіксований бездротовий доступ 5150-5350 МГц і 5650-6425 МГц забезпечує високу швидкість переданих даних в мережі Інтернет [23-25]. Для пошуку вільного каналу зв'язку необхідно скоординувати підключення мережі з адміністраціями інших мереж. Кожна мережа повинна використовувати канал-частоту, відокремлену від іншого каналу смугою 25 МГц.

Стандарт 802.11a володіє високою продуктивністю і швидкодією. Завдяки використанню частоти 5 ГГц і модуляції OFDM у цього стандарту є суттєві переваги перед стандартом 802.11b. Діапазон 5 ГГц (відомий як UNII) фактично складається з трьох піддіапазонів: UNII1 (5.15 - 5.25 ГГц), UNII2 (5.25 - 5.35 ГГц) і UNII3 (5.725 - 5.825 ГГц). При використанні одночасно двох піддіапазонів UNII1 і UNII2 можна отримати до восьми непересічних каналів проти всього лише трьох в діапазоні 2.4 ГГц. Також у цього стандарту набагато більше доступна смуга пропускання. Таким чином, з використанням стандарту 802.11a можна підтримувати більше число одночасних, більш продуктивних, неконфліктних бездротових з'єднань.

Варто зазначити, що оскільки стандарти 802.11a і 802.11b працюють в різних діапазонах, то і продукти, які було розроблено під ці стандарти не є сумісними. Так, наприклад, точка доступу Wi-Fi, яка працює в діапазоні 2.4 ГГц стандарту 802.11b, не буде працювати з бездротовою мережевою картою, робочий діапазон якої 5 ГГц.

Однак, обидва стандарти можуть і співіснувати. Наприклад, користувачі, підключені до точок доступу, які застосовують різні стандарти, також можуть використовувати будь-які внутрішні ресурси цієї мережі, але за умови, що ці точки доступу підключені до однієї опорної мережі.

Стандарт 802.11g характеризується високою швидкістю в діапазоні 2.4 ГГц. Цей стандарт несе з собою більш високі швидкості передачі даних, але при цьому підтримуючи сумісність з продуктами стандарту 802.11b. Стандарт працює із застосуванням модуляції DSSS на швидкостях до 11Мбіт/с, але при цьому додатково використовується модуляція OFDM на швидкостях вище ніж 11Мбіт/с. Таким чином, обладнання стандартів 802.11b і 802.11g сумісно на швидкостях, що не перевищують 11Мбіт/с. Якщо в діапазоні 2.4 ГГц необхідна швидкість вище, ніж

11Мбіт/с, то потрібно використовувати обладнання стандарту 802.11g. Тобто, стандарт 802.11g поєднав в собі все найкраще від стандартів 802.11b і 802.11a.

Стандарт 802.11n – на даний момент найпередовіший комерційний Wi-Fi-стандарт. У 802.11n використовуються частотні канали в частотних діапазонах Wi-Fi 2.4GHz і 5GHz. Сумісний з 11b / 11a / 11g. Хоча рекомендується будувати мережі з орієнтацією тільки на 802.11n, тому що потрібна конфігурація спеціальних захисних режимів при необхідності забезпечення сумісності із застарілими стандартами. Це веде до великого приросту сигнальної інформації та істотного зниження доступною корисної продуктивності радіоінтерфейсу. Власне навіть один клієнт Wi-Fi 802.11g або 802.11b потребують спеціальної настройки всієї мережі і миттєвої її істотної деградації в продуктивності. Підтримуються частотні канали Wi-Fi шириною 20MHz і 40MHz (2x20MHz). Використовувана радіочастотна технологія: OFDM. Також використовується технологія OFDM MIMO (Multiple Input Multiple Output) аж до рівня 4x4.

Стандарт 802.11ac є розвитком широко поширеної технології 802.11n і в цілому групи Wi-Fi-стандартів IEEE 802.11. Основними перевагами стандарту Wi-Fi 802.11ac є високі швидкості передачі в радіоканалі і, відповідно, більша агрегована смуга пропускання точки доступу, а також більш досконалі механізми контролю активного і пасивного стану клієнтських пристроїв. Все це разом веде до значної економії заряду батареї мобільного пристрою.

1.3. Низькопрофільні та планарні антени для бездротових систем

Як антени Wi-Fi для мобільних пристроїв широке застосування знайшли антени наступних конфігурацій: перевернута L-подібна антена, перевернута F-подібна антена, подвійна перевернута F-подібна антена, планарна антена, антена PIFA. Розберемо конструкцію цих антен трохи детальніше.

В літературі детально розглянуті різними авторами несиметричні інверсні *L-подібні антенні елементи* (Inverted L антени – ІЛА, рис.1.3.) у вигляді дротових або планарних конструкцій, розташованих на відносно невеликій висоті над

плоским провідним екраном [26]. Областю застосування таких антен, а також їх численних модифікацій, переважно є термінали систем GSM, CDMA, WiFi, WiMAX.

Основними недоліками таких антен є: відносно вузька смуга робочих частот і низький активний вхідний опір на частоті першого резонансу, оскільки залежність вхідного імпедансу L-антени подібна аналогічній залежності дводрової лінії, розімкнutoї на кінці.

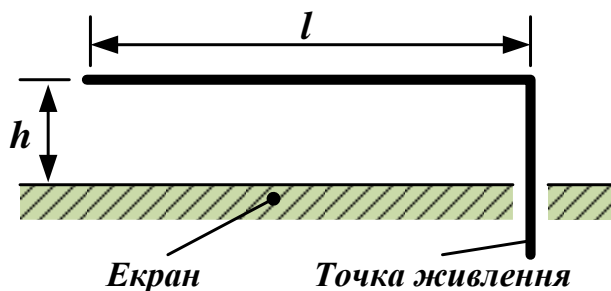


Рис. 1.3. Перевернутий L-подібний вібратор (ILA)

Ця антена може, наприклад, розміщуватись всередині телефону уздовж довгої сторони корпусу. На вертикальний сегмент перевернутого L-вібратора подається живлення. Вільний його кінець через повітря або діелектрик навантажений на еквівалентну ємність, яка утворена повітряним проміжком або діелектриком, що розташований між горизонтальним сегментом і екраном.

Перевернута L-антена (Inverted L Antenna, ILA) досить проста у виготовленні [27-29]. За багатьма електричними характеристиками вона подібна до короткої монопольної антени. Її ДС майже ідентична ДС короткого монополя, який є всеспрямованим в площині, яка перпендикулярна його осі. Однак, внаслідок додаткового випромінювання, яке обумовлене геометрією антени, її ДС несиметрично деформована в площині, де у звичайного вібратора ДС кругова. Резонансна довжина хвилі L-вібратора визначається його геометричними розмірами відповідно до виразу

$$\lambda = 4(h + l),$$

де h – висота вібратора над заземленим екраном, l – довжина його горизонтальної частини.

Як і у звичайного монополя, активний опір перевернутої L-антени невеликий (не більше 4 Ом), а реактивна складова опору складає сотні Ом, що дуже ускладнює узгодження з лінією живлення.

Для прикладу продемонструємо декілька формул для визначення характеристик ПЛА. Співвідношення для граничної добротності електрично малої ПЛА буде

$$Q = \frac{6}{k^3 h (h+l)^2} \left(\ln\left(\frac{h}{a}\right) - 1 + \frac{l}{h} \left[\ln\left(\frac{2l}{a}\right) - 1 \right] \right), \quad (1.1)$$

де a – радіус провідника, з якого виготовлена ПЛА, h – висота горизонтального плеча над екраном, l – довжина горизонтального плеча, k – хвильове число.

У випадку електрично малих ПЛА, коли $kh < 0,5$ і $kl < 0,5$, при розрахунку активної складової вхідного опору слід враховувати діаметр дроту, з якого виготовлена антена

$$R_{ILA} = 15(kh)^2 \left(2 - \frac{h}{h+l} \right) \left[2 - \frac{10}{9} \frac{\left(h^2 + \frac{3}{5}l^2 + \frac{6}{5}h(l+a) \right)}{(h+l)^2} \right]. \quad (1.2)$$

Реактивна складова вхідного опору приймальної ПЛА визначається співвідношенням

$$X_{ILA} = \frac{-60h \left(2 - \frac{h}{h+l'} \right)}{k(h+l')^2} \left[\begin{aligned} & \ln\left(\frac{2h}{a}\right) - \frac{a}{h} + \frac{lT-h}{\sqrt{l^2+h^2}} - \frac{5(kh)^2}{8} + \\ & + \left(\frac{(kh)^2}{2} \left(1 + \frac{l'}{h} \right)^2 \right) \ln\left(\frac{2h}{a}\right) + \\ & + \frac{(kh)^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{l}{h} \right)^2} + \frac{(kh)^2}{2} T \ln\left(\frac{l + \sqrt{l^2+h^2}}{h+a} \right) \end{aligned} \right], \quad (1.3)$$

де $l' = l + a$, $T = 1 - \frac{a}{h}$.

Крім ПЛА з дроту, можливий альтернативний варіант їх виконання на основі мікросмужкових ліній. Так, наприклад, для ноутбуків пропонується використовувати друкований варіант дводіапазонної антени, в якій ПЛА виконана у вигляді щілини (рис. 1.4), яка прорізана в провідній пластині. Габарити антени – 5 x 34 мм². Ця антена розрахована на роботу в діапазонах частот WLAN мереж (2,4 / 5,2 ГГц). При цьому ширина смуги пропускання в першому діапазоні, згідно з отриманими результатами експериментальних вимірювань, перевищує 7%, а в другому – 10%.

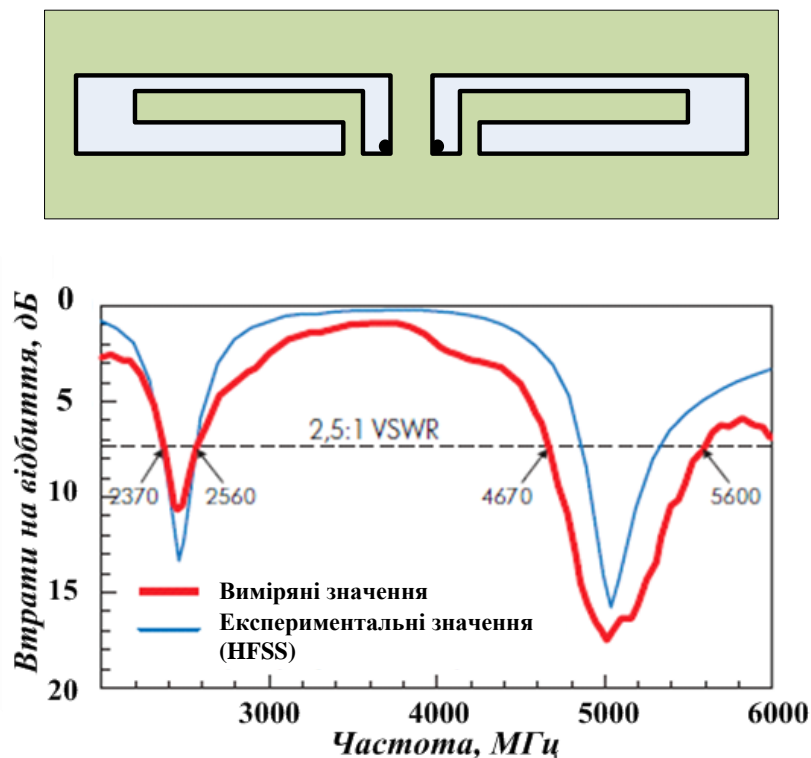
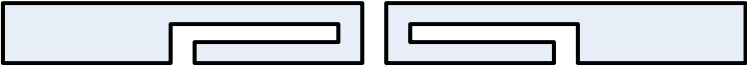
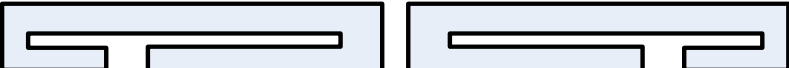
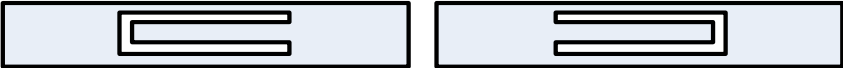






Рис. 1.4. Друкований диполь з плечима у вигляді ПЛА і його характеристика залежності зворотних втрат від частоти роботи

Як багатодіапазонне рішення така антена програє в спрямованих властивостях півхвильовим вібраторам, які розраховані на один конкретний діапазон. Місце зазначеної антени в ряду інших альтернативних рішень показано в табл. 1.2.

Плата за компактність не перевищує 3,1 дБі в порівнянні з друкованим диполем, коефіцієнт підсилення якого в діапазоні 2,4 ГГц дорівнює 5,8 дБ. Для частот в районі 5,2 ГГц ця різниця становить всього 0,2 дБі.

Порівняння коефіцієнтів підсилення різних варіантів друкованих диполів

№	Вигляд антени	Коефіцієнт підсилення, дБі	
		2,4 ГГц	5,2 ГГц
1		4,3	3,9
2		4,7	3,8
3		4,2	2,4
4		4,2	3,6
5		2,7	4,9
6		5,8	-
7		-	5,1

В роботі [30] було проведено дослідження більш складних конструкції ІЛА для боротьби з вищеперерахованими недоліками.

Перевернута F-подібна антена (Inverted F antenna, IFA) стала наступним кроком у розвитку конструкції L-подібного вібратора. Антена цього типу являє собою два L-подібних вібратори різної довжини, що розміщено на одній осі (рис. 1.5).

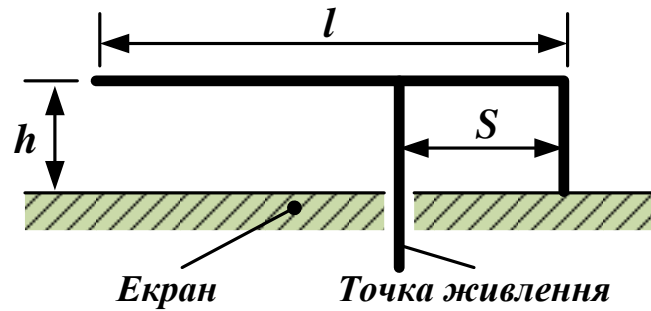


Рис. 1.5. Перевернута F подібна антена (IFA)

При цьому зовнішня вертикальна стійка F-подібної антени навантажена на корпус, тоді як сигнал подається через внутрішню вертикальну секцію. Введення додаткового L сегменту забезпечує гнучке управління значенням вхідного опору антени і суттєво спрощує її узгодження. Змінюючи відстань S між вертикальними секціями, можна домогтися прийняттого значення реактивної складової вхідного опору антени. Значення S не впливає на резонансну частоту такого випромінювача, і за рахунок поліпшеного узгодження антени на резонансній частоті VSWR може бути менше за 2 (рис. 1.6). Габарити антени: $h = 2,28$ см, $l = 7,2$ см, радіус провідника 0,15 см. Відстань між вертикальними секціями $S = 0,68$ м (не набагато більше 4,5 радіусів провідника)

Однак, при цьому ширина робочої смуги частот становить всього 1,5% (смуга типових дротових F образних антен не перевищує 2% [31]), що є занадто малим значенням для засобів мобільного зв'язку.

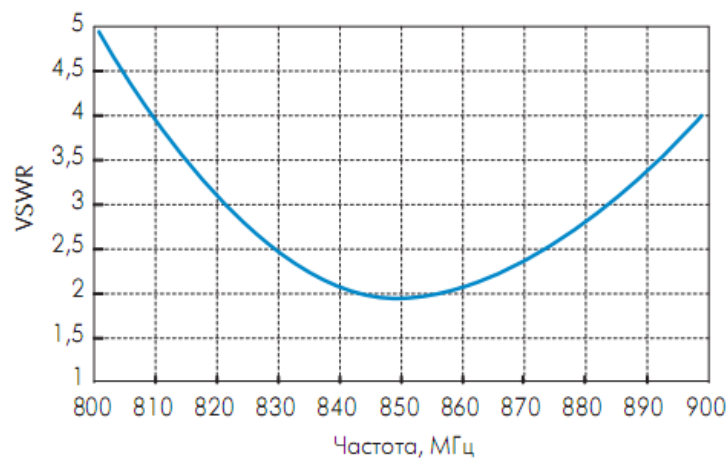


Рис.1.6. Залежність коефіцієнта стоячої хвилі (VSWR) від частоти роботи типової IFA

Можливе виконання IFA у друкованому вигляді. Наприклад, для випадку антени МІМО (рис. 1.7 [31]).

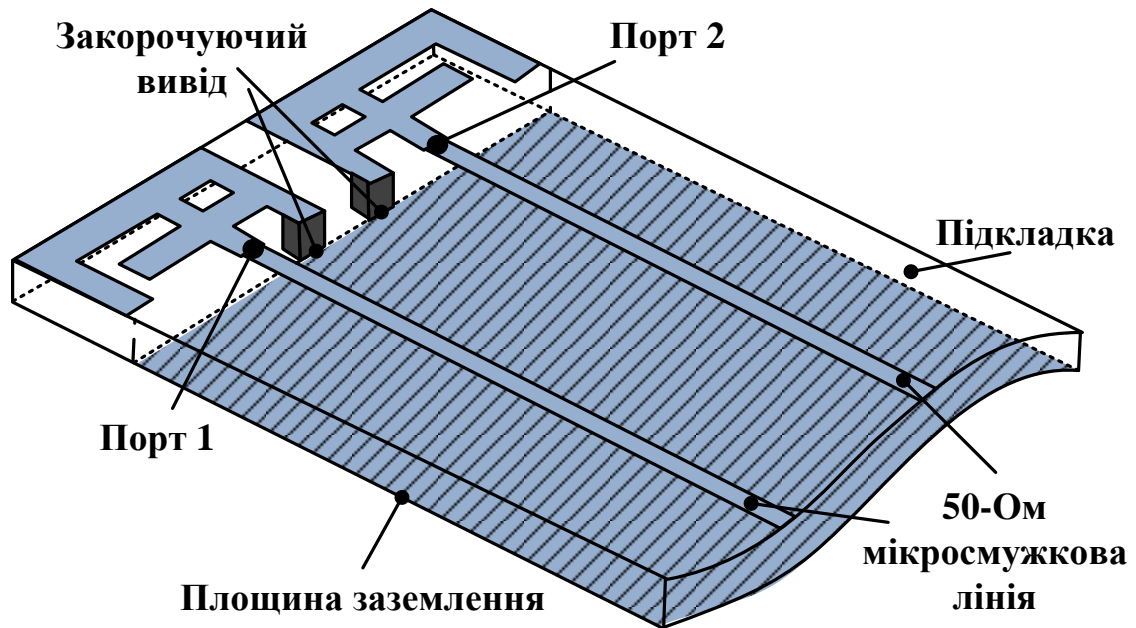


Рис. 1.7. Друкована двоелементна антена МІМО для діапазону частот 2,4/5,2 ГГц

Приклади реалізації F-подібної антени приведені на рис. 1.8.

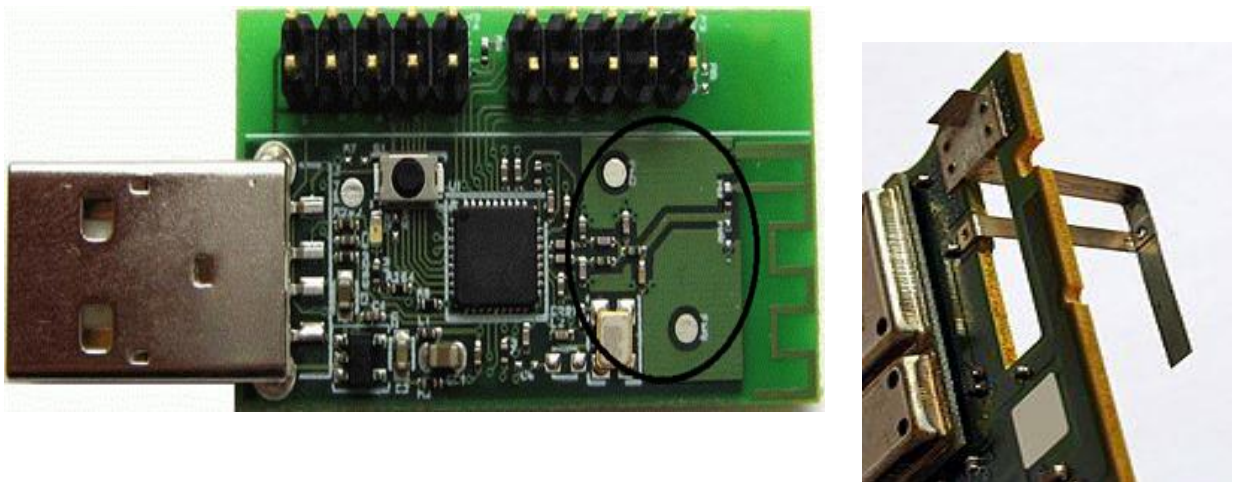


Рис. 1.8. Приклади реалізації IFA

Один зі способів розширення робочого діапазону частот – гібридна конструкція, що складається з двох паралельно розташованих над металевим екраном L- і F-подібних вібраторних антен – *подвійна перевернута F-антена (DIFA)* [31]. При такій конструкції L-антена є пасивним елементом, а її довжина дорівнює протяжності перевернутої F-антени (рис. 1.9). Таке рішення дозволило

вдвічі розширити граничну смугу пропускання, довівши її до 4% від номіналу резонансної несучої частоти.

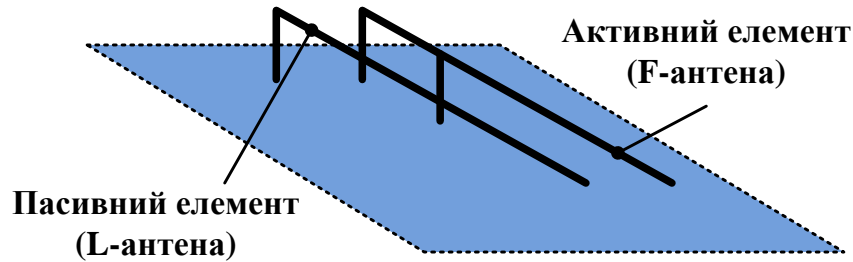


Рис. 1.9. Подвійна перевернута F-антена (DIFA)

Але, навіть такої смуги недостатньо для використання в засобах мобільного зв'язку. Наприклад, в діапазоні частот стандарту DAMPS 824-894 МГц з центральною частотою 859 МГц смуга робочих частот повинна становити 8,1% від номіналу резонансної. Крім того, габарити DIFA занадто великі - 0,6x8,6 см для вищезгаданого діапазону.

Наступним етапом розвитку інверсних антен стала якісно нова конструкція – *планарна F-подібна антена* (Planar Inverted F Antenna, PIFA) [32], яку більшість фахівців вважають прийнятною альтернативою спіральним вібраторам. Типова однодіапазонна PIFA показана на рис. 1.10.

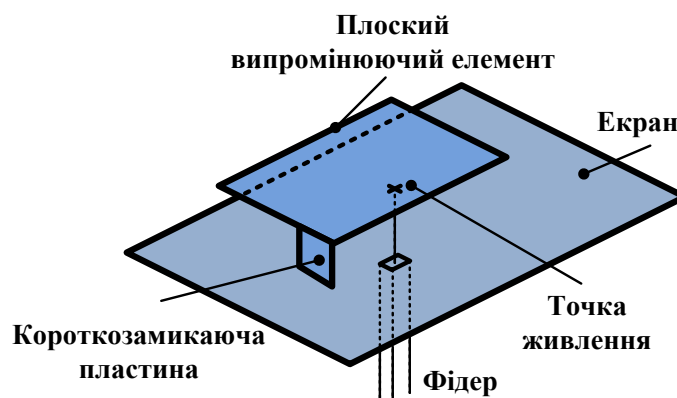


Рис. 1.10. Одно діапазонна PIFA

Приклади реалізації PIFA приведені на рис. 1.11, а основні параметри в табл. 1.3.

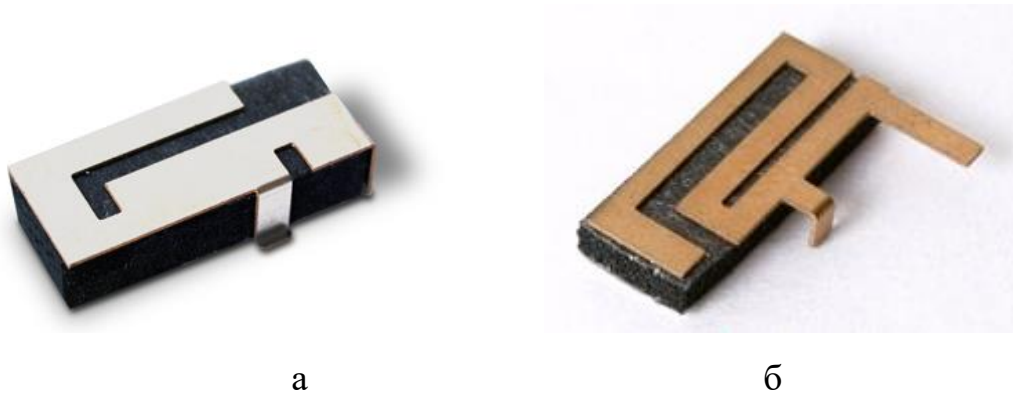


Рис. 1.11. Приклади реалізації PIFA (а – GEFN-102; б – GEFN-101) для 2,4 ГГц

Таблиця 1.3

Характеристики антени PIFA типу GEFN-102

Категорія	WLAN Антена (GEFN-102)	LTE Антена (GEFN-101)
Частота, МГц	2400~2485	2400~2485
Коефіцієнт підсилення, дБі	0,97 на 2,45 МГц	3,79 на 2,45 МГц
КСХН	<.2,2	<1,7
ККД, %	52.9 2,45 МГц	61.53 2,45 МГц
Ширина смуги частот, МГц	85	85
Вхідний опір, Ом	50	50
Поляризація	лінійна	лінійна
Тип антени	PIFA	PIFA
Робоча температура, °С	-45 ~ 100	-45 ~ 100

1.4. Приклади реалізації антен Wi-Fi

Будь-який бездротовий маршрутизатор, точка доступу або бездротовий адаптер має у своєму комплекті антену, яка може бути як стаціонарною, так і знімною. У той же час в роздрібній мережі пропонується достатньо велика кількість альтернативних антен для Wi-Fi пристроїв. Виникає питання: навіщо потрібні ще окремі антени, якщо в комплекті антени присутні.

Основна проблема, яка стосується більшості штатних антен, тобто антен, які йдуть у комплекті з бездротовими точками доступу, полягає в тому, що вони мають

достатньо велику зону покриття. Наприклад, якщо у межах однієї кімнати (офісу) одна точка доступу у стані забезпечити надійну роботу бездротових клієнтів, то на стабільний зв'язок з клієнтом, який знаходиться за стіною, розраховувати не доводиться. А через дві стіни ситуація ще більш погіршиться.

З однієї сторони, цю проблему легко вирішити. Для цього достатньо придбати точку доступу зі збільшеною потужністю передавача. Але, потужність передавача Wi-Fi пристрою чітко регламентована. Наприклад, в частотному діапазоні від 2400 до 2483,5 МГц для створення радіомереж на безліцензійній основі допускається використання передавача з потужністю випромінювання не більше ніж 100мВт. У випадку перевищення даного показника необхідно отримати ліцензію на створення і експлуатацію радіомережі передавання даних.

Тобто, всі точки доступу і бездротові адаптери мають однакову потужність передавача. Отже, єдиний спосіб збільшити зону покриття бездротової мережі – замість традиційних штатних антен використовувати спеціальні антени.

Збільшення зони покриття – це лише одна з функцій антен для Wi-Fi пристроїв. Друга, і не менш важлива їх властивість, полягає в тому, що вони дозволяють змінити форму зони покриття, таким чином забезпечуючи підвищення безпеки бездротової мережі. Штатні антени випромінюють і приймають сигнал рівномірно у всі сторони (в горизонтальній площині). Тобто, якщо точку доступу помістити коло стіни в кімнаті, то сигнал буде розповсюджуватись не тільки по вашій квартирі (офісі), а і у сусіда. Для того, щоб убезпечити свою бездротову мережу від вторгнення ззовні, можливо використовувати спеціальні спрямовані антени, які випромінюють сигнал в заданому секторі. Це також дозволить збільшити дальність розповсюдження сигналу у цьому напрямку.

З точки зору використання всі антени Wi-Fi пристроїв можна умовно поділити на два великих класи: антени для зовнішнього (outdoor) і для внутрішнього застосування (indoor). Перш за всі ці антени відрізняються своїми розмірами і коефіцієнтом підсилення.

Антени для зовнішнього застосування більші за розмірами. Високий коефіцієнт підсилення в таких антенах досягається за рахунок вузької головної

пелюстки в ДС. Зовнішні антени застосовуються, як правило, для зв'язку двох бездротових мереж, які знаходяться на значній відстані одна від одної. Дві таких антени встановлюються в зоні прямої видимості і важливо, щоб кожна з них знаходилась в зоні головної пелюстки ДС іншої антени. Антени для внутрішнього використання менші за розмірами і мають більш низький коефіцієнт підсилення.

Всі точки доступу стандарту 802.11b/g комплектуються штатними мініатюрними штирьовими антенами, які можуть бути як зйомними, так і стаціонарними. Ця антена являє собою найпростіший варіант антени – чвертьхвильову несиметричну вібраторну антену. Довжина хвилі в діапазоні від 2400 до 2483,5 МГц варіюється від 12,12 до 12,49 см, а чверть довжини хвилі приблизно дорівнює 31 мм. Тривимірна ДС такої антени представлено на рис. 1.12.

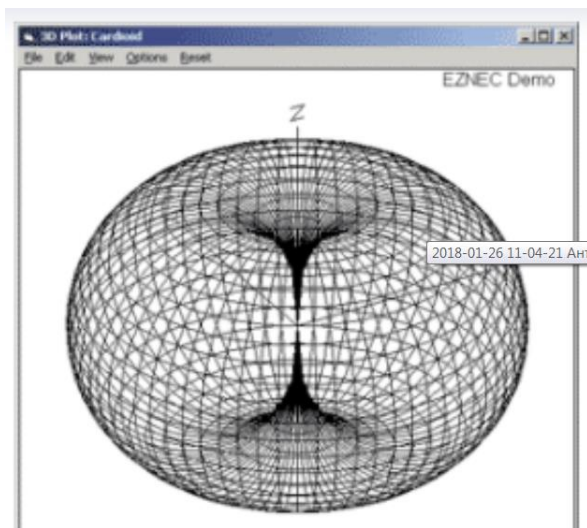


Рис. 1.12. 3D ДС чвертьхвильового несиметричного вібратора



Рис. 1.13. Антена D-Link ANT24-0700

Очевидно, що чвертьхвильовий несиметричний вібратор і його модифікації хоча і є найбільш розповсюдженими для Wi-Fi пристроїв, але не представляють всього різноманіття можливих конструкцій Wi-Fi антен. Розглянемо ті конструкції, які знайшли своє втілення у виробництві [33].

Антена D-Link ANT24-0700 (рис. 1.13) – варіант штирьової антени для використання всередині приміщення. Як і будь-яка штирьова антена, ANT24-0700 є всеспрямованою в горизонтальній площині. Але від штатних штирьових антен,

якими комплектуються більшість точок доступу, її відрізняє високий коефіцієнт підсилення, який дорівнює 7 дБі. Висота антени (з підставкою) становить 326 мм, а її діаметр – 9 мм. З технічної документації відомо, що ширина ДС у вертикальній площині дорівнює 24°.

TP-Link TL-ANT2406A (рис. 1.14) – мініатюрна спрямована антена для внутрішнього використання. Згідно з технічною документацією TL-ANT2406A має коефіцієнт підсилення 6дБі.

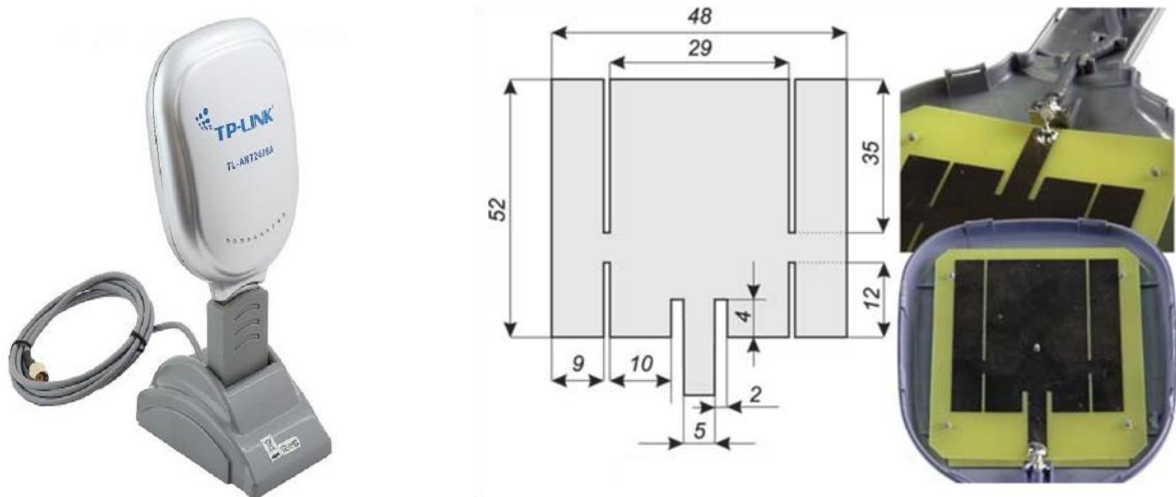


Рис. 1.14. Антена TP-Link TL-ANT2406A

У якості випромінювального елемента в цій антені використовується прямокутна металева пластина, в якій зроблені невеликі розрізи. Випромінююча площа знаходиться на відстані 4 мм від прямокутного екрана-рефлектора, розміри якого співпадають з розмірами випромінювача.

TP-Link TL-ANT2409A (рис. 1.15) – антена Wi-Fi для зовнішнього користування. Заявлений коефіцієнт підсилення становить 9 дБі. Внутрішня конструкція антени досить проста. Над квадратним заземленим екраном на висоті 7 мм розташований випромінюючий елемент у вигляді металевого прямокутника. З'єднання випромінюючого елемента з коаксіальним кабелем реалізовано зі зворотного боку екрану, причому для узгодження фідера з антеною використовується металізована смужка певної конфігурації.

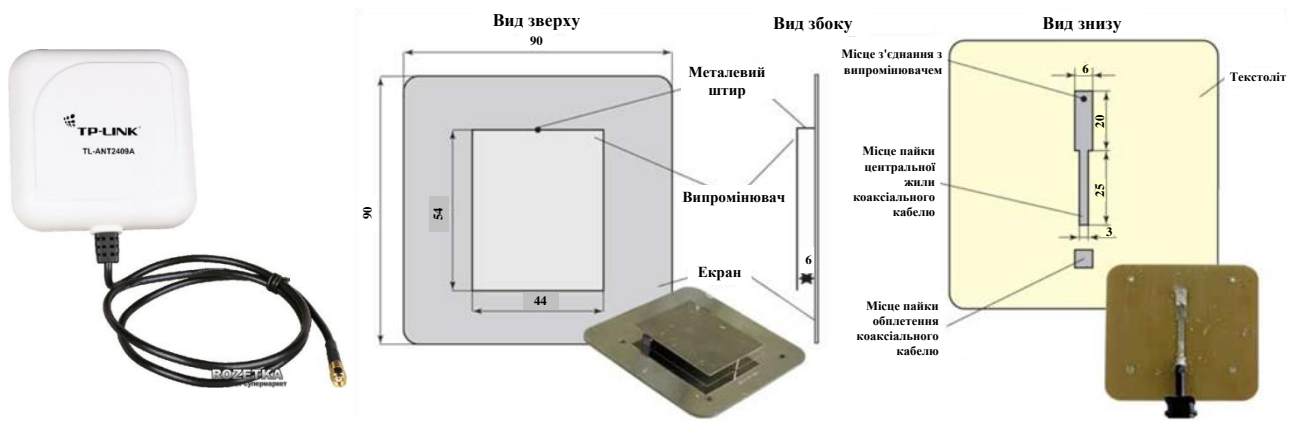


Рис. 1.15. Антена TP-Link TL-ANT2409A

TP-Link TL-ANT2414A (рис. 1.16) – спрямована антена TP, яка також призначена для зовнішнього використання. Однак габарити даної антени дозволяють встановлювати її і всередині приміщення. Відповідно до технічної документації, антена TL-ANT2414A має коефіцієнт посилення 14 дБі.

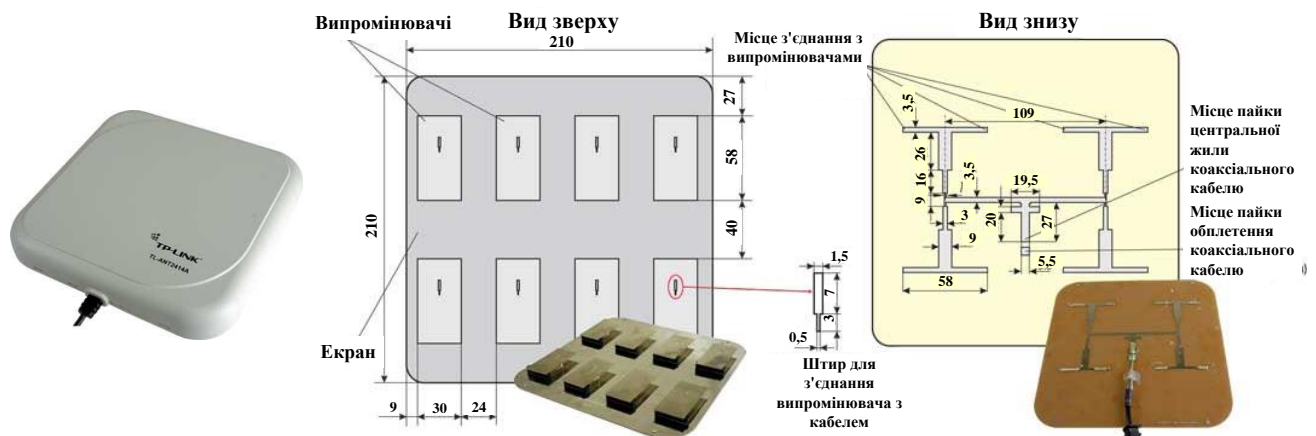


Рис. 1.16. Антена TP-Link TL-ANT2414A

Над металевим заземленим квадратним екраном (металізований текстоліт) в два ряди розташовані вісім випромінюючих елементів, що представляють собою металеві прямокутники. Відстань між випромінюючими елементами і екраном становить 7 мм. Підводка фідера до випромінюючих елементів підводиться зі зворотного боку екрану.

TP-Link DWL-R60AT (рис. 1.17) – спрямована антена, яка призначена для внутрішнього використання. Вона відноситься до розряду мініатюрних панельних антен – її габарити складають всього 80x85x12,8 мм. Антена передбачає

безпосереднє (без використання кабелю) підключення до точки доступу за допомогою роз'єму SMA.

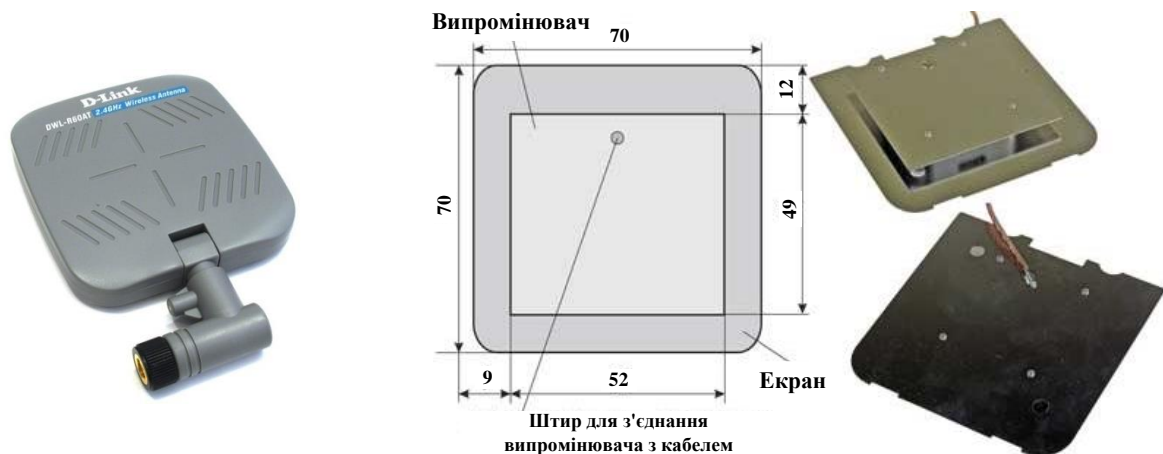


Рис. 1.17. Антена TP-Link DWL-R60AT

Відповідно до технічної документації, антена D-Link DWL-R60AT має коефіцієнт підсилення 6 дБі. Крім того відомо, що ширина діаграми спрямованості у вертикальній площині складає у неї 90° , а ширина діаграми спрямованості в горизонтальній площині – 60° . Внутрішня конструкція цієї антени досить проста і мало чим відрізняється від конструкції антени TP-Link TL-ANT2409A.

Висновок

Отже, після розгляду декількох моделей антен можна констатувати, що всеспрямовані антени влаштовані приблизно однаково і дуже просто. Якщо антена відноситься до панельного типу, то її конструкція включає екран і випромінювач, виконаний у формі прямокутника і встановлений на деякій відстані від екрану. Відмінності між антенами полягають лише в розмірах випромінювача і екрану, а також в відстані між ними. У антенах, призначених для використання всередині приміщень, є один випромінювач, а антени, призначені для застосування поза приміщеннями, можуть містити кілька випромінювачів. Відзначимо також, що вартість усіх антен явно завищена і не зрозуміло чому. Тому було прийнято рішення про моделювання простої конструкції для спрямованої антени з використанням одного і чотирьох елементів.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА ОДИНАРНОЇ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕНИ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ

2.1. Принципи побудови мікросмужкової патч-антени

Для методології проектування мікросмужкової патч-антени, яка буде представлена в цьому розділі, було використано представлення мікросмужкової антени як відрізка мікросмужкової лінії передачі.

Процедура проектування мікросмужкової патч-антени містить ретельний вибір матеріалу діелектричної підкладки, на якій будується антена, та її товщини. Для того щоб отримати високу ефективність випромінювання та спрямованість, необхідно, щоб відносна діелектрична проникність діелектричного матеріалу $\epsilon_r \leq 3$. Товщина діелектричного матеріалу підкладки h повинна бути $h \leq 1,5$ мм для антен з робочою частотою менше за 10 ГГц [14]. Отже, у якості діелектричного матеріалу підкладки ідеально підходить матеріал Rogers RT5880, параметри якого $\epsilon_r = 2,2$ і $h = 1,5$ мм. Товщину діелектричної підкладки можна вибрати за наступною формулою, якщо відома робоча частота f_0 антени [34],

$$h \leq \frac{0,3c}{2\pi f_0 \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.1)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м – швидкість світла.

На рис. 2.1 зображено конструкцію одинарної досліджуваної мікросмужкової антени з лінійною поляризацією, яка живиться за допомогою коаксимальної лінії передачі [35].

Ширину патч-елементу знаходимо, використовуючи формулу

$$w = \frac{c}{2f_0} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}. \quad (2.2)$$

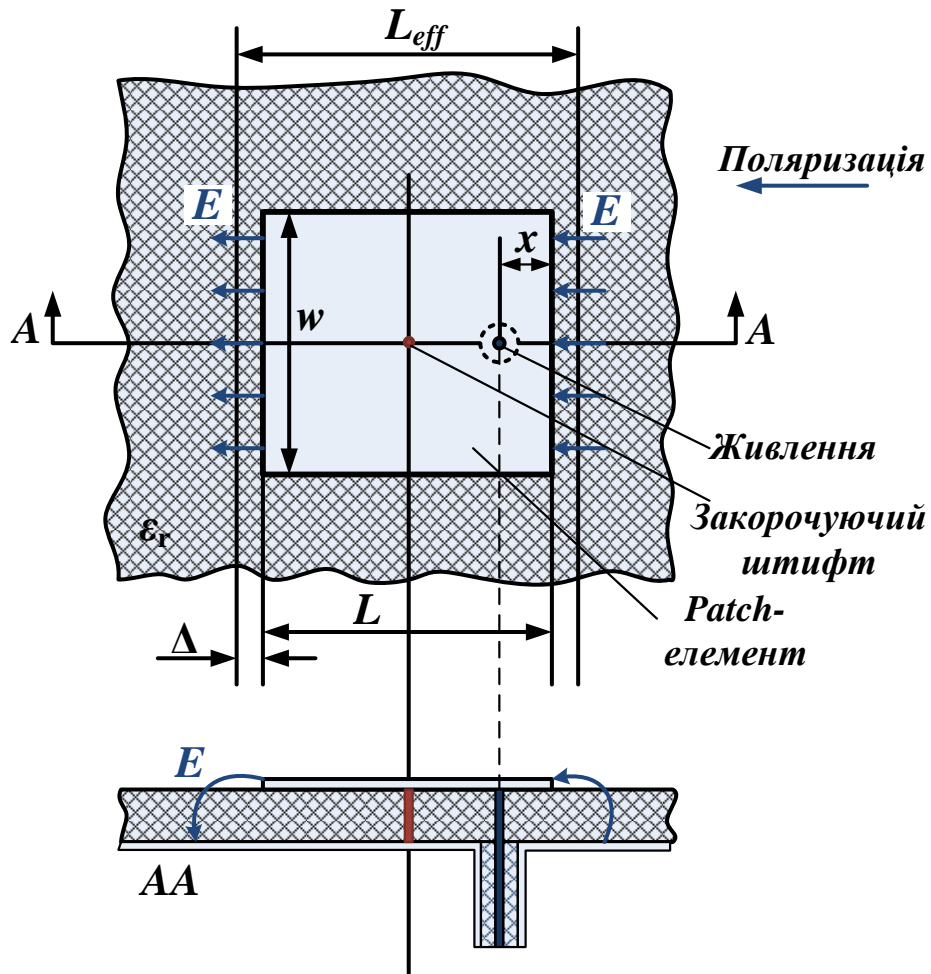


Рис. 2.1. Конструкція одинарної прямокутної мікросмушкової антени

Електричне поле зазнає вигину по краях патч-елементу. Це робить електричні розміри мікросмушкової патч-антени ширшими в порівнянні з фізичними розмірами. Цей ефект враховується в резонансній частоті у вигляді ефективної діелектричної проникності ϵ_{eff} , яка розраховується за наступною формулою

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{w} \right)^{-1/2}. \quad (2.3)$$

Збільшення електричної довжини патч елемента (ΔL) можна отримати за допомогою формули

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{eff} + 0.3)(w/h + 0.262)}{(\epsilon_{eff} - 0.258)(w/h + 0.813)}. \quad (2.4)$$

Таким чином, ефективну довжину патч-елементу L_{eff} та фізичну довжину L можна отримати, використовуючи вирази:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} = L + 2\Delta L, \quad (2.5)$$

$$L = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{eff}}} - 2\Delta L. \quad (2.6)$$

Точку підключення коаксіального кабелю з опором 50 Ом для гарного узгодження з вхідним опором патч-елементу знаходимо, користуючись наступними формулами:

- вхідний опір на ребрі антени

$$R_p = \frac{1}{2G}, \quad (2.7)$$

де $G = \frac{\pi w}{W_c \lambda_0} \left[1 - \frac{(kh)^2}{24} \right]$ – випромінююча провідність; $W_c = 120\pi$ Ом – хвильовий опір середовища (вільний простір); λ_0 – довжина хвилі у вільному просторі; $k = 2\pi/\lambda_0$ – хвильове число.

- вхідний опір патч-антени

$$R_{вх} = R_p \cos^2 \frac{\pi x}{L}, \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{2}, \quad (2.8)$$

де x – відстань від ребра антени.

- точка підключення з необхідним вхідним імпедансом:

$$x = \frac{L}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{R_{вх}}{R_p}}. \quad (2.9)$$

2.2. Програмні пакети для моделювання електродинамічних середовищ

Існує багато програмних пакетів, які дозволяють відносно просто будувати і досліджувати різноманітні конструкції випромінюючих систем. Розберемо детальніше деякі з них.

Mmana Gal – програма для розрахунку та аналізу антен методом моментів [36-38] (рис. 2.2). Обчислювальною основою програми є модифікований під сучасні умови MININEC3.

Можливості MMANA-GAL :

1. Розраховувати будь-які типи антен, які можна представити у вигляді довільного набору проводів;
2. Здійснювати розрахунок антени на будь-якій частоті;
3. Створювання і редагування опису антени як по зазначеним цифровим координатам, так і в графічному редакторі;
4. Створювати таблиці для всіх змінних розрахункових даних;
5. Розраховувати котушки, контур, узгоджувальні пристрої на LC елементах, узгоджуючих пристроїв на відрізках довгих ліній, індуктивності і ємності, що виконані з відрізків коаксіального кабелю.
6. Не має обмежень по взаємному розташуванню проводів.
7. Максимальне число: проводів – 512, джерел – 64, навантажень – 100.

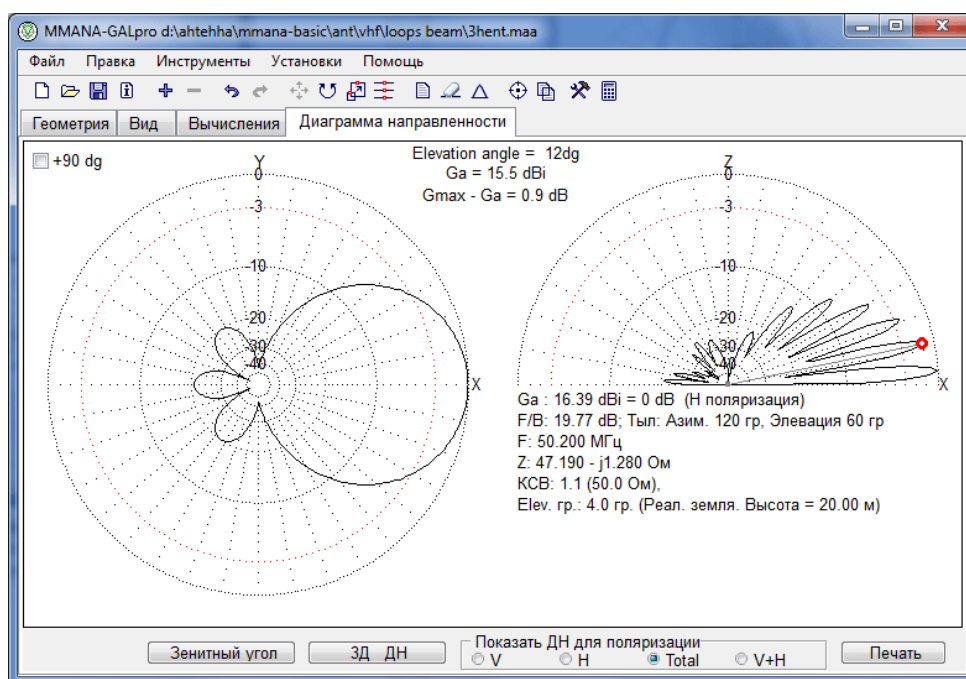


Рис. 2.2. Інтерфейс програми Mmana – Gal

Разом з перевагами програми існують і недоліки – складність побудови апертурних і планарних антен.

GST Microwave Studio – потужна програма тривимірного моделювання електромагнітного поля. Програма використовує різні методи розрахунку: розрахунок перехідного процесу в часовій області [39-41], аналіз в частотній

області, метод знаходження власних частот. Можливе моделювання складних НВЧ структур: фільтрів, антен, циркуляторів, аттенюаторів і т.д. Інтерфейс програми CST Microwave Studio зображено на рис. 2.3.

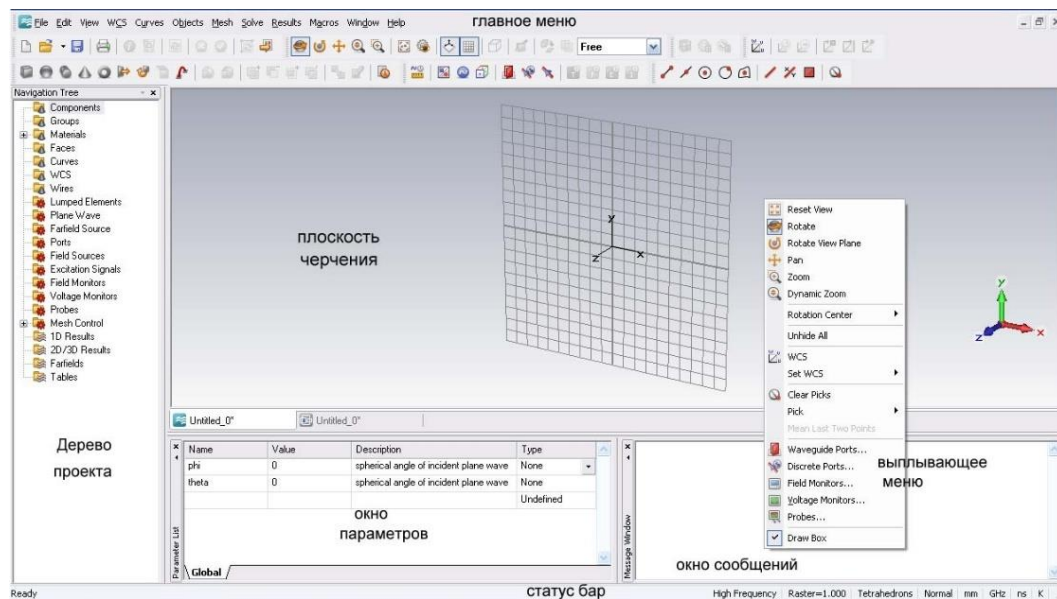


Рис. 2.3. Інтерфейс програми CST Microwave Studio

CST Microwave Studio – це потужний комплекс, який призначений для тривимірного моделювання об'єктів різноманітної форми. В процесі проектування НВЧ пристроїв конструкції в тривимірному просторі створюються за допомогою креслення найпростіших геометричних форм і виконання логічних операцій над ними. Також є широкі можливості імпорту моделей з інших програм. Після того як конструкція накреслена, задані граничні умови і визначено місце розташування джерел збудження, виконується розбиття всього простору на сітку, а потім розраховується поле в кожній точці простору.

Базовий метод розрахунку в CST Microwave Studio – метод кінцевого інтегрування метод просторової дискретизації, в якому простір завдання розбивається на дискретні осередки (сітку). При цьому у вирішальному пристрої реалізується метод кінцевих різниць у часовій області як окремий випадок методу кінцевого інтегрування. Важливою особливістю розрахунку в часовій області – пропорційна залежність необхідних обчислювальних ресурсів від розмірів структури.

Ansoft HFSS – пакет програм, який обчислює багатомодові S-параметри і електромагнітні поля в тривимірних пасивних структурах довільної форми [42-44].

HFSS першою з комерційних програм показала всю міць електродинамічних методів розрахунку. Вона поставила на нову основу та принципи навчання такого складного предмету, як електродинаміка. Ця програма використовує для вирішення рівнянь електродинаміки метод кінцевих елементів (Finite Element Method, FEM), що включає адаптивне генерування і розподіл осередків. Рішення для електромагнітного поля, знайдені з рівнянь Максвелла, дозволяють точно визначити всі характеристики НВЧ пристрої з урахуванням виникнення і перетворення одних типів хвиль в інші, втрат в матеріалах і на випромінювання і т. Д.

Ansoft HFSS надає можливості для моделювання антен, подільників потужності, схем комутації, хвилеводних елементів, фільтрів НВЧ і тривимірних неоднорідностей, опис яких зводиться до створення креслення структури (рис. 2.4), точному завданням матеріалу, ідентифікації портів і необхідних характеристик. В результаті розрахунку знаходяться поля всередині і поза структурами, а також багатомодові S-параметри.

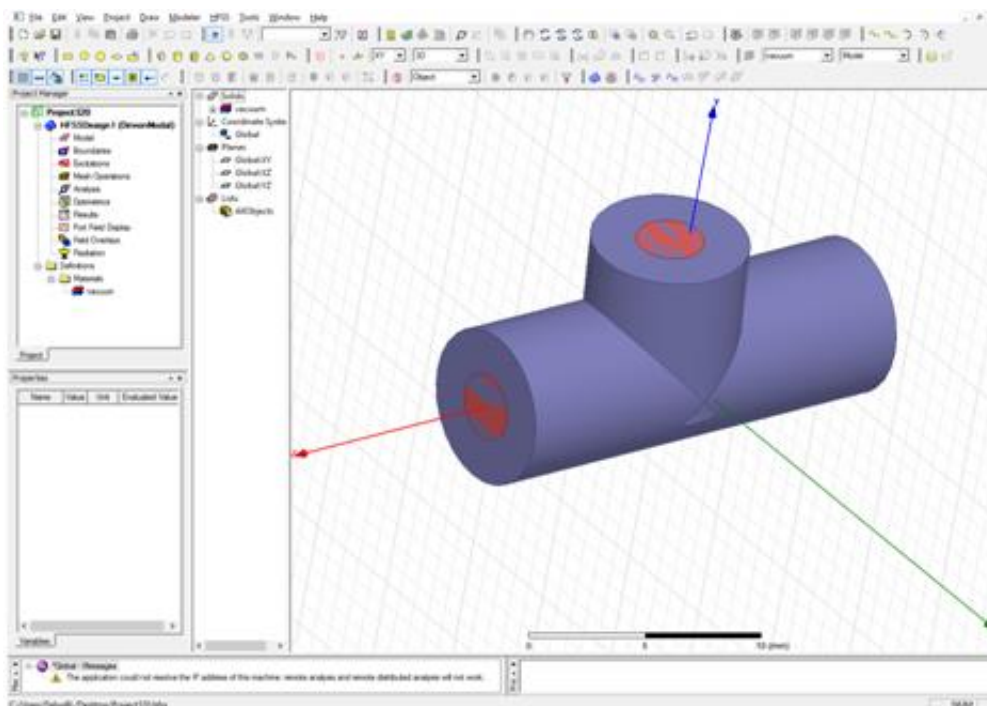


Рис. 2.4. Інтерфейс програми HFSS

Розраховані S-параметри можуть використовуватися далі в програмах аналізу лінійних і нелінійних схем, зокрема, в програмі Microwave Office, Serenade Ansoft або ADS.

HFSS поки здійснює аналіз виключно лінійних структур. Тому для моделювання нелінійних вузлів (підсилювачі, генератори, детектори) доводиться їх розділяти на лінійну частину, що аналізується в рамках HFSS і нелінійну, яка моделюється іншими програмами за допомогою апарату еквівалентних схем. Подібний розподіл завдань в цілому знижує точність опису всього пристрою.

Потужним засобом підвищення ефективності є адаптивний метод ущільнення сітки: початкові тетрадральні чарунки створюються на основі структури, створеної з базових елементів в бібліотеці HFSS. Це початкове розбиття надає грубу інформацію про поле, виділяючи області з високою його напруженістю або з великими градієнтами. Розбиття на осередки потім ущільнюється тільки там, де поле зазнає різкої зміни, зменшуючи обчислювальні витрати при поліпшенні точності. Якщо необхідно, користувачі можуть вести адаптацію вручну.

Головний метод в програмі HFSS є метод кінцевих елементів – чисельна процедура вирішення завдань, сформульованих у вигляді диференціального рівняння або варіаційного принципу. Метод кінцевих елементів відрізняється від класичних методів Рітца і Гальоркіна тим, що апроксимуюча функція являється лінійною комбінацією безперервних кусково гладких фінітних функцій.

Для моделювання розроблювальної в даній роботі антени дана програма не була обрана. А програмі HFSS дуже легко і зручно моделювати лінії передачі і різні пристрої на них. Однак моделювання антен має деякі складності. Наприклад, необхідність завдання куба з параметрами середовища, в якій розташована антена.

FEKO (рис. 2.5) призначена для вирішення широкого кола завдань, які пов'язані з проектуванням НВЧ пристроїв і антен, розсіюванням електромагнітних хвиль на складних об'єктах, поширенням радіохвиль в міських умовах і т.д.

Головною особливістю програми FEKO [45-47] і те, що відрізняє її від інших комерційних програм електромагнітного проектування, є вдале поєднання базового методу моментів з наближеними аналітичними методами – методом фізичної

оптики і однорідної теорії дифракції. Це дозволяє подолати головний недолік програм комп'ютерного моделювання ВЧ структур: великі витрати ресурсів при моделюванні об'єктів з розмірами, які набагато більше ніж довжина хвилі. В результаті з'являється можливість вирішення таких завдань, як розсіювання радіохвиль на літаку або кораблі і поширення радіохвиль в міських умовах з хорошою точністю.

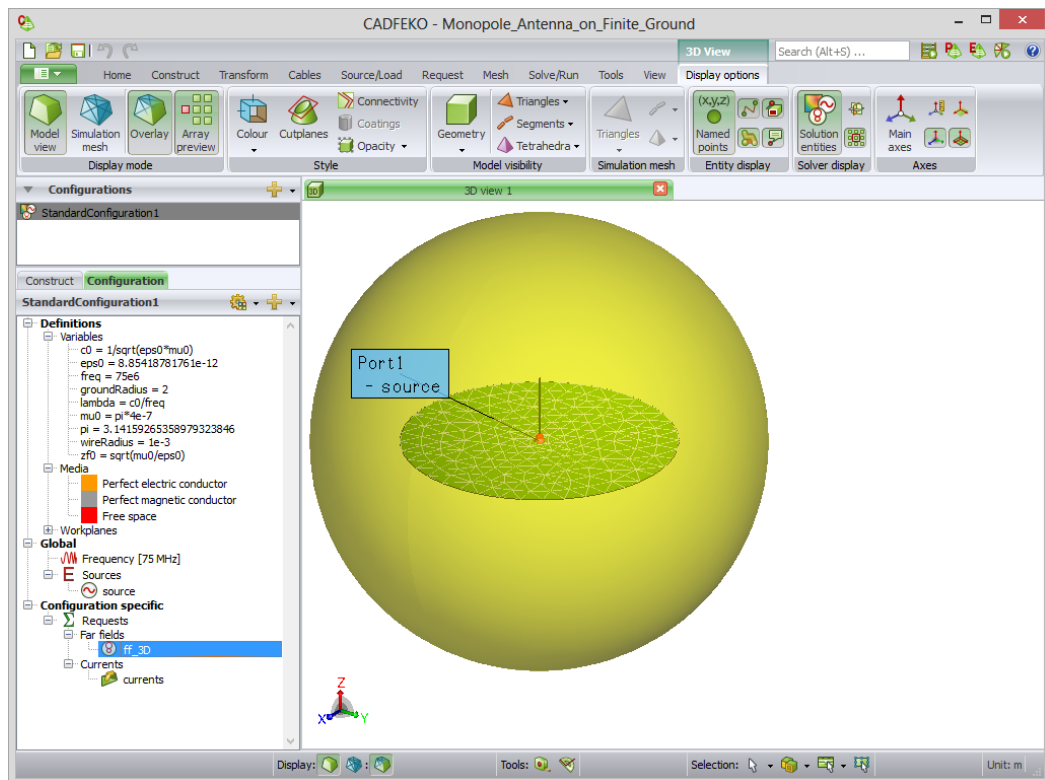


Рис. 2.5. Інтерфейс програми FEKO

Базовим методом FEKO є метод моментів – спосіб вирішення інтегральних рівнянь. На відміну від методу скінченних елементів, де простір розрахунку замкнутий і обмежений, метод, в основі якого лежить рішення інтегральних рівнянь, не обмежує величину завдання. Метод моментів є базовим, але не єдиним методом, що реалізовані в FEKO.

Ядром програми FEKO є алгоритм розв'язання тривимірних задач електродинаміки в частотній області. Для вирішення електродинамічних задач використовуються три методи, зазначених вище.

Метод моментів передбачає декілька етапів вирішення електродинамічної задачі. Металеві елементи аналізованої структури замінюються еквівалентними

електричними поверхневими струмами. Потім вирішується завдання збудження навколишнього середовища даними струмами. При цьому середовище може бути складним, тобто містити магніто-діелектричні шари.

Рішення задачі збудження середовища здійснюється за допомогою апарату тензорних функцій Гріна. Після того, як завдання збудження вирішена і знайдено електричне поле, використовуються граничні умови на металевих елементах. Ця умова використовується для визначення еквівалентних струмів. Важливим моментом рішення є розбиття поверхні металу на елементарні площадки і апроксимація електричного струму в межах майданчика.

У програмі FEKO для апроксимації струмів використовуються постійні, лінійні і трикутні функції. Граничні умови на поверхні металу в методі моментів виконуються наближено, а саме в декількох точках в межах кожної елементарної площадки. В результаті завдання граничних умов в дискретних точках виходить система лінійних алгебраїчних рівнянь коефіцієнтів при базисних функціях, які мають зміст амплітуд струмів в межах елементарної площадки.

У програмі FEKO елементарна площадка має трикутну форму, що дозволяє добре описувати навіть викривлені поверхні. Дана програма має зручний інтерфейс і достатньо великі можливості в моделюванні антенних систем. Тому FEKO була мною обрана для моделювання мікросмужкової антени і антенної решітки, яка буде досліджена в даній дипломній роботі.

2.3. Моделювання одинарної мікросмужкової патч-антени

Використовуючі формули для розрахунку розмірів мікросмужкової прямокутної патч-антени, які було наведено в попередньому підрозділі, розраховуємо параметри патч антени для роботи на частоті Wi-Fi системи 2,4 ГГц. Як було сказано вище, вибираємо підкладку для антени Rogers RT5880 з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 2,2$ і товщиною $h = 1,5$ мм. Отримуємо розміри, які зведено в табл 2.1 і зображено на рис. 2.6.

Розміри одинарної мікросмушкової антени прямокутної форми

Розмір	Товщина h , мм	Ширина w , мм	Довжина L , мм	Точка підключення живлення x , мм	Вхідний опір на ребрі антени, Ом
Значення	1,5	49	41	13	151,825

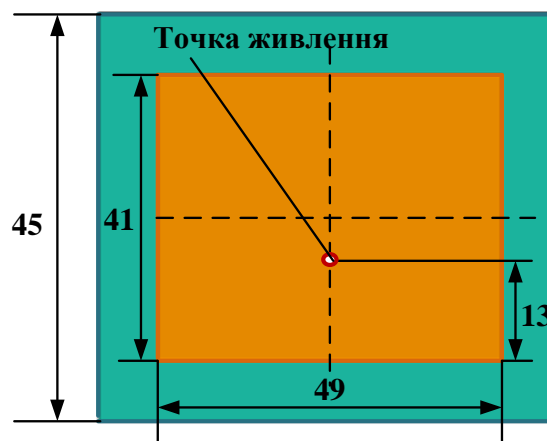


Рис. 2.6. Розміри одинарної мікросмушкової антени прямокутної форми

Після моделювання розрахованої конструкції антени отримуємо графіки основних параметрів: діаграми спрямованості (рис. 2.7, 2.8), коефіцієнту підсилення КП та коефіцієнту спрямованої дії КСД (рис. 2.9), комплексного вхідного опору (рис. 2.10), коефіцієнту стоячої хвилі за напругою КСХН (рис. 2.11), коефіцієнту відбиття (рис. 2.12).

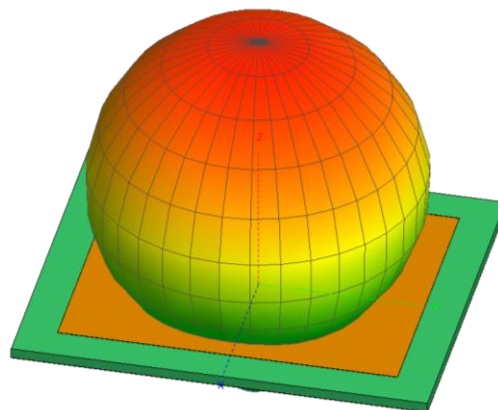


Рис. 2.7. 3D діаграма спрямованості одиночного елемента мікросмушкової антени на центральній частоті роботи 2,4 ГГц

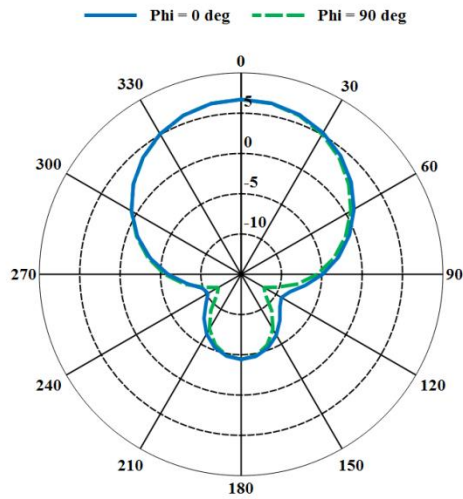


Рис. 2.8. Діаграма спрямованості одиночного елемента мікросмушкової антени на центральній частоті роботи 2,4 ГГц в полярній системі координат

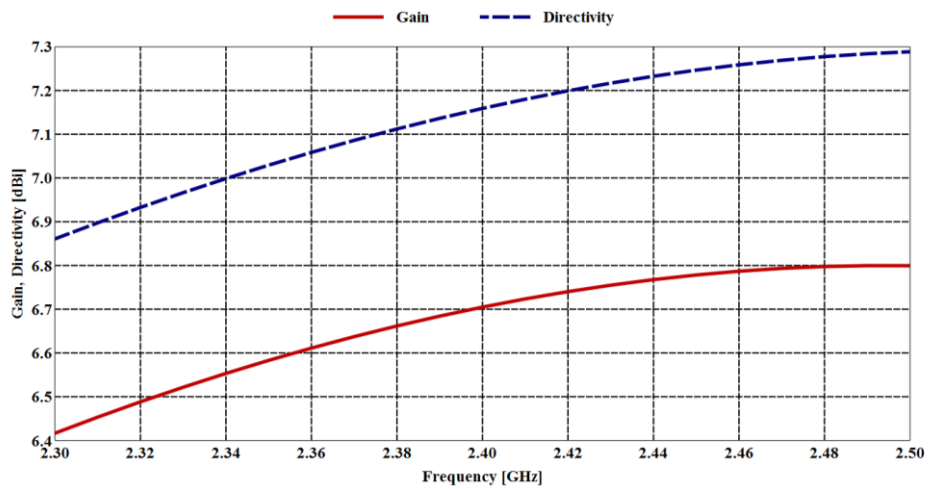


Рис. 2.9. Залежність КП та КСД одиночного елемента мікросмушкової антени від частоти роботи

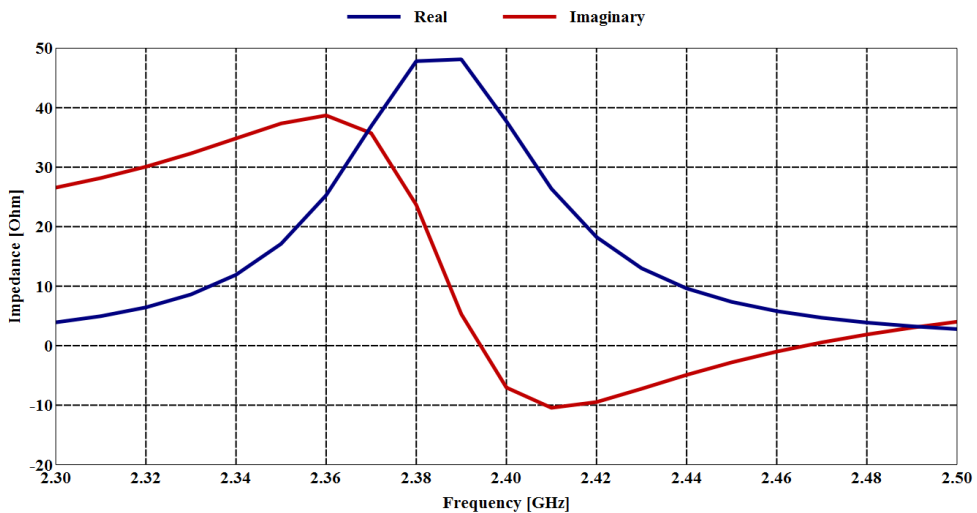


Рис. 2.10. Залежність вхідного опору одиночного елемента мікросмушкової антени від частоти роботи

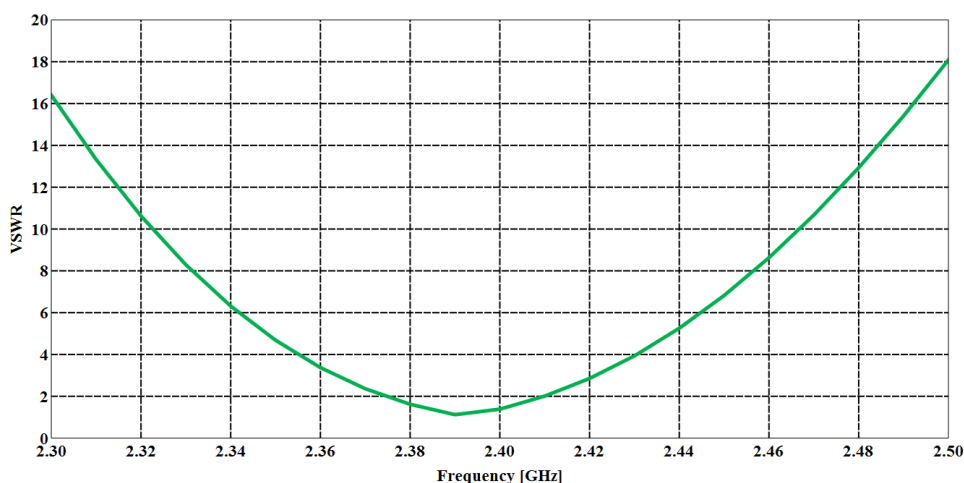


Рис. 2.11. Залежність коефіцієнту стоячої хвилі за напругою одиночного елемента мікросмушкової антени від частоти роботи

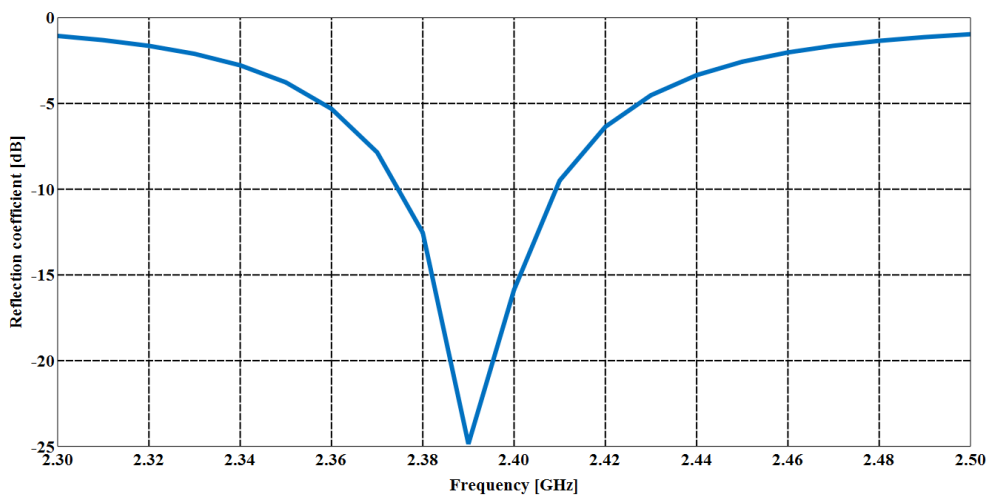


Рис. 2.12. Залежність коефіцієнту відбиття одиночного елемента мікросмушкової антени від частоти роботи

Коефіцієнт відбиття, отриманий на частоті 2,4 ГГц, становить -15 дБ, що менше -10 дБ, і, отже, існує належне узгодження імпедансу між лінією живлення та антеною. Значення КСХН (VSWR) повинно знаходитися в діапазоні від 1 до 2, а отриманий коефіцієнт становить 1,5. Отримана ДС вказує на те, що антена має спрямованість і ширина її головної пелюстки за рівнем половинної потужності випромінювання становить близько 85 градусів. Коефіцієнт підсилення і коефіцієнт спрямованої дії на центральній частоті роботи дорівнюють 6,7 дБі та 7,16 відповідно. Коефіцієнт корисної дії випромінювання може бути розрахований за допомогою формули [10]

$$\eta = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{6,7}{7,16} = 0,9357 \text{ або } \eta \approx 94\%.$$

З отриманих результатів можна сказати, що розроблена одинарна мікросмужкова патч-антена має оптимальну ефективність випромінювання і отримане випромінювання є спрямованим.

Висновок

У даному розділі було розглянуто існуючі програмні пакети для моделювання електродинамічних процесів та їхні можливості при моделюванні антенних систем. Було обрано програмний пакет FEKO для моделювання мікросмужкової антени, зі зручним інтерфейсом та великими можливостями.

Було розраховано параметри одинарної мікросмужкової прямокутної антени, яка буде використана в антенній решітці для Wi-Fi системи. В результаті моделювання було отримано якісні характеристики роботи одинарної мікросмужкової прямокутної антени. Коефіцієнт стоячої хвилі нижче 2 (1,39) в робочій смузі частот, що дає гарне узгодження з лінією живлення в 50 Ом. Коефіцієнт підсилення сягає 6,7 дБі а ККД становить 94 %.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСМУЖКОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ ДЛЯ WI-FI СИСТЕМ

3.1. Проектування мікросмужкової антенної решітки

Процедура проектування мікросмужкової антенної решітки розмірністю 2×2 подібна до проектування конструкції одинарної мікросмужкової антени, але тут чотири патч-елементи живляться мікросмужковою лінією, а вся антена живиться коаксіальною лінією. Схема запропонованої мікросмужкової AP показана на рис. 3.1.

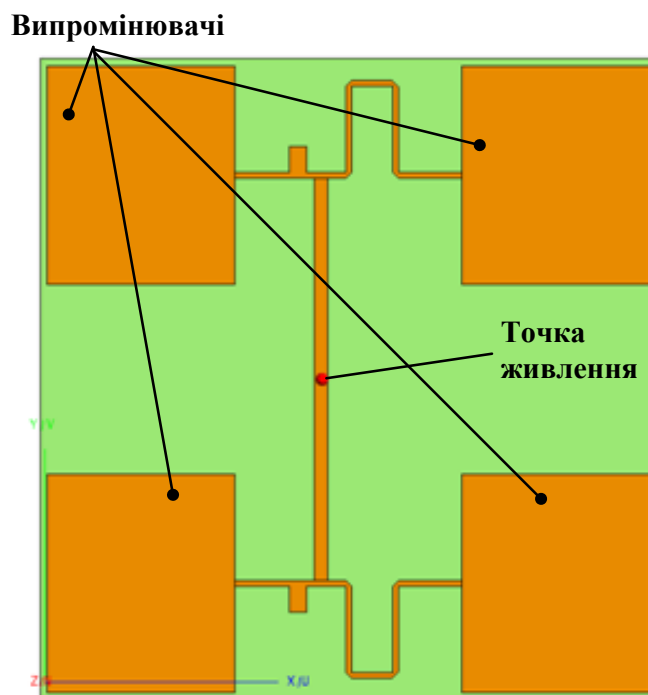


Рис. 3.1. Конструкція мікросмужкової AP для систем Wi-Fi

У попередньому розділі було розраховано основні розміри одиночного патч-елементу мікросмужкової AP для заданого діапазону частот і матеріалу підкладки.

Відстані між центрами патч-елементів в AP по горизонталі і вертикалі становлять $3/4$ центральної довжини хвилі робочого діапазону.

В даному розділі необхідно приділити увагу узгодженню патч-елементів АР з мікросмужковими лініями живлення, а потім – з коаксіальною лінією живлення.

Для гарного узгодження АР з лінією живлення необхідно вирішити наступну задачу – розрахунок ширини смужкових ліній b у відповідності із заданим вхідним опором $Z_{\text{вх}}$, шириною h і матеріалом підкладки ϵ_r . Цю процедуру треба зробити два рази: перший - для узгодження патч-елементів АР з мікросмужковими лініями (у попередньому розділі для живлення патч-елементів була використана стандартна коаксіальна лінія); другий – для узгодження загальної мікросмужкової лінії живлення з 50-Омним коаксіальним кабелем.

Перш за все, обчислюються три допоміжні величини:

$$A = \frac{Z_{\text{вх}}}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \left(0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right), \quad (3.1)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_{\text{вх}}\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3.2)$$

$$C = \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}. \quad (3.3)$$

Наступним кроком буде обчислення ширини смужки

$$\frac{b}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & \text{якщо } \frac{b}{h} < 2; \\ 2\pi \left[B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} C \right], & \text{якщо } \frac{b}{h} > 2. \end{cases} \quad (3.4)$$

Використовуючи формули (3.1)-(3.4), спочатку розрахуємо ширину смужкової лінії для живлення патч-елементів АР. У попередньому розділі було знайдено, що вхідний опір на ребрі антени дорівнює 151,825 Ом. Підставляючи це значення і відомі значення матеріалу підкладки, отримуємо ширину мікросмужкової дінії живлення оклемого патч-елементу АР 0,4 мм.

Аналогічно отримуємо ширину загальної мікросмужкової лінії живлення для вхідного опору в 50-Ом. Отримуємо – 4,7 мм.

3.2. Моделювання мікросмушкової антенної решітки

Після моделювання розрахованої конструкції АР отримуємо графіки основних параметрів: діаграми спрямованості (рис. 3.2, 3.3), КП та КСД (рис. 3.4), комплексного вхідного опору (рис. 3.5), коефіцієнту стоячої хвилі за напругою КСХН (рис. 3.6), коефіцієнту відбиття (рис. 3.7).

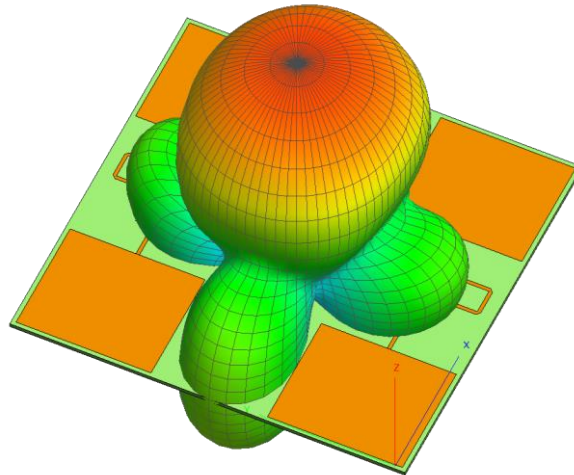


Рис. 3.2. 3D діаграма спрямованості мікросмушкової АР на центральній частоті роботи 2,4 ГГц

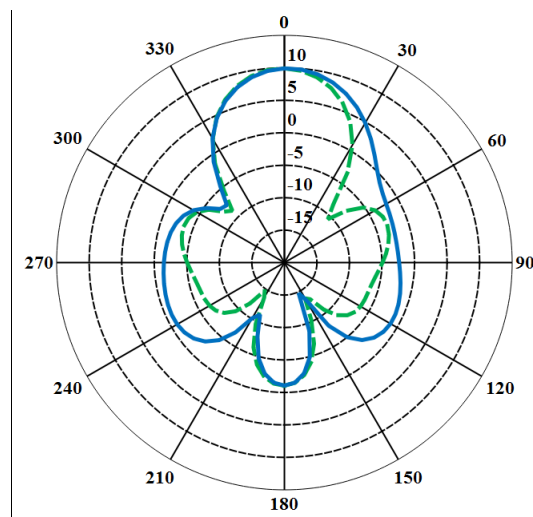


Рис. 3.3. Діаграма спрямованості мікросмушкової АР на центральній частоті роботи 2,4 ГГц в полярній системі координат

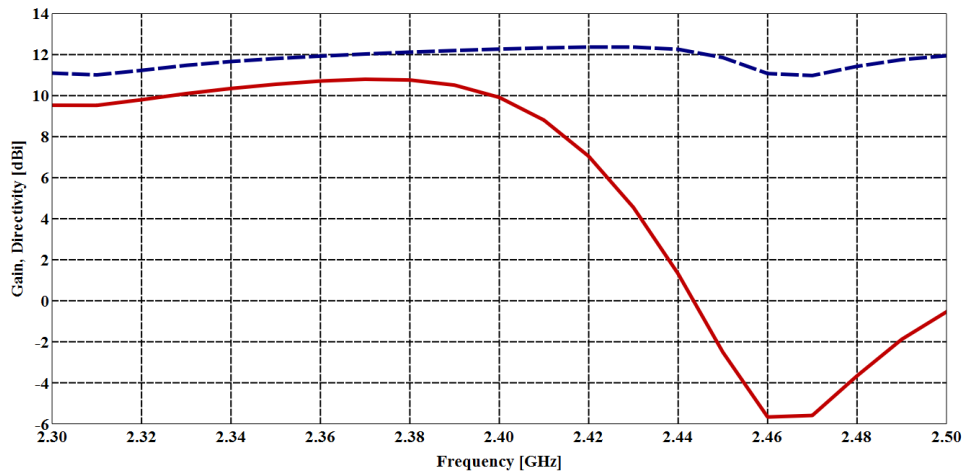


Рис. 3.4. Залежність КП та КСД мікросмушкової АР від частоти роботи

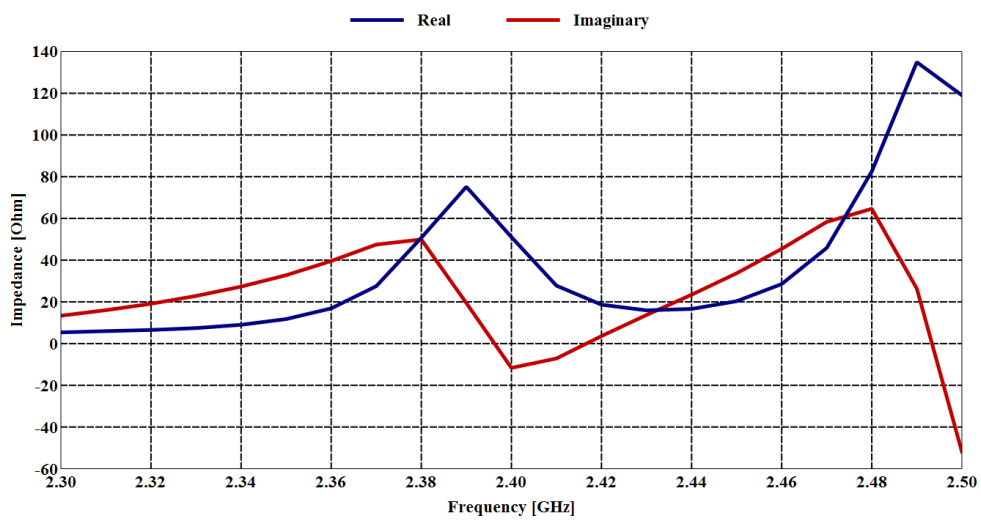


Рис. 3.5. Залежність вхідного опору мікросмушкової АР від частоти роботи

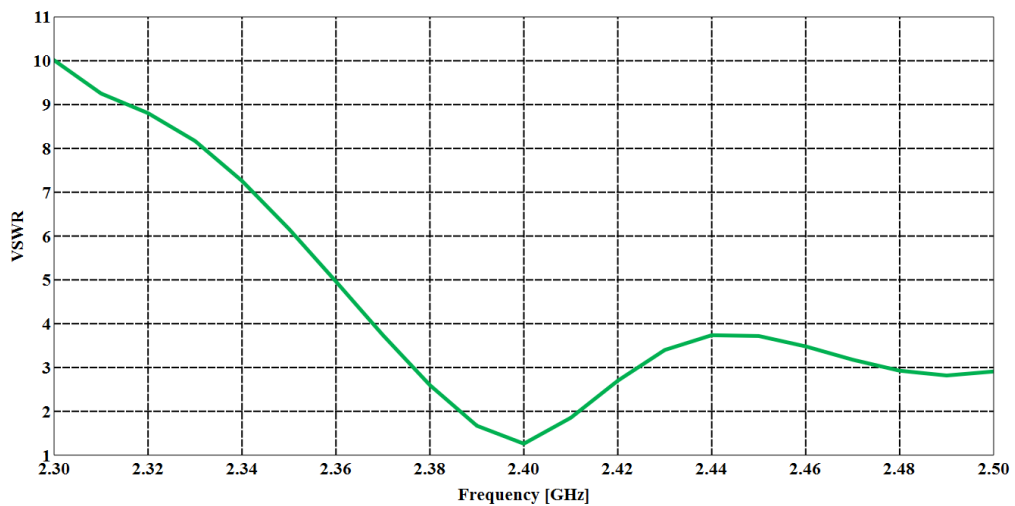


Рис. 3.6. Залежність КСХН коефіцієнту стоячої хвилі за напругою мікросмушкової АР від частоти роботи

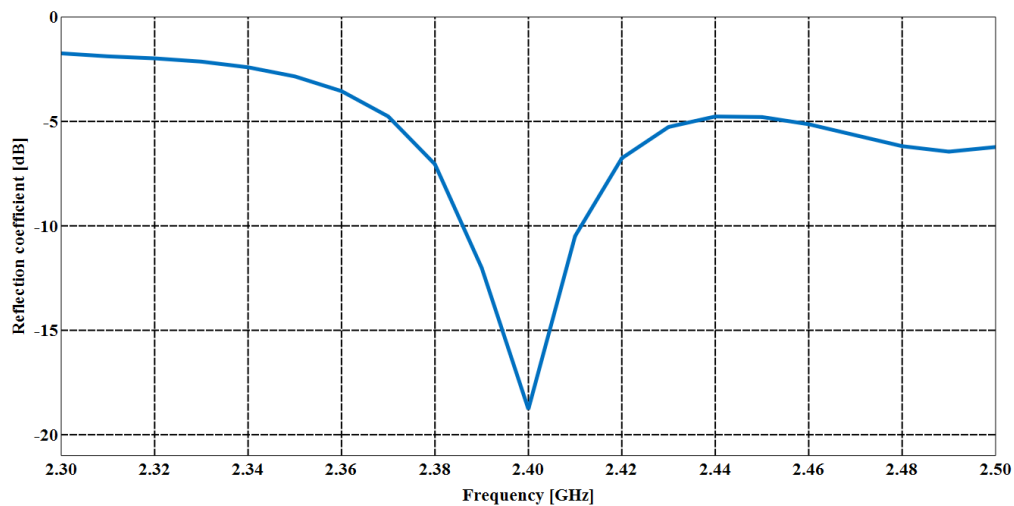


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнту відбиття мікросмушкової АР від частоти роботи

Коефіцієнт корисної дії системи патч-випромінювачів

$$\eta_{AP} = \frac{G(\theta, \varphi)}{D(\theta, \varphi)} = \frac{9,91}{12,3} = 0,81 \text{ або } \eta \approx 81\% .$$

Для більш повного сприйняття представимо результати моделювання АР у вигляді порівняльної таблиці (табл. 3.1). Порівняння буде проведене між одинарним патч-елементом, моделювання якого було проведене в попередньому розділі, і АР, яка складається з чотирьох однакових патч-елементів

Таблиця 3.1

Порівняння характеристик одинарного патч-елементу та планарної АР

Параметр	Одиночний патч-елемент	Мікросмушкова АР 2 × 2
Коефіцієнт підсилення ($\theta = 0$ град), дБі	6,7	9,99
Коефіцієнт спрямованої дії ($\theta = 0$ град), дБі	7,2	12,3
КСХН	1,39	1,27
Коефіцієнт відбиття, дБ	-15,8	-18,6
Ширина ДС за половинною потужністю випромінювання, град	82,6	37
ККД випромінювання, %	94	81
Вхідний опір, Ом	37,6-i7,1	51,3-i11,4

3.3. Дальність дії розробленої мікросмушкової антенної решітки

При розрахунку дальності дії розробленої Wi-Fi AP припустимо, що її місце розташування вільне від суттєвих перешкод. Ширину сектору опромінювання розраховуємо, використовуючи ширину ДС за половинною потужністю випромінювання $2\theta_{0,5} = 37^\circ$.

Дальність дії розраховуємо за формулою:

$$P_{\text{вхРПП}} = P_{\text{вихРПД}} + G_1 + G_2 - g_{\phi_1} - g_{\phi_2} - L, \quad (3.5)$$

де $P_{\text{вхРПП}}$ – вхідна потужність Wi-Fi приймача; $P_{\text{вихРПД}}$ – вихідна потужність випромінювання досліджуваної антенної системи (вибираємо 1 Вт або 30 дБм); G_1 – коефіцієнт підсилення досліджуваної антени (беремо значення для середньої частоти 2,4 ГГц – 10 дБі); G_2 – коефіцієнт підсилення Wi-Fi антени ноутбука (зазвичай 0 дБі); g_{ϕ_1} , g_{ϕ_2} – втрати фідерах в приймального та передавального трактів (цими втратами знехтуємо); L – рівень втрат при розповсюдженні радіохвилі.

Для вільного простору рівень втрат при розповсюдженні радіохвилі розраховується за формулою

$$L = 32,45 + 20 \lg r_{km} + 20 \lg f_{MHz}, \quad (3.6)$$

де r_{km} – відстань від передавача до приймача (в кілометрах); f_{MHz} – частота роботи системи (в мегагерцах).

Знайдемо максимальну дальність дії досліджуваної AP. Для початку необхідно знайти мінімальний сигнал на вході приймача Wi-Fi (чутливість приймача) за формулою.

$$P_{\text{вхРППmin}} = Y_{\text{ш}} + Q_{\text{с/ш}}, \quad (3.7)$$

де $Y_{\text{ш}}$ – рівень шумів (для частоти 2,4 ГГц знайдено експериментально $Y_{\text{ш}} = -90$ дБм); $Q_{\text{с/ш}}$ – відношення сигнал/шум для стандарту QAM64 ($Q_{\text{с/ш}} = 25$ дБ).

Використовуючи (3.7), знаходимо:

$$P_{\text{вхРППmin}} = -65 \text{ дБм.}$$

З формули (3.6) знаходимо допустимі втрати при розповсюдженні радіохвилі з врахуванням чутливості приймача Wi-Fi для частоти $f = 2,4$ ГГц:

$$L = 30 + 10 + 0 + 65 = 105 \text{ дБ.}$$

З формули (3.5) знаходимо максимальну дальність передачі:

$$r_{\text{max}} = 10^{\frac{L-20\lg f_i-32,45}{20}} = 10^{\frac{105-20\lg 2400-32,45}{20}} = 1,767 \text{ км.}$$

Висновок

У даному розділі було розраховано параметри чотирьохелементної мікросмушкової антенної решітки для Wi-Fi системи. В результаті моделювання було отримано якісні характеристики роботи мікросмушкової прямокутної АР. Коефіцієнт стоячої хвилі нижче 2 (1,27) в робочій смузі частот, що дає гарне узгодження з лінією живлення в 50 Ом. Коефіцієнт підсилення сягає 10 дБі а ККД становить 81 %. Дальність дії розробленої Wi-Fi антени сягає 1,7 км.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Вступ

Охорона праці – система правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини в процесі праці.

Соціальне значення охорони праці полягає в сприянні росту ефективності суспільного виробництва шляхом безперервного вдосконалення і поліпшення умов праці, підвищення їх безпеки, зниження виробничого травматизму і профзахворювань.

Соціальне значення охорони праці проявляється в зростанні продуктивності праці, збереженні трудових ресурсів і збільшенні сукупного національного продукту.

Збереження трудових ресурсів і підвищення професійної активності працюючих відбувається завдяки покращенню стану здоров'я і подовженню середньої тривалості життя шляхом покращення умов праці, що супроводжується високою трудовою активністю і підвищенням виробничого стажу. Підвищується професійний рівень також завдяки зростанню кваліфікації і майстерності [47].

Економічне значення охорони праці визначається ефективністю заходів з покращення умов і підвищення безпеки праці та є економічним виразом соціальної значущості охорони праці. Тобто, економічне значення охорони праці оцінюється за результатами, отриманими при зміні соціальних показників шляхом впровадження заходів з покращення умов праці: підвищення продуктивності праці; зниження непродуктивних витрат часу і праці; збільшення фонду робочого часу; зниження витрат, пов'язаних з плинністю кадрів через умови праці, тощо.

Економії матеріальних втрат можна досягти шляхом відміни пільг та компенсацій за несприятливі умови праці через недотримання відповідних

санітарно-гігієнічних вимог і правил безпеки до робочих місць. Дотримання таких вимог дає можливість повністю або частково відмінити такі пільги, як: скорочений робочий час і додаткова відпустка; підвищення тарифної ставки та пільгової пенсії; лікувально-профілактичне харчування і безкоштовна видача молока. Всі ці пільги пов'язані зі значними трудовими втратами і супроводжуються виплатами додаткових коштів за фактично не відпрацьований час.

На підприємствах спостерігається висока плинність кадрів серед працівників, робота яких пов'язана з важкою фізичною працею, несприятливими санітарно-гігієнічними умовами, монотонністю виробничого процесу. Із загальної кількості працівників, які звільняються за власним бажанням, від 10 до 25% складають особи, яких не влаштовують несприятливі умови праці [48].

4.2. Аналіз умов праці

4.2.1. Організація робочого місця

Під робочим місцем розуміється частина виробничої площі майстерні, обладнання, матеріали, інструмент, технічна документація та інший інвентар, необхідні для виконання тих чи інших робіт.

Стаціонарні майстерні не мають, як правило, різко вираженою спеціалізації і проводять ремонт досить різноманітних засобів зв'язку. Тому вони мають кілька робочих місць для електромонтажних робіт (по числу штатних майстрів). Кожне з них призначений для ремонту, перевірки і налагодження одного або декількох типів апаратури [49].

Залежно від наявності засобів зв'язку в майстерні можуть бути обладнані такі робочі місця:

- ремонт УКХ радіостанцій;
- ремонт КВ радіостанцій;
- ремонт радіорелейних станцій;
- ремонт телефонної апаратури;
- ремонт телеграфної апаратури;

- ремонт апаратури ущільнення і т.д.

Робоче місце радіомайстрів має забезпечувати максимальну зручність для роботи ремонтника, так як від цього залежать якість і терміни виконання ремонтних робіт.

Площа верхньої кришки столу повинна забезпечити вільне розміщення на ній ремонтної апаратури, паяльника, іншого монтажного інструменту і вимірювальних приладів.

Поверхня кришки столу повинна бути покрита ізоляційним матеріалом (лінолеумом, гетинакс або гумою). У ящиках столу розміщуються матеріали, креслення, довідкова література, технічна документація, кріпильні деталі (гвинти, гайки, шайби, заклепки), матеріали для пайки і т.п. На полицях і під ними, на задній частині кришки столу розміщуються різні вимірювальні прилади, які використовуються в ході ремонту, налагодження і регулювання. Все підводиться живлять напруги рекомендується виводити на щиток харчування, звідки вони розподіляються до споживачів. На цьому ж щитку можуть розміщуватися спеціальний понижуючий трансформатор для забезпечення харчування паяльника, прилади захисту й клема заземлення. Розетки для електроживлення вимірювальних приладів розміщують безпосередньо на полицях. Якщо загального освітлення недостатньо, над столом встановлюють додаткове бра.

На робочому столі повинні підтримуватися порядок і чистота, повинні бути визначені місця на столі і в ящиках для кожного інструменту, приладів, деталей і матеріалів [50].

4.2.2. Перелік шкідливих та небезпечних виробничих чинників.

Шкідливий виробничий фактор - виробничий фактор, вплив якого може призвести до погіршення стану здоров'я зниження працездатності працівника.

Небезпечний виробничий фактор – виробничий фактор, дія якого за певних умов може призвести до травм або іншого раптового погіршення здоров'я працівника.

Відповідно до ПХТ 12.0.003-74 небезпечні та шкідливі фактори за природою дії поділяються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні [51].

До фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать:

- рухомі машини та механізми;
- пересувні частини виробничого устаткування;
- підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони;
- підвищена чи знижена температура поверхонь устаткування, матеріалів чи повітря робочої зони;
- підвищений рівень шуму, вібрацій, інфразвукових коливань, ультразвуку, іонізуючих випромінювань, статичної електрики, електромагнітних випромінювань, ультрафіолетової чи інфрачервоної радіації;
- підвищені чи знижені барометричний тиск, вологість, іонізація та рухомість повітря;
- небезпечне значення напруги в електричному колі; підвищена напруженість електричного чи магнітного полів;
- відсутність чи нестача природного світла;
- недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла;
- пряме та відбите випромінювання, що створює засліплюючу дію.

До хімічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать хімічні речовини, які за характером дії на організм людини поділяються на:

- загальнотоксичні,
- подразнюючі;
- сенсibiliзуючі;
- канцерогенні;
- мутагенні;
- такі, що впливають на репродуктивну функцію.

До біологічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, мікроскопічні гриби та ін.) та продукти їх життєдіяльності, а також макроорганізми (рослини та тварини).

До психофізіологічних небезпечних та шкідливих виробничих факторів належать фізичні (статичні та динамічні) і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження органів чуття, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Один і той же небезпечний і шкідливий виробничий фактор за природою своєї дії може належати одночасно до різних груп. Дія окремих несприятливих факторів виробничого середовища може призвести невиробничої травми – порушення анатомічної цілісності організму людини або його функцій внаслідок впливу виробничих факторів.

Часто травма є наслідком нещасного випадку. Нещасний випадок на виробництві – раптовий вплив на працівника небезпечного виробничого фактора чи середовища, внаслідок яких заподіяна шкода здоров'ю або спричинена смерть.

Наслідком дії несприятливих виробничих факторів може бути і професійне захворювання – патологічний стан людини, обумовлений роботою і пов'язаний з надмірним напруженням організму або несприятливою дією шкідливих виробничих факторів.

Діагноз професійного захворювання ставиться у кожному випадку з урахуванням характеристики умов праці, тривалості роботи працюючого за даною професією, професійного маршруту робітника, даних попередніх періодичних медичних оглядів, результатів клініко-лабораторних та діагностичних досліджень [51].

4.2.3. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників

4.2.3.1. Мікроклімат

4.2.3.1.1. Вплив параметрів мікроклімату на організм людини

Суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність чинить мікроклімат (метеорологічні умови) у виробничих приміщеннях, під яким розуміють умови внутрішнього середовища цих приміщень, що впливають на тепловий обмін працюючих з оточенням. Ці умови визначаються поєднанням температури, відносної вологості та швидкості руху повітря, температури поверхонь, що оточують людину, та інтенсивності теплового (інфрачервоного) опромінення.

Незважаючи на те, що параметри мікроклімату виробничих приміщень можуть змінюватись, іноді навіть значно, температура тіла людини залишається сталою (36,6 °C). Це досягається завдяки терморегуляції - властивості організму людини підтримувати тепловий баланс із навколишнім середовищем [52].

Нормальний перебіг фізіологічних процесів, а отже, і хороше самопочуття можливе лише тоді, коли тепло, що виділяється організмом людини, постійно відводиться в навколишнє середовище. Мікрокліматичні умови, які забезпечують цей процес, вважаються найкращими. У разі незадовільних мікрокліматичних умов у організмі людини для підтримання сталої температури тіла починають відбуватися різні процеси, спрямовані на регулювання теплоутворення і тепловіддачі. При температурі повітря в межах 15-25 °C теплоутворення організму майже не змінюється (зона байдужості). Зі зниженням температури повітря теплоутворення підвищується, головним чином, унаслідок м'язової активності (з'являється тремтіння) та підсилення обміну речовин. З підвищенням температури повітря посилюються процеси тепловіддачі. Кількість тепла, що утворюється в організмі людини, залежить в основному від фізичних навантажень, а рівень тепловіддачі - від мікрокліматичних умов, головним чином, температури повітря (табл. 4.1).

Кількість тепла та вологи, що виділяється однією людиною

Виконувана робота	Тепло, Вт				Волога, г/год.	
	Повне		Явне		Пр и 10° С	Пр и 30° С
	П ри 1 0°С	П ри 3 0°С	П ри 1 0°С	П ри 3 0°С		
У стані спокою	1 60	9 3	1 40	2	30	115
Фізична:						
Легка	1	1	1	5	40	200
Середньої важкості	80 2	45 1	50 1	5 1	70 135	280 415
Важка	15 2 90	95 2 90	65 1 95	0		

Віддача тепла організмом людини в навколишнє середовище здійснюється трьома основними способами (шляхами): конвекцією, випромінюванням та випаровуванням вологи з поверхні шкіри.

Чим нижча температура повітря і швидкість його руху, тим більше тепла віддається випромінюванням. При високій температурі значна частина тепла втрачається випаровуванням поту (рис. 4.1). Разом з потом організм втрачає воду, вітаміни, мінеральні солі, внаслідок чого він зневоднюється, порушується обмін речовин [53].

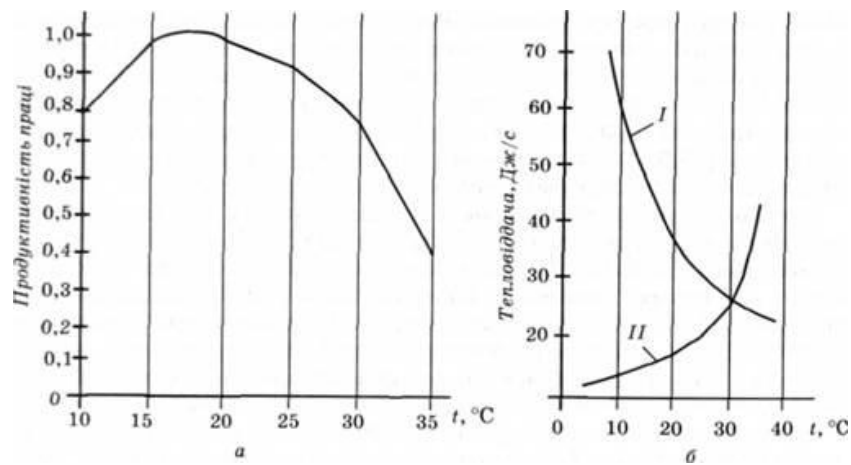


Рис. 4.1. Вплив температури повітря на продуктивність праці (а) та тепловіддачу організму людини (б): I - випромінюванням і конвекцією; II - випаровуванням

Вологість повітря істотно впливає на віддачу тепла випаровуванням. Через високу вологість випаровування утруднюється і віддача тепла зменшується. Зниження вологості покращує процес тепловіддачі випаровуванням. Однак надто низька вологість спричинює висихання слизових оболонок дихальних шляхів.

Рухомість повітря визначає рівень тепловіддачі з поверхні шкіри конвекцією і випаровуванням. У жарких виробничих приміщеннях при температурі рухомого повітря до 35 °С рух повітря сприяє збільшенню віддачі тепла організмом. З підвищенням температури рухоме гаряче повітря саме буде віддавати своє тепло тілу людини, нагріваючи його.

Рухоме повітря при низькій температурі зумовлює переохолодження організму. Різкі коливання температури в приміщенні, яке продувається холодним повітрям (протяг), значно порушують терморегуляцію організму і можуть спричинити простудні захворювання.

Параметри мікроклімату певним чином взаємопов'язані. Наприклад, вищій температурі повітря відповідає більша швидкість руху повітря, а вищій відносній вологості - нижча температура повітря. Так, на людину чинять однаковий тепловий вплив наступні співвідношення температури та відносної вологості повітря (у разі відсутності руху повітря): 17,7 °С - 100 %; 18,3 °С - 90%; 20,7°С - 50%; 22,3°С - 30%.

Здатність організму пристосовуватись до метеорологічних умов значна, однак не безмежна. Верхньою межею терморегуляції людини, що перебуває в стані

спокою, прийнято вважати 30-31 °С за відносної вологості 86% або 40 °С за відносної вологості 30%. При виконанні фізичної праці ця межа значно нижча. Так, при виконанні важкої роботи теплова рівновага ще зберігається завдяки терморегуляторній функції організму при t - 25-26 °С (відносна вологість 40-60 %).

Отже, для нормального теплового самопочуття людини важливо, щоб температура, відносна вологість і швидкість руху повітря перебували у певному співвідношенні [54].

4.3. Розробка заходів з охорони праці

4.3.1. Нормалізація параметрів мікроклімату

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату робочих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99 та ГОСТ 12.1.005-88.

Ці параметри нормуються для робочої зони - визначеного простору, в якому знаходяться робочі місця постійного або непостійного (тимчасового) перебування працівників.

В основу принципів нормування параметрів мікроклімату покладено диференційну оцінку оптимальних та допустимих метеорологічних умов у робочій зоні в залежності від категорії робіт, періоду року та виду робочих місць.

Під поняттям оптимальних мікрокліматичних умов розуміють поєднання параметрів мікроклімату, котрі при тривалому та систематичному впливі на людину забезпечують зберігання нормального теплового стану організму без активізації механізмів терморегуляції. Вони створюють відчуття теплового комфорту та передумови для високого рівня працездатності працівника та персоналу в цілому.

Допустимі мікрокліматичні умови - це поєднання параметрів мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливі на людину можуть спричинювати зміни теплового стану організму, що швидко минають і нормалізуються та супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції в межах фізіологічної адаптації. При цьому не виникає ушкоджень або порушень стану здоров'я, але

можуть спостерігатись дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності.

Оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в робочій зоні виробничих приміщень для різних категорій робіт у теплий та холодний періоди року наведені в табл. 1. Період року визначається за середньодобовою температурою зовнішнього середовища. Коли протягом десяти днів $t_{сд} < +10\text{ }^{\circ}\text{C}$ - холодний період, а якщо $t_{сд} > +10\text{ }^{\circ}\text{C}$ - теплий період року [55].

Таблиця 4.2

Показники температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в залежності від періоду року та категорії виконуваних робіт

Період року	Категорія робіт	Температура, $^{\circ}\text{C}$				Віднос на вологість, %		Швид кість руху повітря, м/с								
		Оптимальна	Допустим				Оптимальна	Допустима на робочих місцях	Оптимальна	Допустима на робочих місцях						
			а		б											
			В	Н	В	Н										
			ерхня межа	ижня межа	ерхня межа	ижня межа										
На робочих місцях				Оптимальна	Допустима на робочих місцях	Оптимальна	Допустима на робочих місцях									
Постій	Непостій	Постій	Непостій													
Холодний	Легка – Іа	2- 24	5					6	1	8	0- 60	5	7	.1	акс. 0.1	М
	Легка – Іб	1-	4					5	0	7	0-	5	7	.1	акс. 0.2	М

		23					60				
	Середньої важкості – Па	8- 20	3	4	7	5	0- 60	5	7	.2	М акс. 0.3
	Середньої важкості – Пб	7- 19	1	3	5	3	0- 60	5	7	.2	М акс. 0.4
	Важка – Ш	6- 18	9	0	3	2	0- 60	5	7	.2	М акс. 0.5
Теплий	Легка – Іа	3- 25	8	0	2	0	0- 60	5 (при 28°C)	5	.1	0.1- 0.2
	Легка – Іб	2- 24	8	0	1	9	0- 60	0 (при 27°C)	6	.2	0 .1-0.3
	Середньої важкості – Па	1- 23	7	9	8	7	0- 60	5 (при 26°C)	6	.3	0 .2-0.4
	Середньої важкості – Пб	0- 22	7	9	6	5	0- 60	0(при 25°C)	7	.3	0 .2-0.5
	Важка – Ш	8- 20	6	8	5	3	0- 60	5 (при 24°C)	7	.4	0 .2-0.6

Примітка: більша швидкість руху повітря у теплий період року відповідає максимально допустимій температурі повітря; менша - мінімальній. Для середніх величин температури повітря швидкість його руху дозволяється визначати інтерполяцією; при мінімальній температурі повітря швидкість його руху може обиратися нижче 0,1 м/с - при легкій роботі й нижче 0,2 м/с - при роботі середньої важкості та важкій.

Допустимі величини параметрів мікрокліматичних умов встановлюються у випадках, коли на робочих місцях не можна забезпечити оптимальних умов мікроклімату за технологічними вимогами виробництва, технічною недосяжністю та економічно обґрунтованою недоцільністю.

Інтенсивність теплового опромінення працюючих від нагрітих поверхонь технологічного устаткування, освітлювальних приладів, інсоляція від застаклених, огорожень не повинна перевищувати:

- 35 Вт/ма при опроміненні 50 % і більше поверхні тіла;
- 70 Вт/м² при опроміненні від 25 % до 50 % поверхні тіла;
- 100 Вт/м² при опроміненні не більше 25 % поверхні тіла [56].

4.3.2. Заходи щодо нормалізації мікроклімату

Найбільш частими причинами відхилення параметрів мікроклімату від нормативних є надходження надлишкового тепла в повітря виробничого приміщення, або водяної пари від працюючого обладнання чи інших джерел випаровування.

Заходи захисту від тепловипромінювань можна поділити на чотири групи:

- а) усунення джерела тепла;
- б) захищення від тепловипромінювання;
- в) полегшення тепловіддачі від тіла людини в навколишнє середовище;
- г) індивідуальний захист від теплового впливу.

Усунути джерело тепловиділення можна зміною технологічного процесу, наприклад, заміною пічного обігріву на електричний, заміною розмірів

тепловипромінюючих поверхонь та ін. Захистити виробниче середовище від надмірного радіаційного та конвективного тепла, що поступає від нагрітих поверхонь обладнання, можна за рахунок теплоізоляції цих поверхонь. В приміщеннях, де є можливість ураження людини електричним струмом і температура повітря досягає 30 °С і вище (приміщення особливо небезпечні і підвищеної небезпеки по класифікації Правила будови електроустановок - ПБЕ), температура на поверхні теплоізоляції не допускається більше 45 °С. З точки зору техніки безпеки, щоб уникнути опіків людини, температура гарячих поверхонь у виробничій зоні дії працюючих не повинна перевищувати 45 С.

Захист від прямої дії теплового випромінювання здійснюється екрануванням - встановленням термічного опору на шляху теплового потоку. Екрани досить різноманітні, за принципом дії бувають поглинаючими і відбиваючими променеве тепло. Вони можуть бути стаціонарними і пересувними. Екрани захищають людину не тільки від теплових променів, а й оберігають від дії іскор і розжарених та гарячих бризок, виплесків рідин та викидів шлаків та окалини.

Для зменшення вологості у виробничих приміщеннях слід уникати технологічних процесів з відкритими поверхнями випаровування рідини. Технологічне обладнання повинно бути герметизоване, а для видалення пари - обладнане витяжками. Як засіб видалення вологи із повітря приміщення використовується вентиляція. В приміщеннях, де діють оптимальні норми мікроклімату, слід встановлювати апарати для кондиціонування повітря.

Полегшенню тепловіддачі від тіла людини сприяє підвищення швидкості руху повітря, що омиває тіло. Здійснюється це за допомогою вентиляційних систем.

При необхідності виконання робіт в зоні підвищеної температури повітря або в гарячих реактивних зонах обладнання (ремонт толочних камер, котлів, печів, сушарок та ін.) користуються засобами індивідуального захисту від інфрачервоних випромінювань - термозахисним одягом, ізолюючими апаратами органів дихання, спеціальними рукавичками, касками та ін [57].

4.4. Пожежна безпека

Пожежну безпеку забезпечують системи запобігання пожежі та протипожежного захисту, а також організаційно-технічні заходи. Управління пожежною безпекою передбачає підвищення безпечності стану приміщень, обладнання та виробничих процесів.

Система пожежної безпеки - це комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на запобігання пожежі та збиткам від неї.

Пожежобезпека об'єкта - стан об'єкта, за якого з регламентованою ймовірністю виключається можливість виникнення й розвитку пожежі та впливу на людей небезпечних факторів пожежі, а також забезпечується захист матеріальних цінностей.

Рівень забезпечення пожежної безпеки - кількісна оцінка попереджених збитків у разі можливої пожежі.

Об'єкти, пожежі на яких можуть призвести до масового враження людей на них та на навколишній території, підприємства з небезпечними та шкідливими виробничими факторами, а також небезпекою пожежі повинні мати системи пожежної безпеки для зведення до мінімуму ймовірності виникнення пожежі. Конкретні значення такої ймовірності визначають проектувальники та технологи.

Системи пожежної безпеки мають запобігати впливу на людей небезпечних факторів пожежі, у тому числі їхніх вторинних проявів. Основними напрямками забезпечення пожежної безпеки є усунення умов виникнення пожежі та мінімізація її наслідків.

Пожежну безпеку забезпечують такі основні компоненти виробництва:

- технічна система, яка передбачає надійність обладнання, використання безпечних технологій, визначає обсяг вибухопожежонебезпечних речовин, проектні рішення, впровадження систем виявлення та гасіння пожеж, розміщення обладнання тощо;

- персонал, його підготовка, забезпечення регламентами та правилами роботи;
- система управління.

Системи пожежної безпеки спрямовані на:

- визначення вихідних причин ситуацій ризику виникнення пожеж внаслідок характерних властивостей та особливостей продуктів, речовин і матеріалів, які використовуються у виробничих процесах, енергії, яка споживається у виробництві, а також відповідних факторів людської діяльності;
- комплексний аналіз із метою створити ефективні засоби попередження пожежі шляхом нейтралізації дії сприяючих їй обставин;
- вивчення засобів і методів локалізації та гасіння пожеж;
- запобігання виникненню пожежі;
- пожежну безпеку людей та матеріальних цінностей.

Системи пожежної безпеки мають відповідати також економічним критеріям ефективності з урахуванням усіх стадій життєвого циклу об'єктів (проекування, будівництво, експлуатація).

Оскільки пожежа являє собою процес неконтрольованого горіння, то контроль за процесами, які сприяють умовам її виникнення, є основним інструментом запобігання пожежі.

На території підприємства це досягається попередженням створення горючого середовища та утворення в ньому джерел загорання. Система запобігання пожежі має забезпечувати контроль горючого середовища, речовин і матеріалів, джерел теплової енергії та їхньої взаємодії з горючими речовинами та матеріалами.

Оцінка пожежонебезпечних властивостей речовин і матеріалів передбачає визначення комплексу показників, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу) та умов їхнього використання. Номенклатура показників та їхнє визначення й застосування для характеристики вибухопожежонебезпечності речовин і матеріалів приймається за ГОСТ 12.1.044-89. Дані про пожежонебезпечні властивості мають подаватися для всіх речовин, матеріалів, сумішей тощо, які

застосовуються на виробничому об'єкті, з урахуванням особливостей і параметрів технологічних процесів. При відсутності таких параметрів їх визначають дослідним шляхом на установках, які пройшли атестацію на право отримання експериментальних даних, або за допомогою стандартизованих розрахункових методів.

Аналіз пожежної небезпеки технологічних процесів включає:

- оцінку пожежної небезпеки речовин і матеріалів, які використовуються в технологічному процесі;
- вивчення технологічного процесу з метою визначити обладнання, ділянки або місця зосередження горючих матеріалів або можливого утворення парогазових горючих сумішей;
- визначення можливості утворення в горючому середовищі джерел загоряння;
- моделювання різноманітних варіантів аварій, шляхів розповсюдження пожежі та вибір проектної аварії;
- розрахунок категорії приміщень, будівель, установок за вибухопожежною і пожежною небезпекою;
- визначення складу систем попередження пожежі та протипожежного захисту технологічних процесів;
- розробку заходів підвищення пожежної безпеки технологічних процесів і окремих їхніх ділянок.

Пожежна небезпека технологічних процесів визначається на основі вивчення технологічного регламенту, технологічної схеми виробництва, показників вибухопожежонебезпеки речовин і матеріалів, які використовуються у технологічному процесі, конструктивних особливостей апаратів, машин та агрегатів, схеми розташування небезпечного обладнання.

На основі проведеного аналізу на підприємстві розробляється система заходів щодо попередження пожежі та протипожежного захисту технологічних процесів згідно з вимогами нормативних документів.

Протипожежні заходи базуються на вимогах ГОСТ 12.1.004-91 щодо виключення джерела загоряння. Якщо це джерело не може бути ізольованим за умовами технологічного процесу, то об'єкт (приміщення, устаткування) необхідно забезпечити надійною системою протипожежного захисту.

До заходів зниження наслідків пожежі належать:

- обмеження розтікання горючих рідин;
- зменшення інтенсивності випаровування горючих рідин;
- аварійний злив горючих рідин у аварійні ємності;
- установлення вогнеперешкоджувачів;
- обмеження маси небезпечних речовин при зберіганні та в технологічних апаратах;
- водяне зрошення технологічних апаратів;
- винесення пожежонебезпечного обладнання до ізольованих приміщень;
- установлення в технологічному обладнанні швидкодіючих відмикаючих пристроїв;
- обмеження розповсюдження пожежі за допомогою протипожежних відстаней і перешкод;
- застосування вогнезахисних фарб та покриттів;
- захист технологічних процесів, обладнання та окремих приміщень установками пожежогасіння;
- застосування пожежної сигналізації;
- навчання персоналу способам ліквідації аварій та діям у разі пожежі;
- створення умов для найшвидшого введення в дію підрозділів пожежної охорони шляхом улаштування під'їзних шляхів, пожежних водоймищ та зовнішнього протипожежного водогону.

Технологічне обладнання за нормальних режимів роботи повинно бути пожежобезпечним, а на випадок несправностей та аварій необхідно передбачати захисні заходи, які обмежують масштаб та наслідки пожежі.

Виробництво, де є вибухопожежонебезпечні речовини й матеріали, повинно бути оснащено автоматичними засобами контролю параметрів

вибухопожежонебезпечності процесу, сигналізацією граничних значень і системами блокувань, які перешкоджають виникненню аварійних ситуацій.

Технологічне устаткування, апарати й трубопроводи, в яких утворюються вибухопожежонебезпечні пари, повинні бути герметичними.

Об'ємно-планувальні та конструктивні рішення будівель промислових об'єктів повинні мінімізувати наслідки пожежі. У разі виникнення пожежі споруда, яку проектували й будували правильно, має протягом певного часу зберігати несучу здатність своїх конструкцій. Поява та поширення вогню й диму всередині будівлі мають бути обмеженими. Проектанти та будівельники повинні також ужити заходів, аби обмежити поширення пожежі на сусідні будівлі, дати можливість людям вільно залишити будівлю, а пожежно-рятувальним підрозділам - загасити пожежу [58].

4.5. Розрахункова частина

4.5.1. Розробка заходів щодо захисту від неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Закон України про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1998, № 22, ст.115) спрямований на забезпечення захисту життя, здоров'я і майна людей від негативного впливу іонізуючого випромінювання, викликаного практичною діяльністю, а також у випадках радіаційних аварій, шляхом виконання запобіжних та рятувальних заходів і відшкодування шкоди. У законі сказано, що кожна людина, яка проживає або тимчасово перебуває на території України, має право на захист від впливу іонізуючого випромінювання. Це право забезпечується здійсненням комплексу заходів щодо запобігання впливу іонізуючого випромінювання на організм людини вище встановлених дозових меж опромінення, компенсацією за перевищення встановлених дозових меж опромінення і відшкодування шкоди, заподіяної в результаті впливу іонізуючого випромінювання [59].

А так як чорнобильська катастрофа створила надзвичайно небезпечну для здоров'я людей і навколишнього природного середовища радіаційну обстановку на

значній території України і країна була оголошена зоною екологічної катастрофи, усунення наслідків якої залежало від законодавчого визначення правового режиму різних за ступенем радіоактивного забруднення територій і заходів щодо його забезпечення, то розробка останніх є як і раніше дуже актуальною.

Одним з найбільш небезпечних і поширених вражаючих факторів, що згубно впливають на людину є іонізуючі випромінювання.

Поняття «іонізуюче випромінювання» об'єднує різноманітні види, різні за своєю природою випромінювання. Подоба їх полягає в тому, що всі вони відрізняються високою енергією, мають властивість іонізувати і руйнувати біологічні об'єкти.

Іонізуючим випромінюванням (радіацією) називають таке випромінювання, яке під час взаємодії з речовиною викликає іонізацію середовища і створює в ній атоми, молекули і іони.

Людина стикається у своєму житті з такими видами іонізуючих випромінювань, як фотонне і корпускулярне. До фотонного випромінювання відносять електромагнітні коливання (це рентгенівське і гаммавипромінювання), до корпускулярного - потік частинок (альфа-, бета-, нейтронне випромінювання).

Найбільш проникаючими і небезпечними є нейтронне і фотонне випромінювання. Але зупинимося на фотонному, яким є рентгенівське і гамма-випромінювання (γ -випромінювання). Рентгенівське випромінювання - це електромагнітне випромінювання. Воно може бути отримано в спеціальних рентгенівських трубках або в прискорювачах електронів. За характером рентгенівські промені схожі з гамма-променями і відрізняються від них джерелом походження.

Гамма-випромінювання являє собою електромагнітне випромінювання, яке поширюється зі швидкістю світла і має високу проникаючу здатність. При впливі його на живі тканини порушуються молекулярні зв'язки і атоми перетворюються в іони. І тоді крізь зруйновані мембрани клітин починають надходити сторонні речовини і їх робота порушується. Якщо доза опромінення невелика, то молекулярні зв'язки відновлюються і клітина продовжує виконувати свої функції. Якщо ж доза

опромінення висока або багаторазово повторюється, то виходить з ладу велика кількість клітин і порушується вже робота органів. Залежно від отриманої дози наслідки для опроміненої людини можуть бути самими різними від незначних змін в стані здоров'я до так званої «смерті під променем».

4.5.2. Розрахунок насипної щільності

До теперішнього часу захистом від гамма-випромінювання є такі матеріали: бетон, свинець, сталь, а також злежаний ґрунт [54]. У табл. 4.3. вказані характеристики шару половинного ослаблення гамма-випромінювання цих матеріалів захисту.

Таблиця 4.3.

Характеристика шару половинного ослаблення для деяких матеріалів.

Матеріал захисту	Шар половинного ослаблення, см	Щільність, г /см ³
Сталь	2,5	7,86
Ґрунт	9,1	1,99
Свинець	1,8	11,3
Бетон	6,1	3,33

З таблиці видно, що найбільш надійним матеріалом для захисту людини від впливу гамма-випромінювання є свинець.

Якщо провести аналіз всіх існуючих будівельних матеріалів з тих, що можуть бути надійним протирадіаційним захистом, то побачимо, що вибір не такий вже й великий. Це свинцева цегла, яку можна використовувати для будівництва будівель і баритова штукатурка, яку використовують для захисту від рентгенівського випромінювання при обробці приміщення.

А враховуючи, що це дорогі матеріали, так, наприклад, 1 кг. свинцевої цегли коштує від 100 грн. і вище, а 1 штука свинцевої цегли важить 7 кг. при розмірі 100x100x50 мм., то стає зрозумілим, що будівництво буде дуже витратним. А

враховуючи, що використання свинцю через його токсичність не рекомендується Всесвітньою організацією охорони здоров'я, і утилізація якого обходиться дуже дорого, то виникає необхідність пошуку нових більш безпечних і комфортних для використання в якості захисту протирадіаційних матеріалів [2].

Вперше в якості захисту на стадії будівництва будівлі пропонується використовувати шар сфер із свинцевого скла діаметром 1мм, який буде засипатися в передбачені заздалегідь порожнини стін і стелі будівлі. Перевагою цього матеріалу, на відміну від свинцю, крім того, що він не токсичний, є також його низька вартість.

Кришталі або свинцеве скло - особливий вид скла, що містить не менше 24% окису свинцю, яке, в свою чергу, і буде тим необхідним захистом.

На рис. 4.2. представлений загальний вид запропонованого шару, де 1 края порожнини в стіні (стелі), 2 - скляні мікросфери.

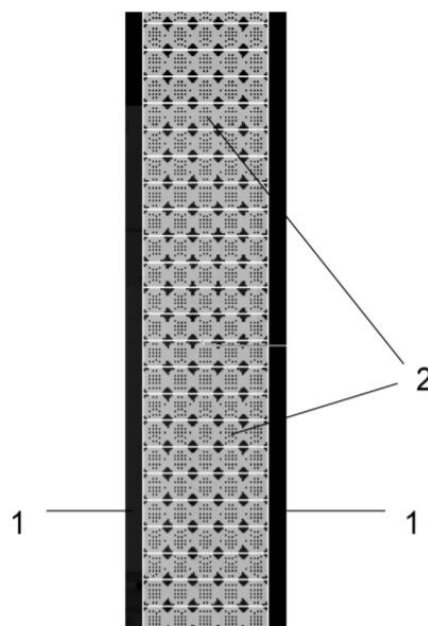


Рисунок 4.2. - Загальний вигляд захисного матеріалу.

Але, так як шар такого матеріалу матиме не однорідну структуру і буде складатися з сфер і повітря між ними, то необхідно провести розрахунок насипної щільності. Насипна щільність $\rho_{\text{нас}}$ в загальному випадку дорівнює:

$$\rho_{\text{нас}} = \frac{M_{\text{сф}} + m_n}{V_o} \quad (4.1)$$

де: $M_{\text{сф}}$ - маса всіх скляних сфер, розміщених в радіаційно-захисному шарі, кг;
 $m_{\text{п}}$ - маса повітря, яке розташовано в порожнинах між сферами в радіаційно-захисному шарі, кг.

Маса сфер дорівнює:

$$M_{\text{сф}} = m_{\text{сф}} \cdot n \quad (4.2)$$

де: $m_{\text{сф}}$ - маса однієї сфери, кг;

n - кількість скляних сфер в радіаційно-захисному шарі.

Маса однієї сфери дорівнює:

$$m_{\text{сф}} = \frac{4}{3} \times \pi r^3 \times \rho_{\text{ск}} \quad (4.3)$$

де: r - радіус однієї скляної сфери, м;

$\rho_{\text{ск}}$ - щільність скла, кг / м³.

Кількість скляних сфер n в радіаційно-захисному шарі дорівнює однієї цілої частини в меншу сторону від ділення:

$$n = \frac{V_{\text{ш}}}{V_o} = \frac{V_{\text{ш}}}{\frac{4}{3} \times \pi r^3} \quad (4.4)$$

де: $V_{\text{ш}}$ - об'єм радіаційно-захисного шару, м³; V_o - об'єм однієї скляної сфери, м³.

Маса повітря $m_{\text{п}}$ в радіаційно-захисному шарі дорівнює:

$$m_{\text{п}} = (V_{\text{ш}} - V_o \times n) \rho_{\text{п}} \quad (4.5)$$

де: $\rho_{\text{п}}$ - щільність повітря, кг / м³.

Кінцева формула насипної щільності ($\rho_{\text{н}}$) виглядає наступним чином:

$$\rho_{\text{н}} = \frac{\frac{4}{3} \times \pi r^3 \times \rho_{\text{ск}} \times \left[\frac{V_{\text{ш}}}{\frac{4}{3} \times \pi r^3} \right] + \left(V_{\text{ш}} - \left[\frac{V_{\text{ш}}}{\frac{4}{3} \times \pi r^3} \right] \times \frac{4}{3} \times \pi r^3 \right) \times \rho_{\text{п}}}{V_o} \quad (4.6)$$

де: η - коефіцієнт упаковки сфер, який може приймати значення для щільної упаковки від 0,59 до 0,63. Для діаметра сфер, які випускає промисловість, рівному 1 мм, насипна щільність складе 2676,4 кг / м³.

Висновок

В даному розділі розглянуті небезпечні та шкідливі фактори, які виникають під час користування вимірювальним комплексом приладів для системи зв'язку та приладами по його ремонту та обслуговуванню. Була наведена організація робочого місця. Перелічено шкідливі та небезпечні виробничі чинники та приведено засоби з нормалізації мікроклімату. Розглянуто пожежну безпеку. Також розроблено заходи щодо захисту від неіонізуючих електромагнітних випромінювань. І представлено розрахунок насипної щільності. Використовуючи ці дані, можна забезпечити безпечні та не шкідливі умови праці для робітників.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Електромагнітні поля різні за частотою та напруженістю. Їхні характеристики коливаються у часі. Весь цей процес отримав назву “електросмог”, і вчені гаряче обговорюють, яку небезпеку людям створюють джерела найрізноманітніших електромагнітних випромінювань. Високочастотні випромінювання можуть іонізувати атоми та молекули соматичних клітин і порушувати в них біохімічні процеси. Електромагнітні коливання довгохвильового спектра здатні нагрівати органіку та надавати молекулам теплового руху.

Електромагнітні поля негативно впливають на організм людини, яка безпосередньо працює з джерелом випромінювання, а також на населення, яке мешкає поблизу джерел випромінювання. Встановлено, що переважна частина населення знаходиться в умовах підвищеної активності ЕМП. Можна вважати, що в діапазоні промислових частот (у тому числі 50 Гц) допустимо розглядати вплив на біологічний об'єкт електричної і магнітної складових поля роздільно (нарізно).

В будь-якій точці ЕМП промислової частоти енергія магнітної складової поля, яка поглинається тілом людини, майже в 50 разів менша від енергії електричної складової цього поля, що поглинається тілом. Це дає змогу зробити висновок, що в діапазоні промислових частот дією магнітної складової поля на біологічний об'єкт можна знехтувати, а негативний вплив на організм обумовлений електричною складовою поля.

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань на організм людини взагалі залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму [60].

5.1. Поняття та типи електромагнітних випромінювань

Розглянемо з початку поля природного походження. Навколо Землі існує електричне поле середньої напруженості 130 В/м. Воно зменшується від середніх широт до полюсів та до екватора, а також з віддаленням від земної поверхні. Спостерігають річні, добові та інші варіації цього поля [61]. Також це поле постійно змінюється під впливом грозових розрядів, опадів та інших природних катаклізмів.

Також існує магнітне поле напруженістю 47.8 А/м та 39.8 А/м на північному та південному полюсах відповідно. Це поле коливається з 80- та 11-річними циклами змін, а також більш короткочасними змінами з різних причин, пов'язаних із сонячною активністю. Також існує магнітне поле 19.9 А/м на магнітному екваторі. Це поле інколи змінюється під впливом магнітних бурь. Також земля постійно знаходиться під впливом електромагнітного поля, що випромінюється сонцем. Діапазон частот цього випромінювання приблизно дорівнює 10МГц-10ГГц. Слід взагалі зазначити, що електромагнітне поле Землі постійно змінюється через низку факторів, як то сонячна активність, процеси у земних надрах та інше. Щодо спектра сонячного випромінювання, то він знаходиться біля короткохвильової області та поєднує у собі інфрачервоне та ультрафіолетове випромінювання. Інтенсивність цього випромінювання має постійну властивість періодично змінюватися та досить сильно збільшуватися під час атмосферних спалахів.

Ці поля впливають на біологічні об'єкти протягом всього часу їх життя. Тому у процесі еволюції людина пристосувалася до їх впливу і виробила здатність захищатися від можливих ушкоджень за рахунок природних чинників. Проте науковцями спостерігається зв'язок між спалахами сонячної активності і змінами електромагнітного поля, що спричиняється цим процесом та деякими групами захворювань людей. Також, вивчаючи це явище, вчені помітили зміну умовно-рефлекторної діяльності тварин у рамках цього процесу. Систематичні дослідження щодо впливу електромагнітних полів на організм людини почалися десь з 50-х років.

На рис.5.1 зображено спектр електромагнітного випромінювання.

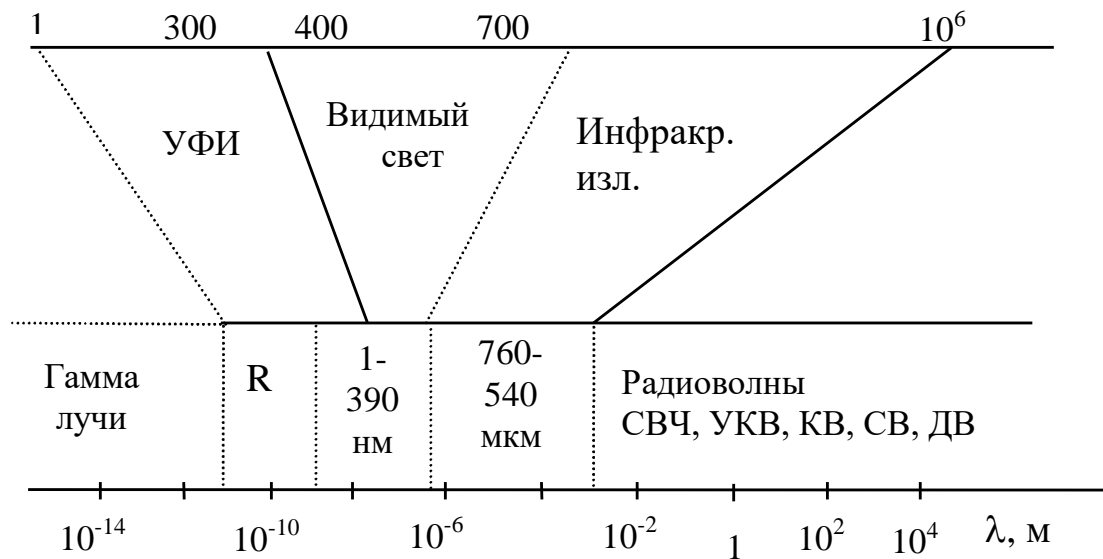


Рис. 5.1 – Спектр електромагнітного випромінювання

Існує така номенклатура діапазонів згідно регламенту радіозв'язку (таб. 5.1). Електромагнітні поля НЧ часто використовують у термічній обробці. ВЧ – у радіозв'язку, медицині, телебаченні, радіомовленні [62].

Таблица 5.1.

Підсилення в антені SAF2040-B

30-300 кГц	НЧ
300-3000 кГц	СЧ
3-30 МГц	ВЧ
30-300 МГц	метрові
300-3000 МГц	УВЧ
3-30 ГГц	СВЧ
30-300 ГГц	КВЧ

Простір коло джерела поля поділяють на зони: ближню (зона індукції) та дальню (зона випромінювання). Границя між зонами дорівнює $R=\lambda/2\pi$. В залежності від розташування зони характеристиками поля є: у ближній зоні –

складова вектора напруженості електромагнітного поля; у дальній – енергетична характеристика, інтенсивність щільності енергетичного потоку.

Розглянемо випромінювання ВЧ та УВЧ діапазонів. Медичні обстеження засвідчили суб'єктивні розлади, що спостерігаються під час роботи: слабкість, підвищена втомлюваність, пітливість, сонливість, а також розлад сну, головний біль, болі в області серця. Пригнічуються також харчові та статеві рефлексії. Також вченими було зафіксовано зміни показників білкового та вуглеводного обміну, збільшення концентрації азоту в організмі, а також зменшення концентрації альбуміну та підвищення глобуліну. Крім того, фіксують деякі зміни у крові, а саме: збільшення кількості лейкоцитів, тромбоцитів, та інше.

При дослідженні впливу електромагнітних полів на організм людини, взяли під нагляд тестову групу людей, що мешкали поблизу радіостанції [63]. Це дослідження дало дуже цікавий та тривожний результат: у цій контрольній групі кількість скарг на здоров'я майже у два рази перевищувала середню. При дослідженні дітей було виявлено порушення розумової працездатності, зниження уваги через розвиток послідовного гальмування та пригнічення нервової системи. Було також виявлено, що внаслідок дії електромагнітних полів страждає також і імунно-біологічна система. Можливе також виникнення гострих та хронічних хвороб та функціональні порушення у роботі майже усіх систем організму. Зміни діяльності нервової та серцево-судинної систем мають кумулятивний характер, та не зважаючи на це при припиненні впливу, а також поліпшенні умов праці, як правило, спостерігається покращення їх функціонування. Тривалий вплив електромагнітних полів все одно призводить до стійких порушень та захворювань.

Активність впливу полів різних діапазонів частот зростає з ростом частоти і дуже серйозно впливає у СВЧ діапазоні. У цьому діапазоні працюють багато теле- та радіостанцій, а також майже усі радіорелейні станції, радіолокатори, та інше. На заході хвилі цього діапазону прийнято називати “мікрохвилями”. СВЧ випромінювання поширюється у межах прямої видимості. На деяких ділянках діапазону СВЧ хвилі розсіюються молекулами кисню, атмосферними опадами, та інше, що обмежує дальність їх поширення. У наведеній вище апаратурі, що

використовує СВЧ діапазон, його використання пов'язане із зменшенням перешкод та більш високої якості передачі інформації ніж у УВЧ діапазоні.

Але, слід зазначити, що сучасна побутова та корпоративна апаратура зв'язку досить широко використовує саме УВЧ діапазон. У ньому працює більшість телефонів мобільного зв'язку, безпроводні комп'ютерні мережі, транкингові радіостанції та інше. Це насамперед пов'язане з небезпекою використання апаратури, яка працює у діапазонах високих частот в безпосередній близькості від людини.

Через те, що випромінювання СВЧ при поглинанні середовищем, яким є поганий провідник, спричиняє його нагрівання, цей діапазон дуже широко використовують у промислових установках. Подібні установки використовуються й у побуті. Слід до цього навести приклад СВЧ (мікрохвильової) печі. Тому розповіді про небезпеку використання СВЧ-печей мають досить вагому підставу. Це явище також посприяло створенню вченими терапевтичної апаратури, що базується на властивостях СВЧ випромінювання. Також слід зазначити, що саме через ці властивості СВЧ випромінювання використовують для передачі енергії променем на великі відстані. Коли розглядали проекти будівництва сонячних електростанцій на навколораземній орбіті, саме ця технологія розглядалася як базова для передавання отриманої енергії з космосу на Землю. Але до цього стоїть ще багато не розв'язані з технологічних проблем, пов'язаних із практичним використанням цієї технології.

При використанні СВЧ діапазону здебільшого встановлюють не напрямлені антени, а можливість сфокусувати випромінювання у вузький промінь антеною невеликих габаритів. У межах цього променю інтенсивність електромагнітного поля значно збільшується, а за його межами стає ледь помітною. Це дозволяє досить чітко визначати зони, що є небезпечними для здоров'я.

Досить багато вчених зараз зосереджують свою увагу у наукових працях саме на СВЧ діапазоні та його впливі на біологічні об'єкти. В одній з таких робіт наведений приклад про прояви дії СВЧ залежно від інтенсивності опромінення.

При інтенсивності поля близько 20 мкВт/см^2 спостерігається зменшення частоти пульсу, зниження артеріального тиску. Ця дія більш сильна у людей, що вже

підпадали під подібне опромінення. З ростом інтенсивності проявляються електрокардіографічні зміни. Потім відмічається прискорення пульсу, коливання об'єму крові. При досяганні відмітки інтенсивності у бВт/см^2 відмічають зміни у статевих залозах, у крові та помутніння кришталика. Далі можуть почати відчуватися навіть такі страшні симптоми, як розриви капілярів і крововиливи у легені та печінку.

Подальше опромінення помітно впливає на тканини, викликає больові почуття. Якщо інтенсивність перевищує 1 Вт/см^2 , це спричиняє швидку втрату зору.

Пошкодження органів зору, до речі, являє собою один з найсерйозніших ефектів спричинених електромагнітними полями СВЧ діапазону. На низьких частотах такі ефекти не спостерігаються, тому вони є специфічними саме для СВЧ діапазону. Ступень ушкодження внаслідок ураження електромагнітним полем СВЧ діапазону може бути різною і частіше залежить від інтенсивності опромінення та часу його дії. Ушкодження зору спричиняє напруженість поля, яка зменшується з ростом частоти.

Тепер звернемо свою увагу на так званому “оптичному випромінюванні”. Під цим терміном ми розуміємо хвилі видимого для людського ока діапазону хвиль. Цей діапазон розташований у межах $0.4\text{-}0.77 \text{ мкм}$. Також до оптичного випромінювання відносять інфрачервоне (ІЧ), яке знаходиться у діапазоні $0.11\text{-}0.1 \text{ мкм}$ та ультрафіолетове, яке відповідно знаходиться у межах $0.4\text{-}0.5 \text{ мкм}$. Тому ми можемо зрозуміти, що з боку довгих хвиль між оптичним та СВЧ діапазоном знаходиться маловивчений діапазон субміліметрових хвиль, які займають ділянку діапазону $1.0\text{-}0.1 \text{ мм}$. Цей діапазон є досить незручним для практичного використання. З боку коротких хвиль знаходиться рентгенівське випромінювання.

Джерела випромінювання ІЧ діапазону можна побачити скрізь у побуті та у виробництві. Це велика кількість елементів та вузлів радіоапаратури, напівпровідникові та квантові прилади, трансформатори, та багато інших.

Слід також окремо розглянути лазерне випромінювання. Воно є досить цікавим для вивчення. Науковці звернули увагу, що вплив лазерного випромінювання на біологічні тканини може призвести до теплової, ударної дії та

світлового тиску. Залежно від різних обставин прояви кожного ефекту окремо чи їхня сумарна дія можуть набувати досить різних значень.

При великій інтенсивності та малих тривалості імпульсу спостерігають ударну дію лазерного випромінювання, яка поширюється досить швидко та призводить до пошкодження внутрішніх тканин. При цьому зовсім непомітними залишаються зовнішні прояви. Майже головним елементом дії лазерного випромінювання на організм є тепловий ефект, через який можуть з'явитися опіки. Також можуть спостерігатися більш серйозні наслідки, такі як руйнування, деформація і навіть часткове випаровування клітинних структур. При дії лазерного випромінювання менших інтенсивності можна спостерігати видимі зміни у організмі, а саме порушення пігментації, почервоніння з досить чіткими кордонами зони, що зазнала ураження. Шкірні оболонки значною мірою захищають внутрішні системи організму від серйозних уражень внаслідок дії лазера.

Деякі дослідження показали цікавий результат – інколи опромінення ділянок шкіри може призвести до порушення низки систем організму, зокрема нервової та серцево-судинної.

Наслідком навіть не дуже високих доз лазерного випромінювання можуть стати майже такі симптоми, як і при СВЧ – опроміненні. Це і нестійкий стан артеріального тиску, і порушення серцевого ритму, а також втома, роздратування та інше. Ці порушення є зворотними та мають властивість зникати з часом після деякого відпочинку.

Як і СВЧ, найбільшої шкоди лазерне випромінювання завдає очам. Найбільша небезпека спостерігається в ультрафіолетовому діапазоні. За таких умов може статися коагуляція білка, рогівки та опік слизової оболонки, що може спричинити сліпоту. Промені з видимого діапазону мають властивість впливати на клітини сітківки. Через це може спостерігатися як тимчасова сліпота так і втрата зору внаслідок опіку. Випромінювання інфрачервоного діапазону є більш небезпечним, проте також може призвести до сліпоти.

Тобто можна зробити висновок, що лазерне опромінення може пошкодити усі структури ока. Внаслідок того, що око є оптичною системою, можна спостерігати

також непрямий вплив, а другорядні ефекти, які є реакцією організму на опромінення.

При лазерному опроміненні у біологічних тканинах виникають вільні радикали. Вони беруть активну участь у взаємодії з молекулами та порушують нормальний процес обміну речовинами у організмі на рівні клітин. Це призводить до загального погіршення стану здоров'я [63].

5.2 Дія електромагнітного випромінювання на організм людини

Дія електромагнітного випромінювання на організм людини в основному визначається поглиненою в ньому енергією [64]. Відомо, що випромінювання, що потрапляє на тіло людини, частково відбивається і частково поглинається в ньому.

Поглинена частина енергії електромагнітного поля перетворюється на теплову енергію. Ця частина випромінювання проходить через шкіру і поширюється в організмі людини залежно від електричних властивостей тканин (абсолютній діелектричній проникності, абсолютній магнітній питомій провідності) і частоти коливань електромагнітного поля.

Істотні відмінності електричних властивостей шкіри, підшкірного жирового шару, мишечної і інших тканин обумовлюють складну картину розподілу енергії випромінювання в організмі людини. Точний розрахунок розподілу теплової енергії, що виділяється в організмі людини при опроміненні, практично неможливий. Проте, можна зробити наступний висновок: хвилі міліметрового діапазону поглинаються поверхневими шарами шкіри, сантиметрового — шкірою і підшкірною клітковиною, дециметрового — внутрішніми органами.

Окрім теплової дії, електромагнітні випромінювання викликають поляризацію молекул тканин тіла людини, переміщення іонів, резонанс макромолекул і біологічних структур, нервові реакції і інші ефекти.

Із цього виходить, що при опроміненні людини електромагнітними хвилями в тканинах його організму відбуваються складні фізико-біологічні процеси, які можуть

з'явитися причиною порушення нормального функціонування як окремих органів, так і організму в цілому.

Люди, що працюють під надмірним електромагнітним випромінюванням, зазвичай швидко стомлюються, скаржаться на головні болі, загальну слабкість, болі в області серця. У них збільшується пітливість, підвищується дратівливість, стає тривожним сон. В окремих осіб при тривалому опроміненні з'являються судоми, спостерігається зниження пам'яті, наголошуються трофічні явища (випадання волосся, ламкість нігтів і так далі).

Норми допустимого опромінення встановлюються для забезпечення безпечних умов праці обслуговуючого персоналу джерел випромінювання і всіх навколишніх осіб.

Напруженість електромагнітних полів на робочих місцях не повинна перевищувати:

1) по електричній складовій: у діапазоні частот 60 кГц—3 МГц — 50 В/м; 3—30 МГц — 20 В/м; 30—50 МГц — 10 В/м; 50—300 МГц — 5 В/м;

2) по магнітній складовій: у діапазоні частот 60 кГц— 1,5 МГц — 5 А/м; 30 МГц—50 МГц — 0,3 А/м.

Гранично допустима щільність потоку енергії електромагнітних полів в діапазоні частот 300 МГц — 300 ГГц і час перебування на робочих місцях і в місцях можливого знаходження персоналу, пов'язаного професійно з дією полів (окрім випадків опромінення від антен, що обертаються і скануючих), взаємозв'язані таким чином: перебування протягом робочого дня — до 0,1 Вт/м²; перебування не більш 2ч— 0,1—1 Вт/м², в останній робочий час щільність потоку енергії не повинна перевищувати 0,1 Вт/м².

Напруженість електричного поля промислової частоти (50 Гц) в електроустановках напругою 400 кВ і вище для персоналу, систематично (протягом кожного робочого дня) обслуговуючого їх, не повинна перевищувати при перебуванні людини в електричному полі: без обмеження часу—до 5 кВ/м; не більше 180 хвилин протягом однієї доби 5—10 кВ/м; не більше 90 хвилин протягом однієї доби 10—15 кВ/м; не більше 10 хвилин протягом однієї доби 15-30 кВ/м; не

більше 5 хвилин протягом доби 20-25 кВ/м. Останній час доби чоловік повинен і знаходиться в місцях, де напруженість електричного поля не перевищує 5 кВ/м.

Якщо опромінення людей перевищує вказані гранично допустимі рівні, то необхідно застосовувати захисні засоби.

Захист людини від небезпечної дії електромагнітного опромінення здійснюється рядом способів, основними з яких є: зменшення випромінювання безпосередньо від самого джерела, екранування джерела випромінювання, екранування робочого місця, поглинання електромагнітної енергії, вживання індивідуальних засобів захисту, організаційні заходи захисту.

Для реалізації цих способів застосовуються: екрани, поглинальні матеріали, аттенюатори, еквівалентні навантаження і індивідуальні засоби.

Екрани призначені для ослаблення електромагнітного поля у напрямі поширення хвиль. Міра ослаблення залежить від конструкції екрану і параметрів випромінювання. Істотний вплив на ефективність захисту надає також матеріал, з якого виготовлений екран.

Товщину екрану, що забезпечує необхідне ослаблення, можна розрахувати. Проте розрахункова товщина екрану зазвичай мала, тому вона вибирається з конструктивних міркувань. При потужних джерелах випромінювання, особливо при довгих хвилях, товщина екрану може бути прийнята розрахунковою.

Товщина екрану в основному визначається частотою і потужністю випромінювання і мало залежить від вживаного металу.

Дуже часто для екранування застосовується металева сітка. Екрани з сітки мають ряд переваг. Вони є видимими, пропускають потік повітря, дозволяють досить швидко ставити і знімати що екранують пристроїв [64].

5.3 Загальні рекомендації і заходи захисту персоналу

Захист організму людини від дії електромагнітних випромінювань передбачає зниження їх інтенсивності до рівнів, що не перевищують гранично допустимі. Захист забезпечується вибором конкретних методів і засобів, обліком їх

економічних показників, простотою і надійністю експлуатації. Організація цього захисту має на увазі:

- оцінку рівнів інтенсивності випромінювань на робочих місцях і їх зіставлення з нормативними документами, що діють;
- вибір необхідних заходів і засобів захисту, що забезпечують міру захищеності в заданих умовах;
- організацію системи контролю над функціонуючим захистом.

По своєму призначенню захист може бути колективним, передбачаючим заходи для груп персоналу, і індивідуальною.

У основі кожною з них лежать організаційні і інженерно-технічні заходи. Організаційні заходи захисту направлені на забезпечення оптимальних варіантів розташування об'єктів, що є джерелами випромінювання, і об'єктів, що опиняються в зоні дії, організацію праці і відпочинку персоналу з метою понизити до мінімуму час перебування в умовах дії, попередити можливість попадання в зони з інтенсивностями, що перевищують гранично допустимі рівні, тобто здійснити захист «часом». Впровадження в практику цих захисних заходів починається в період попереджувального і уточнюється в період.

Впровадження в практику цих захисних заходів починається в період попереджувального і уточнюється в період поточного санітарного нагляду. До організаційних заходів захисту слід віднести і проведення низки лікувально-профілактичних заходів. Це, перш за все, обов'язковий медичний огляд при прийомі на роботу, подальші періодичні медичні обстеження, що дозволяє виявити ранні порушення в стані здоров'я персоналу, усунути від роботи при виражених змінах стану здоров'я.

У кожному конкретному випадку оцінка ризику здоров'ю що працюють повинна базуватися на якісній і кількісній характеристиці чинників. Істотним з позиції впливу на організм є характер професійної діяльності і стаж роботи. Важливу роль грають індивідуальні особливості організму, його функціональний стан.

До організаційних заходів слід віднести також вживання засобів наочного запобігання про наявність того або іншого випромінювання, вивішування плакатів з переліком основних запобіжних засобів, проведення інструктажів, лекцій з безпеки праці при роботі з джерелами випромінювань і профілактиці їх несприятливої і шкідливої дії.

Захист «часом» передбачає знаходження у контакті з випромінюванням лише по службовій необхідності з чіткою регламентацією за часом і простору здійснюваних дій; автоматизацію робіт; зменшення часу настроювальних робіт і так далі [65].

Залежно від впливаючих рівнів (інструментальний і розрахунковий методи оцінки) час контакту з ними визначається відповідно до нормативних документів, що діють.

Захист раціональним (оптимальним) розміщенням має на увазі визначення санітарно-захисних зон, зон недопустимого перебування на етапах проектування. У цих випадках для визначення міри зниження дії в якомусь просторовому об'ємі використовують спеціальні розрахункові, графоаналітичні, інструментальні (стадія експериментальної експлуатації) методи.

Організаційні заходи колективного і індивідуального захисту засновані на одних і тих же принципах і в деяких випадках відносяться до обох груп. Різниця лише в тому, що перші направлені на нормалізацію електромагнітної обстановки для цілих колективів, на великих виробничих площах, а другі зменшують випромінювання при індивідуальній регламентації праці.

Інженерно-технічні заходи захисту застосовуються в тих випадках, коли вичерпана ефективність організаційних заходів.

Колективний захист в порівнянні з індивідуальним переважає внаслідок простоти обслуговування і проведення контролю над ефективністю захисту. Проте його впровадження часто ускладнюється високою вартістю, складністю захисту великих просторів. Недоцільно, наприклад, його використання при проведенні короткочасних робіт в полях з інтенсивністю вище гранично допустимих рівнів. Це ремонтні роботи в аварійних ситуаціях, налаштування і вимір в умовах відкритого

випромінювання, при проході через небезпечні зони і так далі. У таких випадках показано вживання індивідуальних засобів захисту.

Тактика вживання методів колективного захисту від електромагнітного випромінювання залежить від знаходження джерела опромінення по відношенню до виробничого приміщення: усередині або зовні.

Індивідуальні засоби захисту призначені для запобігання дії на організм людини.

А саме електромагнітного випромінювання з рівнями, що перевищують гранично допустимі, коли вживання інших засобів неможливе або недоцільно. Вони можуть забезпечити загальний захист, або захист окремих частин тіла (локальний захист).

Вони застосовуються в тих випадках, коли інші заходи захисту не можуть бути використані або не забезпечують необхідного ослабіння випромінювання. До індивідуальних засобів відносяться захисні халати, комбінезони, окуляри. Всі ці засоби захисту є своєрідними екранами. Їх захисні властивості визначаються мірою віддзеркалення хвиль.

Як матеріал для захисних халатів і комбінезонів використовується спеціальна тканина, в структурі якої тонкі металеві нитки скручені з бавовняними нитками, що додає тканини щільність, еластичність і теплозахисні властивості.

При використуванні сітчастих матеріалів їх слід перевіряти аналогічно суцільним з урахуванням еквівалентної товщини [66].

$$a_3 = \frac{\pi r_c^2}{l} \quad (5.1)$$

Екранне загасання різних форм екранів можливо представити наступним виразом: $S \approx S_n - S_\phi$, де S_ϕ – складова екранного загасання, обумовлена формою екрану і дорівнює 0;6,0;9,6 дБ відповідно для плоского, циліндрового і сферичного екранів [68]. Звідси витікає, що для того, щоб ефективність екранування циліндрового екрану була такою ж, як і для плоского екрану, необхідно вибрати екрануючий матеріал для циліндрового екрану таким, щоб він компенсував зменшення ефективності екранування на 6 дБ. Це, наприклад, можна зробити за

рахунок збільшення товщини матеріалу на величину, що забезпечує збільшення ефективності екранування на величину 6 дБ.

Приріст товщини матеріалу визначаємо:

$$\Delta a_{\text{ц}} = \frac{20lg2}{0,132\sqrt{fGu}} \quad (5.2)$$

Аналогічно для матеріалу, з якого виготовляється сферичний екран:

$$\Delta a_{\text{сф}} = \frac{20lg3}{0,132\sqrt{fGu}} \quad (5.3)$$

Якщо екрануючий матеріал виконаний з міді, то $G = 1$ і $\mu = 1$.

В діапазоні НВЧ $f = 300$ МГц – 300 ГГц максимальне збільшення товщини буде при $f = 300$ МГц.

В цьому випадку, як слід з (4.2) і (4.3):

$$\Delta a_{\text{ц}} = 2,63 \text{ мкм}; \quad \Delta a_{\text{сф}} = 4,2 \text{ мкм}.$$

При використуванні у якості екрануючого матеріалу мідної сітки збільшення товщини матеріалу на величину Δa еквівалентно, як впливає з формули (5.1), зменшення кроку сітки на величину Δl , тобто:

$$\Delta a = = \frac{\pi r_c^2}{l - \Delta l} \times \frac{\pi r_c^2}{l}.$$

Відносне зменшення кроку сітки визначається виразом:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta a}{\Delta a + \frac{\pi r_c^2}{l}}.$$

Звідси з урахуванням (5.2) і (5.3) при виготовленні циліндрового екрану з мідної сітки відносне зменшення кроку сітки для збереження її екрануючих властивостей дорівнює:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{2,63}{2,63 + \frac{\pi r_c^2}{l}}.$$

а при виготовленні сферичного екрану:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{4,2}{4,2 + \frac{\pi r_c^2}{l}}.$$

Якщо дріт латунний, то $G = 0,26$.

В цьому випадку:

$$\Delta a_{\text{ц}} = \frac{45,6}{\sqrt{0,26f}}; \quad \Delta a_{\text{ф}} = \frac{72,3}{\sqrt{0,26f}};$$

а для діапазону НВЧ їх максимальні величини рівні:

$$\Delta a_{ц} = 5,16 ; \quad \Delta a_{ф} = 8,18 ,$$

Тоді:

$$\Delta I_{ц} = \frac{5,161}{5,16 + \frac{\pi r c^2}{l}} ;$$

$$\Delta I_{ф} = \frac{8,181}{8,18 + \frac{\pi r c^2}{l}} .$$

Розрахований екрануючий одяг дозволяє забезпечити постійний коефіцієнт екранування по всій поверхні тіла людини [68].

Контроль рівнів опромінення повинен вироблятися шляхом виміру нормованого параметра електромагнітного поля на робочому місці не рідше двох разів на рік, а також при введенні в дію нових джерел випромінювання при реконструкції установок, що діють, після ремонтних робіт; при дослідних і дослідницьких роботах рівні опромінення необхідно перевіряти при кожній зміні умов праці.

Виміри в кожній вибраній точці проводяться не менше трьох разів. Результат кожного виміру фіксується в протоколі. За рівень електромагнітного опромінення в даній точці приймається середньоарифметичне трьох вимірів. Виміри проводяться спеціально розробленими для цієї мети приладами ІЕМП (діапазон високих частот), ПО-1 (діапазон надвисоких частот), ПЗ-1 (промислова частота) і ін.

У результаті дії ЕМП на людину можливі гострі та хронічні форми порушення фізіологічних функцій організму. Ці порушення виникають в результаті дії електричної складової ЕМП на нервову систему, а також на структуру кори головного та спинного мозку, серцево-судинної системи.

У більшості випадків такі зміни в діяльності нервової та серцево-судинної системи мають зворотній характер, але в результаті тривалої дії вони накопичуються, підсилюються з плином часу, але, як правило, зменшуються та зникають при виключенні впливу та поліпшенні умов праці. Тривалий та інтенсивний вплив ЕМП призводить до стійких порушень та захворювань.

Для попередження професійних захворювань, які виникають у результаті тривалої дії електромагнітних випромінювань, встановлені гранично допустимі рівні електромагнітних випромінювань. Відповідно до ГОСТ 12.1.006-84 “ССБТ. Электромагнитное поле радиочастот” [67].

Рівні ЕМП необхідно контролювати не рідше 1 разу на рік. Якщо вводиться в дію новий об'єкт або здійснюється реконструкція старих об'єктів, то заміри рівня електромагнітних випромінювань проводяться перед введенням їх в експлуатацію.

Висновок

Засоби індивідуального захисту використовуються у тих випадках коли інші заходи недостатньо ефективні: при переході через зони збільшеної інтенсивності випромінювання, при ремонтних та налагоджувальних роботах у аварійних ситуаціях, під час короткочасного контролю та при зміні інтенсивності опромінення. ЗІЗ застосовують тоді, коли безпека робіт не може бути забезпечена конструкцією та розміщенням устаткування, організацією виробничих процесів, архітектурно-планувальними рішеннями та засобами колективного захисту.

Для захисту тіла використовується одяг із металізованих тканин та радіопоглинаючих матеріалів.

Таким чином, ця тканина, мов металева сітка (при віддалі між нитками 0,5мм) послаблює випромінювання не менш, як на 20-30дБ. При зшиванні деталей захистного одягу потрібно забезпечити контакт ізольованих провідників. Тому електрогерметизація швів проводиться електропровідними розчинами чи клеями, які забезпечують гальванічний контакт або збільшують ємнісний зв'язок проводів, котрі не контактують.

ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день Wi-Fi мережі є невід'ємною частиною нашого життя. Одним з важливих елементів Wi-Fi системи, від якого залежить якість функціонування всієї системи, є Wi-Fi антена.

Після ретельного аналізу існуючих на ринку декількох моделей антен можна констатувати, що всі спрямовані антени влаштовані приблизно однаково і дуже просто. Якщо антена відноситься до панельного типу, то її конструкція включає екран і випромінювач, виконаний у формі прямокутника і встановлений на деякій відстані від екрану. Відмінності між антенами полягають лише в розмірах випромінювача і екрану, а також в відстані між ними. У антенах, призначених для використання всередині приміщень, є один випромінювач, а антени, призначені для застосування поза приміщеннями, можуть містити кілька випромінювачів. Відзначимо також, що вартість усіх антен явно завищена. Тому було прийнято рішення про моделювання простої конструкції для спрямованої антени з використанням чотирьох елементів.

У другому розділі було розглянуто існуючі програмні пакети для моделювання електродинамічних середовищ, методи, на яких вони базуються, та їхні можливості при моделюванні антенних систем. Був обраний програмний пакет для моделювання мікросмушкової антени, зі зручним інтерфейсом та великими можливостями.

Було розраховано параметри одинарної мікросмушкової прямокутної антени, яка буде використана в антенній решітці для Wi-Fi системи. В результаті моделювання було отримано якісні характеристики роботи одинарної мікросмушкової прямокутної антени. Коефіцієнт стоячої хвилі нижче 2 (1,39) в робочій смузі частот, що дає гарне узгодження з лінією живлення в 50 Ом. Коефіцієнт підсилення сягає 6,7 дБі а ККД становить 94 %.

У третьому розділі було розраховано параметри чотирьохелементної мікросмушкової антенної решітки для Wi-Fi системи. В результаті моделювання

було отримано якісні характеристики роботи мікросмужкової прямокутної АР. Коефіцієнт стоячої хвилі нижче 2 (1,27) в робочій смузі частот, що дає гарне узгодження з лінією живлення в 50 Ом. Коефіцієнт підсилення сягає 10 дБі а ККД становить 81 %. Дальність дії розробленої Wi-Fi антени сягає 1,7 км з сектором покриття 37 градусів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. H. W. Hsieh, Y. C. Lee, K. K. Tiong, and J. S. Sun, "Design of a multiband antenna for mobile handset operations," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 200–203, 2009.
2. K. C. Lin, C. H. Lin, and Y. C. Lin, "Simple printed multiband antenna with novel parasitic-element design for multistandard mobile phone applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 1, pp. 488–491, 2013.
3. J. Cho, C. W. Jung, and K. Kim, "Frequency-reconfigurable twoport antenna for mobile phone operating over multiple service bands," *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 20, p. 1009, 2009.
4. Y. Sung, "Compact quad-band reconfigurable antenna for mobile phone applications," *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 16, p. 977, 2012.
5. R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*. 2005.
6. B. Tomasic, J. Turtle, S. Liu, R. Schmier, S. Bharj, and P. Oleski, "The Geodesic Dome Phased Array Antenna For Satellite Control and Communication - Subarray Design, Development and Demonstration," *IEEE Int. Symp. Phased Array Syst. Technol.*, pp. 411–416, 2003.
7. N. Seong and C. Pyo, "Ka-band Satellite Active Phased Array Multi-beam Antenna," *Vehicular Technology Conference*, vol.5, Vol.5, pp. 2807–2810, 2004.
8. N. H. Noordin, N. Haridas, A. O. El-Rayis, A. T. Erdogan, and T. Arslan, "Antenna array with wide angle scanning properties," *Proc. 6th Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2012*, pp. 1636–1640, 2012.
9. Y. Shih, B. Hsiao, and W. Liao, "Meandered Loop Array Antenna for Omni-Directional Coverage," *Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation*, pp. 61–62, 2014.
10. W. Zhou and T. Arslan, "A Bidirectional Planar Monopole Antenna Array for WiFi / Bluetooth and LTE Mobile Applications," *Loughborough Antennas and Propagation*, vol. 1, pp. 190–193, 2013.

11. Constantine A. Balanis, "Antenna Theory", 3rd ed., WileyIndia publications.
12. John D. Kraus, Ronald J. Marhefka, Ahmad S. Khan, "Antennas and Wave Propagation", 4th ed., Tata McGraw Hill Education Pvt. Ltd.
13. V. R. Anitha, S. Narayana Reddy, "Design of an 8×1 square microstrip patch antenna array", International Journal of Electronic Engineering Research, Vol. 1. No. 1, 2009, pp. 71-77.
14. Md. Tanvir Ishtaique-ul Huque, Md. Kamal Hosain; Md. Shihabul Islam, Md. Al-Amin Chowdhury, "Design and performance analysis of microstrip array antenna with optimum parameters for X-band applications", (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 2, No. 4, 2011.
15. K. Praveen Kumar, K. Sanjeeva Rao, T. Sumanth, N. Mohana Rao, R. Anil Kumar, Y. Harish, "Effect of feeding techniques on the radiation characteristics of patch antenna: Design and analysis", International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, Vol. 2, Issue 2, February 2013.
16. David M. Pozar, Sean M. Duffy, "A dual-band circularly polarized aperture-coupled stacked microstrip antenna for global positioning satellite", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 45, No. 11, November 1997.
17. R. Vivek, S. Sreenath Kashyap, "Novel inset feed miniaturized fractal patch antenna for wifi-applications", International Journal of Electronics and Communication Engineering, Vol. 2. Issue 2, May 2013, pp. 127-134.
18. R. Rajeswari, P. Sudharshini, S. V. Vidhya Harini, "Design of dual band dissimilar patch size array antenna for wireless applications", International Journal of Information Sciences and Techniques (IJIST), Vol. 4, No. 3, May 2014.
19. Anouar Dalli, Lahbib Zenkouar, Seddik Bri, "Comparison of circular sector and rectangular patch antenna arrays in C-band", Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2012, No. 4, pp. 457-467.
20. В. Щербаков, С. Ермаков. Безопасность беспроводных сетей: стандарт IEEE 802.11, 2010. – 256 с.
21. Сергей Пахомов. Анатомия беспроводных сетей // КомпьютерПресс. 2002. №7. С.167-175.

22. К. Е. Самуйлов, Д. С. Кулябов. Учебно-методическое пособие по курсу "Сети и системы телекоммуникаций". – М.: РУДН. – 2002. – 568с.
23. Група стандартів Wi-Fi IEEE 802.11.: <http://wi-life.ru/tehnologii/wi-fi/wi-fi-standarty>
24. Стандарти серії IEEE 802.: <http://latysheva2007.narod.ru/theme10.html>
25. Мережі Wi-Fi, стандарти і технологія: http://www.getwifi.ru/p_standarts.html
26. Планарні низько профільні інверсні L- та С-антени, Радіотехніка, телекомунікація та електроніка, наук. пр. – ОНАЗ.: О.С. Попова. 2014. - № 1. – С. 20-28.
27. Цалиев Т.А. Широкополосная дипольно-щелевая антенна / Т.А. Цалиев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2013. – № 2. – С. 10-17.
28. Слюсар В. И. Многодиапазонные антенны мобильных средств связи В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2006.– № 8. – С. 9096.
29. Банков С.Е. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2008. – 245 с.
30. Слюсар В. Многодиапазонные антенны мобильных средств связи. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2001. – № 10. – С. 90-97.
31. Слюсар В. Антенны RIFA для мобильных средств связи. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007.– №1. – С. 64-74.
32. Планарна антена для системи Wi-Fi на діелектричних резонаторах: <http://cyberleninka.ru/article/n/planarnaya-antena-dlya-sistemy-wi-fi-na-dielektricheskikh-rezonatorah>
33. Антенны для Wi-Fi-устройств: <https://compress.ru/article.aspx?id=17784>
34. Tanveer Kour Raina, Mrs. Amanpreet Kaur, Rajesh Khanna, "Design of aperture coupled micro-strip patch antenna for wireless communication applications at 10 GHz (X band)", International Journal of Electronics Engineering, 4(1), 2012, pp. 25-28.
35. Антенні пристрої: навч. посібник / Л.Я. Ільницький, Л.В. Сібрук, О.А. Щербина . – 2-е вид., допов. – К.: НАУ, 2018. – 200с.

36. Mmana-Gal – расчет и анализ, моделирование антенн:
<http://www.r9j.ru/soft/mmana-gal/>
37. MMana-gal: <http://dl2kq.de/mmana/4-1.htm>
38. Гончаренко И. Компьютерне моделювання антенн, все про програму Ммана. 2002. – 79 с.
39. Курушин А.А., Пластиков А.Н Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. – 2011. – 150 с.
40. Система моделирования СВЧ трехмерных структур CST Microwave Studio : <http://www.eurointech.ru/index.sema?a=pages&id=108>
41. DETAILED MODELING OF THE SNS RFQ STRUCTURE WITH CST MICROWAVE STUDIO:
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/106/PAPERS/THP008.PDF>
42. Банков С.Е., Курушин А.А Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. – 2009. – 250 с.
43. ANSYS HFSS: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-HFSS>
44. Ansoft HFSS: <http://www.obnovisoft1.ru/ansoft-hfss>
45. Банков С.Е., Курушин А.А Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. – 2008. – 249 с.
46. FEKO, система 3D электромагнитного моделирования FEKO:
http://rtf.sfedu.ru/noc1/soft_feko.html
47. FEKO: <http://www.rodnik.ru/catalog/sapr-svch-ustroystv/feko/>
48. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Мельников О. В. Основи охорони праці: Навч. посіб. – 4-те вид., допов. – Львів, 2000. – 350 с.
49. Жидецький В. Ц. Охорона праці користувачів комп'ютерів. – Львів, 2000. – 176 с.
50. Практикум з охорони праці: Навч. посіб. / В. Ц. Жидецький, В. С. Джигирей, В. М. Сторожук та ін. – Львів, 2000. – 350 с.
51. Методичні вказівки з курсу "Охорона праці" / В. С. Джигирей та ін. – Львів, 1992. – 88 с.

52. Державний реєстр міжгалузевих нормативних актів про охорону праці (Реєстр. ДНАОП) Держнаглядохоронпраці. – К.: Основи, 1995. – 223 с.
53. Денисенко Г. В. Охрана труда. – М., 1985. – 320 с.
54. Золотницкий Н. Д., Пчелинцев В. А. Охрана труда в строительстве. – М., 1978. – 407 с.
55. Законодавство України про охорону праці: У 4 т. – К.: Основи, 1995.
56. КерБЛ. П. Основи охорони праці: Навч.-метод. посіб. – К., 2001. – 252 с.
57. Петренко В. В. Заходи пожежної безпеки в Україні. – К.: Упр. держ. пожежної охорони МВС України, 1995. – 196 с.
58. Рожков А. П. Пожежна безпека на виробництві. – К., 1997. – 448 с.
59. Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий. СН 245-71. – М., 1972.
60. Шеляков О. П, Оберемок В. Н., Шевченко Л. А. Охорона праці. – К.: Укрпрофосвіта, 1999.
61. Влияние различных видов излучений на здоровье работников / Федорович С. В. и др. // Проблемы общественного здоровья и здравоохранения. – 2004. – 111 с.
62. Пресман А. С. Электромагнитные поля и живая природа / Пресман А. С. – Рипол Классик. – 2013. – С.33–60 .
63. Яшин С. А. Система регистрации собственных низкоинтенсивных электромагнитных полей на организм человека / С. А. Яшин // Весник новых медицинских технологий. – 2013. – Т. 20. – № 3. – 158 с.
64. Цветкова Е. А. Взаимодействие электромагнитных полей с биополем человека / Е. А. Цветкова, В. А. Гольдаде // Проблемы физики, математики, техники. – 2012. – № 1(10). – С. 51 – 58.
65. Павлов С.В. Механізм дії електромагнітного випромінювання, на об'єкти, що знаходяться в водному середовищі / С.В.Павлов, А.Ю. Клапоушак, Н.В. Тітова, Д.М. Барановський // Фото біоніка та фотомедицина. – 2016. – Т.12. – Вип. 1,2. – С. 139 – 141.

66. Шибкова Д. З., Эффекты воздействия электромагнитных излучений на разных уровнях организации биологических систем / Д. З. Шибкова, А. В. Овчинникова // Успехи современного естествознания. – М.: 2015. – № 5.

67. Девятков Н. Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты / Н. Д. Девятков // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110. – № 7. – С. 453 – 454.

68. Biomedical and biosocial anthropology 22 70 – 75 International academy of integrative anthropology / Богомольний Б. Р., Барзинський В. П., Грідіна Т. Л., Федчук А. С. А., Лозицький В. П., Мудрик Л. М., Шитікова Л. І., Сочесло Л. В. – 2014.

69. Дзюндзюк Б.В. Методы расчета радиопоглощающих материалов / Б. В. Дзюндзюк. – Харьков, 1987. – 150 с. – Деп. в УкрНИИИТИ 22.01.87, № 458, Ук.87.

70. А.с.1501325 СССР МКИ Н010. Экранирующая одежда / Б. В. Дзюндзюк, Э. И. Куликовский, В. И. Багров, А. А. Никитин, В. Д. Сахацкий (СССР). – № 4289037; заявл. 2.06.87.