

МІНІСТЕРСТВО ОБОРОНИ УКРАЇНИ

ВІЙСЬКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА ІНФОРМАТИЗАЦІЇ
ІМЕНІ ГЕРОЇВ КРУТ

Кафедра телекомунікаційних систем та мереж

І.К. Нестеренко

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ
РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ І
(ЕМС РЕЗ)**

Частина II

Київ - 2025

УДК 621.396

І.К.Нестеренко. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів та радіочастотний менеджмент. Частина II. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів і випромінювальних пристроїв: Навчальний посібник. К.: ВІТІ, 2026. 252 с.

Навчальний посібник містить базовий теоретичний та довідковий матеріал для проведення занять з навчальних дисциплін “Електромагнітна сумісність (ЕМС) радіоелектронних засобів (РЕЗ) та випромінюючих пристроїв (ВП)”. Викладено загальні положення по ЕМС РЕЗ, технічні основи аналізу електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, вплив процесів поширення радіохвиль для аналізу ЕМС, наведені методи забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів, а також методи оцінювання електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.

Приділено увагу аспектам практичного застосування отриманих знань для вирішення проблем електромагнітної сумісності радіообладнання.

До кожного розділу книги наведено контрольні питання та розрахункові завдання.

Навчальний посібник розроблено відповідно до робочих програм навчальної дисципліни (силабуса) та призначений для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю 172 (Електронні комунікації та радіотехніка) та G5 (Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка), буде також корисним для здобувачів інших спеціальностей при опануванні радіотехнологій та забезпечення спільної роботи радіообладнання.

АВТОР:

Нестеренко І. К. – доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Сайко В. Г. – професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, доктор технічних наук, професор;

Гуржій П. М. – докторант науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, к.т.н.

Рекомендовано до друку Вченою радою Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут (протокол засідання № __ від __ 2025 року).

УДК 621.396
© ВІТІ ім. Героїв Крут, 2025

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначення.....	5
Вступ	7
1. Основні положення про електромагнітну сумісність.....	8
1.1. Причини виникнення електромагнітних завад та проблеми електромагнітної сумісності.....	8
1.2. Основні поняття та визначення.....	10
1.3. Класифікація радіозавад та їх вплив на роботу радіоелектронних засобів.....	12
Контрольні питання.....	17
2. Електромагнітна сумісність технічних засобів	18
2.1. Класифікація технічних засобів за показниками електромагнітної сумісності.....	18
2.2. Показники електромагнітної сумісності технічних засобів.....	21
2.3. Сертифікація технічних засобів на відповідність нормам електромагнітної сумісності.....	23
Контрольні питання.....	27
3. Технічні основи аналізу електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.....	28
3.1. Параметри радіопередавальних засобів, що впливають на електромагнітну сумісність.....	28
3.2. Параметри радіоприймальних пристроїв, що впливають на електромагнітну сумісність.....	42
3.3. Характеристики антен, що впливають на електромагнітну сумісність...	58
Контрольні питання та завдання	68
4. Вплив процесів поширення радіохвиль на електромагнітну сумісність.....	73
4.1. Основне рівняння для енергетичного розрахунку радіолінії.....	73
4.2. Особливості поширення радіохвиль та моделі для розрахунку їх загасання.....	83
4.3. Моделі поширення радіохвиль діапазону ультрависоких частот.....	95
4.4. Модель нерегулярного рельєфу Лонглі-Райса.....	116
Контрольні питання.. та завдання.....	119
5. Методи забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.....	121
5.1. Технічні способи забезпечення електромагнітної сумісності.....	122
5.2. Організаційні способи забезпечення електромагнітної сумісності.....	125
5.3. Особливості забезпечення внутрішньооб'єктової електромагнітної сумісності.....	126
5.4. Частотно-територіальне рознесення радіоелектронних засобів.....	138
5.5. Призначення частотних каналів для радіоелектронних засобів.....	144
5.6. Активні просторові та поляризаційні способи захисту від завад.....	146
Контрольні питання та завдання	158
6. Методи оцінювання електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.....	160
6.1. Дослідження електромагнітної обстановки.....	160
6.2. Захисне відношення та його використання як критерію електромагнітної сумісності.....	164

6.3. Розрахунок рівня корисного сигналу і радіозавад.....	169
6.4. Порядок розв'язування завдань із забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.....	176
6.5. Оцінювання електромагнітної сумісності.....	181
6.6. Натурні випробування електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів.....	187
Контрольні питання та завдання.....	188
Додатки	
А. Таблиця даних для побудови моделі обвідної деяких випромінювань.....	190
Б. Статистичні моделі, які використовуються у розрахунках базових втрат поширення радіохвиль у різних типах середовищ у сценаріях за участю радіообладнання фіксованої служби.....	192
В. Програмне забезпечення для розрахунку радіоліній.....	194
Г. Алгоритм розрахунків електромагнітної сумісності для присвоєння радіочастот радіоелектронним засобам рухомої служби.....	201
Д. Форма картки тактико-технічних даних радіообладнання	213
Е. Перелік даних замовлення для розрахунку електромагнітної сумісності радіообладнання.....	215
Є. Розрахунок коефіцієнта частотної вибірконості приймача графічним та спрощеним методами.....	216
Ж. Урахування характеристик антен при розрахунках електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів	223
З. Методика визначення частотного та територіального рознесення для радіосистем.....	233
І. Приклади реалізації активних завадозахищених антен.....	240
Список літератури.....	249

СКРОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АА	– Адаптивна антена
ААР	– Адаптивна антенна решітка
АКЗ	– Адаптивний компенсатор завад (автокомпенсатор завад)
АФАР	– Адаптивна фазована антенна решітка
АЧС	– Амплітудно-частотний спектр
АЧХ	– Амплітудно-частотна характеристика
АФП(С)	– Антено-фідерний пристрій (антена, АФС– система)
АФР	– Амплітудно-фазовий розподілу (АФР) поля в апертурі антени
БГШ	– Білий гауссівський шум
БС	– Базова станція
ВАХ	– Вольт-амперна характеристика
ВП	– Випромінювальний пристрій
ВЕМЗ	– Внутрішньосистемні електромагнітні завади
ВК	– Вагові коефіцієнти
ДЗ	– Джерело електромагнітних завад
ДС(А)	– Діаграма спрямованості (антени)
ЗО	– Зона обслуговування
ДЗК (ЗК)	– Дзеркальний радіоканал
ДРВ	– Джерело радіовипромінювання
ДРЗ	– Джерело радіозавад
ДУС	– Діаграмоутворююча схема
ЗВ	– Захисне відношення
ЗС	– Завадовий сигнал
ЕІВП	– Еквівалентна ізотропно-випромінювальна потужність
ЕМЗ (EMI)	– Електромагнітна завада (<i>electromagnetic interference</i>)
ЕМО (EME)	– Електромагнітна обстановка (середовище)
ЕМС	– Електромагнітна сумісність (<i>Electro Magnetic Compatibility</i>)
ЕРС	– Електрорушійна сила
ІРЗ	– Індустріальні радіозавади
ІФР	– Інтегральної функції розподілення
КАР	– Кільцева антенна решітка
КВП	– Коефіцієнт використання поверхні апертури
КП	– Коефіцієнт підсилення антени
КР	– Координатна відстань
КСД	– Коефіцієнт спрямованої дії
КТР	– Кутове рознесення
КТЧ	– Канал тональної частоти
КХ	– Короткі хвилі
КЯ	– Критерій якості
МЕМЗ	– Міжсистемна електромагнітна завада
МСЕ (ITU)	– Міжнародний союз електрозв'язку (<i>International Telecommunication Union</i>)
МСЕ-Р (ITU-R)	– Сектор радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку
НКЕК	– Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сфері електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку
НТД	– Нормативно-технічні документи
ПА	– Параболічна антена

ПВЧ	– Підсилювач високої частоти
ПЕС	– Первинний електричний сигнал
ПОС	– Пристрої обробки сигналів
ППЧ	– Підсилювач проміжної частоти
ПРА	– Перископічна антена
ПРАУ	– Пристрій реалізації алгоритму управління
ПРМ (прм)	– Радіоприймач або радіоприйом;
ПРД (прд)	– Радіопередавач або радіопередача;
ПРХ	– Поширення радіохвиль
ПЧОС	– Просторово-часові методи формування та обробки сигналів
ПФОС	– Пристрої формування опорного сигналу
ПФС	– Пристрій формування сигналів
РЕБ	– Радіоелектронна боротьба
РЕЗ	– Радіоелектронний засіб
РЗ	– Рецептор радіозавад
РЛА	– Рупорно-лінзова антена
РПА	– Рупорно-параболічна антена
РРЛ (С)	– Радіорелейна лінія (станція)
РО	– Радіообладнання
РЧС (РЧР)	– Радіочастотний спектр (радіочастотний ресурс)
СЗО	– Сигнально-завадова обстановка
СК	– Сусідній радіоканал
ТЗ	– Технічний засіб
ТР	– Територіальне рознесення
ТРС	– Тропосферна станція
ТРЧ (ТВЧ)	– Тракт радіочастоти (Тракт високої частоти)
ТУ	– Технічні умови
УДЦР (ДП УДЦР)	– Державне підприємство "Український державний центр радіочастот"
УКХ	– Ультракороткі хвилі
ЧР	– Частотне рознесення
ЧТР	– Частотне та територіальне (просторове) рознесення
<i>BS</i>	– <i>Base Station</i> (базова станція)
<i>DMR</i>	– <i>Digital Mobile Radio</i> (відкритий стандарт цифрового радрозв'язку)
<i>CRPA</i>	– <i>Controlled reception pattern antenna</i>
<i>EMC</i>	– <i>Electro Magnetic Compatibility</i> (електромагнітна сумісність)
<i>EMI</i>	– <i>Electromagnetic interference</i> (електромагнітна завада)
<i>FDMA</i>	– <i>Frequency Division Multiple Access</i> (множинний доступ з поділом каналів за частотою)
<i>HAAT</i>	– висота розміщення антени над середньою місцевістю
<i>SINR</i>	– <i>Signal Interference + Noise Ratio</i> (відношення сигналу до шуму та завади)
<i>SNR</i>	– <i>Signal Noise Ratio</i> (відношення сигналу до шуму)

ВСТУП

Широке впровадження радіоелектронних засобів (РЕЗ) у різні сфери людської діяльності призводить до зростання рівня електромагнітних полів, створюваних ними у навколишньому просторі. Ці поля є радіозавадами для інших подібних пристроїв, що погіршує умови їх функціонування та знижує ефективність застосування. Забезпечення одночасної та спільної роботи різного радіотехнічного, електронного та електротехнічного обладнання потребує забезпечення їх електромагнітної сумісності (ЕМС).

Загострення проблеми ЕМС обумовлено такими причинами:

- розширений розвиток радіотехнологій для різноманітних завдань;
- кількісне зростання стаціонарних та рухомих радіозасобів, що супроводжується зменшенням відстаней між ними;
- збільшення потужностей радіовипромінювань та коефіцієнтів посилення антен, зростання чутливості радіоприймальних пристроїв;
- висока щільність зосередження радіозасобів, розміщення РЕЗ на одному об'єкті та в умовах обмеженого простору (на опорах, будинках, судах, літаках, супутниках тощо) внаслідок чого відстані між РЕЗ є дуже малими, що знижує втрати енергії радіосигналів при поширенні, тобто, обумовлює підвищення енергетики ненавмисних завад;
- використання багатьма сучасними радіозасобами широкосмугових сигналів;
- обмеженість радіочастотного спектру, включаючи концентрацію генераторних та приймальних приборів в небагатьох раніше освоєних частотних діапазонах;
- технічна недосконалість передавальних та приймальних пристроїв РЕЗ, внаслідок чого виникають невідомі в інших галузях радіоелектроніки нелінійні явища, що обумовлюють наявність прийому та випромінювання сигналів за межами смуг робочих частот, тощо, а також відхилення параметрів радіостанцій від заданих;
- зростання кількості радіозавод промислового, медичного, транспортного та іншого походження, яке не пов'язано з радіозв'язком, тощо.

Проблема ЕМС РЕЗ одна із найважливіших проблем радіоелектроніки. Неможливо займатися проєктуванням, створенням та експлуатацією РЕЗ різного призначення без урахування умов їх ЕМС. Фахівець у галузі радіоелектроніки повинен знати принципи забезпечення ЕМС РЕЗ та використовувати ці знання у практичній діяльності. Для подальшого розвитку радіоелектроніки завдання забезпечення ЕМС має менше значення, ніж забезпечення надійності чи мініатюризація РЕЗ.

Метою даного навчального посібника є викладення необхідного мінімуму знань у галузі ЕМС РЕЗ. Автор спробував викласти матеріал настільки просто, наскільки це можливо.

1. Основні положення про електромагнітну сумісність (ЕМС)

1.1. Причини виникнення електромагнітних завад та проблеми ЕМС

Широке впровадження електротехнічних і радіоелектронних засобів (РЕЗ) приводить до зростання рівнів електромагнітних полів, які створюються ними в навколишньому просторі. Ці поля є завадами для інших подібних пристроїв, погіршуючи умови їхнього функціонування й знижуючи ефективність застосування.

Сукупність електромагнітних полів у певній частині простору, смуги частот та інтервалу часу, що створюються діючими РЕЗ, випромінювальними пристроями (ВП), природними явищами тощо, що впливають на якість функціонування радіосистем становлять собою електромагнітну обстановку (ЕМО) в цій області (електромагнітне оточення). Причому такий вплив може проявлятися як разом із корисним сигналом, так і без нього, як через антену, так і без неї.

Електромагнітна завада (англ. *electromagnetic interference – EMI*) визначається, як небажаний вплив енергії електромагнітного поля, викликане одним або декількома випромінюваннями, радіаціями або індукціями, на прийом у системі радіозв'язку, що виявляється в будь-якому погіршенні якості, помилках або втрати інформації, яких можна було б уникнути за відсутності такої небажаної енергії. Джерела завад можуть бути всередині РЕЗ та поза ним.

Рівень радіозавади вимірюють або одиницях напруженості електромагнітного поля (В/м, мкВ/м), або одиницях щільності потоку потужності (Вт/м²).

В залежності від походження джерел електромагнітних завад їх поділяють на природні або штучні. Останні прийнято ділити на навмисні та ненавмисні завади.

Ненавмисна завада – це будь-яка радіозавада штучного походження, не призначена для порушення функціонування РЕЗ. Ненавмисні завади можуть бути випромінюваними та наведеними у провідниках. Електромагнітні завади можуть серйозно погіршити якість функціонування РЕЗ, до повної неможливості виконати їм основну функцію.

Неприпустима радіозавада (НРЗ) – електромагнітна завада, вплив якої знижує якість функціонування технічного засобу до недопустимого рівня.

Завадостійкість – властивість РЕЗ виконувати функціональне завдання із заданою якістю в умовах впливу **ненавмисних** радіозавад.

Навмисні радіозавади в теорії ЕМС РЕЗ і в процедурах управління користуванням РЧС не розглядаються. Вони є предметом вивчення в теорії завадозахищення.

Завадозахисність – властивість РЕЗ виконувати функціональне завдання із заданою якістю в умовах впливу **навмисних** радіозавад.

У Регламенті радіозв'язку [10] та інших нормативних документах наводяться також визначення таких термінів:

Технічні засоби (ТЗ) – електротехнічні, радіотехнічні та електронні вироби, обладнання та апаратура виробничо-технічного, господарського та культурно - побутового призначення.

Радіосистема – система, що складається з радіоелектронних засобів, призначена для певних цілей.

Радіолінія – сукупність радіотехнічних засобів та обладнання, що утворюють один чи кілька каналів зв'язку для передачі інформації між двома або більше пунктами.

Причинами виникнення ненавмисних радіозавад є:

- кількісне зростання стаціонарних та рухомих радіозасобів, що супроводжується зменшенням відстаней між ними;

- збільшення потужностей радіовипромінювань та коефіцієнтів посилення антен, зростання чутливості радіоприймальних пристроїв;

- висока щільність зосередження радіозасобів, розміщення РЕЗ на одному об'єкті та в умовах обмеженого простору (на опорах, будинках, судах, літаках, супутниках тощо) внаслідок чого відстані між РЕЗ є дуже малими, що знижує втрати енергії радіосигналів при поширенні, тобто, обумовлює підвищення енергетики ненавмисних завад;

- обмеженість радіочастотного спектру, включаючи концентрацію генераторних та приймальних приборів в небагатьох раніше освоєних частотних діапазонах:

- використання широкосмугових сигналів;

- технічна недосконалість передавальних та приймальних пристроїв РЕЗ, внаслідок чого виникають невідомі в інших галузях радіоелектроніки нелінійні явища, що обумовлюють наявність прийому та випромінювання сигналів за межами смуг робочих частот, тощо, а також відхилення параметрів радіостанцій від заданих;

- зростання кількості радіозавад промислового, медичного, транспортного та іншого походження, яке не пов'язано з радіозв'язком, тощо.

Оскільки діапазон застосовуваних частот обмежений, то значна кількість і скупченість антен РЕЗ розміщених на одному об'єкті, зростання рівня радіозавад, у тому числі випромінюваних у небажаних напрямках, а також підвищена сприйнятливості радіосистем по відношенню до завад сприяють порушенню умов ЕМС. Причому **завади можуть виникати в РЕЗ і проникати в них на частотах, відмінних від частот робочого діапазону**, тим самим погіршуючи якісні показники.

Наявність ненавмисних радіозавад породила проблему електромагнітної сумісності – галузі теорії та практики, пов'язаної із забезпеченням сумісної роботи РЕЗ, особливо на об'єктах, в локальних угрупованнях без шкідливого впливу випромінювань одних засобів на

функціонування інших.

Ці радіовипромінювання можуть бути завадами для інших подібних пристроїв, погіршуючи умови їхнього функціонування та знижуючи ефективність застосування. Отже, основним напрямом вирішення цієї проблеми є зниження рівня радіозавад – основного фактора, що погіршує умови нормального функціонування РЕЗ.

1.2. Основні поняття та визначення

Законом України “Про електронні комунікації” визначено терміни стосовно ЕМС [9]:

радіообладнання (радіоелектронний засіб, РЕЗ) – електричний або електронний виріб, що призначений для випромінювання та/або приймання радіохвиль з метою радіозв’язку та/або радіовизначення або укомплектований додатковим пристроєм, призначеним для випромінювання та/або приймання радіохвиль з метою радіозв’язку та/або радіовизначення;

випромінювальний пристрій (ВП) – технічний пристрій, що випромінює електромагнітну енергію у навколишній простір, використовується для виробничих, наукових, медичних, військових, промислових, побутових потреб (крім потреб радіозв’язку) та який не є радіообладнанням;

радіозавади – завади, спричинені електромагнітним випромінюванням, що загрожують функціонуванню служб радіонавігації або інших служб безпеки чи значно погіршують якість, перешкоджають або неодноразово переривають роботу служб радіозв’язку, що діють відповідно до законодавства чи міжнародних договорів;

радіозв’язок – електронні комунікації, що здійснюються з використанням радіочастотного спектра;

електромагнітна сумісність – здатність радіообладнання, випромінювальних пристроїв, радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв спеціального призначення функціонувати одночасно, з обумовленою якістю в реальних умовах експлуатації і не створювати радіозавад іншому радіообладнанню, випромінювальним пристроям, радіоелектронним засобам та випромінювальним пристроям спеціального призначення.

З визначення випливає, що радіосистема вважається електромагнітно сумісною з іншими РЕЗ, якщо вона:

- не створює завад іншим системам;
- не сприймає ненавмисні завади від інших систем;
- не створює завади собі.

Слід мати на увазі, що електромагнітні поля, які збуджуються різними джерелами, взаємопроникні і для них не немає ні державних, ні відомчих кордонів. Тому радіохвилі, які збуджуються окремими

радіопередавальними пристроями, є корисними сигналами для радіоприймальних пристроїв одної радіосистеми, водночас можуть стати ненавмисними радіозавадами для радіоприймальних пристроїв, що належать іншим радіосистемам.

Поява нового РЕЗ змінює ЕМО в точках, де вже розташовані інші РЕЗ. Ця зміна може погіршити якість функціонування деяких з них.

Електромагнітні випромінювання будь-якого радіопередавача зосереджені як у смузі його робочої частоти (*основне випромінювання*), так і за межами цієї смуги (*неосновне випромінювання*). І основне, і неосновне випромінювання при використанні, наприклад, направлених антен можуть поширюватися як у головній пелюстці діаграми направленості, так у бокових, і в задній. В головній і в бокових пелюстках випромінюються електромагнітні хвилі як з робочою поляризацією, так і з поляризацією, параметри якої відмінні від робочої.

Причини та шляхи виникнення завад при роботі радіозасобів ілюструє наступна схема (рис. 1.1):

На схемі показані умовні виходи (основний та небажані) радіопередавача (ПРД, англ. *Transmitter* – T_x) та умовні входи (по основному каналу приймання та канали проникнення завад) радіоприймача (ПРМ, англ. *Receiver* – R_x) з ознаками (частотними, просторовими, поляризаційними) розподілу випромінювання радіопередавача та селекції (вибірковості) радіоприймача.

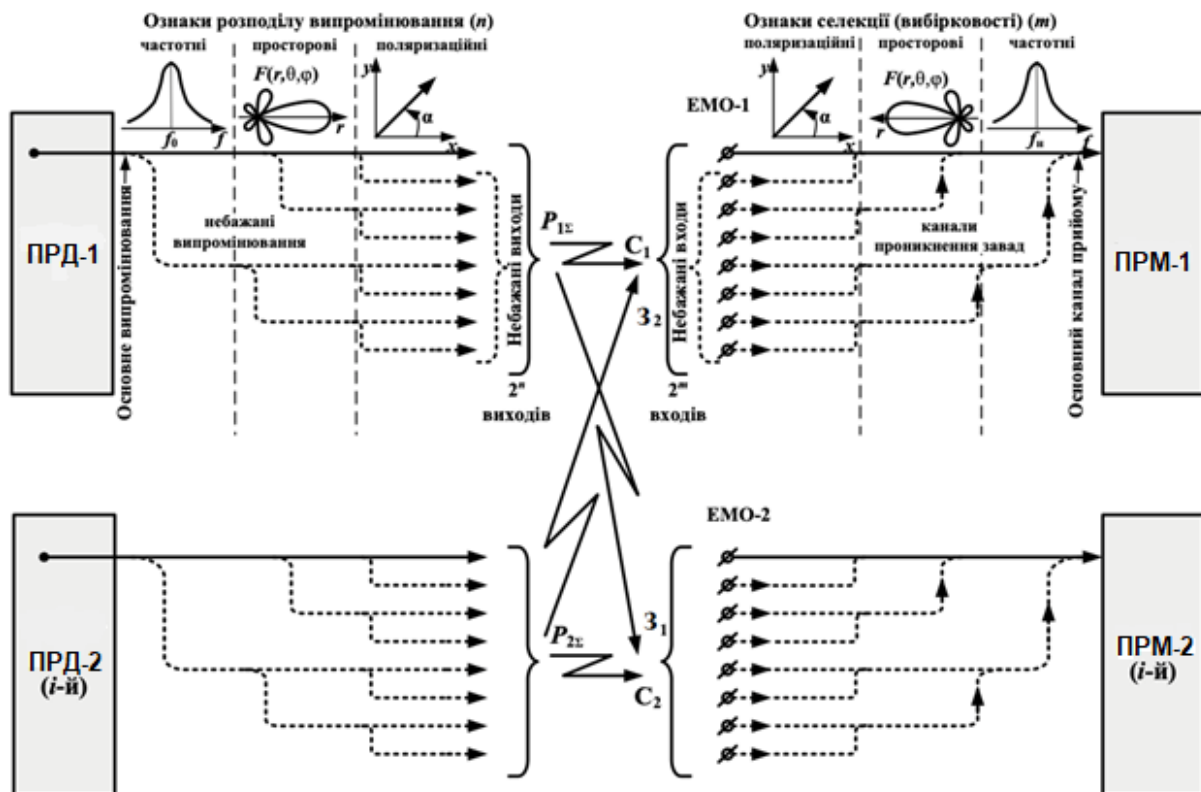


Рисунок 1.1 – Схематична інтерпретація виникнення завад (P_{Σ} – сумарна вихідна потужність випромінювання, C – корисний сигнал, Z – завада)

У точці приймання зазвичай має місце сукупність корисного сигналу і завад (*сигнально-завадова обстановка – СЗО*).

Аналіз ЕМС для конкретної ситуації проводиться перевіркою виконання **критерію ЕМС**. У більшості випадків – порівнянням розрахункового значення відношення *корисний сигнал/(завада+шум)* на вході приймача (англ. *Signal Interference + Noise Ratio – SINR*) з мінімально необхідним для даного РЕЗ у вибраному режимі роботи (виду модуляції). Враховується сукупний рівень завадових сигналів від декількох джерел завад та каналів приймання на вході приймача, що досліджується.

Щоб домогтися ЕМС при забезпеченні спільної роботи якомога більшої кількості РЕЗ у тому ж радіочастотному просторі, необхідно підвищити електромагнітну ефективність РЕЗ, тобто поліпшити ті чи інші параметри випромінювання та/або приймання. За таких ідеальних умов передавальні РЕЗ випромінюють тільки необхідні сигнали в необхідній смузі частот і з мінімальною потужністю тільки в задану точку, а приймальні РЕЗ здійснюють приймання сигналів тільки із заданого напрямку на частоті налаштування.

1.3. Класифікація радіозавад та їх вплив на роботу РЕЗ

Джерелами електромагнітних завад (ДЗ) можуть бути будь-які пристрої, які створюють та випромінюють електромагнітні поля.

Джерела радіозавад бувають *штучного* та *природного походження* (рис.1.2).

Штучні завади породжуються електромагнітними процесами в технічних пристроях. Джерела штучного походження можуть бути **навмисні** і **ненавмисні**.

Рецептор радіозавади – приймальний пристрій або система, що піддається впливу радіозавад;

Джерелами електромагнітних завад можуть виступати не лише радіоелектронні, а й інші технічні засоби (ТЗ). Деякі пристрої можуть одночасно бути і джерелами і рецепторами завад, а їх властивість виступати в ролі рецептора завад характеризується їх **електромагнітною сприйнятливістю** – під якою розуміється *властивість рецептора реагувати на зовнішню щодо нього заваду*.

За видом рецептора ненавмисні завади поділяються на міжсистемні, внутрішньосистемні та індустріальні.

Внутрішньосистемні радіозавади – ненавмисні радіозавади, що виникають між РЕЗ однієї радіосистеми.

Внутрішньосистемні завади можуть бути **внутрішніми** і **зовнішніми**. Внутрішні завади створюються вузлами самої апаратури, а джерела зовнішніх завад знаходяться поза нею.

Внутрішньосистемні завади формуються джерелами, що входять в дану систему зв'язку, наприклад, створюються випромінюваннями радіопередавальних пристроїв, гетеродинами радіоприймачів,

генераторами рядкової розгортки телевізорів та ін.



Рисунок 1.2. Класифікація радіозавад

До категорії внутрішньосистемних завад можна віднести і контактні завади. Найбільш небезпечними є випромінювання радіопередавальних пристроїв, найчастіше погіршують якість зв'язку аж до повного порушення зв'язку.

Міжсистемна радіозавада – ненавмисна радіозавада, що виникає між РЕЗ різних радіосистем. Вона створюються джерелами, зовнішніми щодо даної системи.

Основним постачальником електромагнітних полів в навколишнє середовище є радіовипромінювання систем, що спрямовано використовуються радіослужбами. Внутрішньо- і міжсистемні радіозавади іноді називають взаємними.

Ці завади поширюються в просторі (середовищі) аналогічно корисним радіосигналам.

Індустріальні радіозавади (IPЗ), іноді їх називають техногенними, створюються технічними засобами, які використовують в будь-якій формі енергію електричного струму. Це – дуже широкий клас завад.

До електромагнітних полів **природного походження** належать:

- власні внутрішні шуми радіоапаратури (тепловий і дробовий шуми, шуми струморозподілу, поверхневого ефекту, вторинної емісії, генерування та рекомбінування носіїв заряду);

- шуми теплового випромінювання Землі;
- позаземні шуми (радіовипромінювання Сонця, Місяця, планет, космічне радіовипромінювання);
- атмосферні завади (грозові розряди, випромінювання атмосфери); до
- атмосферних завад умовно відносять специфічні завади від електростатичних розрядів;
- завади процесу поширення радіохвиль.

Класифікація радіозавад за видом середовища поширення

За видом середовища поширення розрізняють завади випромінювання і кондуктивні завади.

Завади випромінювання (індуктивні завади) поширюються у відкритому просторі і впливають зазвичай на прийомні антени (або елементи, які виконують роль «приймних антен»). Індуктивними називають завади, що розповсюджуються у вигляді електромагнітних полів у непровідних середовищах.

Кондуктивні завади поширюються від джерела до рецептора по фізичним (штучним) ланцюгам живлення, управління, сигналізації, заземлення і т.п. Кондуктивні завади являють собою струми, що течуть по конструкціях, що проводять, і землі.

Класифікація радіозавад за частотно-часовими властивостями

За частотно-часовими властивостями завади можуть бути зосередженими по спектру (**вузькосмугові**), зосередженими по часу (**імпульсні**) і **флуктуаційними**. Поняття вузькосмуговості і зосередженості завад за часом відносяться відповідно до величин $\Delta f_{\text{ПР}}$ і $1/\Delta f_{\text{ПР}}$, де $\Delta f_{\text{ПР}}$ – смуга пропускання радіоприймача.

Класифікація радіозавад по характеру взаємодії з корисним сигналом

За характером взаємодії з корисним (що приймається) сигналом розрізняють **адитивні і мультиплікативні завади**. У першому випадку завади *підсумовуються* з сигналом, у другому – виступають в ролі «*випадкового помножувача*», коефіцієнта передачі середовища ПРХ.

Типовим представником мультиплікативний завад є завади процесу поширення радіохвиль (наприклад, коефіцієнта передачі середовища за рахунок багатопроменевого ПРХ), що викликаються відбиттям, розсіюванням, поглинанням енергії хвиль, обертанням площини поляризації, ефектом Доплера тощо. До них, зокрема, відносяться завади, що викликають завмирання сигналів.

Заходи ослаблення їх впливу є специфічними і не є предметом розгляду в теорії ЕМС РЕЗ, хоча в багатьох радіосистемах при визначенні якості приймання радіосигналів, наприклад, в радіорелейних, тропосферних, супутникових і наземних мобільних, з їх впливом доводиться миритися. Специфічні заходи боротьби з такими завадами розглядаються при вивченні відповідних радіосистем.

Індустріальні (техногенні) радіозавади

ІРЗ можуть створюватися при роботі електричних, електронних і радіотехнічних пристроїв різного призначення, за винятком випромінювань, які створюються високочастотними трактами радіопередавачів. А саме – медичною, науковою, промисловою та побутовою апаратурою, лініями електропередачі, генераторним і трансформаторних обладнанням, електрообладнанням усіх видів транспорту тощо.

Під час роботи електропристроїв ІРЗ виникають унаслідок різких змін струму й напруги в електричних колах, що часто супроводжуються іскрінням, наприклад при розриві контактів або при ковзанні щіток електричних машин по колектору. Зрештою формується радіозавада з безперервним спектром, який може співпадати зі смугами частот РЕЗ.

На відміну від природних радіозавад, для ІРЗ існують можливості регулювання їх не лише в рецепторах, тобто апаратурі, що зазнає впливу ІРЗ, а й у місцях їх виникнення – в джерелі завад. Рівні ІРЗ в джерелі обмежуються до припустимих значень. Вимоги до припустимих рівнів регламентовано нормативними документами, наприклад у ДСТУ EN 55011:2019 “Обладнання промислове, наукове та медичне радіочастотне. Характеристики електромагнітних завад. Норми і методи вимірювання” та в інших документах, наведених в [7].

Пристрої – джерела ІРЗ підлягають контролю якості за рівнем завад при сертифікації (дивись п. 2.3).

Для обмеження ІРЗ використовують різні засоби придушення: іскрогасники, відбивальні і поглинальні фільтри та екрани, дроселі, симетруючі пристрої, заземлення тощо. На основі методів фільтрації та екранування розробляють конструкції, що мінімізують рівні завад.

Класифікація індустріальних радіозавад

Індустріальні радіозавади діляться на безліч груп, класів і підкласів в залежності від середовища поширення, спектрального складу, механізму утворення і впливу на рецептор.

За функціональним призначенням пристрою – джерела радіозавад (далі – ДРЗ) діляться на наступні основні групи:

- побутові прилади та пристрої;
- електричне світлове обладнання;
- електротранспорт та пристрої з двигунами внутрішнього згоряння;
- промислові, наукові, медичні та побутові високочастотні пристрої;
- високовольні повітряні лінії електропередачі (ЛЕП) і електричні підстанції;
- системи з електротягою;
- побутова радіоелектронна апаратура (ПРЕА);
- обладнання інформаційних технологій (ОІТ).

Типовий усереднений рівень електромагнітного шуму для деяких джерел (МСЕ-Р) наведені на рис. 1.3.

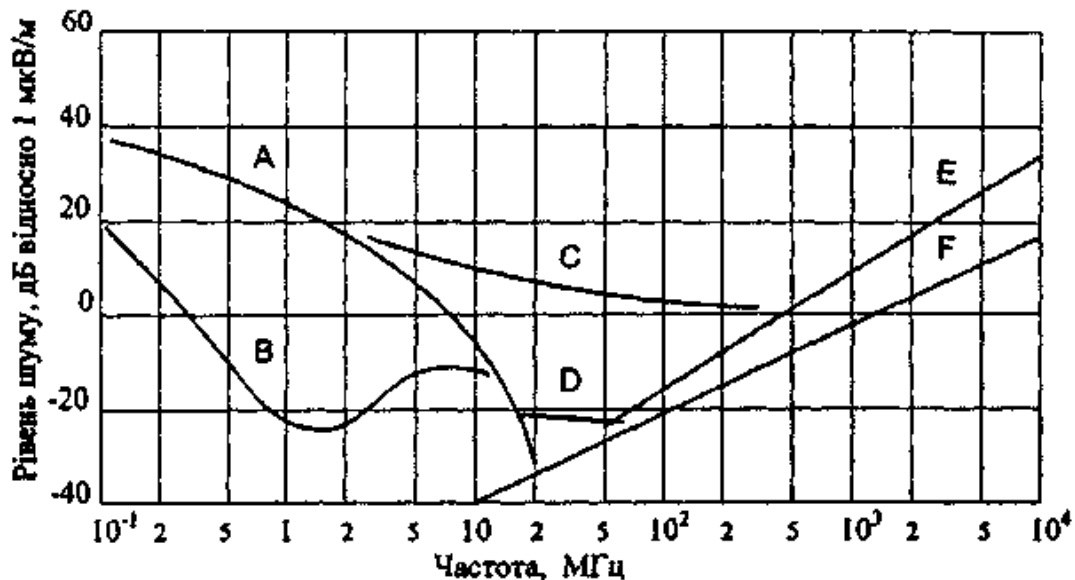


Рисунок 1.3. Типовий усереднений рівень шуму в смузі частот 6 кГц:
A – стаціонарний атмосферний шум вночі; *B* – полуденний стаціонарний атмосферний шум; *C* – шуми від систем запалювання двигунів внутрішнього згоряння у великому місті; *D* – космічний шум; *E* – шум типового радіоприймача; *F* – тепловий шум.

Рівні шумів можуть бути різними не тільки у різних смугах частот, а і на різній місцевості (в умовах міста, сільської місцевості тощо).

Для прикладу на рисунку 1.4. наведені мінімальні рівні корисного сигналу, які необхідні для радіозв'язку у діапазоні VHF в умовах індустріальних завод:

- – 80... –100 дБ – у місті;
- – 100...– 110 дБ – у сільській місцевості.

Таблиця рівнів радіосигналів у дБ

Важливо запам'ятати: шкала зворотна.
 -100 дБ це "слабко", а -40 дБ це "сильно"



Мета: дати загальне розуміння лінійки рівнів прийомних сигналів. Постарався для Вас Сергій Флеш

Рисунок 1.4. Мінімальні рівні корисного сигналу, які необхідні для радіозв'язку у діапазоні VHF в умовах індустріальних завод

Контрольні питання

1. Аргументуйте актуальність проблеми електромагнітної сумісності технічних засобів.
2. Наведіть визначення електромагнітної сумісності технічних засобів. Обґрунтуйте найважливіші причини загострення проблеми ЕМС.
3. Що таке ЕМС та ЕМО?
4. Яка різниця між завадостійкістю та завадозахищеністю приймання?
5. Наведіть класифікацію радіозавад та подайте їх визначення.
6. Які завади відносять до ненавмисних завад штучного походження?
7. Які завади відносять до завад природного походження?
8. Наведіть класифікацію та характеристику внутрішньосистемних радіозавад.
9. Дайте визначення та характеристику міжсистемних радіозавад.
10. Наведіть класифікацію радіозавад за видами середовища поширення.
11. У чому полягає сутність поділу радіозавад за частотно-часовими властивостями?
12. Наведіть класифікацію радіозавад за характером взаємодії з корисним інформаційним сигналом.
13. Класифікація індустріальних радіозавад.
14. Розкрийте причини виникнення контактних радіозавад і аргументуйте способи їх послаблення (подавлення).
15. По яким каналам можуть передаватися завади до рецептора завад?

2. Електромагнітна сумісність технічних засобів

2.1. Класифікація технічних засобів за показниками електромагнітної сумісності

Джерелами електромагнітних завад можуть виступати не тільки радіоелектронні, а й інші технічні засоби (ТЗ). Багато ТЗ, що піддаються дії завад, можуть самі виступати рецепторами завад. Властивість ТЗ виступати в якості рецептора завад називається сприйнятливістю.

Електромагнітна сприйнятливість визначає наскільки добре електронний пристрій може працювати без погіршення продуктивності під впливом електромагнітних завад. По суті, це вимірює здатність пристрою протистояти завадам від інших пристроїв або джерел електромагнітного випромінювання.

Сприйнятливість характеризує вразливість рецептора. Так, для радіоприймача вона визначає сприйняття їм завади будь-яким (основним або побічним) каналом приймання. Зрозуміло, що *сприйнятливість тільки за основним каналом приймання еквівалентна чутливості приймача*. Поняття “чутливість” відноситься до реакції приймача на корисний сигнал.

Отже, поняття ЕМС поширюється на більш широкий клас ТЗ, ніж РЕЗ. Багато ТЗ (в тому числі і РЕЗ) можуть бути одночасно як джерелами, так і рецепторами завад.

Початкова інформація, призначена для передачі (наприклад, мова, відеосигнал, цифрові дані ЕОМ або телеметрії, навігаційні параметри, сигнали логічних систем, синхроімпульси), поступає від інформаційного блоку передавача і перетворюється для безпосередньої передачі. При цьому електромагнітні завади (ЕМЗ) можуть утворитися в результаті випромінювання (*Radiated interference*) передавачем потужності досить високого рівня, а також можуть бути наведені (*Conducted interference*) через загальний контур заземлення або джерело живлення. Оскільки шляхи виникнення цих завад лежать усередині даної РЕЗ, то їх називають **внутрішньосистемними електромагнітними завадами (ВЕМЗ)**.

Радіосигнал від антени передавача розповсюджується в просторі. Приймальна антена разом з корисним випромінюванням передавача (інформаційним сигналом) може приймати сигнали від інших джерел навмисного випромінювання (наприклад, зв'язкових, навігаційних, радіолокаційних), які в даному випадку є завадами. Приймальна антена може також приймати завади від джерел ненавмисного випромінювання (таких, наприклад, як завади від промислового і медичного устаткування, дугового електрозварювання, ЕОМ, атмосферний і галактичний шум). Завади, що виникають між двома або більш системами, називають **міжсистемними електромагнітними завадами (МЕМЗ)**.

На рис. 2.1 і рис. 2.2 відображені джерела і рецептори внутрішньо-системних і міжсистемних електромагнітних полів відповідно.

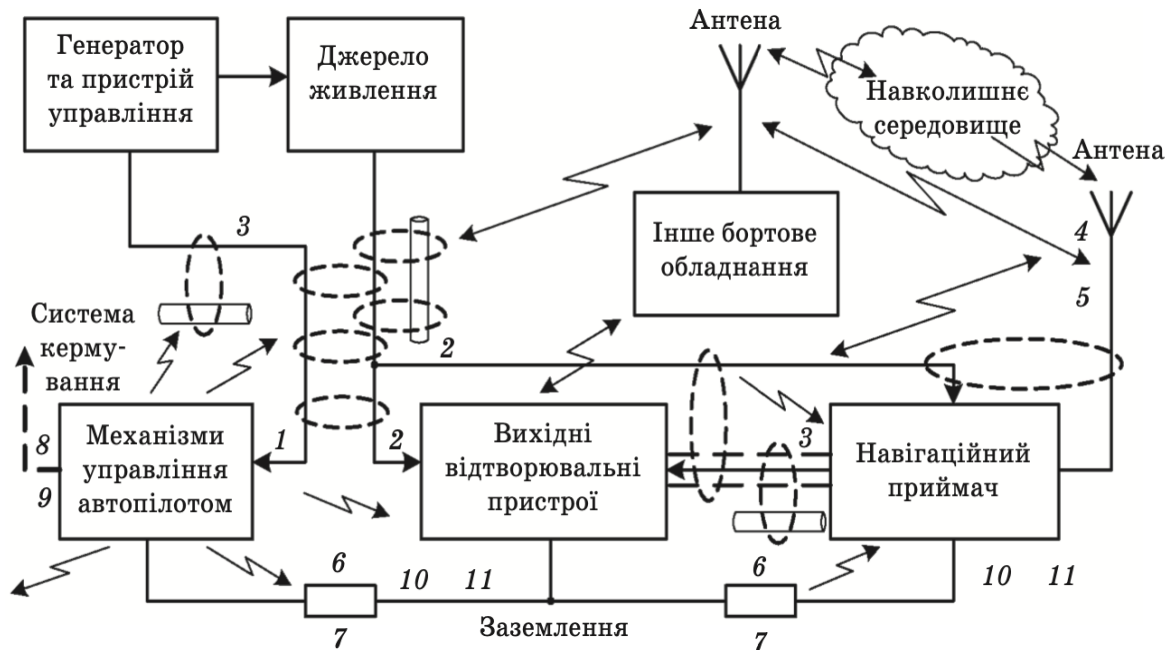


Рисунок 2.1. Джерела й рецептори внутрішньосистемних електромагнітних полів:

1, 2 – відповідно випромінювання та сприйнятливість кабелю живлення; 3 – випромінювання з'єднувального кабелю; 4, 5 – відповідно випромінювання та сприйнятливість антенного фідера; 6, 7 – еквівалентний імпеданс спільного контура заземлення, що відіграє роль як джерела, так і рецептора завад; 8, 9 – випромінювання магнітного та електричного поля; 10, 11 – сприйнятливість до магнітного та електричного поля

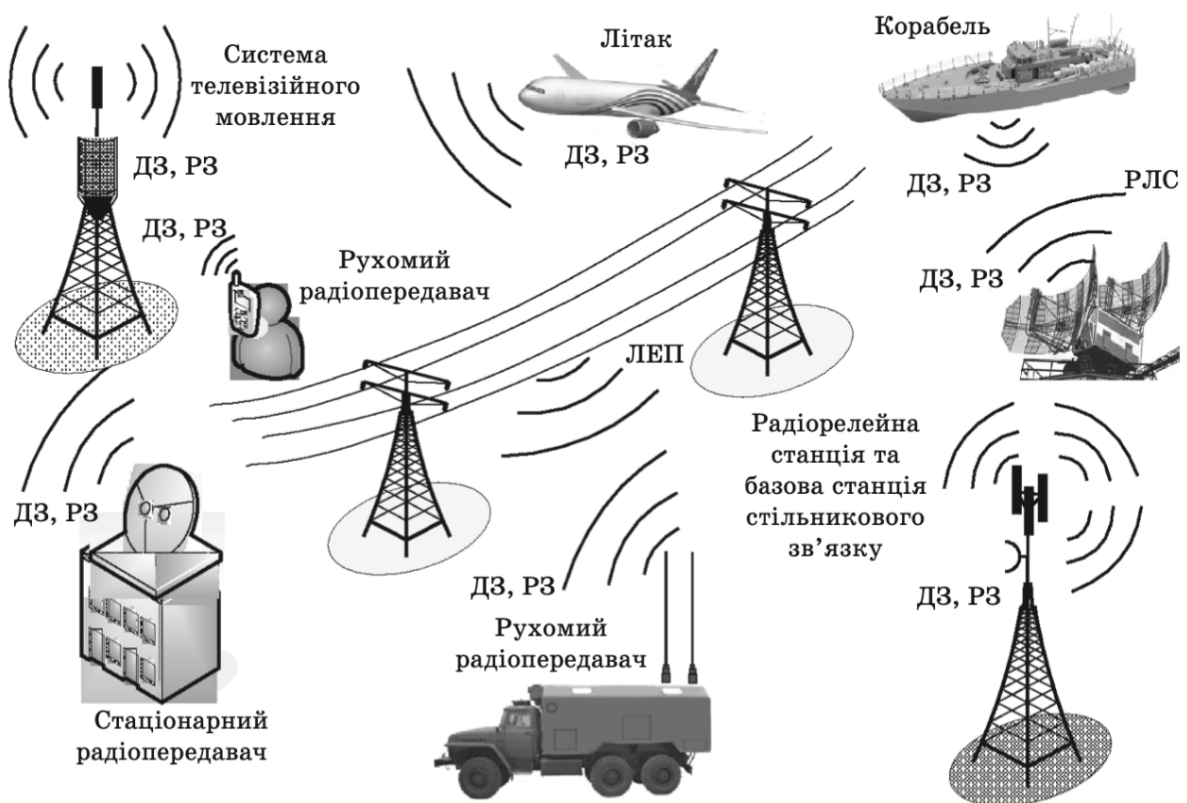


Рисунок. 2.2. Джерела і рецептори міжсистемних електромагнітних полів

На рис. 2.3 показані інші шляхи виникнення ЕМЗ, які можуть виникати при загальному заземненні, загальних джерелах живлення або в кабельних розподільних системах. Внутрішньосистемні завади можуть з'являтися із-за порушень електричних контактів в кабелях, а також в загальному контурі заземлення або унаслідок прямого випромінювання від блоку до блоку або кабелю.



Рисунок 2.3. Деякі шляхи внутрі- і міжсистемних ЕМЗ

Згідно з ГОСТ 2919291 усі технічні засоби класифіковані за функціональним призначенням на 4 категорії, 21 клас і 48 підкласів.

За умовами експлуатації технічні засоби поділяються на такі групи:

A1 – технічні засоби, що розміщуються на космічних об'єктах, ракетах, носіях;

A2 – земні станції та технічні засоби забезпечення технічних засобів групи A1;

B1 – технічні засоби, що розміщуються на літальних апаратах;

B2 – наземні технічні засоби забезпечення безпеки польотів;

V1 – технічні засоби, що розміщуються на кораблях;

V2 – наземні технічні засоби забезпечення безпеки плавання;

Г – наземні технічні засоби, що розміщуються в критичних зонах;

Д – наземні технічні засоби, що розміщуються за межами критичних зон, пов'язані з технічними засобами групи Г загальними силовими ланцюгами;

Е – наземні технічні засоби, що розміщуються за межами критичних зон і не належать до технічних засобів групи Д.

Критична зона – рухливий або стаціонарний об'єкт або ділянка території з розміщеними на них технічними засобами, зниження якості функціонування яких через вплив електромагнітних завад може привести до зниження нижче допустимого рівня ефективності технічної системи, що включає в якості елемента одне з цих коштів, зниження якості послуг населенню та забезпеченням його життєдіяльності.

Припустимий рівень ефективності конкретизується в технічних умовах (ТУ) або інших нормативно-технічних документах (НТД) на групу однорідних засобів.

У НТД допускається подальша деталізація груп ТЗ на підгрупи в залежності від конкретних умов експлуатації технічних засобів.

2.2. Показники електромагнітної сумісності технічних засобів

Для кожного підкласу (або класу ТЗ при відсутності його деталізації на підкласи) зазначено перелік видів характеристик ЕМС, рекомендованих для стандартизації і сертифікації (рис 2.4) :

- рівень напруженості поля індустриальних радіозавад, створюваних ТЗ,
- рівень напруги індустриальних радіозавад, створюваних ТЗ в ланцюгах живлення, управління, передачі інформації, комутації, заземлення,
- рівень потужності індустриальних радіозавад, створюваних ТЗ,
- рівень сприйнятливості (стійкості) ТЗ до імпульсного електромагнітного впливу,
- рівень сприйнятливості (стійкості) ТЗ до поля електромагнітного випромінювання,
- рівень сприйнятливості (стійкості) ТЗ до імпульсних завад в ланцюгах живлення,
- рівень сприйнятливості (стійкості) ТЗ до динамічних змін (підвищень, пониженнях і пропажі), напруги в мережі живлення,
- рівень побічного радіовипромінювання радіопередавального пристрою,
- рівень позасмугового радіовипромінювання радіопередавального пристрою,
- відхилення частоти радіосигнали пристрої,
- рівень шумового радіовипромінювання радіопередавального пристрою,
- рівень електромагнітного поля, створюваного радіопередавальним пристроєм крім антени,
- рівень сприйнятливості радіоприймального пристрою по побічним каналам прийому,
- характеристика частотної вибіркової радіоприймального пристрою по інтермодуляції,

- характеристика частотної вибіркової радіоприймального пристрою по блокуванню або перехресним спотворень,
- рівень сприйнятливості радіоприймального пристрою по сусідньому каналу,
- рівень електромагнітного поля, створюваного гетеродином радіоприймального пристрою,
- коефіцієнт прямокутності основного каналу прийому радіоприймального пристрою,
- рівень бічних і задніх пелюсток діаграми спрямованості антени,
- рівень сприйнятливості (стійкості) до низькочастотних кондуктивних завад по ланцюгах живлення і управління.

Нижче наведені деякі визначення термінів, які використані на рис. 2.4.

Лінія живлення – лінії, що відходять від джерела живлення змінного або постійного струму.

Лінії управління – лінії, призначені для управління, сигналізації і вимірювань.

Сигнальне і інформаційне коло – електричне коло, що включає технічні засоби, функціональне призначення яких полягає в створенні, передачі, розподілі, перетворенні параметрів електричних сигналів і перетворенні електричних сигналів в сигнали іншої природи.

Первинний перетворювач електричних сигналів – технічний пристрій, що перетворює сигнали неелектричної природи в електричні і / або забезпечує зчитування електричних сигналів з носіїв інформації.

Кінцевий перетворювач електричних сигналів – технічний засіб, що перетворює електричні сигнали в сигнали іншої природи і / або забезпечує запис електричних сигналів на носій інформації.

Радіочастотний ланцюг передачі сигналу – електричний ланцюг технічного засобу, призначена для прийому від іншого технічного засобу або передачі іншому технічному засобу радіочастотного сигналу.

Нестабільність частоти – зміна частоти основного випромінювання або коливання технічного засобу, не передбачене його режимом роботи.

Побічне випромінювання (коливання) – електромагнітне випромінювання (коливання) через антену (на затискачах вихідний радіочастотної ланцюга) технічного засобу, не передбачене в даному режимі роботи його функціональним призначенням.

Інтермодуляції по входу – виникнення небажаного відгуку на виході технічного засобу в результаті взаємної модуляції двох або більше електромагнітних завад, що впливають на вхідні радіочастотні ланцюги передачі сигналу, частоти яких знаходяться за межами основної смуги пропускання або основного каналу прийому технічного засобу.

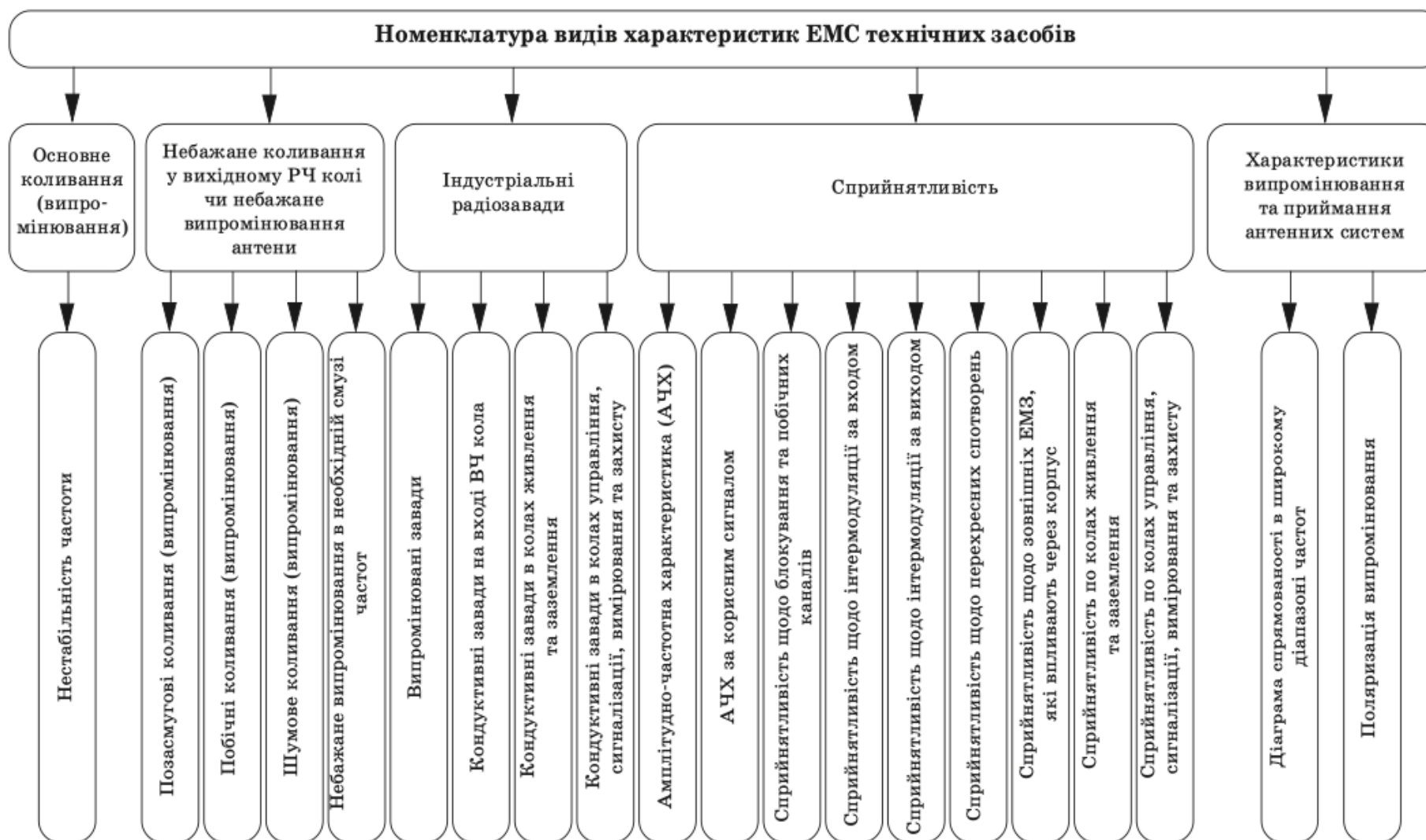


Рисунок 2.4. Перелік видів характеристик ЕМС, рекомендований для стандартизації та сертифікації

Інтермодуляція по виходу – взаємна модуляція в вихідних каскадах технічного засобу між основним коливанням цього технічного засобу і електромагнітним коливанням, наведеним в його вихідному радіочастотному ланцюзі передачі сигналу іншим ТЗ.

Відзначимо на закінчення, що параметри (характеристики) ЕМС різних технічних засобів висловлюють системну ознаку, тобто можливості кожного засобу функціонувати спільно з іншими технічними засобами в системі.

Цією ознакою параметри ЕМС будь-якого засобу відрізняються від функціональних параметрів того ж засобу, що відбивають можливість виконання ним свого призначення (тобто “працювати якісно”). Або інакше: створення та експлуатація окремих пристроїв (систем) за вимогами тільки до їх автономного функціонування не відповідає сучасним вимогам. Справа в тому, що не можна вважати продукцію якісною, якщо вона “нормально функціонує”, виконуючи своє призначення, але при цьому порушує “нормальне функціонування” іншої продукції.

Це означає, що якість продукції, що має електромагнітні властивості, необхідно оцінювати з системної позиції за комплексним показником (у вигляді сукупності функціональних параметрів і параметрів ЕМС).

Вимоги до впорядкування системних властивостей різних технічних засобів закріплюються у вигляді стандартних норм на параметри ЕМС, які повинні враховуватися при визначенні «якості продукції».

2.3. Сертифікація технічних засобів на відповідність нормам електромагнітної сумісності

Згідно з ГОСТ 29037-91 для підприємств і організацій, які здійснюють серійний випуск технічних засобів, і їх імпортерів обов’язковою є сертифікація на відповідність вимогам (нормам) щодо ЕМС. Ідеться про такі загальні види технічних засобів:

- автомобільні засоби та інші пристрої з двигунами внутрішнього згоряння;
- вироби та обладнання промислового, транспортного й енергетичного призначення;
- вироби електронної техніки;
- лінії електропередавання та електричні підстанції;
- промислові, наукові, медичні й побутові високочастотні установки;
- *радіоелектронні засоби*;
- засоби обчислювальної техніки й інформатики;
- засоби вимірювань;
- *телевізійна й відеоапаратура, пристрої проводового зв’язку та передавання даних*;
- електрорухомий склад наземного міського та залізничного транспорту;
- електропристрої побутового й медичного призначення;

— світильники з люмінесцентними лампами.

Відповідно до зазначеного стандарту на незнімну частину виробів має наноситися знак відповідності технічних засобів вимогам щодо ЕМС. Той самий знак має проставлятися також в експлуатаційній та супровідній до документації на виріб.

У цьому самому стандарті визначено й перелік технічних характеристик, що визначають ЕМС ТЗ при сертифікації.

Як приклад у табл. 2.1 і 2.2 наведено обов'язкові норми на індустриальні радіозавади від обладнання інформаційної техніки (ЕОМ, обчислювальні комплекси й системи, проблемно-орієнтовані процесори, периферійне обладнання, засоби для побудови обчислювальних мереж, сервісне обладнання, спеціальні пристрої обробки й передавання інформації) у смузі частот 0,15...1000 МГц (ГОСТ 29216-91). Щоб уникнути неоднозначності тлумачення термінів, у державних стандартах наводяться визначення застосованих термінів.

Таблиця 2.1

Обов'язкові норми на несиметричну напругу радіозавад
на мережних затискачах обладнання, дБмкВ

Смуга частот, МГц	Для обладнання поза житловими будівлями й такого, що не підмикається до електромереж житлових будівель		Для обладнання в житлових будівлях або такого, що підмикається до електромереж цих будівель	
	Квазіпікове значення	Середнє значення	Квазіпікове значення	Середнє значення
0,15...0,5	79	60	66...56	56...46
0,5...5			56	46
0,5...30	73	60		
5...30			60	50

Норми на індустриальні завади – припустимі значення напруги, напруженості поля, струму або перераховані значення потужності індустриальних радіозавад, виражені відповідно в децибелах відносно 1 мкВ, 1 мкВ/м, 1 мкА, 1 пВт і встановлені на статистичній основі та регламентовані в НТД.

Таблиця 2.2

Обов'язкові норми на квазіпікове значення напруженості
поля завад на відстані R , дБмкВ/м

Смуга частот, МГц	R , м	Напруженість поля	R , м	Напруженість поля
30...230	10	40	3	40
230...1000	10	47	3	47

Завада обчислювальній машині – електромагнітна завада, що спотворює або може спотворити інформацію, яка зберігається, обробляється або передається обчислювальною машиною.

Завада від обчислювальної машини – електромагнітна завада, створена обчислювальною машиною в під'єднаних до неї зовнішніх колах живлення, заземлення, управління та зв'язку й у навколишньому середовищі.

Симетрична завада – завада, що спостерігається у вигляді напруги довільної форми між фазовим чи двома фазовими вводами проводів від джерела первинного електроживлення або між уводами проводів ліній зв'язку обчислювальної машини.

Несиметрична завада – завада, що спостерігається у вигляді напруги довільної форми між уводом проводу від джерела первинного електроживлення або уводом проводу лінії зв'язку обчислювальної машини та затискачем заземлення її провідного корпусу.

У документі, де йдеться про вимоги щодо норм ЕМС, зазвичай наводиться й методика випробувань, здійснюваних із метою перевірки цих вимог. Беззаперечною є необхідність стандартизації вимірювань параметрів ЕМС.

Метрологічне забезпечення вимірювань у сфері ЕМС, як і будь-яких інших вимірювань, являє собою сукупність наукових основ, організаційних заходів, технічних засобів і правил, необхідних для досягнення єдності точності вимірювань параметрів технічних засобів на етапі розробки, виготовлення та експлуатації цих ТЗ.

Випробовування на завадостійкість мають здійснюватися згідно з ГОСТ 29280-92.

Зауважимо, що ГОСТ 17822-91 установлює норми на параметри ІРЗ, створюваних двигунами внутрішнього згоряння. Додержувати цих норм важливо для забезпечення функціонування рухомих систем радіозв'язку в метровому й дециметровому діапазонах. Максимум інтенсивності завад від систем внутрішнього згоряння становить близько 27 МГц, причому зі зростанням частоти інтенсивність завад повільно зменшується. Проте завади такого походження можуть даватися взнаки до частот 1 ГГц, а для чутливих РЕЗ (наприклад, розміщених на наземних пунктах космічного радіозв'язку й астрономічних спостережень) – до 1,4 ГГц.

Постановою Кабінету міністрів України був затверджений “Технічний регламент радіообладнання” [11]. Цей Технічний регламент встановлює вимоги до радіообладнання, яке вводиться в експлуатацію в Україні незалежно від форми постачання, включаючи реалізацію радіообладнання дистанційним способом.

Цей Технічний регламент розроблено на основі Директиви 2014/53/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 16 квітня 2014 р. про

гармонізацію законодавства держав-членів щодо постачання на ринок радіообладнання і скасування Директиви 1999/5/ЄС.

Радіообладнання повинно бути розроблено таким чином, щоб забезпечити:

- захист здоров'я, безпеку людей і домашніх тварин, захист власності, в тому числі з урахуванням вимог безпеки, викладених в Технічному регламенті низьковольтного електричного обладнання, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 р. № 1067, але без застосування обмеження за напругою;

- відповідний рівень електромагнітної сумісності, встановлений у Технічному регламенті з електромагнітної сумісності обладнання, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 р. № 1077.

Регуляторний орган (НКЕК) відповідно до статті 65 Закону України “Про електронні комунікації” визначає можливість застосування радіообладнання, в тому числі у комбінації з програмним забезпеченням, яке впливає на дотримання суттєвих вимог.

Регуляторний орган надає кожному зареєстрованому типу радіообладнання реєстраційний номер, який виробники повинні наносити на радіообладнання, яке вводиться в обіг, починаючи з 12 червня 2018 року.

Технічний регламент з електромагнітної сумісності обладнання [12] встановлює вимоги до обладнання з метою забезпечення надання на ринку України обладнання, яке відповідає належному рівню електромагнітної сумісності.

Технічний регламент розроблено на основі Директиви 2014/30/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 26 лютого 2014 р. про гармонізацію законодавства держав-членів стосовно електромагнітної сумісності.

Обладнання може бути надано на ринку та/або введено в експлуатацію тільки в разі, коли воно відповідає вимогам цього Технічного регламенту за умови належного встановлення, обслуговування та використання за призначенням.

У Технічному регламенті надано визначення термінів, у тому числі таких:

знак відповідності технічним регламентам – маркування, за допомогою якого виробник вказує, що апаратура відповідає вимогам, які застосовуються до зазначеної апаратури та визначені в технічних регламентах, якими передбачене нанесення цього маркування;

орган з оцінки відповідності – орган, що провадить діяльність з оцінки відповідності, включаючи калібрування, випробування, сертифікацію та інспектування.

У додатку 1 до Технічного регламенту наведені суттєві вимоги:

Обладнання повинне бути спроектоване та виготовлене з урахуванням сучасного стану розвитку техніки таким чином, щоб:

1) рівень створюваних обладнанням електромагнітних завад не перевищував рівень, за якого технічні засоби електронних комунікацій, радіообладнання та інше обладнання не може функціонувати за призначенням;

2) обладнання мало такий рівень завадостійкості до електромагнітних завад, очікуваних під час його використання за призначенням, який дає змогу цьому обладнанню функціонувати без неприпустимого погіршення для його використання за призначенням.

Реєстр радіообладнання та випромінювальних пристроїв дозволених та заборонених до використання в Україні розміщений на сайті НКЕК (<https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=59&language=uk>)

Контрольні питання

1. У чому полягає відмінність між сприйнятливістю радіоприймача та його чутливістю?

2. Наведіть класифікацію та характеристику внутрішньосистемних радіозавад.

3. Дайте визначення та характеристику міжсистемних радіозавад.

4. Подайте класифікацію показників ЕМС технічних засобів за функціональним призначенням.

5. Наведіть номенклатуру параметрів ЕМС технічних засобів. Як потрібно розуміти кожний із параметрів?

6. Аргументуйте цілі сертифікації технічних засобів на відповідність параметрам ЕМС.

7. Поясніть, з якою метою в державних стандартах окрім норм параметрів ЕМС технічних засобів має зазначатися методика вимірювання цих параметрів та відповідна термінологія?

3. Технічні основи аналізу електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів

Основними параметрами, які застосовують для оцінювання ЕМО та ЕМС є характеристики *передавачів корисного та завадових сигналів, антен* (коефіцієнт підсилення, діаграма спрямованості та поляризація), їх взаємна просторова орієнтація, віддаленість від приймача корисного сигналу на напрямок на нього, частотне рознесення несучих, характеристики *приймача корисного сигналу* – рецептора завади (реальна чутливість, частотна вибірковість, коефіцієнт підсилення, поляризація та діаграма спрямованості антени тощо), *втрати енергії при поширенні радіохвиль* (ПРХ) від кожного передавача.

Технічні умови на обладнання здебільшого використовуються для встановлення допустимих технічних характеристик обладнання, зазвичай використовуюваного у великій кількості багатьма користувачами однієї й тієї самої радіослужби [11].

У технічних умовах на обладнання крім допустимих технічних характеристик розглядаються *допустимі технічні параметри електромагнітної сумісності* (ЕМС), яких у цьому обладнанні потрібно суворо дотримуватися з огляду на необхідність ефективного використання спектра та зведення до мінімуму завад на обох кінцях лінії: як з боку передавача, так і з боку приймача [12].

На забезпечення ЕМС впливають такі фактори розподілу між РЕЗ корисного та завадового сигналів [7]:

- за частотою;
- за часом;
- просторове (відстань);
- вибірковість за напрямками (діаграми спрямованості антен) та поляризацією.

3.1. Параметри радіопередавальних пристроїв, що впливають на електромагнітну сумісність

Радіопередавач – пристрій, призначений для формування високочастотного коливання, модульованого (маніпульованого) за законом повідомлення, що передається, і яке перетворюється антеною в радіохвилю.

Модуляція – це процес зміни одного або кількох параметрів високочастотного (несучого) сигналу за допомогою низькочастотного (інформаційного) сигналу.

Радіохвиля – це електромагнітне поле, яке збуджується антеною радіопередавача, поширюється у просторі і застосовується як переносник інформації від антени радіопередавача до точок розміщення антен відповідних радіоприймачів. Радіохвилю для цих радіоприймачів ототожнюють з **радіосигналом**. Для радіоприймачів, які належать до інших радіосистем, ця сама радіохвиля може стати *ненавмисною радіозавадою*. При цьому може виникнути ситуація, яка визначає електромагнітну несумісність окремих одночасно працюючих радіоелектронних засобів, що належать до незалежних радіосистем.

Крім основного (корисного) радіовипромінювання, на виході антени ПРД є неосновні (небажані) випромінювання. Ці випромінювання можуть заважати приймачам інших РЕЗ, створюючи їм ненавмисні завади та погіршуючи ЕМС РЕЗ.

Типовий радіопередавач (ПРД) складається з таких основних вузлів (рис. 3.1):

- генератор або синтезатор несучої, тобто високочастотного періодичного сигналу основної частоти;

- модулятор (маніпулятор) – пристрій з двома входами, у якому низькочастотний електричний сигнал, що відображає повідомлення від джерела інформації, упродовжується у високочастотну несучу;
- підсилювач напруги, що забезпечує попереднє збільшення амплітуди сигналу;
- вихідний підсилювач потужності сформованого модульованого (маніпульованого) високочастотного сигналу;
- антенно-фідерний тракт (АФТ).

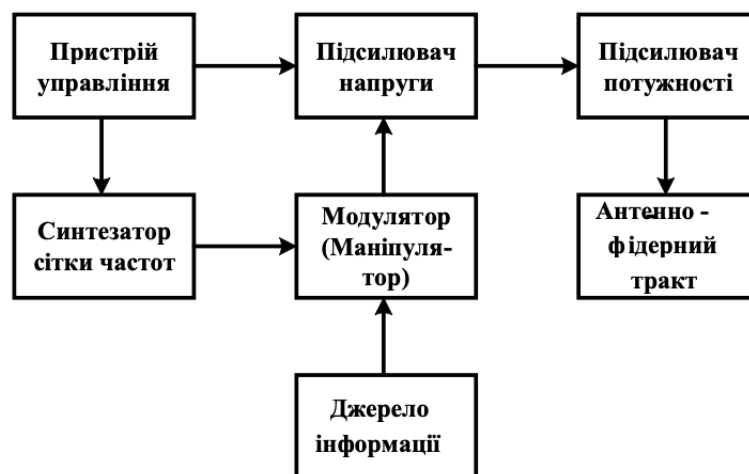


Рисунок 3.1. Основні вузли типового радіопередавача

У модуляторі (маніпуляторі) ПРД відбувається процедура перемноження високочастотного коливання синтезатора несучих частот та низькочастотного коливання джерела інформації. Тому його вольт-амперна характеристика (ВАХ) повинна бути нелінійною в принципі. Наслідком цього є розширення спектра модульованого сигналу – поява спектральних складових, яких не було у первісних вхідних сигналах. Нелінійним може бути й режим роботи вихідного підсилювача потужності радіопередавача, що також супроводжується додатковим розширенням спектра вихідного сигналу. Усе це означає, що у вихідному сигналі радіопередавача, крім спектральних складових, які відображають повідомлення, що впроваджене у високочастотну несучу і які є необхідними для його подальшого відтворення, присутні й складові, які лише забруднюють спектр сигналу на виході ПРД, тобто на вході АФТ.

Синтезатор частоти – пристрій, що формує заданий набір частот з однієї або декількох опорних частот шляхом використання операцій складання, віднімання, поділу та множення. Тому на його виході існує високий вміст небажаних спектральних складових.

Ці усі складові разом з корисним сигналом, навіть після необхідної фільтрації, можуть проникнути до входу антени радіопередавача і випромінюватися у вільний простір як неосновні радіовипромінювання

РПД, ускладнюючи електромагнітну обстановку в точках розміщення антен інших радіоелектронних пристроїв.

Крім основного (корисного) радіовипромінювання, на виході антени РПД є неосновні (небажані) випромінювання. Ці випромінювання можуть заважати приймачам інших РЕЗ, створюючи їм ненавмисні завади та погіршуючи ЕМС РЕЗ.

Спектр електричного сигналу – частотний розподіл потужності, амплітуди струму або напруги сигналу.

Приблизний розподіл спектральної густини потужності сигналу передавача представлені на рис. 3.2.

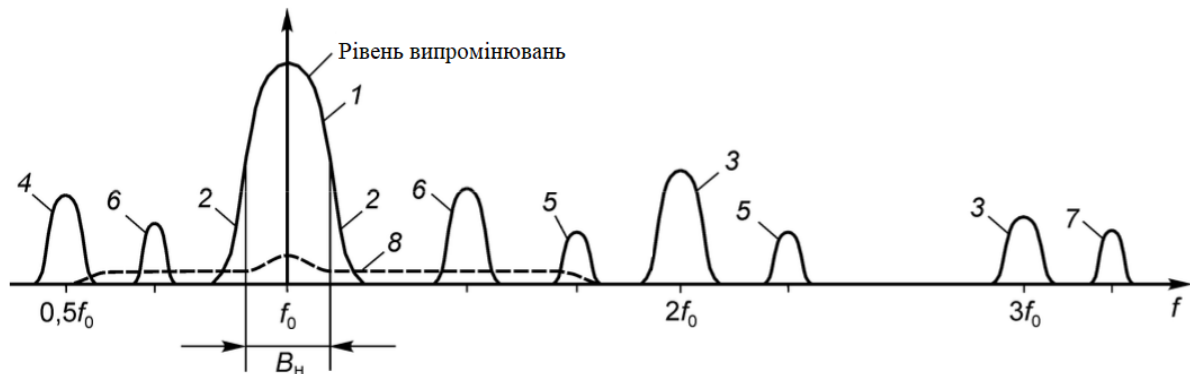


Рисунок 3.2. Приклад спектра випромінювання РЕЗ

(1 – основне; 2 – позасмугові; 3 – на гармоніках; 4 – на субгармоніках; 5 – комбінаційні; 6 – інтермодуляційні; 7 – паразитні; 8 – шумові)

Основне випромінювання конкретного РПД та його небажані випромінювання є ненавмисними радіозавадами для інших незалежних радіосистем та пристроїв. Зрозуміло, що основні випромінювання радіопередавачів через антену є водночас і найпотужнішими ненавмисними радіозавадами для інших радіоелектронних систем та окремих радіопристроїв.

Крім антенного пристрою, джерелами небажаних випромінювань РПД у просторі можуть стати кола живлення, роз'єми, монтажні проводи, вентиляційні отвори в корпусах обладнання тощо.

Структурний склад випромінювання РПД наведено на рис. 3.3.

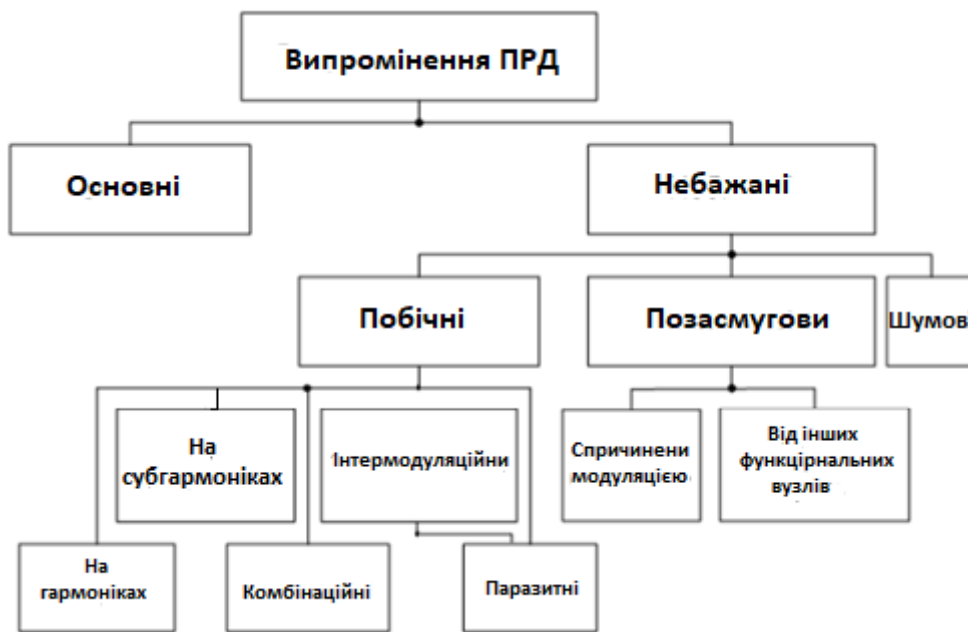


Рисунок 3.3. Структурний склад випромінювання ПРД

Основне випромінювання займає деяку необхідну смугу частот (B_H), призначену передачі корисного радіосигналу (B – від англ. *Frequency Band*, смуга частот). Всі інші (неосновні) випромінювання, розташовані за межами основної (робочої) ділянки радіочастотного спектра B_H , є небажаними.

Небажане випромінювання – випромінювання радіообладнання (РО) або його компонентів, яке не призначене для передавання, приймання або навмисного спотворення інформації.

Це випромінювання поділяється на позасмугове, побічне та шумове.

Позасмугове випромінювання – небажане випромінювання через антену радіопередавача у смузі частот, яке безпосередньо прилягає до необхідної смуги частот і викликане модуляцією.

Спектри **побічних випромінювань** на гармоніках, на субгармоніках, на комбінаційних частотах, паразитних та інтермодуляційних коливань віддалені від частот основного каналу випромінювання.

Шумове випромінювання займає широку смугу частот.

Основне радіовипромінювання – випромінювання радіопередавального пристрою в необхідній смузі частот (B_H).

Необхідна смуга радіочастот B_H – мінімальна смуга радіочастот достатня для даного класу випромінювання для забезпечення передавання повідомлень з необхідною швидкістю і якістю. Ширина необхідної смуги частот, у межах якої зосереджене основне випромінювання, є відомою, оскільки визначена у класі випромінювання.

ПРД – джерело корисних сигналів і, водночас, ненавмисних радіозавад характеризується сукупністю якісних та кількісних показників, які повинні відповідати окремим рекомендаціям та нормативам.

До найважливіших *характеристик основного випромінювання* радіопередавальних пристроїв, які впливають на забезпечення ЕМС, відносять:

- потужність, Вт (або у відносних одиницях – дБВт, дБм);
- поверхнева густина потоку потужності, Вт/м² (або в дБВт/м²);
- несуча (центральна) частота випромінювання, Гц;
- відхилення несучої частоти, Гц;
- необхідна смуга частот, Гц;
- ширина займаної смуги частот, Гц;
- ширина контрольної смуги частот радіовипромінювання, Гц;
- вид і параметри модуляції тощо.

Граничний допуск відхилення частоти визначається Рекомендацією МСЕ-Р SM.1045.

Вихідна потужність передавача може набувати різних значень.

Потужність несучої визначається в режимі безперервного випромінювання за відсутності модуляції.

Середня потужність – це вихідна потужність, усереднена за час, що перевищує період найменшої частоти модуляції первинного сигналу.

Пікова потужність відповідає максимальній амплітуді радіосигналу.

Імпульсна потужність визначається як середнє значення потужності за час тривалості імпульсу.

Коефіцієнти перерахунку між зазначеними видами потужності наведено в Рекомендації МСЕ-Р SM.326-7.

При оцінюванні ЕМС радіоліній слід брати до уваги, що випромінювана потужність пов'язана з коефіцієнтом підсилення антени G_A . З урахуванням значення G_A розглядається поняття ефективно випромінюваної потужності. Вона дорівнює добутку потужності, що підводиться через узгоджене коло до антени, помноженій на коефіцієнт $R_{\text{прд}} \cdot G_A$. При цьому еталонною антеною, відносно якої визначається G_A , може бути:

- ізоτροпна антена;
- півхвильовий диполь;
- короткий лінійний провідник довжиною $L \ll \lambda_0/4$.

Розрізняють такі коефіцієнти підсилення: ізоτροпний G_{AI} , відносно диполя G_{AD} і відносно вертикальної антени G_{AB} . Відповідно використовують поняття **ефективної ізоτροпно випромінюваної потужності (ЕІВП)**, **ефективної випромінюваної потужності (ЕВП)** та **ефективної (монопольної) випромінюваної потужності (ЕМВП)** у заданому напрямку (для короткої вертикальної антени).

Передавальним станціям дозволяється випромінювати радіосигнали тільки в межах певної смуги частот, яка називається присвоєною. Частота, що відповідає середині присвоєної радіостанції смуги частот, називається **присвоєною частотою**.

З урахуванням нестабільності частоти радіопередавачів (відхилення несучої частоти) ширина присвоєної смуги частот B_{Π} повинна перевищувати ширину необхідної смуги B_H на подвоєну величину абсолютного припустимого відхилення частоти $\Delta f_{\text{прип}}$ відповідно до виразу $B_{\Pi} = B_H + 2\Delta f_{\text{прип}}$.

Припустиме відхилення частоти радіопередавача – це максимально допустима величина відхилення $\Delta f_{\text{макс}}$ фактичної середньої частоти радіовипромінювання станції від номінального значення присвоєної їй частоти. Припустиме відхилення частоти – довготривала нестабільність, яку повинен забезпечувати передавач за весь час його роботи. Граничний допуск відхилення частоти визначається Рекомендацією МСЕ-Р SM.1045.

Розширення присвоєної смуги частот стосовно необхідної величину $2\Delta f_{\text{прип}}$ забезпечує захист від радіозавад у суміжних (сусідніх) каналах, розташованих вище і нижче присвоєної смуги.

Наприклад, для УКХ радіозв'язку у Плані розподілу і користування радіочастотним спектром в Україні (Розділ 2. “Діючи радіотехнології”) передбачено з урахуванням допустимого відхилення частот та захисного інтервалу між сусідніми каналами крок сітки частот 25 кГц (для сигналів 16K0F3E) і 12.5 кГц (для сигналів 6K25F3E).

Класифікація випромінювань радіопередавача

Випромінювання класифікуються, і їх клас позначається відповідно до їх основних та додаткових характеристик радіосигналу.

Перший символ (літера) у позначенні вказує на *тип модуляції несучої*: А - амплітудна двосмугова; Н, R, J – амплітудна односмугова з різним ступенем придушення несучою; F, G - кутова (частотна та фазова) та ін.

Другий символ (цифра) в позначенні вказує на *характер модулюючого сигналу*: 1, 2 – один канал цифрової інформації;

3 – один канал аналогової інформації; 7, 8 – два або більше каналу, що містять цифрову (7) або аналогову (8) інформацію.

Третій символ (літера) у позначенні вказує *тип інформації, що передається*: А, Б – телеграфія, Е – телефонія (включаючи звукове радіомовлення), F – телебачення і т.д.

Четвертий символ містить *додаткові дані про сигнал* (сигнали): В, С – двопозиційний код з однаковим числом елементів і однаковою тривалістю без виправлення (В) та з виправленням (С) помилок, G, J – передача звуку мовного (G) або комерційного (J) якості; N – передача телевізійного сигналу.

П'ятий символ вказує на *характер ущільнення*: N – без ущільнення, F, T – частотне (F) або часове (T) ущільнення та ін.

Наприклад, повне позначення класу випромінювання для двосмугового звукового радіомовлення – 8K00A3EGN. Допускається також позначати клас випромінювання у скороченому вигляді.

Поняття **необхідна смуга частот**, наведене в Регламенті радіозв'язку, застосовується для опису спектральних властивостей даного класу випромінювань у найпростіший спосіб. Формули для обчислення необхідної ширини смуги випромінювання наведено в Рекомендації МСЕ–Р SM.1138 [45]. Для багатоканальних випромінювань із частотним розділенням каналів і частотною модуляцією, а також сигналів із “цифровою модуляцією” (сигнали з фазовою маніпуляцією, ММС, багатопозиційною КАМ тощо) внесено доповнення в Рекомендацію МСЕ–Р SM.853–1.

Значення B_H визначається багатьма чинниками, головними з яких є такі:

- найвища частота модулюючого сигналу;
- швидкість передавання цифрової інформації;
- тривалість і крутизна фронтів імпульсного сигналу;
- кількість каналів у груповому модулюючому сигналі;
- частота підносійної;
- припустимі спотворення при мінімізації передаваної смуги частот.

Необхідна смуга частот B_H обраховується наступним чином [45]:

- для випромінювання з амплітудною модуляцією $B_H = 2 \cdot F_{\text{МАКС}}$, де $F_{\text{МАКС}}$ – максимальна частота модулюючого сигналу;
- для випромінювання з частотною маніпуляцією $B_H = 5,2 \cdot \Delta f_{\text{ЗСУВ}} + 0,55 \cdot B$, де $\Delta f_{\text{ЗСУВ}}$ – значення частотного зсуву, B – швидкість маніпуляції в бодах;
- для випромінювань із подвійною частотною маніпуляцією $B_H = 4,4 \cdot \Delta f_{\text{ЗСУВ}} + 4B$;
- для сигналів з фазовою квадратурною маніпуляцією $B_H = R / \log_2 M$, де R – швидкість передачі інформації, M – кількість рівнів маніпуляції, що використовується для передачі даних.

На практиці, з метою зменшення міжсимвольної інтерференції, зазвичай, ширина необхідної смуги частот обраховується наступним чином

$$B_H = (1,15 \dots 1,35) \cdot (R / \log_2 M).$$

У ряді випадків значення B_H визначається експериментально.

В додатку 5 до Регламенту радіозв'язку наведено залежності для визначення B_H більшості інших класів випромінювань.

При визначенні спектра позасмугових випромінювань наявне в межах B_H максимальне значення рівня випромінюваного сигналу береться за *точку відліку* (0 дБ).

В загальному спектрі радіовипромінювань РЕЗ (рис.3.3) *основне* випромінювання супроводжується **небажаними** випромінюваннями, що забруднюють радіочастотний спектр, які знаходяться *за межами необхідної смуги B_H* , до складу яких входять (див. рис. 3.4 а), б)):

- **побічні** випромінювання;
- **позасмугові** випромінювання.

Позасмугові випромінювання – це всі небажані радіовипромінювання на частоті або в смугах частот, які безпосередньо примикають до необхідної смуги радіочастот, і є *результатом процесу модуляції*, але не включають до себе побічних випромінювань.

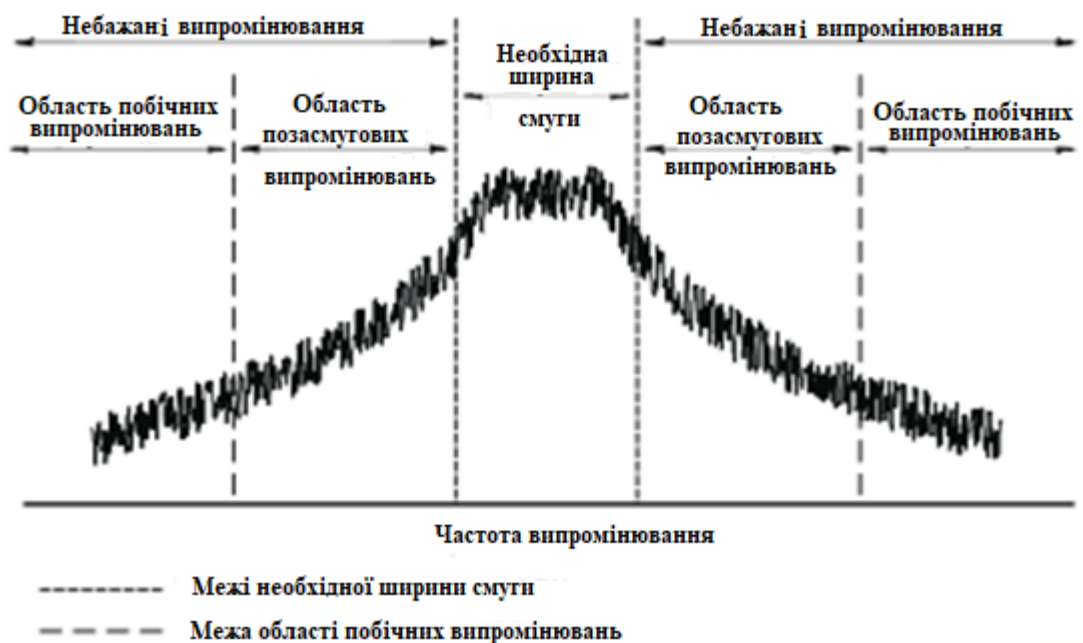
На характер позасмугових випромінювань в основному впливають:

- форма модулюючих сигналів (наприклад, імпульсів із надзвичайно крутими фронтами);
- нелінійність модуляційної характеристики;
- перемодуляція;
- обмеження амплітуди сигналу, квантування тощо.

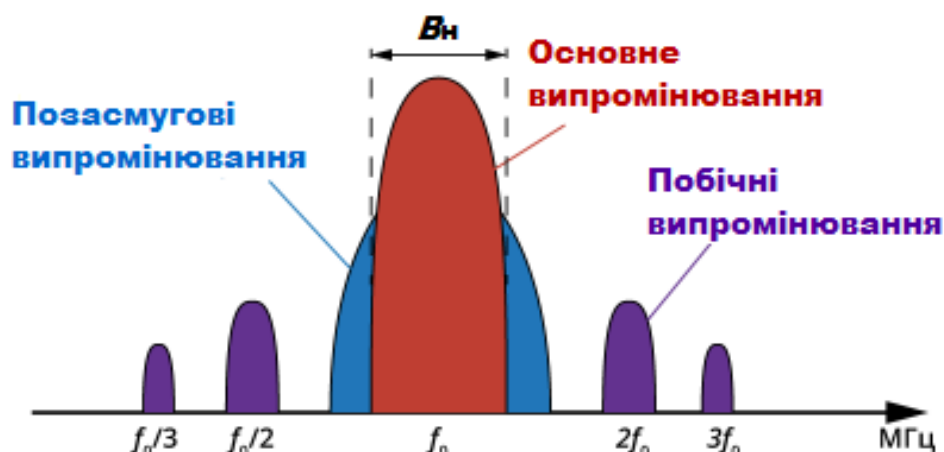
Шляхи поширення небажаних радіовипромінювань різноманітні: через антено-фідерний тракт, кабелі, з'єднувачі та монтажні дроти, по колах електроживлення, через вентиляційні отвори в кожухах радіообладнання тощо. Причини, які викликають появу небажаних випромінювань, різні. Деякі їх складові частини обумовлені процесом модуляції випромінюваного сигналу, інші – нелінійними ефектами в окремих каскадах РЕЗ.

Межа між областями позасмугових та побічних випромінювань, зазначені в РР, застосовуються до всім випромінюванням, включаючи гармонічні випромінювання, що становлять взаємну модуляцію, складові перетворення частот та паразитні випромінювання, на частотах в області побічних випромінювань (див. рис. 3.4 а).

У доповненні 1 до додатку 3 тому 2 Регламенту радіозв'язку визначено, що за виключенням окремих випадків межа між областями позасмугових та побічних випромінювань для вузькосмугових сигналів знаходиться на частотах, які стоять від центральної частоти випромінювання на відстані 250% від необхідної ширини смуги частот, або на $2,5 \cdot B_H$. Для більшості систем центральна частота випромінювання є необхідним центром ширини смуги частот [10].



а) області позасмугових та побічних випромінювань



б) спрощене зображення спектра випромінювання передавача

Рисунок 3.4. Спектр випромінювання передавача

Для оцінки швидкості спадання інтенсивності позасмугового випромінювання РЕЗ використовується **ширина смуги частот B_X на рівні мінус X дБ** відносно основного випромінювання (рис. 3.5).

Згідно Рекомендації МСЕ використовується також таке визначення терміну “**займана смуга частот**” B_z (англ. *occupied bandwidth* – OBW): така ширина смуги частот, що нижче нижньої та верхньої меж частот, середня потужність випромінювання дорівнює визначеному відсотку $\beta/2$ від загальної середньої потужності даного випромінювання. Якщо інше не зазначено в Рекомендаціях МСЕ-Р для відповідного класу випромінювання, значення $\beta/2$ слід приймати як 0,5%. Зазвичай це відповідає нижньому рівню випромінюваної потужності – 60 дБ (вважається, що позасмугові

випромінювання нижчі від рівня $X = -60$ дБ не впливають на умови забезпечення ЕМС РЕЗ). Таким чином у займаній смузі частот зосереджено 99% середньої потужності випромінювання.

В разі, коли виконується умова $B_3 = B_H$ говорять, що **випромінювання досконале**, причому воно є можливе лише на дуже низьких частотах. Більшість радіопередавачів має **недосконале випромінювання**, коли $B_3 > B_H$. У тих випадках, коли з метою заощадження РЧС припустимо дещо знизити швидкість або якість зв'язку, може використовуватися вузькосмугове випромінювання зі смугою $B_3 < B_H$.

Значення B_3 істотно залежить від форми модулюючого сигналу. Для сигналів усіх класів випромінювання, окрім спеціально обумовлених, *смуга B_3 не повинна перевищувати B_H більш ніж на 20%*.

Контрольна смуга частот B_K (див. рис. 3.5) використовується для контролю і нормування позасмугового випромінювання, а також у разі оцінювання частотного рознесення РЕЗ. Контрольна смуга частот визначається на рівні $X = -30$ дБ. Її перевищення неприпустиме.

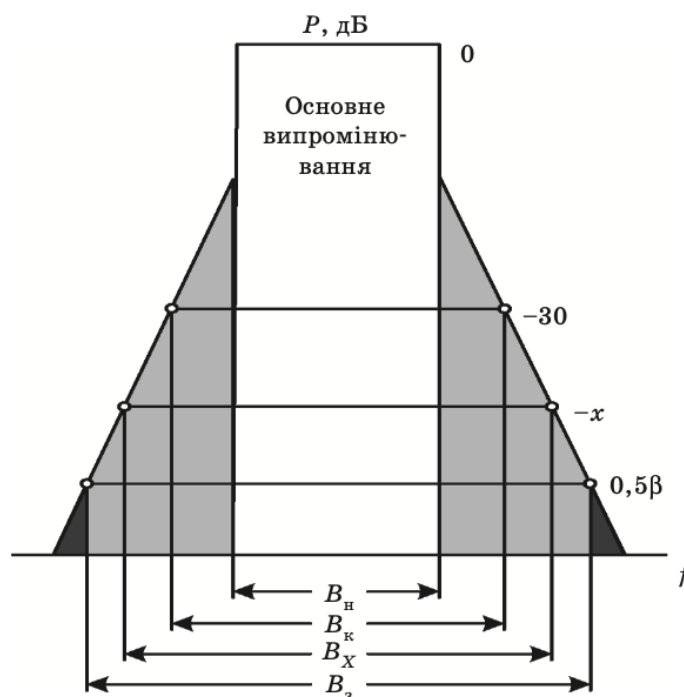


Рисунок 3.5. Нормована обвідна радіовипромінювання у логарифмічному масштабі (ОВ – основне випромінювання РЕЗ):

(B_H - ширина необхідної смуги частот; B_K - ширина контрольної смуги частот на рівні -30дБ; B_X -ширина смуги частот на рівні мінус X дБ; B_3 -ширина займаної смуги частот).

Методи вимірювання ширини смуги на рівні X дБ наведено у Рекомендації МСЕ-Р SM.328 [41].

За наявності норм на позасмугове випромінювання можна побудувати обвідну спектра для будь-якого класу випромінювання. Найчастіше вдаються до апроксимації обвідної відрізками прямих із застосуванням логарифмічної осі частот, що відповідає моделі, згідно з якою значення

обвідної при розстроюванні відносно центра спектра на величину Δf подається у вигляді [1]:

$$M(\Delta f) = M(\Delta f_i) + M_i \lg(\Delta f / \Delta f_i),$$

де $\Delta f_i \leq \Delta f \leq \Delta f_{i+1}$.

Тут i , Δf_i та M_i – відповідно номер, ширина апроксимованої ділянки та швидкість (у децибелах на декаду) зміни на ній обвідної.

На рис. 3.6 наведено приклад побудови моделі обвідної для радіо-випромінювання класу R3E (радіомовлення) [6]. На рис. 3.6 позначено:

X_1, X_2, X_3, X_4 – рівні, на яких вимірюється смуга випромінювання;

$B_{x1}, B_{x2}, B_{x3}, B_{x4}$ – ширина смуги випромінювань на відповідному рівні.

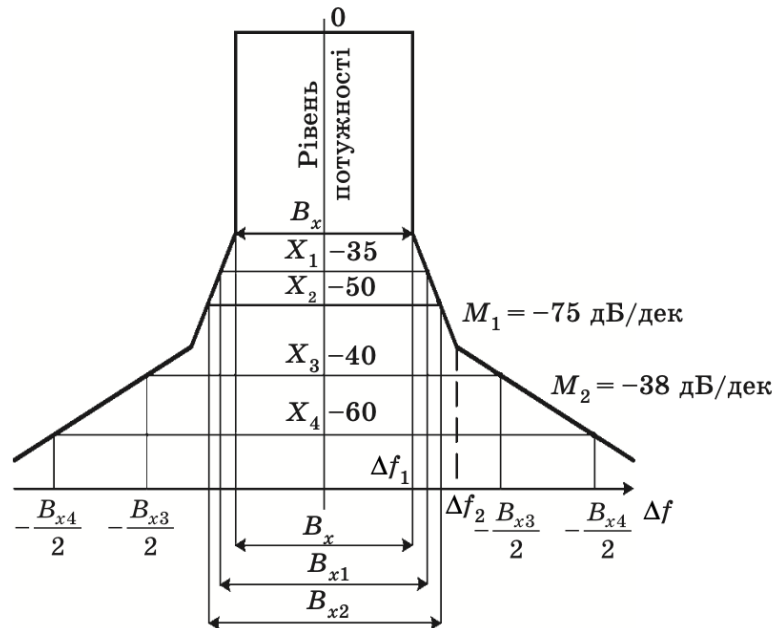


Рисунок 3.6. Приклад побудови моделі обвідної для випромінювання класу R3E (радіомовлення)

Нижче наведено приклад побудови моделі обвідної (рис. 3.6) з використанням наведеного співвідношення для класу випромінювання R3E (радіомовлення) [1,6].

Межа першої ділянки визначається через необхідну смугу випромінювання B_H , що відповідає зсуву частоти $\Delta f_i = B_H/2$. Для зсувів $\Delta f < \Delta f_i$ спектральну густину потужності беремо таку, щоб виконувалася рівняння $M(\Delta f) = 0 = Const$.

Візьмемо точки $X_1, B_{x1}/2, X_2, B_{x2}/2, X_3, B_{x3}/2$ та $X_4, B_{x4}/2$. Оскільки $B_{x2}/2 = 0,7B_H$, а $B_{x3}/2 = 1,2B_H$, то початок наступної ділянки апроксимації буде між $0,7B_H$ та $1,2B_H$. Узявши $\Delta f_1 \leq \Delta f \leq \Delta f_2$ і прирівнявши спочатку $\Delta f = B_{x1}/2$, а потім $\Delta f = B_{x2}/2$ врахувавши, що $M(B_{x1}/2) = X_1$ і $M(B_{x2}/2) = X_2$, дістанемо систему рівнянь. Рішення системи рівнянь надає модель обвідної такого вигляду [6]:

$$M(\Delta f) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } |\Delta f| \leq 0,5B_H, \\ -29 - 75 \lg(\Delta f/B_H) & \text{якщо } 0,5 < |\Delta f| \leq 0,75B_H \\ -46,7 - 38 \lg(\Delta f/B_H) & \text{якщо } |\Delta f| \geq 0,75B_H. \end{cases}$$

В додатку А наведено дані для побудови моделі обвідної для деяких випромінювань.

Обвідна спектра потужності в прикладі отримана на основі норм на обмежувальну лінію спектра. Подібний підхід закономірний, коли немає відомостей про результати вимірювань. Якщо ж дані вимірювань є, то аналогічна методика може бути використана для апроксимації реального спектра. Оцінка значень обвідної спектра для конкретних видів випромінювань може бути отримана і шляхом теоретичного аналізу перетворень Фур'є цих випромінювань.

Значення ширини контрольної смуги частот для певних класів випромінювання наведено у табл. 3.1

Таблиця 3.1

Значення ширини контрольної смуги частот для певних класів випромінювання

Призначення радіостанції, радіопередавача	Клас радіовипромінювання	Ширина контрольної смуги частот, кГц
Станції стереофонічного радіомовлення (діапазон частот 100- 108 МГц)	180KF3EHN	248,400
Станції стереофонічного радіомовлення з пілот-тоном (діапазон частот 100-108 МГц)	220KF3EHN 300KF8EHF	300,000 414,000
Передавач стільникових мереж зв'язку стандарту GSM	200KG7W	280,000
	200KG7AB	280,000
	200KF7CD	240,000
	271KG7W	379,400
Передавач стільникових мереж зв'язку стандарту DCS-1800	271KG7W	379,400
	200KG7D	280,000
	200KG7ED	280,000
Передавачі наземних радіостанцій мережі транкінгового зв'язку загального (відомчого) користування стандартів SmartTrunk, SmartNet, MPT 1327	16K0G3E	22,400
	16K0F3E	16,000
	25K0J7W	28,750
Передавач наземних радіостанцій мережі передавання даних	8K50FID	10,455
	12K00F1DAN	14,760
	12K50F1DAN	15,375
Передавач наземних радіостанцій мережі передавання даних з використанням широкосмугового доступу	1M00GID	1400,000
	1M08GID	1512,000
	1M0FID	1230,000
	2M0GIDF	2800,000
	2M12GID	7168,000

Шумове радіовипромінювання – це небажане випромінювання, зумовлене шумами елементів радіопередавача (власно, синтезатора частот, збуджувача, підсилювача потужності) через невисоку стабільність частоти

(фазові шуми) і потрапляння зовнішніх шумів. Джерелами шуму є будь-які елементи схем, які зазнають обтікання електричним струмом. Найсерйозніші трансформації (посилення чи послаблення рівня, розширення або звуження ширини смуги спектра) шумів відбуваються у схемах синтезу частот (синтезаторах). Спектр шумових випромінювань займає широку смугу частот, його можна виявити у смузі частот, яку займає основне випромінювання, та за його межами.

Практичне значення шумових випромінювань як параметра ЕМС полягає в тому, що вони створюють завади прийманню в сусідніх каналах приймачів, що особливо дається взнаки в рухомих системах радіозв'язку. У таких системах шумові випромінювання істотно впливають на вибір частот сусідніх каналів, а також на значення дуплексного рознесення частот $f_{\text{ПР}}$ та $f_{\text{ПЕР}}$ відповідно приймача та передавача. Зменшити ці завади можна, вилучивши приймачі на велику відстань.

Згідно визначенню, даному в Регламенті радіозв'язку, *випромінювання на частоті або частотах, розміщених за межами ширини необхідної смуги частот, рівень якого може бути понижений без будь-яких втрат для відповідної передачі повідомлень називають **побічними випромінюваннями***. До побічних випромінювань відносять випромінювання на:

- гармоніках (субгармоніках);
- паразитні випромінювання;
- продукти інтермодуляції та частотних перетворень.

До побічних випромінювань не відносяться основне, позасмугове та шумове випромінювання.

В основі їх появи лежать *нелінійні процеси, що виникають в окремих вузлах РЕЗ, по елементах яких протікає струм високої частоти*, наприклад, у трактах формування високочастотних сигналів та в антено-фідерних трактах, але вони не пов'язані з процесом модуляції несучих коливань.

Випромінювання на гармоніках – це випромінювання на частотах $f_m = m \cdot f_0$, кратних частоті f_0 основного випромінювання. Головною причиною випромінювань на гармоніках від передавачів є спотворення форм сигналу в радіочастотних підсилювачах потужності.

Рівень гармонік у діапазоні ВЧ можна зменшити орієнтовно до мінус 60 дБ відносно рівня корисного випромінювання, скориставшись простими вихідними колами з фільтром нижніх частот.

Випромінювання на субгармоніках – це випромінювання на частотах $f_m = f_0 / m$. Вони характерні для передавачів, в яких частота випромінювання формується з коливань помноженням вихідної частоти.

Комбінаційні випромінювання виникають при формуванні радіосигналів за допомогою нелінійних перетворень вихідних коливань (зазвичай у діапазонних збуджувачах, синтезаторах), коли з опорних частот

f_1 і f_2 на виході перетворювача формуються складові $f_{pq} = p \cdot f_1 + q \cdot f_2$, де $p, q = \pm 1, 2, 3, \dots$. Із цих складових лише одна використовується для утворення основного випромінювання.

Інтермодуляційні випромінювання виникають унаслідок електромагнітної взаємодії двох або більшої кількості випромінювань передавачів, які працюють на близько розташовані антени чи на спільну антену. Якщо у вихідному каскаді одного (або кожного) передавача існуватиме нелінійний опір для коливань, які взаємодіють (обох передавачів), то на ньому можуть утворюватися та перевипромінюватися інтермодуляційні складові спектра: $f_{pq} = p \cdot f_{p1} + q \cdot f_{p2}$, де $p, q = \pm 1, 2, 3, \dots$, а f_{p1} і f_{p2} – робочі частоти передавачів, які «взаємодіють».

Інтермодуляційні складові можуть створюватися передавачами, що мають спільний підсилювач потужності. До спільної антени може бути підімкнено кілька передавачів за допомогою об'єднання сигналів перед посиленням. У такому разі інтермодуляційні складові можуть, напевне, виникати в потужному підсилювачі, якщо в ньому порушено суворі вимоги стосовно лінійності амплітудної характеристики.

Однак, вони можуть утворюватися і при роботі одного передавача за рахунок інтермодуляції поміж бічними смугами модуляції, якщо амплітудна характеристика тракту підсилювання не є лінійною. Тоді знижується якість сигналу в основних каналах багатоканального тракту. Окрім того, продукти нелінійності можуть потрапляти в сусідні канали інших радіосистем.

Найбільш інтенсивними інтермодуляційними складовими є складові *третього та вищих непарних порядків*: їхній рівень неможливо знизити за допомогою фільтрування, оскільки ці складові близькі до спектра частот корисних сигналів. Частоти складових третього порядку утворюються з основних частот двох чи більшої кількості розміщених на одній станції передавачів.

У таблиці 3.2 неведені деякі інтермодуляційні частоти.

Таблиця 3.2

Порядок інтермодуляції	2	3	5	7
Комбінація частот	$ f_1 + f_2 $ $ f_1 - f_2 $	$2 \cdot f_1 - f_2$ $2 \cdot f_2 - f_1$	$3 \cdot f_1 - 2 \cdot f_2$ $3 \cdot f_2 - 2 \cdot f_1$	$4 \cdot f_1 - 3 \cdot f_2$

Примітка. У Рекомендаціях МСЕ–Р SM.1134 і SM.1072 наведено розрахунок інтермодуляційних завад у передавачах сухопутних рухомих служб та подано поради щодо їх зниження.

Паразитні випромінювання випадково утворюються на частотах, які не залежать від несучої частоти випромінювання та від частот коливань, що виникають у процесі утворення несучої. Із появою паразитних коливань, як правило, порушується нормальна робота радіопередавача, тобто він перестає виконувати свої основні функції.

Частоти паразитних коливань, по суті, не пов'язані з частотами вхідних сигналів, що надходять на вхід тракту радіочастоти передавача. Наприклад, причиною виникнення паразитних коливань на виході передавача, як правило, є самозбудження в деякому каскаді тракту радіочастоти або у тракті в цілому. Узагальнених правил придушення цих коливань запропонувати неможливо, а тому в кожному окремому випадку доводиться усувати причину їх виникнення.

Рівні побічного випромінювання згідно Рекомендації МСЕ-Р SM.329 визначають в таких контрольних смугах частот:

- 1 кГц – для діапазону 9 ... 150 кГц;
- 10 кГц – для 150 кГц ... 30 МГц;
- 100 кГц – для 30 МГц та 1 ГГц;
- 1 МГц – понад 1 ГГц.

Рівень побічних випромінювань зазвичай подається відносно основного випромінювання в децибелах. При цьому нормується верхня межа рівнів (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Приклад норм побічних випромінювань для деяких передавачів, що були встановлених після 1 січня 2003 року

Категорія служби або тип обладнання	Послаблення, дБ, нижче від потужності, підведеної до фідера антени
Усі служби, окрім тих, які перелічено далі	$(43 + 10 \lg P)$, або 70 дВс, залежно від того, яка межа менш строга
Телевізійне мовлення	$(46 + 10 \lg P)$, або 60 дВс, залежно від того, яка межа менш строга без перевищення абсолютного рівня середньої потужності в 1 мВт для станцій ДВЧ або 12 мВт для станцій НВЧ. Проте в окремих випадках може знадобитися більше послаблення
ЧМ радіомовлення	$(46 + 10 \lg P)$, або 70 дВс, залежно від того, яка межа менш строга, причому перевищення абсолютного рівня середньої потужності в 1 мВт неприпустиме
Радіомовлення на СЧ/ВЧ	50 дВс, причому перевищення абсолютного рівня середньої потужності в 50 мВт неприпустиме
Малопотужна радіоапаратура	$(56 + 10 \lg P)$, або 40 дВс, залежно від того, яка межа менш строга

де P – середня потужність (у ватах), підведена до фідера антени. Якщо використовується пакетний сеанс зв'язку, то середня потужність P і середня потужність будь-яких побічних випромінювань вимірюються з використанням потужності, усередненої за часом сеансу.

dBc (децибел відносно несучої; c – *carrier*) – це відношення потужності сигналу до несучої, що виражене в децибелах.

3.2. Параметри радіоприймальних пристроїв, що впливають на електромагнітну сумісність

Радіоприймальні пристрої (радіоприймач-ПРМ) призначені для виділення сигналів із радіовипромінювань. Ідеальний з погляду ЕМС радіоприймач повинен мати лише один **основний канал приймання** – смугу частот, яка міститься у смузі пропускання приймача й призначена для приймання основного випромінювання потрібної радіостанції. У реальних приймачах окрім основного існують також небажані неосновні канали приймання, розміщені за межами смуги основного каналу в широкому діапазоні частот.

ПРМ найбільш поширеного супергетеродинного типу забезпечує *вузьку смугу пропускання та високу вибірковість* у широкому діапазоні частот, а також *необхідне підсилювання сигналу та високу чутливість*. Ці обставини є визначальними в розв'язуванні проблем, зумовлених потребою забезпечення ЕМС сукупності незалежних РЕЗ в умовах дефіциту радіочастотного ресурсу.

Типова функціональна схема тракту обробки сигналу простішого ПРМ супергетеродинного типу з однократним перетворюванням частоти зображена на рис. 3.7.

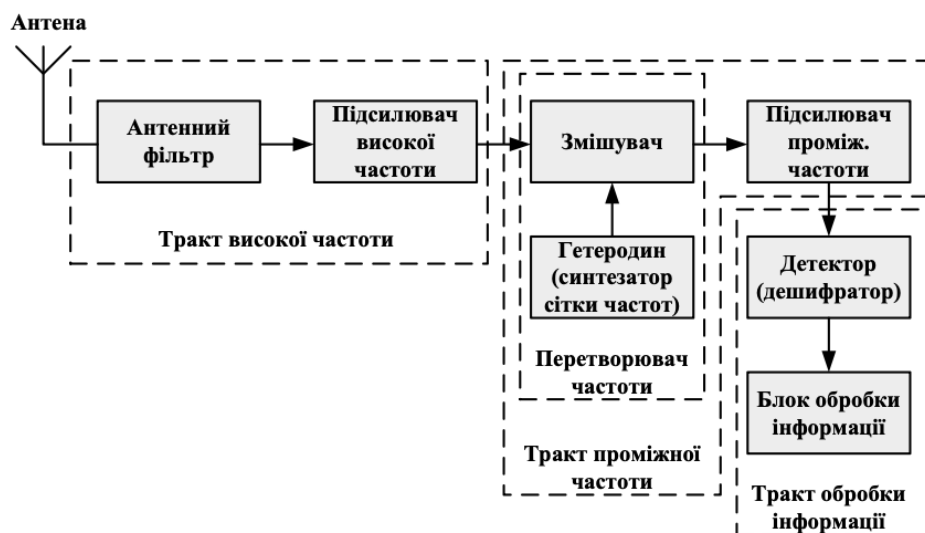


Рисунок 3.7. Типова функціональна схема ПРМ супергетеродинного типу

При зміні робочої частоти супергетеродинного приймача проміжна частота не змінюється. Це надає можливість застосовувати багатоланкові фільтри проміжної частоти, які мають АЧХ близькою до П-подібної. Ці фільтри не потрібно переналаштовувати, вони забезпечують високу вибірність, що у свою чергу, дає змогу збільшувати підсилення у тракті проміжної частоти та досягати високої чутливості.

Основним недоліком супергетеродинних ПРМ є виникнення небажаних каналів приймання радіозавад, наявність яких у тракті ПРМ

може привести до недопустимих спотворювань інформації, що приймається;

Через основний і неосновні канали на вихід приймача можуть надходити завади, що погіршують ЕМС РЕЗ. Сприйнятливість приймача до радіозавад оцінюється щодо випромінюваних завад, які завдають впливу через антену РПП, а також поза нею, наприклад через корпус по каналах живлення, управління тощо. На рис.3.8 наведено схему розподілу смуг частот, що пояснює сприйнятливість супергетеродинного приймача до радіозавад.

Сприйнятливість – це міра здатності радіоприймача *реагувати на ненавмисні завади*, яка залежить від його чутливості та вибірності по основному та неосновних каналах приймання.

Сприйнятливість тільки за основним каналом прийому еквівалентна **чутливості приймача**. Поняття “чутливість” відноситься до *реакції на корисний сигнал*.

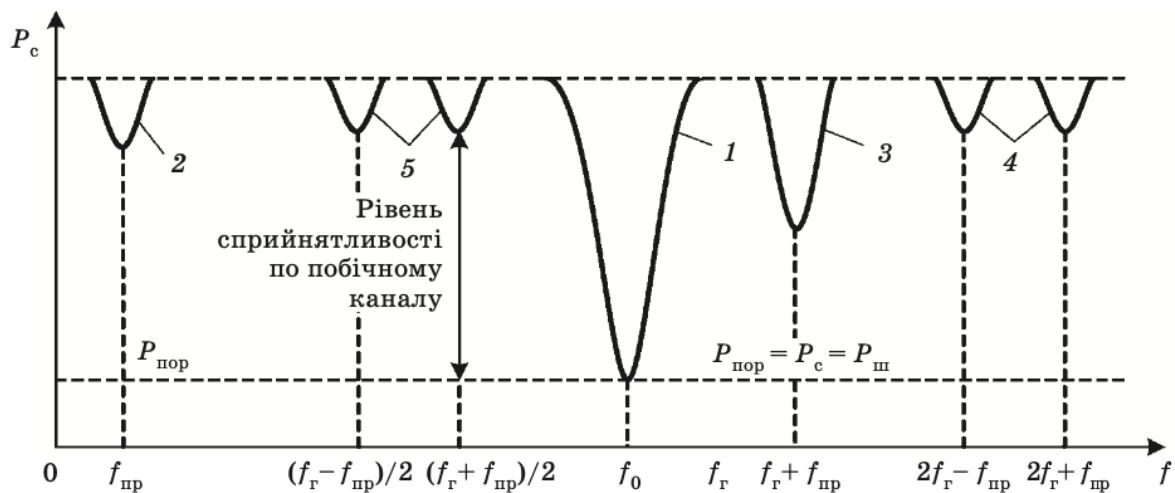


Рисунок 3.8. Характеристика сприйнятливості до завад супергетеродинного приймача:

1 – основний канал приймання на частоті настроювання $f_0 = f_r - f_{пр}$; 2 – побічний канал приймання на проміжній частоті $f_{пр}$; 3 – побічний канал приймання на дзеркальній частоті $f_{дзк} = f_0 + 2f_{пр}$; $f_{дзк} = f_0 - 2f_{пр}$; 4 – побічні канали приймання на комбінаційних частотах $2f_r \pm f_{пр}$; 5 – побічні канали приймання на субгармоніках частоти настроювання приймача $0,5(f_r - f_{пр})$ та дзеркальної частоти $0,5(f_r + f_{пр})$.

Каналом приймання радіохвиль вважаємо будь-яку смугу частот, у межах якої електромагнітні коливання надходять до того чи іншого функціонального вузла ПРМ. В реальних ПРМ є канал приймання корисного сигналу – **основний канал та неосновні**, тобто небажані канали, поява яких зумовлена застосуванням у ПРМ частотнозалежної елементної бази та особливостями функціональних перетворювань електромагнітних збурень різного походження, які проникли в його тракт.

Основний канал приймання – смуга частот, що знаходиться в межах смуги пропускання приймача та призначена для приймання сигналу. Вхідне коло ПРМ настраюється на частоту корисного сигналу f_0 .

Наявність в ПРМ супергетеродинного типу позасмугових та побічних каналів свідчить про те, що під час його застосування можливе одночасне приймання радіохвиль не лише на частоті настойки, розташованою в центрі смуги пропускання основного каналу, але і на інших частотах, що знаходяться за межами цього каналу – у смугах частот побічних каналів приймання. Ці радіохвилі для конкретного ПРМ є радіозавадами, які утруднюють або унеможливають приймання та обробку корисного сигналу.

Неосновні канали приймання завадних радіосигналів поділяються на **побічні** та **позасмугові**. До **побічних** належать небажані канали приймання, номінальні частоти яких мають фіксоване значення для даного приймача при його фіксованому настроюванні на частоту сигналу f_0 . Розміщення основного та побічних каналів приймання на характеристиці сприйнятливості супергетеродинного приймача ілюструє рис. 3.8. В упорядкованому вигляді канали приймання наведені на рис. 3.9.

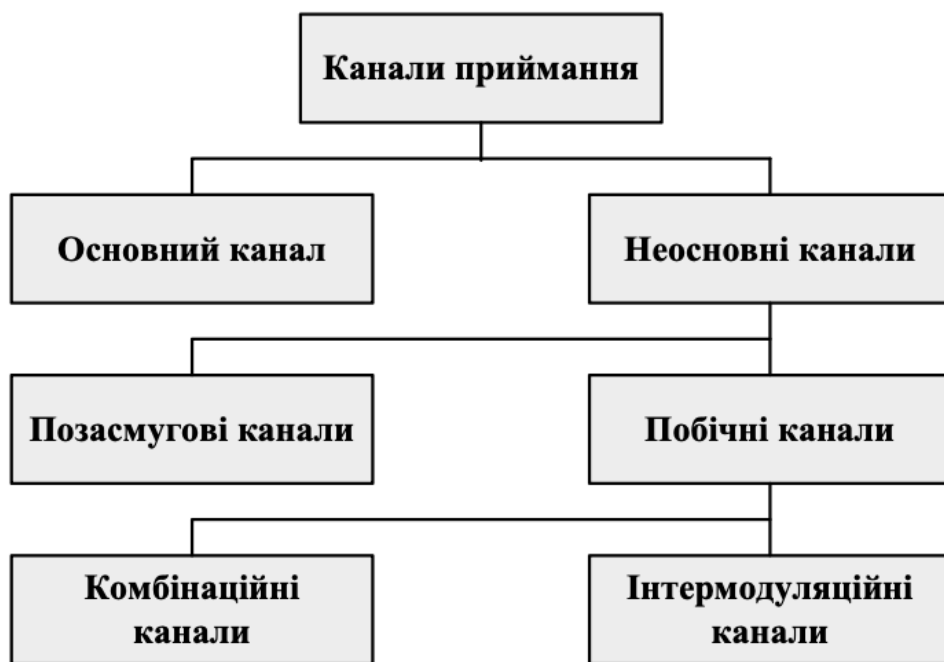


Рисунок 3.9. Канали приймання ПРМ супергетеродинного типу

Небажані канали приймання в ПРМ супергетеродинного типу можуть виникнути як побічний ефект при сумісних нелінійних перетворюваннях високочастотних вхідних коливань або їх гармонік та вихідної напруги гетеродину у перетворювачі частоти. Таки канали відносять до *побічних каналів приймання*.

Побічний канал прийому – смуга частот за межами основного каналу прийому радіоприймача, з якої небажаний сигнал може проходити на вихід

приймача.

Якщо вхідним коливанням є тільки корисний сигнал, то канали, що при цьому виникають, називають **комбінаційними каналами приймання**. Основний канал приймання знаходиться серед них. Як правило, основний канал є найбільш низькочастотним каналом серед усіх можливих комбінаційних каналів. В основному каналі приймання забезпечують мінімальні ослаблення енергії корисного сигналу. В усіх інших комбінаційних каналах забезпечують максимальні ослаблення можливих у них ненавмисних електромагнітних завад.

Якщо серед коливань, наявних на вході ПРМ, корисний сигнал відсутній, то побічні канали, які виникають як наслідок гетеродинування вхідних високочастотних впливів, називають інтермодуляційними каналами приймання.

Відмінність амплітудно-частотних характеристик реальних селективних ланцюгів, які містяться в тракті ПРМ, за своєю формою від П-подібних призводить до появи частотних каналів приймання, прилеглих до основного каналу. Такі непередбачені конструкцією приймача небажані канали називаються **позасмуговими каналами приймання**.

На відміну від побічних, *небажані позасмугові канали приймання з'являються на частотах, які при фіксованій частоті настроювання приймача можуть мати різні значення залежно від частоти завадного сигналу*. Частота радіозавади при цьому не збігається з частотами основного чи побічних каналів приймання, а її рівень може досягати таких значень, при яких у приймачі виникають нелінійні ефекти блокування, перехресної модуляції та інтермодуляції.

Вибірні властивості приймальної антени та приймача дають змогу відрізнити й виокремлювати корисний радіосигнал на тлі завадних випромінювань за рахунок різниці в напрямі приходу радіохвиль і/або їх поляризації, за займаною смугою частот, структурою сигналів тощо.

На рис. 3.10 наведено АЧХ фільтрів супергетеродінного радіоприймача на основній (радіо) та проміжній частотах. Слід мати на увазі, що фільтр преселектора на частоті сигналу f_c та фільтр на проміжній частоті $f_{\text{ПР}}$ мають різні коефіцієнти прямокутності та різну ширину смуги пропускання. Фільтр преселектора переналаштовується разом зі зміною робочої частоти й тому має невисоку вибірковість. Проміжна частота при зміні робочої частоти не змінюється, фільтр проміжної частоти має АЧХ близькою до П-подібної. На рис. 3.10 наведено також розташування на осі частот деяких каналів приймання супергетеродінного приймача ($\text{СК}_{1,2}$ – сусідні, ЗК – дзеркальний) та частоту гетеродину $f_{\text{Г}}$.

Сусідній канал – смуга частот, яка прилягає до нижньої або верхньої межі основного каналу прийому і знаходиться в межах смуги пропускання підсилювача високочастотного тракту приймача.

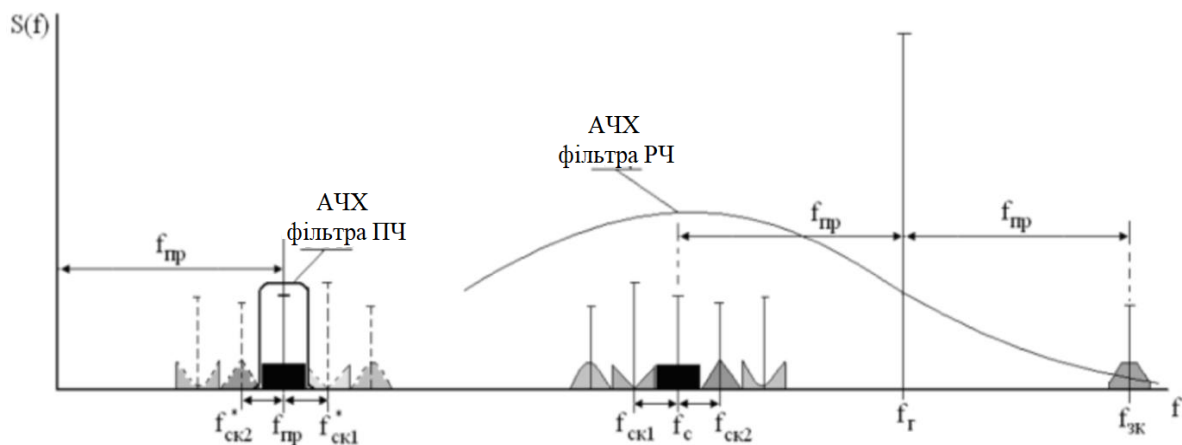


Рисунок 3.10. АЧХ тракту РЧ (преселектора) та проміжній частоти (ПЧ) приймача

Корисний сигнал – електромагнітний сигнал між однотипним радіообладнанням (РО однієї системи радіозв'язку), призначений для передавання повідомлень між кореспондентами.

Корисний сигнал за частотною ознакою виокремлюється за рахунок частотної вибірності приймача, яка характеризує його здатність послаблювати завади, які мають частоту, відмінну від частоти настроювання.

Розрізняють **односигнальну** та **багатосигнальну частотну вибірність** приймача.

За малих рівнів корисного та завадного сигналів радіочастотний тракт приймача працює в лінійному режимі, а його вибірні властивості характеризує **односигнальна частотна вибірність**. Вона визначається відношенням рівня вхідного сигналу на заданій частоті до його заданого рівня на частоті настроювання за незмінного рівня сигналу на виході радіоприймача та вимірюється за допомогою одного сигналу, що подається на вхід приймача, із рівнем, що не викликає нелінійних ефектів у тракці приймання.

Багатосигнальна вибірність радіоприймача визначається відношенням рівнів сигналів, які одночасно надходять на його вхід на одній чи кількох заданих частотах і на частоті настроювання приймача при заданому відношенні на його вході сумарної потужності складових завади до потужності корисного сигналу. Вона характеризує здатність приймача послаблювати дію завад залежно від їхнього розстроювання за присутності корисного радіосигналу.

Характеристики та параметри радіоприймального пристрою, що зазнає впливу одним коливанням

За допомогою односигнальних методів оцінюють параметри основного та побічних каналів приймання, що впливають на ЕМС радіоприймачів, коли вони працюють у лінійному режимі. Основний канал

приймання займає смугу частот, яка міститься у смузі пропускання приймача й призначена для приймання корисного радіосигналу.

До параметрів основного каналу належать:

- чутливість (порогова та реальна),
- динамічний діапазон,
- частотна вибірність,
- смуга пропускання,
- коефіцієнт прямокутності,
- частота настроювання,
- нестабільність частоти гетеродина,
- відношення сигнал/шум на виході.

Побічні канали на проміжній дзеркальній частоті, на комбінаційних частотах і субгармоніках характеризуються рівнем сприйнятливості та частотою.

Чутливість радіоприймача характеризує його здатність забезпечувати приймання корисного радіосигналу на тлі власних шумів за відсутності радіозавад та відтворювати цей радіосигнал на виході із заданою якістю. Кількісно цей параметр визначається *мінімально необхідною потужністю* (або ЕРС) *сигналу в антені*, за якої забезпечується номінальне значення напруги або потужності на виході приймача при заданих параметрах модуляції радіосигналу та відношенні сигнал/шум на виході.

Розрізняють порогову та реальну чутливість радіоприймача.

Порогова чутливість приймача визначається мінімальним рівнем радіосигналу на його вході $P_{с.мін}$ за однакових рівнів корисного сигналу й власних шумів на його виході, тобто коли відношення сигнал/шум (англ. *Signal Noise Ratio – SNR*) за потужністю на виході

$$Q_{вих} = P_{с.вих} / P_{ш.вих} = 1 \text{ (0 дБ)}. \quad (3.1)$$

За поріг сприйнятливості приймача до завадних випромінювань в основному каналі приймання також береться рівень власних шумів, тобто його порогова чутливість $P_{с.мін}$.

Коефіцієнт шуму приймача $N_{ш}$ це число, що показує в скільки разів відношення сигнал/шум на виході приймача менше, ніж відношення сигнал/шум на його вході

$$N_{ш} = \frac{P_{с}/P_{ш}}{P_{с,вих}/P_{ш,вих}} = \frac{Q_{вх}}{Q_{вих}}. \quad (3.2)$$

Нині прийнято використовувати одиницю виміру коефіцієнту шуму у децибелах. В ідеальному нешумному приймачі коефіцієнт шуму $N_{ш} = 1$ (0 дБ), так як сигнал і шум посилюються в однакове число разів. У реальних приймачах коефіцієнт шуму збільшується через внутрішні шуми $P_{вн}$,

внаслідок чого потужність шумів на виході зростає, а вихідне відношення сигнал/шум зменшується.

$$N_{\text{ш}} = \frac{P_{\text{с}}(P_{\text{ш}} \cdot G + P_{\text{вн}})}{G \cdot P_{\text{с}} \cdot P_{\text{ш}}} = 1 + \frac{P_{\text{вн}}}{G \cdot P_{\text{ш}}}, \quad (3.3)$$

де G – коефіцієнт підсилення лінійної частини приймача (до детектора).

Порогова чутливість може бути визначена через потужність шумів на виході приймача та його коефіцієнт шуму

$$P_{\text{с.мін}} = N_{\text{ш}} \cdot P_{\text{ш.вих}}. \quad (3.4)$$

Таким чином, порогова чутливість приймача пропорційна коефіцієнту шуму.

Впевнений прийом корисного сигналу забезпечується при значному перевищенні потужності корисного сигналу $P_{\text{с.вих}}$ над шумом $P_{\text{ш.вих}}$.

Реальна чутливість радіоприймача визначається мінімальним рівнем радіосигналу на його вході $P_{\text{с.р.}}$, за якого забезпечується номінальна потужність корисного сигналу на його виході та задане перевищення рівня потужності сигналу над рівнем шумів, тобто відношення сигнал/шум на виході має бути

$$Q_{\text{вих}} = P_{\text{с.вих}} / P_{\text{ш.вих}} > 1, \quad (3.5)$$

при цьому

$$P_{\text{с.р.}} = N_{\text{ш}} \cdot P_{\text{ш}} Q_{\text{вих}}.$$

Реальну чутливість приймача, обмежену його власними шумами, можна обчислити за формулою:

$$P_{\text{с.р.}} = k_{\text{Б}} \cdot T_0 \cdot B_{\text{ш}} \cdot (T_{\text{А}}/T_0 + N_{\text{ш}} - 1) \cdot Q_{\text{вих}}, \quad (3.6)$$

де $k_{\text{Б}} = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – стала Больцмана (пов’язує температуру та енергією), Дж/К; T_0 – абсолютна температура навколишнього середовища, К; $T_{\text{А}}$ – ефективна шумова температура антени, К; $B_{\text{ш}}$ – ширина ефективної смуги шумів приймача (звичайно рівна смузі пропускання ППЧ – підсилювача проміжної частоти, тобто смузі пропускання приймача), Гц; $N_{\text{ш}}$ – коефіцієнт шуму приймача; $Q_{\text{вих}}$ – потрібне відношення сигнал/шум на виході.

У діапазоні 30...120 МГц при кімнатній температурі ($T_0 = 293$ К) відносна температура антени $T_{\text{А}}/T_0 = 1,8 \cdot 10^6/f^3$, де f – відповідна частота, МГц. На вищих частотах ($f > 120$ МГц) відношення $T_{\text{А}}/T_0 \approx 1$. У такому разі реальна чутливість

$$P_{\text{с.р.}} = k_{\text{Б}} \cdot T_0 \cdot B_{\text{ш}} \cdot N_{\text{ш}} \cdot Q_{\text{вих}}, \quad (3.7)$$

порогова чутливість (і поріг сприйнятливості)

$$P_{\text{с.мін}} = k_{\text{Б}} \cdot T_0 \cdot B_{\text{ш}} \cdot N_{\text{ш}}. \quad (3.8)$$

Реальна чутливість (формула 3.4), виражена в децибелах по відношенню до мілівату (дБмВ), визначається формулою

$$P_{\text{С,МІН,дБ}} = Q_{\text{ВІХ, дБ}} - 174 + 10 \cdot \lg B_{\text{ш}} + N_{\text{ш,дБ}}. \quad (3.9)$$

Для ідеального приймача без шумів $N_{\text{ш}}=1$ (0 дБ), й у смузі 1 Гц порогова чутливість, тобто чутливість щодо сигнал/шум на виході $Q_{\text{ВІХ}} = 0$ дБ, дорівнює -174 дБм.

При температурі $T = 293$ К та вхідному опорі $R_{\text{н}} = 50$ Ом чутливість по напрузі, виражену в децибелах по відношенню до мікрровольта (дБмкВ), можна обчислити за формулою

$$U_{\text{С,МІН}} = Q_{\text{ВІХ, дБ}} - 61 + 10 \cdot \lg B_{\text{ш}} + N_{\text{ш,дБ}}. \quad (3.10)$$

Чутливість приймача, наприклад зі смугою пропускання $B = 10$ кГц та коефіцієнтом шуму $N_{\text{ш}} = 12$ дБ при вихідному відношенні сигнал/шум $Q_{\text{ВІХ}} = 10$ дБ, становить 1 дБмкВ, або у мікрровольтах $U_{\text{С}} = 1,08$ мкВ,

Чутливість реальних приймачів залежно від їхнього призначення змінюється в широких межах. Наприклад, чутливість радіомовних АМ приймачів (коли відношення сигнал/шум на виході не менш як 20 дБ) залежно від їхнього класу якості коливається від 50 до 300 мкВ, а в діапазоні УКХ – від 2 до 15 мкВ.

Мірою *лінійності основного каналу (О.К.) приймання* за відсутності радіозавад є **динамічний діапазон** $D_{\text{О.К.}}$, який кількісно дорівнює відношенню максимальної амплітуди радіосигналу $E_{\text{МАКС}}(f_0)$ на вході приймача, при якій нелінійні спотворення (які оцінюються коефіцієнтом нелінійних спотворень $K_{\text{Н.С.}}$) дорівнюють припустимому значенню, до його мінімальної амплітуди $E_{\text{МІН}}(f_0)$, при якій $Q_{\text{ВІХ}}$ – відношення сигнал/шум на виході дорівнює заданому значенню:

$$D_{\text{О.К.}}(f_0) = E_{\text{МАКС}}(f_0)/E_{\text{МІН}}(f_0) \text{ при } K_{\text{Н.С.}}, Q_{\text{ВІХ}} = \text{const}.$$

Динамічний діапазон характеризує припустимі межі змінювання амплітуди вхідного радіосигналу, в межах яких забезпечується необхідна якість вихідного сигналу. Максимальна амплітуда сигналу обмежується зверху нелінійністю вольт-амперної характеристики активних елементів підсилювальних і перетворювальних каскадів приймача. Мінімальна амплітуда вхідного радіосигналу обмежується знизу рівнем власних шумів приймача, тобто його чутливістю. Динамічний діапазон приймачів залежить від їхнього призначення та класу і може становити 100 ... 120 дБ та більше.

Частотна вибірність радіоприймача уможливорює виокремлення корисного сигналу на тлі завадових радіовипромінювань завдяки відмінностям у їхніх спектральних характеристиках (вибірність – *selectivity*)

S). Графік односигнальної частотної вибірності (див. рис. 3.11) характеризує здатність приймача послаблювати дію завади залежно від значення Δf відхилення її частоти відносно частоти настроювання приймача (частоти сигналу) f_0 .

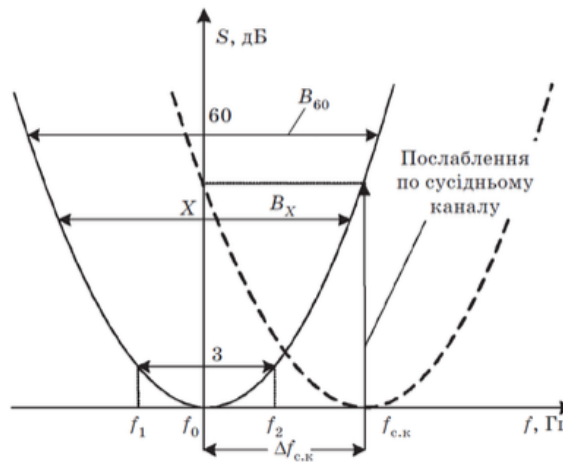


Рисунок 3.11. Характеристика односигнальної частотної вибірності приймача

На графіку по осі абсцис відкладають значення зсуву (Δf), а по осі ординат — значення послаблення $S(\Delta f)$, дБ,

$$S(\Delta f) = 20 \cdot \lg[K(f_0)/K(\Delta f)],$$

де $K(f_0)$, $K(\Delta f)$ — коефіцієнт підсилення приймача відповідно на частоті f_0 настроювання та при зсуві на Δf .

Основний канал приймання радіоприймача. Смуга пропускання приймача по основному каналу B_3 обмежена двома частотами (f_1 і f_2 на рис. 3.10), на яких послаблення рівня сигналу дорівнює 3 дБ. Ширину смуги пропускання B_3 зазвичай обирають дорівнюючій необхідній ширині частот B_H із урахуванням припустимого відхилення частоти радіолінії $\Delta f_{р.л}$ в обидва боки від присвоєної частоти:

$$B_3 = B_H + 2\Delta f_{р.л.},$$

де частотне розузгодження

$$\Delta f_{р.л} = \Delta f_{прм} + \Delta f_{прд}$$

залежить від нестабільності частоти настроювання відповідно $f_{прд}$ передавача і $f_{прм}$ приймача.

Ідеальна характеристика вибірності має бути прямокутною. За такої форми характеристики складові спектра сигналу в межах смуги пропускання B_3 надходять на вихід приймача без спотворень та послаблення ($S = 0$ дБ), а шуми й завади за межами смуги повністю подавляються ($S = \infty$). Уявлення про ступінь близькості реальної та ідеальної характеристик вибірності дає коефіцієнт прямокутності K_X , що дорівнює відношенню

ширини смуги частот B_X на рівні X дБ до ширини смуги пропускання B_3 на рівні 3 дБ:

$$K_X = B_X/B_3.$$

Недостатня крутість схилів характеристики вибірності приймача призводить до появи в основному каналі приймання завад від радіопередавачів, що працюють на частотах **сусідніх каналів**, зміщених на $\pm \Delta f_{\text{с.к}}$ відносно частоти f_0 основного каналу.

Сусідній канал прийому – канал, який примикає до нижньої чи верхньої границі смуги пропускання приймача основного каналу приймання ПРМ і дорівнюють йому за шириною та знаходиться в межах смуги пропускання підсилювача на радіочастоті ПРЧ. Поява сусідніх каналів приймання зумовлена недосконалістю вибіркового характеру вхідних кіл. Тому, крім першого, можна виділити другий, третій та інші сусідні канали, що межують між собою і віддалені від межі смуги пропускання основного каналу відповідно на дві, три і більше ширини B_3 . На рис. 3.11 пунктирною лінією зображено характеристику вибірності одного із сусідніх каналів на частоті $f_{\text{с.к}}$. Через наявність сусідніх каналів сильні завади, які недостатньо послаблені вхідними колами ПРМ, разом із слабким корисним сигналом можуть надійти, наприклад, на вхід високочастотного підсилювача, який працює у лінійному режимі, та перевести його в нелінійний режим. При цьому у підсилювачі виникають такі небажані ефекти, як перехресна модуляція, інтермодуляція та блокування, тобто втрата підсилювальних властивостей. Крім того, завади разом із сигналом, пройшовши високочастотний тракт, можуть потрапити на змішувач – перетворювач частоти. При цьому на вході детектора утворюється завада, яка призводить до подавлення та маскування слабого сигналу на його виході. Тому потрібно забезпечувати ослаблення сусідніх каналів приймання на величину не меншу, ніж 80 дБ.

Для придушення сусідніх каналів (СК) можна використовувати розподілену фільтрацію в тракті проміжної частоти приймача.

Установлені для побутових радіомовних приймачів норми вимагають, щоб односигнальна вибірність по першому сусідньому каналу, яка визначає послаблення завади, при розстроюванні $f_{\text{с.к}} = \pm 9$ кГц становила не менш як 26...56 дБ - залежно від класу приймача.

Побічним каналом приймання називається смуга частот, що перебуває за межами смуги пропускання основного каналу (див. рис. 3.8) й у якій завадовий сигнал може проходити на вихід радіоприймача. Завадові сигнали можуть проникати на вихід приймача по побічних каналах приймання, номінальні частоти яких мають фіксоване значення при настроюванні приймача на частоту сигналу f_0 .

Побічні канали утворюються за рахунок перетворення частоти у змішувачах супергетеродинних приймачів. Сигнал (корисний або завадовий), що надходить на вхід змішувача, потрапляє у смугу $B_{\text{п.ч}}$.

пропускання тракту ППЧ приймача й проходить на його вихід, якщо виконується умова

$$|p \cdot f_c \pm m \cdot f_r| = f_{п.ч} \pm 0,5 \cdot B_{п.ч},$$

де f_c – частота вхідного впливового сигналу; f_r – частота гетеродина; $f_{п.ч}$ – проміжна частота; $p, m = 0, 1, 2, \dots$ – номери гармонік сигналу та гетеродина. Величина $N = |p| + |m|$ називається *порядком побічного каналу*. Проміжні (центральної) частоти побічних каналів подаються у вигляді

$$f_{п.ч} = |(m \cdot f_r \pm f_{п.ч})/p|.$$

Побічний канал на проміжній частоті (див. рис. 3.8, крива 2) має середню частоту $f_{п.к} = f_{п.ч}$ при $p = 1, m = 0$. Цей канал утворюється внаслідок недостатньої вибірності преселектора приймача (вхідних контурів та ПВЧ). Якщо заваду, що надходить по каналу проміжної частоти, не послабити до перетворювача, то вона не послабиться і в наступних каскадах, настроєних на цю частоту. Тому для зменшення завад, що надходять по цьому каналу, підвищують вибірковість вхідних кіл та використовують режекторні фільтри, настроєні на проміжну частоту. У сучасних ПРМ забезпечують ослаблення приймання по каналу проміжної частоти на 80...100 дБ

Побічний канал приймання на дзеркальній частоті (див. рис. 3.8, крива 3) має середню частоту $f_{п.к} = f_{дз} = f_r + f_{п.ч} = 2 \cdot f_c + f_{п.ч}$ при $p, m = 1$. Побічний канал на дзеркальній частоті утворюється через недостатнє послаблення завадових сигналів у преселекторі приймача.

Дзеркальний канал (ДЗК) та канал приймання на проміжній частоті (ПЧ) послаблюється в тракці радіочастоти контурами преселектора (вхідним ланцюгом і резонансними системами підсилювача радіочастоти) та загороджувальними фільтрами, які налаштовуються на проміжну частоту (фільтри пробки). Для ослаблення завади на частоті дзеркального каналу також необхідно збільшувати частотне рознесення основного та дзеркального каналів, тобто підвищувати значення проміжної частоти.

Згідно з установленими нормами односигнальна вибірність по дзеркальному каналу професійних приймачів в залежності від класу приймача мають становити не менш ніж 60-90 дБ.

Комбінаційні канали приймання (див. рис. 3.8, криві 4) утворюється на гармоніках гетеродина з частотами $2 \cdot f_r \pm f_{п.ч}, 3 \cdot f_r \pm f_{п.ч}$ і т.д. має середню частоту $f_{п.к} = m \cdot f_r \pm f_{п.ч}$ при $p = 1, m = 2, 3, \dots$.

Нелінійні побічні канали приймання з'являються на частотах $f_{п.к} = (m \cdot f_r \pm f_{п.ч})/p$ при $p, m = 2, 3, \dots$ у разі, коли рівень вхідного сигналу достатньо великий і цей сигнал зазнає нелінійного перетворення у змішувачі приймача, унаслідок чого у змішувачі утворюються його гармоніки ($p > 1$). При взаємодії першої гармоніки гетеродина ($m = 1$) та другої гармоніки завадового сигналу ($p = 2$) утворюються побічні канали приймання (див.

рис. 3.8, криві 5) на субгармоніках частоти настроювання приймача $f_{п.к}=0,5 \cdot (f_{г} - f_{п.ч})=0,5 \cdot f_0$ та частоти дзеркального каналу $f_{п.к}=0,5 \cdot (f_{г} + f_{п.ч})$. Потрібне послаблення завад по комбінаційних каналах приймання для професійних приймачів має становити в залежності від класу приймача не менш як 60-80 дБ.

Динамічний діапазон по побічному каналу приймання $D_{п.к}$ – відношення максимальної амплітуди $E_{макс}$ завадного сигналу на частоті $f_{п.к}$ одного з побічних каналів до мінімальної амплітуди $E_{мін}$ корисного сигналу f_0 , при якій забезпечується задане відношення сигнал/(шум+завада) на виході приймача, характеризує вибірність приймача від завад по побічних каналах:

$$D_{п.к}(f_{п.к}) = E_{макс}(f_{п.к})/E_{мін}(f_0) \text{ при } Q_{вих} = const$$

де $Q_{вих}=P_c/(P_{ш}+P_{п.к})$ – відношення потужності корисного сигналу до сумарної потужності $P_{ш}$ внутрішніх шумів і $P_{п.к}$ завад із побічного каналу.

Сприйнятливість по побічних каналах приймання виражають у децибелах відносно чутливості основного каналу (див. рис. 3.8). Цей параметр показує, наскільки чутливість побічного каналу нижча за чутливість основного. Послаблення чутливості по побічних каналах зазвичай вимірюють односигнальним методом (за відсутності корисного сигналу).

Послаблення завад побічних каналів приймання здійснюється в основному двома засобами:

- зменшенням кількості побічних каналів;
- зменшенням чутливості приймача побічних каналів.

Перша задача вирішується шляхом забезпечення лінійності перетворювання частоти перетворювачем, тобто зменшенням числа (інтенсивності) гармонік гетеродину та сигналу.

Вирішення другої задачі здійснюється за рахунок ослаблення завад, діючих на частотах побічних каналів, вибірковыми системами тракту радіочастоти (за рахунок вибіркової ТРЧ).

Характеристики й параметри радіоприймального пристрою в разі впливу кількох коливань

У реальних умовах експлуатації радіоприймальних пристроїв на них можуть діяти одночасно з корисним випромінюванням достатньо сильні завадові радіовипромінювання, вплив яких виявляється у вигляді нелінійних ефектів блокування, перехресних та інтермодуляційних спотворень корисного сигналу, а також його вторинної модуляції.

Односигнальна вибіркковість не дає повного уявлення про селективні властивості приймача, який працює в реальних умовах при наявності сигналів, що заважають та розташованих поза основного каналу приймання, а рівні яких можуть значно перевищувати рівень корисного сигналу. У

цьому випадку вводиться поняття реальної вибірковості, яка оцінюється багатосигнальним методом.

Під **багатосигнальною вибірковістю** радіоприймача розуміють його здатність приймати корисний сигнал із потрібною якістю в умовах дії на вході приймача потужних позасмугових завад, які викликають в ньому нелінійні явища. Вона визначається відношенням рівнів сигналів, які одночасно надходять на вхід приймача на одній чи кількох заданих частотах і на частоті настроювання приймача при заданому відношенні на його виході сумарної потужності складових завади до потужності корисного сигналу.

Багатосигнальна вибірковість радіоприймача в значній мірі визначається структурою та параметрами тракту радіочастоти.

На рис. 3.12 представлені криві, які характеризують багатосигнальну вибірність приймача.

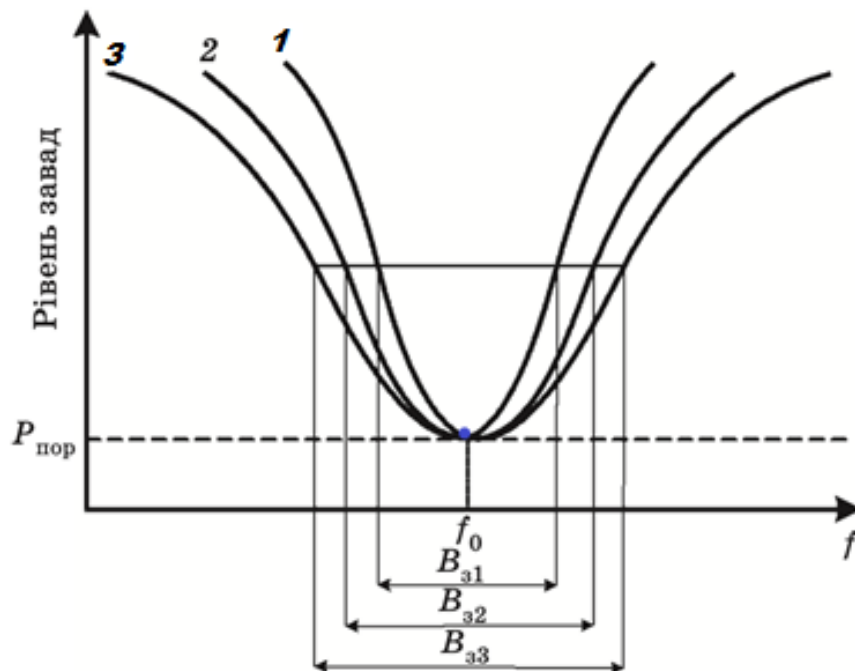


Рис. 3.12. Односигнальна (1) та багатосигнальні (2, 3) характеристики частотної вибірності приймача

Крива 1 представляє характеристику односигнальної вибірності приймача за відсутності завади або в разі дуже малого (такого, що ним можна знехтувати) рівня $P_{з1}$ завади. Криві 2 і 3 представляють характеристики багатосигнальної вибірності, що отримані при дії інтенсивних завад із рівнями $P_{з3} > P_{з2} > P_{з1}$.

Зростання потужності завад призводить до зниження вибірних властивостей (селективної здатності) приймача, що можна представити як погіршення характеристик розширення його смуги пропускання та збільшення коефіцієнта прямокутності частотної характеристики, а також до можливого погіршення порогової чутливості $P_{пор}$.

Виділяють наступні *нелінійні явища в приймачі*:

- *блокування*;
- *перехресну модуляцію*;
- *взаємну модуляцію (інтермодуляцію)*.

Ефект блокування проявляється у зменшенні амплітуди корисного сигналу та відповідному зменшенні відношення сигнал/шум на виході приймача в результаті дії на його вході завадного сигналу з частотою, яка не збігається з частотою основного та побічних каналів приймання. Блокування виникає в перших каскадах приймача (ПВЧ та змішувачі) через нелінійність вольт-амперної характеристики використовуваних активних елементів (діодів, транзисторів тощо).

Якщо амплітуда напруги завади U_3 перебільшує інтервал зміни напруги в межах лінійного відрізка характеристики активного приладу в тракці радіочастоти (ТРЧ) приймача, тоді він переходить в нелінійний режим роботи. При цьому середня крутизна характеристики зменшується, зменшується і підсилення корисного сигналу каскадом (рис. 3.13). Цей ефект називають **блокуванням**.

Для зменшення ефекту блокування ПРМ завадою треба покращувати якість вибіркового кіл, які містяться перед нелінійним елементом, що знаходиться під впливом слабкого сигналу та сильної завади. Ефект блокування не виникає, якщо відсутні нелінійності третього та більш високих порядків.

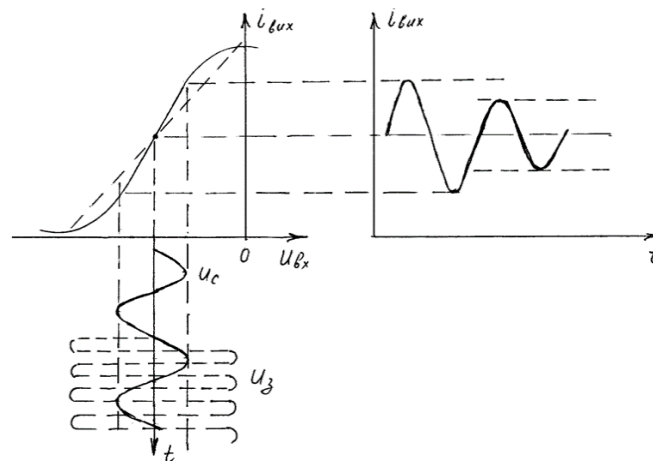


Рисунок 3.13. Ефект блокування

Якщо завада буде ще модульована по амплітуді, то очевидно, що середня крутизна прохідної характеристики буде змінюватися з частотою модуляції. При цьому коефіцієнт підсилення каскаду буде також змінюватися, внаслідок чого корисний сигнал буде модульовано за законом модуляції завади. Таким чином модуляція завади переноситься на корисний сигнал, а такий нелінійний ефект називають **перехресною модуляцією**.

Інтермодуляція – це явище, що виникає при взаємодії двох або більше сигналів різних частот у нелінійній системі, в результаті чого утворюються нові небажані частотні компоненти.

При умові, що на вході підсилювача радіочастоти приймача діють декілька потужних завад на частотах $f_{31}, f_{32}, f_{33}, \dots$, то вони внаслідок нелінійного перетворення в електронному приладі підсилювача утворюють ряд гармонік: $m \cdot f_{31}, m \cdot f_{32}, m \cdot f_{33}, \dots$ (де $m = 0, 1, 2, 3, \dots$). При цьому в складі струму електронного приладу можуть виникати *інтермодуляційні коливання*:

$$f_i = m \cdot f_{31} \pm m \cdot f_{32} \pm m \cdot f_{33} \dots ,$$

Якщо одна або декілька частот f_i співпадають з частотою налаштування приймача або частотами побічних каналів приймання, то це інтермодуляційне коливання проходить в тракт приймання як адитивна завада.

Частоти небезпечних інтермодуляційних коливань порядку $N=|m| + |n|$, які потрапляють у смугу пропускання ППЧ, визначаються нерівністю

$$|m \cdot f_1 + n \cdot f_2| \leq f_0 \pm B_{\text{ПРМ}}/2,$$

де f_1, f_2 – частоти завадних сигналів, f_0 – частота настроювання приймача;

$B_{\text{ПРМ}}$ – смуга пропускання ППЧ на рівні $-X$ дБ; $n, m = \pm 1, 2, 3, \dots$.

Для оцінювання впливу інтермодуляційних завад смугу частот ППЧ зазвичай беруть на рівні $X = -60$ дБ.

Найбільшу завадну дію мають інтермодуляційні завади другого ($N=2$) та третього ($N=3$) порядку виду $f_2 + f_1 = f_0$; $2 \cdot f_1 - f_2 = f_0$; $2 \cdot f_2 - f_1 = f_0$, де f_1 – частота завади, найближча до частоти настроювання приймача; f_2 – більш віддалена частота. Положення завадних сигналів на осі частот, що їх створюють такі завади, ілюструє рис. 3.14.

Ступінь впливу завад на приймач практично при експлуатації зазвичай оцінюють допустимими значеннями амплітуд завад, що викликають відповідно блокування, перехресні спотворення та інтермодуляцію.

Для покращення багатосигнальної вибірковості приймача можуть застосовувати, наприклад, наступні практичні заходи:

- використовують у підсилювачі радіочастоти електронний прилад, який має мінімальний параметр нелінійності S''/S (S, S'' – це відповідно крутизна прохідної характеристики активного елементу та друга її похідна), тобто – з можливо більшою лінійністю прохідної характеристики;

- зменшують напругу завади на вході електронного приладу (U_3) за рахунок підвищення вибірковості вхідного ланцюга ТРЧ шляхом збільшення кількості контурів у фільтруючому ланцюгу та покращення їх добротності.

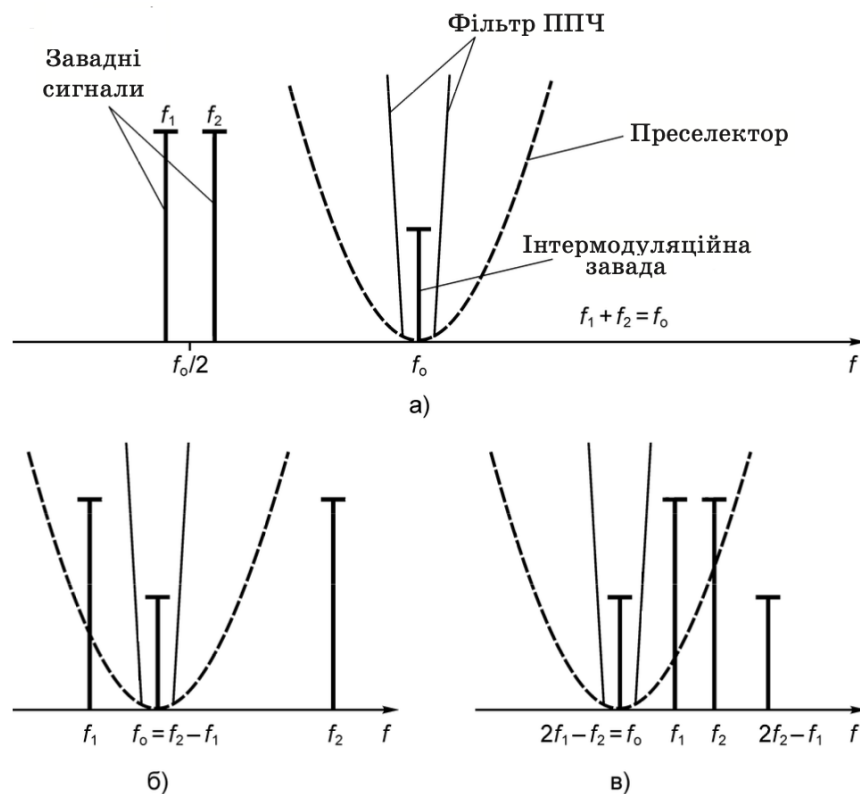


Рисунок 3.14. Утворення інтермодуляційних завад у радіоприймачі

Групи технічної складності радіоприймальних пристроїв

За призначенням та рівнем складності професійні РПП поділяють на три класи [4].

До ПРМ першого класу належать радіоприймачі, що входять до складу радіостанцій великої або середньої потужності, які застосовуються на стаціонарних або польових радіоцентрах. За схемною реалізацією – це ПРМ з двома або трьома перетворювачами частоти. Якісні показники ПРМ першого класу найвищі. Їх живлення здійснюється від електромережі, тобто є централізованим. ПРМ першого класу можуть бути розташованими й у спеціальних приміщеннях та в окремих фургонах.

До ПРМ другого класу відносять радіоприймачі, що входять до складу радіостанцій великої або середньої потужності, які застосовуються на стаціонарних або польових радіоцентрах як допоміжні засоби для приймання звукової та іншої інформації. Їхні якісні показники наближені до показників ПРМ першого класу, але в них застосовується подвійне перетворення частоти. Електроживлення може бути централізованим або автономним.

До ПРМ третього класу належать радіоприймачі, які застосовують у складі рухомих або переносних радіоелектронних засобів. Електроживлення їх здебільшого автономне.

ПРМ різних класів розрізняються за своїми якісними характеристиками. Нормований рівень сприйнятливості S приймачів різного класу по деяким каналам приймання в децибелах наведені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Порівнювальні характеристики сприйнятливості S
професійних ПРМ різних класів

№	Характеристика	Клас ПРМ		
		Перший	Другий	Третій
1	Ослаблення завад у каналі проміжної частоти, не менш ніж, дБ	100	80	60
2	Ослаблення завад у сусідніх каналах приймання, не менш ніж, дБ	90	70	60
3	Ослаблення завад у побічних каналах приймання, не менш ніж, дБ	80	66	60

Завади від радіоприймачів

Радіоприймач може сам виступати джерелом радіозавад, які можуть погіршити ЕМО для інших РЕЗ. Наприклад, коливання гетеродину (-ів) приймача, випромінювання через приймальну антену, будуть виступати як радіозавади для розташованих поблизу інших приймачів та інших рецепторів.

Ефект *перенесення шумів гетеродина* полягає в перетворенні частини енергетичного спектру шуму гетеродина ПРМ із шириною, що дорівнює смузі пропускання тракту ПЧ ПРМ, у проміжну частоту та в попаданні шуму в тракт ПЧ ПРМ у вигляді енергії шуму за умови, якщо різниця частот Δf між завадою з частотою $f_{\text{завади}}$ та частиною енергетичного спектру шуму гетеродина дорівнює проміжній частоті $f_{\text{ПЧ ПРМ}}$. На даний час цей параметр окремо не нормується і не виділяється із загальних вимог до допустимого рівня блокування корисного сигналу.

Інтермодуляційні складові можуть створюватися в нелінійних ланцюгах тракту радіочастоти та змішувачі через недостатній захист цих ланцюгів від полів, що наводяться, і *перевипромінюватись в навколишнє середовище*.

3.3. Характеристики антен, що впливають на електромагнітну сумісність

Антени РЕЗ доволі різноманітні як за типами, так і за характеристиками. Проте всі антени можна поділити на дві групи: антени осьового випромінювання та апертурні антени. До антен осьового випромінювання належать директорні («хвильовий канал»), променеві та спіральні, а до апертурних – рупорні (на основі конічного або пірамідального рупора), одно- та дво-дзеркальні антени із параболічним рефлектором або параболічні антени (ПА), а також комбіновані: рупорно-параболічні (РПА), рупорно-лінзові (РЛА) та перископічні антени (ПРА).

Характеристики випромінюваного антеною поля залежать від відстані між антеною та точкою спостереження. Результируюча напруженість поля, створюваного антеною у вільному просторі, залежить від різниці Δr ходу

хвиль, утворених окремими випромінювальними елементами антени, які являють собою елементарні випромінювачі.

За умови, що $\Delta r \ll \lambda$ (λ – довжина хвилі), антена може розглядатися як точкова. Простір, де ця умова виконується, називається **далекою зоною випромінювання** або **зоною Фраунгофера**. Тут напруженість поля змінюється обернено пропорційно до відстані.

Характер змінювання напруженості поля істотно залежить від відстані R до передавача. Розрізняють *близьку та далеку зони* приймання сигналів.

На практиці вважають, що межа *далекої зони* $R_{дз}$ задовольняє таку рівність:

$$R_{дз} = 2 \cdot L^2 / \lambda, \quad (3.11)$$

де L – максимальний розмір апертури антени. Для *далекої зони* різниця ходу променів Δr становить менш як $\lambda/16$.

Межа *близької зони*, або *зони Релея*, визначається співвідношенням

$$R_{бз} \leq 2 \cdot L^2 / (2 \cdot \lambda). \quad (3.12)$$

При $R \leq R_{бз}$ напруженість поля слабо залежить від відстані. Для *близької зони* хід променів становить менш ніж $\lambda/4$. Якщо відстань R від антени задовольняє умову

$$R_{бз} \leq R \leq R_{дз}, \quad (3.13)$$

то напруженість поля швидко зменшується зі зростанням відстані. Ця зона називається **зоною Френеля**.

Зазвичай характеристики антен зазначають для *далекої зони*, хоча при розв'язуванні багатьох задач, наприклад коли йдеться про розрахунок умов внутрішньооб'єктової ЕМС чи визначення біологічної зони передавальної радіостанції (для якої мають виконуватися санітарні норми на рівень напруженості поля), доводиться використовувати відповідні характеристики антен і у *близькій зоні*. Відстань до *далекої зони* ПА із круглим дзеркалом діаметром d_A залежить від кута φ спостереження відносно головного напрямку випромінювання, і, наприклад, при $\varphi = 90^\circ$ маємо:

$$R'_{дз} = 2 \cdot d_A$$

що дає істотно менше значення, ніж отримуване за формулою $R_{дз} = 2 \cdot L^2 / \lambda$.

3.3.1. Основні параметри антен

На ЕМО і ЕМС впливають основні характеристики антен, які визначають енергетичні співвідношення рівня корисного сигналу та завад:

- коефіцієнт направленої дії та коефіцієнт підсилення антени (КП);
- частотна залежність параметрів антени;
- характеристика (діаграма) спрямованості антени (ДСА);
- ширина головної пелюстки ДСА, параметри бокових за задньої пелюстки ДСА;
- поляризаційна характеристика та крос-поляризаційний захист антени;

- втрати у антені та фідері, ступень погодження опору антени з фідером;
- вплив на параметри антен, які розташовані поруч, рівень розв'язки між антенами.

Коефіцієнт підсилення антени (КП) – відношення потужності, що підводиться до неспрямованої (ізоτροпної) антени з коефіцієнтом підсилення 1, до потужності, що підводиться до даної антени, за умови однакової напруженості поля в місці приймання.

У загальному випадку КП $G_{A, \text{макс}}$ (у далекій зоні) у головному напрямі випромінювання чи приймання визначається (за нульових омичних втрат у елементах антени) співвідношенням, дБ:

$$G_{A, \text{макс}} = 10 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot S_A / \lambda^2), \quad (3.14)$$

де S_A – площа антени, яка залежить від її типу та конструкції.

Для антен осьового випромінювання (директорні, спіральні) S_A має доволі складну залежність від відносної довжини антени. У свою чергу, відносна довжина визначається кількістю директорів (у директорних антенах) або кількістю витків (у спіральних антенах), між якими встановлюється відстань порядку $(0,1 \dots 0,3)\lambda$. При цьому кількість вібраторів або витків спіралі в реальних антенах може коливатися від 3 до 30.

Для параболічних антен (ПА) значення S_A залежить від форми та розмірів дзеркала, а також від типу антени (одно- чи дводзеркальна, несиметрична тощо) і визначається співвідношенням

$$S_A = S_{\text{дз}} \cdot k_{\text{в.п}},$$

де $S_{\text{дз}}$ – площа розкриву основного дзеркала; $k_{\text{в.п}}$ – коефіцієнт використання поверхні апертури (КВП); для типових ПА значення $k_{\text{в.п}}$ становить $0,5 \dots 0,7$.

Характеристика спрямованості антени – це залежність напруженості електричного поля E або величини її пропорційної (потужності P) від кутових координат (θ і ϕ) у просторі в дальній зоні на однаковій відстані ($r = \text{const}$) від джерела випромінювання (антени).

Діаграма спрямованості антени (ДСА) – графічне представлення залежності коефіцієнта підсилення антени від направленості антени в заданій площині.

Спрямовані властивості антени оцінюються за *шириною головного пелюстка* в кутових координатах θ і ϕ .

Ширина діаграми спрямованості антени за рівнем половинної потужності $2\Delta\theta_{0,5}$ і $2\Delta\phi_{0,5}$ – це кутовий розкриття в межах головного пелюстка на границях якого потужність зменшується в два рази відносно максимального значення (–3 дБ). Якщо ж ДСА побудована за напруженістю поля, то відлік її ширини здійснюється за рівнем 0,707 від максимального значення. Іноді ширину ДСА позначають спрощено θ і ϕ .

Нехай $F^2(\varphi)$ – значення ДСА, дБ, під кутом спостереження φ , що утворюється напрямом від точки розміщення антени до точки спостереження та головним напрямом випромінювання (приймання) даної антени. Тоді, узявши до уваги, що ДСА нормується до максимальної інтенсивності випромінювання, поширюваного в головному напрямі (тобто при $\varphi = 0$), дістанемо:

$$F^2(\varphi) = G_A(\varphi) - G_{A \text{ MAX}},$$

де $G_A(\varphi)$ – КП антени, дБ, під кутом φ .

КП антени (за нульових омичних втрат у елементах антени) можна визначити як величину, яка показує у скільки разів площа сфери перевищує площу поперечного перерізу головної пелюстки ДСА на однаковій відстані

$$G_A = S_{\text{сфери}} / S_{\text{ДСА}}, \text{ де } S_{\text{сфери}} = 4 \cdot \pi \cdot r^2.$$

На рис. 3.15 наведені пояснення визначення КП антени в залежності від частини поверхні сфери, яку займає промінь – сфера, півсфера, чверть сфери, сегмент. На рисунку позначено: P_{in} – потужність випромінювання ізотропного випромінювача, P_D – потужність випромінювання у визначеному проміні (головний пелюстки).

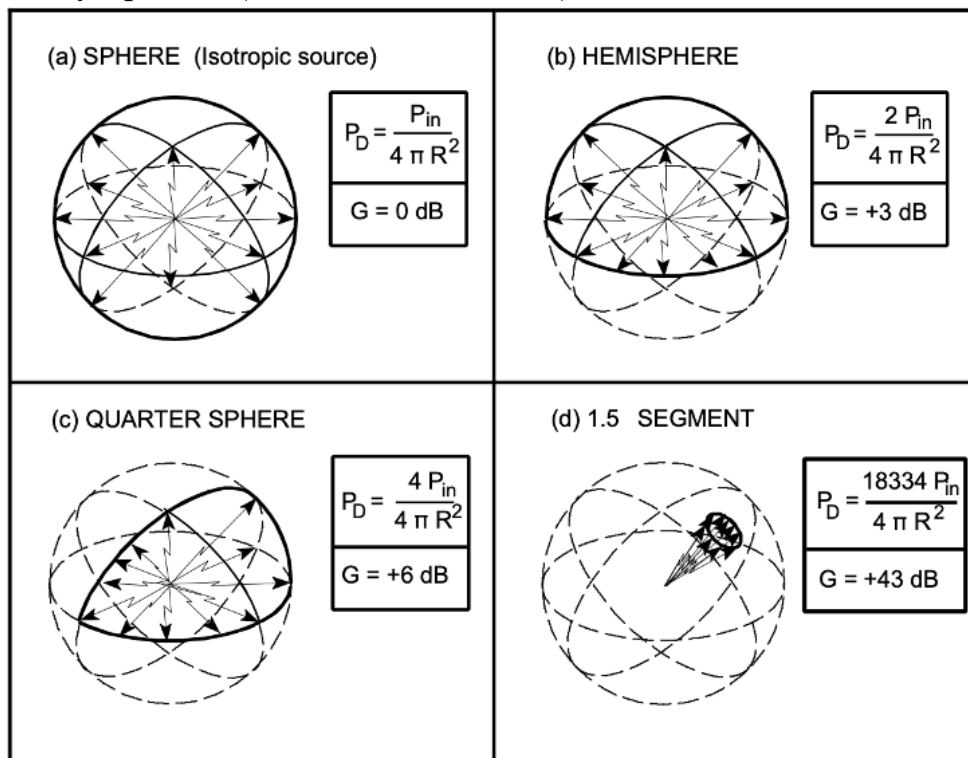


Рисунок 3.15 Пояснення визначення КП антени в залежності від частини поверхні сфери, яку займає промінь

Для визначення площі поперечного перерізу головної пелюстки ДСА можна скористатися виразом для розрахунку площі *еліпса* (рис. 3.16, б)

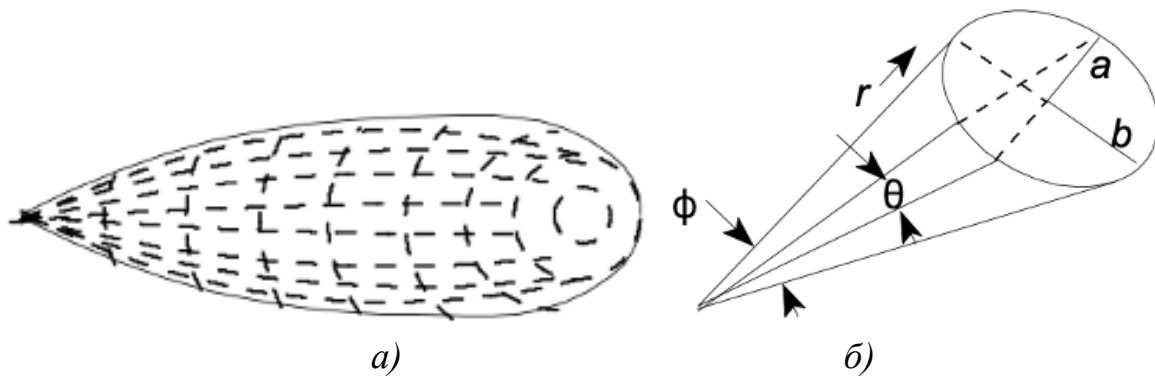


Рисунок 3.16. Форма головної пелюстки ДСА
а) реальна; б) модель у вигляді еліпса

$$S_{\text{ЕЛЛПС}} = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot [(r \cdot \sin \theta)/2] \cdot [(r \cdot \sin \varphi)/2] = (\pi \cdot r^2 \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi)/4,$$

$$G_A = (4 \cdot \pi \cdot r^2) \left(\frac{4}{\pi \cdot r^2 \sin \theta \cdot \sin \varphi} \right) = \frac{16}{\sin \theta \cdot \sin \varphi}.$$

Таким чином якщо відомі кутові розміри основного променя антени, то значення КП для малих кутів ($\sin \theta = \theta$ в радіанах), наближено можна обчислити за формулою

$$G_A = \frac{16}{\sin \theta \cdot \sin \varphi} = \frac{16}{\theta \cdot \varphi \text{ (радіан)}} = \frac{16}{\theta \cdot \varphi} \frac{360 \cdot 360}{2 \cdot \pi \cdot 2 \pi} = \frac{52525}{\theta \cdot \varphi \text{ (градус)}}. \quad (3.15)$$

де θ і φ – ширина основного променя ДСА в градусах за половинною потужністю у взаємно ортогональних площинах. В залежності від моделі основного променя ДСА у чисельнику формули для КУ може бути інша величина. Наприклад, для поперечного перерізу головної пелюстки у вигляді *прямокутника*:

$$a = r \cdot \sin \theta, \quad b = r \cdot \sin \varphi, \quad S_{\text{ПРЯМ}} = a \cdot b = r^2 \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi,$$

$$G_A = \frac{4\pi \cdot r^2}{r^2 \sin \theta \cdot \sin \varphi} = \frac{4\pi}{\sin \theta \cdot \sin \varphi}$$

$$G_A = \frac{4\pi}{\sin \theta \cdot \sin \varphi} = \frac{4\pi}{\theta \cdot \varphi \text{ (радіан)}} = \frac{4\pi}{\theta \cdot \varphi} \frac{360 \cdot 360}{2 \cdot \pi \cdot 2 \pi} = \frac{41253}{\theta \cdot \varphi \text{ (градус)}}. \quad (3.16)$$

Для приблизного визначення КП антени можна скористатися графіком залежності КП від ширини ДСА (рис. 3.17). На рисунку наведені графіки для реальної форми головної пелюстки ДСА, а також моделей головної пелюстки у вигляді еліпса та прямокутника за умови $\theta = \varphi$.

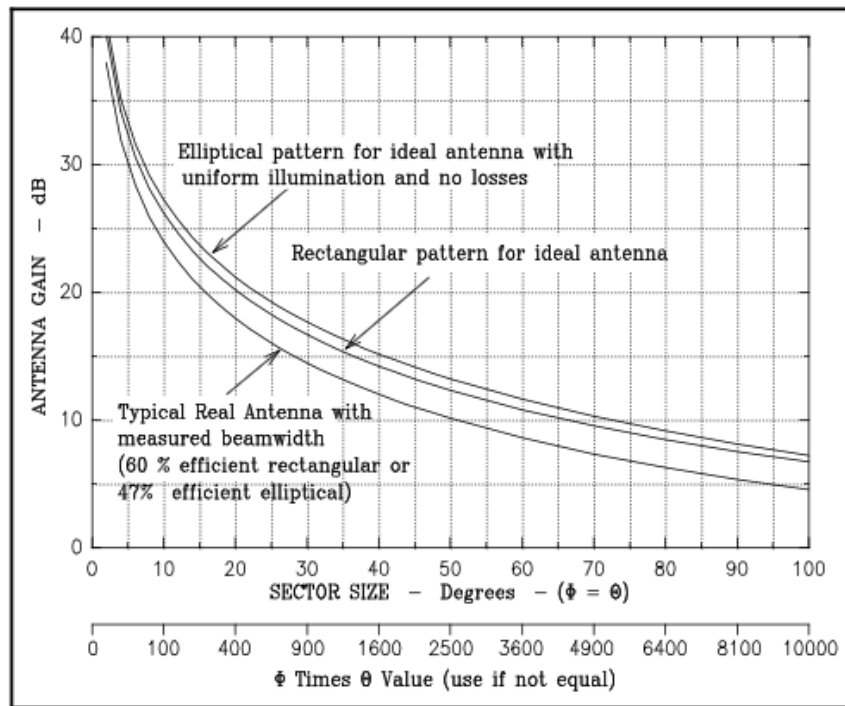


Рисунок 3.17. Графік залежності КП антени від ширини ДСА

Вигляд типових ідеалізованих ДСА у прямокутних координатах у двох площинах ілюструє рис. 3.18, де суцільна крива відповідає ДСА у площині основної поляризації, а пунктирна крива – ДСА у площині крос-поляризації.

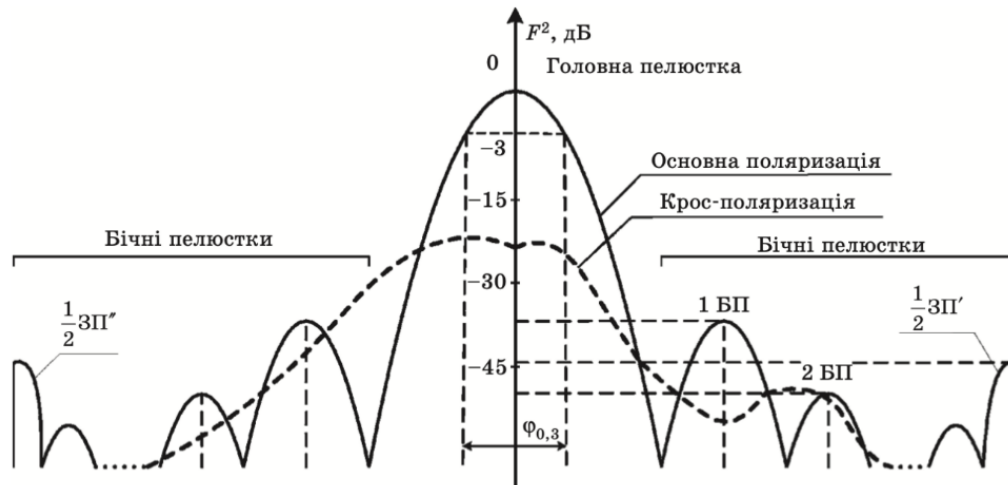


Рисунок 3.18. Загальний вигляд ідеалізованих ДСА на основній поляризації (суцільна лінія) та крос-поляризації (пунктирна лінія) у прямокутних координатах

Основні параметри ДСА (див. на рис. 3.18) такі:

- *головна пелюстка* (англ. *main lobe*) – частина ДСА, що міститься в секторі кутів що відповідають першому нулю ДСА по різні боки від осі кутів;
- $\phi_{0,5}$ – ширина ДСА за *половинною потужністю*, тобто при $F^2(\phi) = -3$ дБ;
- *бічні пелюстки* (англ. *side lobes*, 1БП, 2БП...) та кути, що відповідають максимумам однойменних БП;

- *задня пелюстка* (ЗП, англ. *back lobes*).

Зауважимо, що ДСА реальних антен мають значно складніший вигляд, ніж на рис. 3.18.

Так, реальні ДСА характеризуються асиметрією та візерунчатістю обвідної (рис. 3.19). До того ж, на форму ДСА впливають неточності й особливості конструкції антени, а також навколишні предмети, зокрема й поверхня землі.

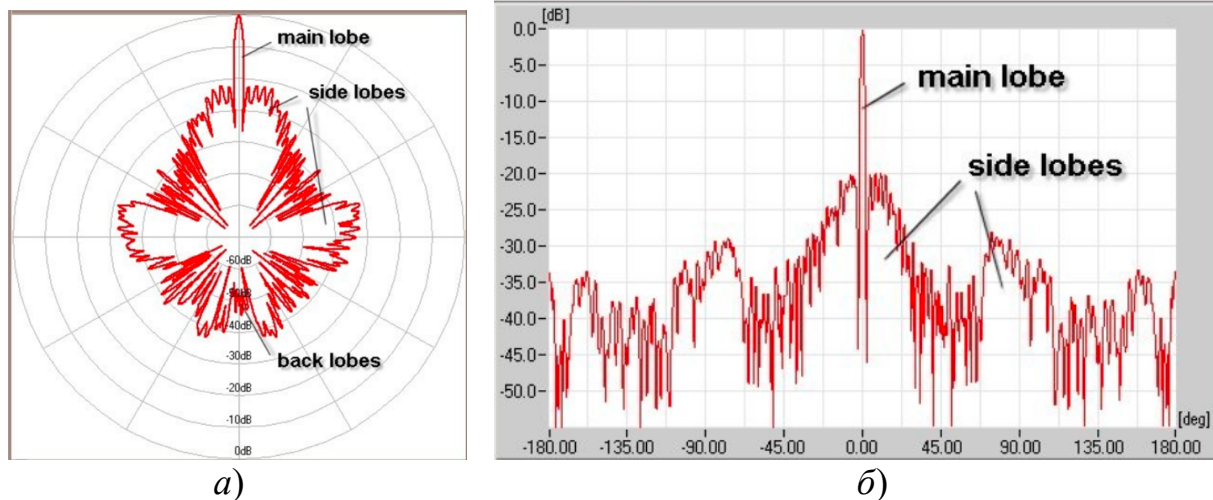


Рисунок 3.19. Вигляд реальних ДСА на основній поляризації у полярних (а) та у прямокутних (б) координатах

Вплив на параметри реальних антен елементів їхньої конструкції та навколишніх предметів змушує під час виконання розрахунків ЕМС удаватися до усереднених математичних описів характеристик антен РЕЗ, зокрема їхньої ДСА. Для цього на практиці широко використовуються так звані *гарантовані обвідні ДСА* у графічній або аналітичній формі, які є результатом апроксимації експериментальних ДСА реальних антен (див. рис. 3.20).

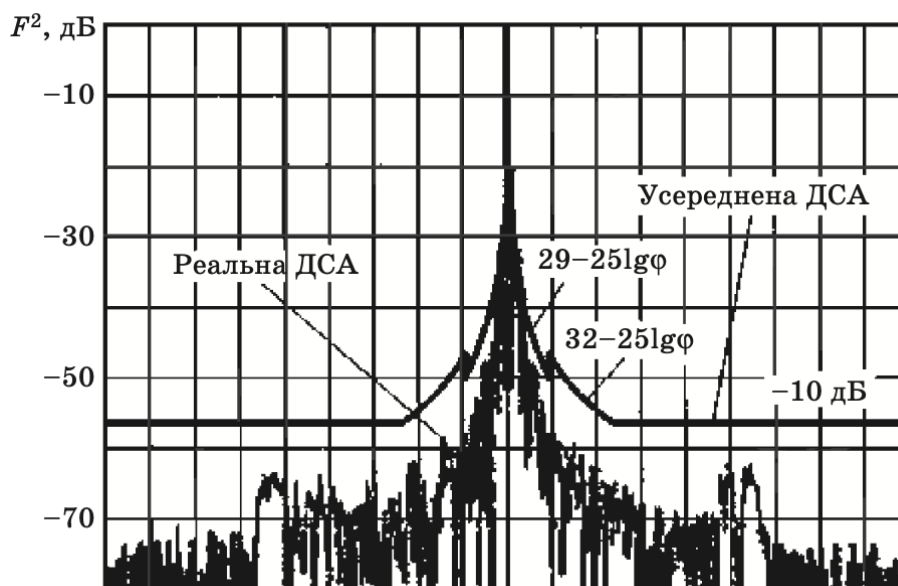


Рисунок 3.20. Співвідношення реальної та усередненої ДСА

Апроксимація реальної експериментальної ДСА (див. рис. 2.20) здійснюється за допомогою трьох простих аналітичних функцій:

$$F_1^2(\varphi) = 29 - 25 \lg \varphi \text{ у секторі кутів } 0 < |\varphi| \leq 20^\circ$$

$$F_2^2(\varphi) = 32 - 25 \lg \varphi \text{ у секторі кутів } 20^\circ < |\varphi| \leq 48^\circ$$

$$F_3^2(\varphi) = -10 \text{ дБ у секторі кутів } 48^\circ < |\varphi| \leq 180^\circ.$$

Важлива перевага *гарантованих* ДСА – їхній доволі простий вигляд (як графічний, так і аналітичний), а також те, що їх можна використовувати для різних типів антен, завдяки чому підвищується надійність результатів розрахунку умов ЕМС.

Поляризаційна характеристика. При вивченні поля випромінювання антени значний інтерес представляє не тільки його амплітуда, а й фаза та орієнтація векторів поля, зокрема вектора E . Для того, щоб характеризувати зміну положення в просторі вектора E у точці спостереження за період високої частоти, вводиться поняття поляризаційної характеристики.

Поляризація – орієнтація вектора напруженості електромагнітного поля E в просторі.

Розрізняють такі види поляризації:

- лінійна (вертикальна, горизонтальна);
- обертаюча (еліптична або кругова правого або лівого обертання).

Розбіжність поляризації антени і сигналу (корисного або завадового) призводить до послаблення сигналу. Коефіцієнт послаблення за рахунок розбіжності поляризації $K_{\text{пол}}$ може приймати значення від 0 до 1.

Для розрахунку умов ЕМС, особливо мережних структур радіозв'язку, необхідно мати у своєму розпорядженні повні залежності ДСА як на основній поляризації сигналу, так і на крос-поляризації, тобто поляризації, яка ортогональна основній поляризації сигналу.

На рис. 3.21 представлені головні пелюстки ДСА антени РПА-2П-2 у діапазоні частот 4 ГГц (див. рис. 4.4) для основної (1) та кросової (2) поляризації у разі вертикальної (а) та горизонтальної (б) поляризації сигналу

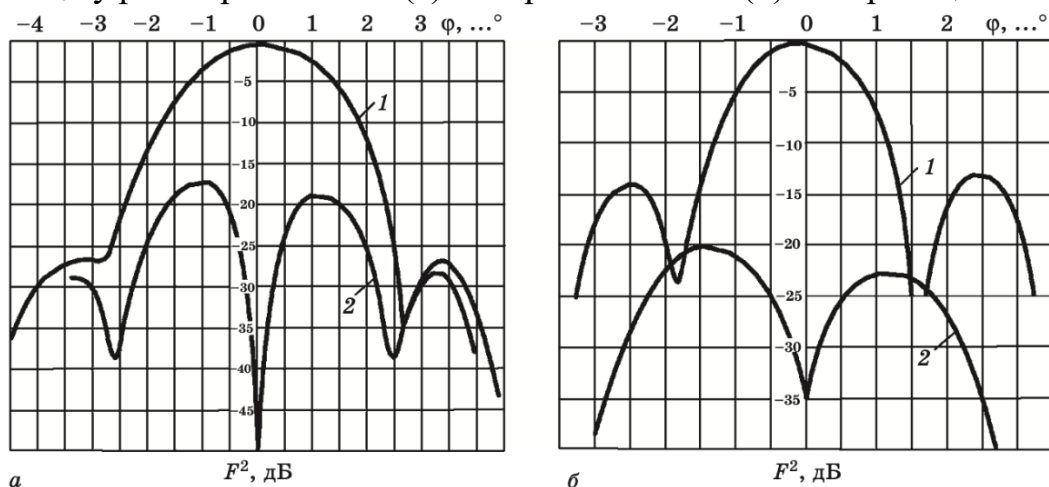


Рисунок 3.21 Головні пелюстки ДСА антени РПА92П92 у діапазоні частот 6 ГГц на основній (1) та кросовій (2) поляризації у разі вертикальної (а) та горизонтальної (б) поляризації сигналу

Крос-поляризаційний захист антени – послаблення поля перехресної поляризації (крос-поляризованої хвилі) – кількісно визначається коефіцієнтом поляризаційного захисту (розв’язки) $XPDA$.

$$XPDA(\varphi) = G_{A.O.P.}(\varphi) - G_{A.K.P.}(\varphi),$$

де $G_{A.O.P.}(\varphi)$, $G_{A.K.P.}(\varphi)$ – КП антени відповідно на основній і кросовій поляризації.

Залежність $XPDA(\varphi)$ має складний характер, пов’язаний із конструктивними особливостями антен, а також із параметрами сигналу. При цьому для всіх типів антен максимум залежності $XPDA_{MAX}$ спостерігається при $\varphi = 0$, тобто на головному напрямі приймання або поблизу осі ДСА. Для типових директорних і параболічних антен маємо $25 \text{ дБ} \leq XPDA_{MAX} \leq 30 \text{ дБ}$, а для окремого типу антен, таких як РПА, відповідне значення може становити 40 дБ і більше.

Розглядаючи наведені раніше ДСА різних антен, доходимо висновку, що в області БП і ЗП ДСА зазвичай $XPDA < 0$, тобто спостерігаються додаткові енергетичні втрати (або принаймні немає енергетичного виграшу) під час приймання завадних сигналів не на основній поляризації за межами основної пелюстки антени.

Коефіцієнт захисної дії $K_{ЗД}$, що характеризує різницю КП антени в головному напрямі та КП зі зворотного напрямку, подається у вигляді

$$K_{ЗД} = G_A(\varphi = 0) - G_A(\varphi = 180^\circ).$$

Значення $K_{ЗД}$ сучасних антен становлять 20...70 дБ.

3.3.2. Нормування характеристик антен

При розрахунках ЕМС РЕЗ до найважливіших характеристик антен, що потребують нормування, належить ДСА як на основній, так і на кросовій поляризації. Нормування ДСА здійснюється для всіх видів РЕЗ загального призначення, а конкретні дані про нормування можна знайти в відповідних довідниках. При цьому нормування здійснюється і на міжнародному, і на національному (або корпоративному) рівні. В останньому випадку нормування характеристик антен має уточнювальний характер. Варто пам’ятати, що відповідні національні (корпоративні) нормативи мають узгоджуватися з міжнародними нормативами, які згідно з Регламентом радіозв’язку мають пріоритет.

Особливої актуальності нормування ДСА набуває для багатоканальних широкосмугових засобів радіозв’язку (ЗРЗ), зокрема — супутникових (ССЗ) і радіорелейних систем зв’язку (РСЗ), які використовують спільні смуги робочих частот у УКХ діапазоні (головним чином у діапазоні частот 1...40 ГГц).

Для практичних розрахунків завад і розв’язання питань координації зазначених видів засобів радіозв’язку у діапазоні частот 1...40 ГГц рекомендовано використовувати так звані **еталонні (довідкові)** ДСА, які

встановлюють припустимі значення обвідної ДСА, тобто такі, які не повинні перевищуватися в разі застосування реальних антен.

Еталонні ДСА для РРЛ прямої видимості в діапазоні 1...40 ГГц (параболічні антени) визначаються співвідношеннями у вигляді аналітичних залежностей $G_A(\varphi)$.

Наприклад, у додатку 2 (Том 2) Регламенту радіозв'язку МСЕ наведено формули для діаграми спрямованості антен земних станцій, якими належить користуватися, якщо відомості про них не опубліковано.

У випадку, коли відношення діаметра D_A антени до робочої довжини хвилі λ перевищує 100 обвідні ДСА таких антен така (рис. 3.22).

$$G(\varphi) = G_{\text{МАКС}} - 2,5 \cdot 10^{-3} (D_A \cdot \varphi / \lambda)^2 \quad \text{якщо } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m$$

$$G(\varphi) = G_1 \quad \text{якщо } \varphi_m \leq \varphi \leq \varphi_r$$

$$G(\varphi) = 32 - 25 \lg \varphi \quad \text{у секторі кутів } 20^\circ < |\varphi| \leq 48^\circ$$

$$G(\varphi) = -10 \text{ дБ} \quad \text{у секторі кутів } 48^\circ < |\varphi| \leq 180^\circ,$$

де D і λ подано в однакових одиницях вимірювань;

φ кут у градусах, що відраховується від осі антени;

$G_{\text{МАКС}} = 7,7 + 20 \cdot \lg(D_A / \lambda)$ – КП антени;

$G_1 = 2 + 15 \cdot \lg(D_A / \lambda)$ – КП першої БП;

$\varphi_m = 20 \cdot \lambda \sqrt{G_{\text{МАКС}} - G_1} / D_A$, (градуси); $G_{\text{МАКС}} - G_1$

$\varphi_r = 15,85 (D_A / \lambda)^{-0,6}$, (градуси).

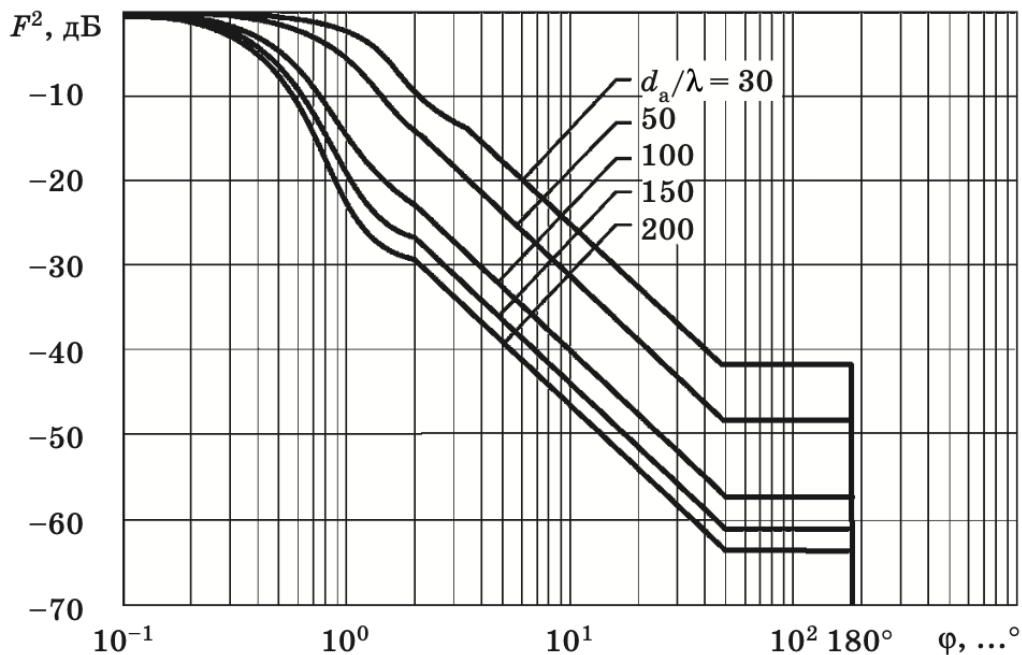


Рисунок 3.22. Обвідні ДСА РРЛ у діапазоні частот 1...40 ГГц при різних значеннях відношення d_a/λ

Останнім часом для розрахунку ЕМС використовують комп'ютерні програми. Більшість цих програм надають можливість підібрати відповідну за параметрами антену з переліку запропонованих або ввести по точках з кроком одиниці градусів параметри наявних антен. Програма в цьому випадку автоматично виконує апроксимацію необхідних кривих.

Контрольні питання та завдання

1. Які характеристики радіосистем (передавачів та приймачів) впливають на раціональне використання радіочастотного спектра та забезпечення ЕМС РЕЗ?

2. Яким чином визначити необхідну смугу частот для радіовипромінювань з АМ, ОМ та ЧМ? Наведіть приклад розрахунку.

3. Як визначають необхідну, контрольну, займану смуги частот випромінювання та смугу на рівні X дБ?

4. Пояснити, що означають поняття “довершене” та “недовершене” випромінювання радіопередавача?

5. Що відносять до небажаних випромінювань, якими параметрами вони характеризуються?

6. Що таке побічні випромінювання та яка природа їх виникнення?

7. Що таке позасмугові випромінювання та чому вони виникають?

8. Які канали приймання існують в супергетеродинних приймачах?

9. Основні параметри основного каналу радіоприймача.

10. Поясніть причину виникнення побічних каналів приймання.

11. Поясніть, яким чином можна зменшити вплив завад по побічним каналам приймання?

12. У чому полягає відмінність між чутливістю та сприйнятливістю радіоприймача?

13. Які нелінійні явища можуть виникати в радіоприймачах?

14. Що визначає характеристика сприйнятливості радіоприймача до завад?

15. Які параметри передавальних і приймальних антен стосуються проблеми ЕМС РЕЗ? Відповідь обґрунтуйте.

16. Дайте визначення коефіцієнта підсилення антени.

17. Наведіть приклади основних типів антен та види РЕЗ, в яких вони застосовуються.

18. Поясніть наявність трьох зон основного випромінювання антен та конкретизуйте особливості структури електромагнітного поля в цих зонах.

19. Чому характеристики антен потрібно вимірювати в далекій зоні?

20. Сформулюйте якісне і кількісне визначення діаграми спрямованості антени.

21. В яких випадках удаються до нормування параметрів ЕМС антен? В якому вигляді ці норми задаються?

22. Зобразіть типову форму ідеалізованої та реальної діаграми спрямованості антени на основній та на кросовій поляризації.

23. Назвіть основні причини, що впливають на характеристики антен.

24. Подайте якісне і кількісне визначення та назвіть основні особливості показника “кросполяризаційний захист антени”.

Задача № 1 (приклад).

Визначити припустимий рівень побічних випромінювань для передавача телевізійного мовлення 26-го каналу із сумарною середньою потужністю 5 кВт, зазначивши при цьому контрольну смугу частот.

Розв'язання. Згідно з табл. 3.3 будь-який передавач цифрового мовлення має відповідати послабленню побічного випромінювання на величину $(43 + 10 \cdot \lg P)$ або 70 дБс – залежно від того, яка межа менш строга.

1) При сумарній середній потужності 5 кВт визначаємо необхідне послаблення:

$$L = 43 + 10 \cdot \lg P = 43 + 10 \cdot \lg 5000 = 43 + 37 = 80 \text{ (дБс)}.$$

Межа 70 дБс менш строга, ніж розраховані 80 дБс, тому використовуємо значення 70 дБс.

Частота 26-го діапазону телевізійного мовлення належить IV-му діапазону частот і його центральна частота становить 514 МГц. Для вимірювання побічних випромінювань у частотному діапазоні 30...1000 МГц Рекомендація МСЕ-Р 329-7 передбачає використання контрольної смуги частот 100 кГц.

2) Визначаємо припустимий (максимальний) рівень побічних випромінювань:

$$P_{\text{ПВМАХ}} = (37 \text{ дБВт} - 70 \text{ дБс}) = -33 \text{ дБВт}.$$

Відповідь: побічні випромінювання повинні не перевищувати в контрольній смузі частот 100 кГц рівень -33 дБВт (тобто необхідно щоб $P_{\text{ПВ}} < 500 \text{ мкВт}$).

Задача № 2 (приклад).

Визначити припустимий рівень побічних випромінювань для передавача мобільного зв'язку GSM діапазону частот 900 МГц із сумарною середньою потужністю 100 Вт, зазначивши при цьому контрольну смугу частот.

Розв'язання. Згідно з табл. 2.2 будь-який передавач мобільного зв'язку GSM, що належить до категорії «Усі служби», має відповідати послабленню побічного випромінювання на $(43+10 \cdot \lg P)$ або 70 дБс – залежно від того, яка межа менш строга.

1) При сумарній середній потужності 100 Вт визначаємо необхідне послаблення:

$$L = (43 + 10 \cdot \lg P) = (43 + 10 \cdot \lg 100) = (43 + 20) = 63 \text{ (дБс)}.$$

Розрахована межа 63 дБс менш строга, ніж 70 дБс, тому використовуємо значення 63 дБс.

Робоча частота передавача 900 МГц належить діапазону 30...1000 МГц, тому згідно з Рекомендацією 329-7 контрольна смуга частот становить 100 кГц.

2) Визначаємо припустимий (максимальний) рівень побічних випромінювань:

$$P_{\text{ПВМАХ}} = (20 \text{ дБВт} - 63 \text{ дБс}) = -43 \text{ дБВт}$$

Відповідь: побічні випромінювання передавача БС GSM мають не перевищувати в контрольній смузі частот 100 кГц рівня -43 дБВт (тобто необхідно щоб $P_{\text{ПВ}} < 50 \text{ мкВт}$).

Задача № 3 (приклад).

Визначити значення побічних каналів приймання за таких умов:

- центральна частота сигналу (f_0) – 11780 МГц;
- частота гетеродину (f_{Γ}) – 10800 МГц;
- налаштування гетеродину – нижнє.

Розв’язання:

До *побічних* належать небажані канали приймання, номінальні частоти яких мають фіксоване значення для даного приймача в разі фіксованого його налаштування на частоту f_0 основного каналу приймання при нижньому налаштуванні гетеродину:

$$f_0 = f_{\Gamma} + f_{\text{ПЧ}},$$

де f_{Γ} – частота гетеродину; $f_{\text{ПЧ}}$ – проміжна частота приймача.

До побічних належать канали приймання на таких частотах:

- на проміжній частоті $f_{\text{ПЧ}} = f_0 - f_{\Gamma}$;
- на дзеркальній частоті $f_{\text{ДЗК}} = f_{\Gamma} - f_{\text{ПЧ}}$, або $f_{\text{ДЗК}} = f_0 - 2 \cdot f_{\text{ПЧ}}$
- на комбінаційних частотах $f_{\text{К}} = 2 \cdot f_{\Gamma} \pm f_{\text{ПЧ}}$;
- на субгармоніці (*другій*) частоти налаштування $f_{\text{С0}} = 0,5 \cdot (f_{\Gamma} + f_{\text{ПЧ}})$;
- на субгармоніці (*другій*) дзеркальної частоти $f_{\text{СДЗК}} = 0,5 \cdot (f_{\Gamma} - f_{\text{ПЧ}})$.

Виконуючи відповідні обчислення, отримаємо наступне:

$$1) f_{\text{ПЧ}} = f_0 - f_{\Gamma} = 11720 - 10800 = 920 \text{ МГц};$$

$$2) f_{\text{ДЗК}} = f_{\Gamma} - f_{\text{ПЧ}} = 10800 - 920 = 9880 \text{ МГц};$$

$$3) f_{\text{К}} = 2 \cdot f_{\Gamma} \pm f_{\text{ПЧ}} = 2 \cdot 10800 \pm 920 = 22520 \text{ (20680) МГц};$$

$$4) f_{\text{С0}} = 0,5 \cdot (f_{\Gamma} + f_{\text{ПЧ}}) = 0,5 \cdot (10800 + 920) = 5860 \text{ МГц};$$

$$5) f_{\text{СДЗК}} = 0,5 \cdot (f_{\Gamma} - f_{\text{ПЧ}}) = 0,5 \cdot (10800 - 920) = 4940 \text{ МГц};$$

Відповідь: частоти побічних каналів приймання становлять відповідно наступні значення: 920; 4940; 5860; 9880; 20680 та 22520 МГц.

Задача № 4 (приклад).

Визначити частоти інтермодуляційних випромінювань 3-го, 5-го та 7-го порядків ПРД, розташованих на одному об'єкті та працюючих на частотах: 422; 422,25 МГц.

Розв'язання. Деякі інтермодуляційні частоти:

Порядок інтермодуляції	2	3	5	7
Комбінація частот	$ f_1+f_2 $ $ f_1-f_2 $	$2f_1-f_2$ $2f_2-f_1$	$3f_1-2f_2$ $3f_2-2f_1$	$4f_1-3f_2$

3-го порядку:

$$2 \cdot f_1 - f_2 = 2 \cdot 422 - 422,25 = 844 - 422,25 = 421,75 \text{ МГц}$$

$$2 \cdot f_2 - f_1 = 2 \cdot 422,25 - 422 = 844,5 - 422 = 422,5 \text{ МГц}$$

5-го порядку:

$$3 \cdot f_1 - 2 \cdot f_2 = 3 \cdot 422 - 2 \cdot 422,25 = 1266 - 844,5 = 421,5 \text{ МГц}$$

$$3 \cdot f_2 - 2 \cdot f_1 = 3 \cdot 422,25 - 2 \cdot 422 = 1266,75 - 844 = 422,75 \text{ МГц}$$

7-го порядку:

$$4 \cdot f_1 - 3 \cdot f_2 = 4 \cdot 422 - 3 \cdot 422,25 = 1688 - 1266,75 = 421,25 \text{ МГц}$$

Відповідь. Частоти інтермодуляційних випромінювань у порядку зростання становлять 421,25; 421,5; 421,75; 422,5; 422,75 МГц.

Задача № 5 (приклад).

Визначити потужність шуму (шум –англ. *noise*) на вході телевізійного приймача стандарту DVB-T2, (дБВт) та мінімальну потужність сигналу на вході приймача (реальну чутливість), $P_{с.р}$ (дБВт);

– коефіцієнт шуму приймача, $N_{ш} = 6$ дБ;

– шумова смуга приймача $B = 7,77 \cdot 10^6$ (Гц).

– потрібне відношення сигнал/шум (S/N) на РЧ вході приймача $Q_{вх}=20$ дБ.

Розв'язання.

$$P_{ш} = N_{ш} + 10 \cdot \lg(k \cdot T_0 \cdot B)$$

де k – постійна Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, (Дж/К));

T_0 – абсолютна температура ($T_0 = 290$ (К)).

$$P_{ш} = N_{ш} + 10 \cdot \lg(k \cdot T_0 \cdot B) = 6 + 10 \lg(k \cdot T_0 \cdot B) = 6 + 10 \cdot \lg(1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 7,77 \cdot 10^6) = 6 + 10 \cdot \lg(3,11 \cdot 10^{-14}) = 6 + 10 \cdot 0,4923 - 140 = -129,077 \text{ дБВт.}$$

$$P_{с.р} = Q_{вх} + P_{ш} = 20 - 129,077 = -109,077 \text{ дБВт.}$$

Відповідь. 1) $P_{ш} = -129,077$ дБВт, 2) $P_{с.р} = -109,077$ дБВт.

Задача 6 (приклад).

Для параболічної антени з круглою формою дзеркала діаметром 0,6 м на середній частоті робочого діапазону 11,7...12,5 ГГц визначити такі параметри:

1) межу далекої зони (зони Фраунгофера);

2) межу близької зони (зони Релея);

3) межу зони Френеля;

4) коефіцієнт підсилення в головному напрямі.

Вважати, що коефіцієнт $k_{в.п}$ використання поверхні апертури антени дорівнює 1) 0,7; 2) 0,5.

Розв'язання.

1) Межа далекої зони (зони Фраунгофера) визначається за формулою

$$R_{д.з} = 2 \cdot L^2 / \lambda,$$

де L – максимальний розмір апертури антени; λ – довжина хвилі випромінювання або приймання.

У нашому випадку $L = D = 0,6$ м, де D – діаметр дзеркала антени;

$$\lambda = 2,48 \text{ см} = 0,0248 \text{ м}.$$

Підставивши в дану формулу відповідні значення, дістанемо:

$$R_{д.з} = 2 \cdot D^2 / \lambda = (2 \cdot 0,36) / 0,0248 = 29 \text{ м}.$$

2) Межа близької зони (зони Релея) визначається за формулою

$$R_{б.з} = L^2 / (2 \cdot \lambda).$$

Для розглядуваного випадку

$$R_{б.з} = D^2 / (2 \cdot \lambda) = 0,36 / (2 \cdot 0,0248) = 7,3 \text{ м}.$$

3) Межі зони Френеля R задовольняють таку умову:

$$R_{б.з} \leq R \leq R_{д.з},$$

тобто для нашого випадку $7,3 \text{ м} \leq R \leq 29,0 \text{ м}$.

4) Коефіцієнт підсилення G_A , дБ, антени в головному напрямі визначається за формулою

$$G_A = 10 \cdot \lg(k_{в.п.} \cdot 4\pi S_A / \lambda^2) = 10 \cdot \lg(k_{в.п.} \cdot 4 \pi^2 R^2 / \lambda^2).$$

Підставляючи послідовно замість $K_{в.п.}$ дані його значення, знаходимо:

$$G_{A1} = 10 \cdot \lg(0,7 \cdot 4 \pi^2 (0,3)^2 / 0,0248^2) = 10 \cdot \lg 4032,5 = 36,1 \text{ (дБ)};$$

$$G_{A2} = 10 \cdot \lg(0,5 \cdot 4 \pi^2 (0,3)^2 / 0,0248^2) = 10 \cdot \lg 2880,4 = 34,6 \text{ (дБ)}.$$

Відповідь. 1) $R_{д.з} = 29,0$ м; 2) $R_{б.з} = 7,3$ м; 3) $7,3 \text{ м} \leq R \leq 29,0 \text{ м}$;

4) $G_{A1} = 36,1$ дБ; $G_{A2} = 34,6$ дБ.

Задача № 7 (приклад).

Визначити максимально припустиму еквівалентну шумову температуру та діаметр дзеркала параболічної антени приймача земної станції, щоб можна було забезпечити високоякісне індивідуальне приймання із супутника Sirius 2/3 цифрового телевізійного сигналу по каналу DVB-S (символьна швидкість – 27,5 Мбіт/с) зі швидкістю внутрішнього кодування FEC = 3/4 на межі зони покриття за таких умов:

- частота мовлення із супутника – 11776 МГц;
- смуга займаних сигналом частот B – 36 МГц;
- коефіцієнт підсилення приймальної антени – 31 дБ;
- шумова температура антени – 50 К;
- коефіцієнт корисної дії антени становить 0,6.

Розв’язання.

Згідно з відповідною Рекомендацією МСЕ для високоякісного приймання необхідно, щоб виконувалася умова

$$(P_C / P_{ш})_{вх} \geq 14 \text{ дБ}$$

для 99% часу найкращого місяця.

Окрім того, згідно з Рекомендацією МСЕ прийнято, що на межі зони покриття густина потоку потужності для індивідуального приймання

$P_{\text{інд}} = -103 \text{ дБВт/м}^2$, тобто маємо:

$$P_{\text{с.вх}} = P_{\text{інд}} S_A,$$

де S_A – ефективна площа приймальної антени, м^2 ,

$$S_A = G_A(\lambda^2/4\pi).$$

Виконавши обчислення, дістаємо:

$$P_{\text{с.вх}} = P_{\text{інд}} G_A(\lambda^2/4\pi) = -111 \text{ дБВт.}$$

Далі маємо:

$$P_{\text{ш}} = P_{\text{с.вх}} - 14 \text{ дБ} = -125 \text{ дБВт.}$$

А оскільки, як відомо,

$$P_{\text{ш}} = k(T_A + T_{\text{екв}}) B,$$

то

$$T_{\text{екв}} = (P_{\text{ш}}/k B) - T_A = 630 \text{ К} - 50 \text{ К} = 580 \text{ К.}$$

Відповідь. $T_{\text{екв}} = 580 \text{ К.}$

4. Вплив процесів поширення радіохвиль на електромагнітну сумісність радіоелектронних засобів

4.1. Основне рівняння для енергетичного розрахунку радіолінії

Сукупність технічних засобів, призначених для передачі повідомлень від джерела до споживача, називається **системою зв'язку**, яка складається з (рис. 4.1):

- передавального пристрою;
- приймального пристрою;
- фізичного середовища, по якому передаються електричні сигнали з повідомленнями.



Рисунок 4.1. Структура системи зв'язку

Як відомо, залежно від середовища поширення електричних сигналів розрізняють:

- провідові системи зв'язку;
- *радіосистеми*.

У радіосистемах середовище поширення радіохвиль (ПРХ) “з'єднує” передавач та приймач.

Лінію безпроводового зв'язку утворює увесь відкритий простір навколо Землі, тобто ця лінія зв'язку є спільною та єдиною для усіх

користувачів радіочастотного спектра (РЧС). У цьому середовищі розміщуються електромагнітні поля всіх випромінювачів.

Навколишнє середовище впливає на характер поширення радіохвиль (ПРХ). Цей вплив призводить до наступного:

- ослаблення енергії радіохвилі (затухання);
- зміни рівня сигналу за часом (завмирання);
- зміни швидкості та напрямку розповсюдження радіохвиль;
- спотворення переданих сигналів;
- повороту площини поляризації, деполяризації радіохвиль тощо.

З цієї причини необхідно розглядати та враховувати особливості ПРХ.

Наявність завадових сигналів у точці прийому ускладнює сигнально-завадову обстановку (СЗО). Створення умов успішної спільної роботи всіх користувачів РЧС неможливе без знання механізмів ПРХ.

Втрати енергії під час ПРХ є одним із головних параметрів, який має враховуватися при визначенні реального розміру зони охоплення (покриття) радіосистеми та рівня ненавмисних завад.

У подальшому будемо розрізняти наступні зони радіозв'язку.

Зона покриття (охоплення) – територія, в межах якої величина напруженості поля дорівнює або перевищує величину мінімальної необхідної медіанної напруженості поля, визначену для конкретних умов приймання та із заданою імовірністю охоплення території.

Мінімальна використовувана напруженість поля (мінімальна захищена напруженість поля) $E_{\min}$ - мінімальна величина напруженості поля, необхідна для забезпечення заданої якості прийому за визначених умов і наявності природного або промислового шуму, але за відсутності радіозавад від інших РО [38].

Мінімальна медіанна напруженість поля E_{med} , дБ (мкВ/м) – значення мінімальної використовуваної напруженості поля, створюваної одним передавачем, необхідне для забезпечення покриття 50% місць прийому у визначеній зоні на висоті 10 м над рівнем землі для 50% часу.

Здебільш термін “зона покриття” застосовується для систем теле- та радіо- мовлення.

Зона обслуговування – територія, в межах якої у присутності зовнішніх завад та шумів забезпечується стійкий двосторонній радіозв'язок із заданою якістю.

Розмір зони обслуговування визначається рівністю еквівалентних ізотропних випромінювальних потужностей (ЕІВП) передавачів кореспондентів (за умови однакових чутливості радіоприймачів та рівня завад на їх входах), тобто: $P_1 \cdot G_1 = P_2 \cdot G_2$, де P і G – відповідно потужність передавача та коефіцієнт посилення антени.

Зона обслуговування базової станції (БС, англ. *BS Base Station*) або ретранслятора (англ. *Repeater*) відрізняється для різного абонентського обладнання. Наприклад, радіус (або розмір) зони обслуговування для

портативної радіостанції (англ. *Handheld Radio*) суттєво менший у порівнянні з радіусом зони обслуговування для автомобільної радіостанції (англ. *Vehicular Radio*), бо вони мають інші енергетичні параметри радіообладнання.

Радіостанції можуть створювати завади на відстанях, які набагато перевищують зону обслуговування.

Координаційна зона – територія, в межах якої передавач може створювати завади для приймачів інших систем радіозв'язку в однаковій смузі радіочастот та за межами якої рівень допустимих завад не буде перевищено і, таким чином, проведення координації не буде потрібним.

Зазвичай терміни *координаційна зона*, *координаційна відстань*, *координаційний контур* відносяться до Земних станцій супутникових систем зв'язку. Але будемо використовувати ці терміни також для врахування взаємного впливу наземних систем радіозв'язку.

Для гладкої поверхні землі, у разі використання всеспрямованих антен, ці зони мають вигляд кола. **Перешкоди** (природні – рельєф, гори, ліси та штучні споруди, будинки тощо), **заважають поширенню радіохвиль**, що може призводити до змін контурів зон. Крім того, всередині контуру можуть виникнути зони радіотіні, де радіозв'язок взагалі відсутній. Тому для збільшення розмірів зон обслуговування та зменшення розмірів можливих зон радіотіні антени стаціонарних радіостанцій (радіопередавачів) встановлюють на самих високих спорудах (щоглах, дахах будівель, елеваторах, трубах), які розташовані на вищих точках рельєфу місцевості. Після розрахунку зони покриття або обслуговування, з урахуванням рельєфу місцевості, можливо переміщення антени на інший об'єкт для оптимізації роботи радіосистеми.

На розмір та форму контурів вказаних зон впливають висота встановлення антени базової станції (БС), форма діаграми направленості антени, рельєф місцевості, електричні параметри поверхні, енергетичні характеристики абонентського обладнання, а також наявність, напрямок та рівень **радіозавад**.

Найважливішою вимогою до ліній (мереж) радіозв'язку є якість передавання інформації, що зазвичай задається *вірогідністю* та *надійністю*. Досягти вірогідності та надійності можна за таких двох умов:

- спотворення сигналу в передавачі, середовищі ПРХ та приймачі не повинні перевищувати припустимих меж;

- виконання енергетичного критерію, тобто потужність корисного сигналу на вході приймача ($P_{\text{с.прм}}$, скорочено $P_{\text{с}}$) має перевищувати сумарну потужність завад ($P_{\text{з.прм}}$, скорочено $P_{\text{з}}$) та власних шумів $P_{\text{ш}}$ на величину *припустимого відношення сигнал/(завада+шум)* на виході пристрою $K_{\text{прип}}$, визначеного для заданих умов, при якому забезпечується необхідна якість приймання корисного сигналу:

$$P_C/(P_3 + P_{\text{ш}}) \geq K_{\text{прип}}^2, \quad (4.1)$$

Потрібне значення $K_{\text{прип}}$ залежить від таких чинників:

- який клас випромінювань використовується;
- яка вірогідність приймання припустима (що залежить, зокрема, від термінального обладнання);
- чи застосовується коригувальне кодування;
- яка надійність зв'язку потрібна тощо.

Чим вищі вимоги до якості радіозв'язку, тим більшим має бути $K_{\text{прип}}$, тобто тим більше рівень сигналу, що приймається, має перевищувати рівень завад, наведених у приймальній антені.

В загальному випадку якість приймання визначається відношенням сигнал/(завада + спотворення + шум) на виході радіоприймача. Для кожного типу модема можна встановити взаємозалежність між відношеннями сигнал/завада (або сигнал/шум) на виході приймача та на його вході.

У природному середовищі ПРХ значення величин напруженості поля E_C та E_3 зазнають безперервних випадкових змін. Тому вірогідність приймання оцінюється за порівняно короткі відрізки часу, коли E_C/E_3 можна вважати незмінним. За довгі інтервали часу відношення E_C/E_3 змінюється, а в разі істотного зниження E_C/E_3 необхідна вірогідність приймання може взагалі ставати недосяжною.

Вірогідність приймання визначається відношенням кількості правильно прийнятих слів чи фраз (при телефонному радіозв'язку) або знаків («0» або «1») при телеграфному зв'язку та передаванні даних до загальної кількості переданих.

Характеристика стійкості роботи радіолінії – **надійність радіозв'язку**, під якою розуміється відношення сумарного часу зв'язку із заданою вірогідністю до загального часу зв'язку (за умови справності всіх технічних засобів). Чим довший сеанс зв'язку, тим більше можуть змінюватися E_C та E_3 . Тому надійність роботи лінії радіозв'язку прийнято відносити до певного інтервалу часу (за добу, місяць, рік). Одним зі способів підвищення надійності радіозв'язку є використання адаптивних радіосистем.

Сучасні вимоги щодо вірогідності визначаються імовірністю помилкового приймання знака $P_{\text{пом.зн}}$ та подаються такими нерівностями:

$$P_{\text{пом.зн}} < 10^{-3} \text{ – для телеграфних повідомлень;}$$

$$P_{\text{пом.зн}} < 10^{-6} \dots 10^{-7} \text{ – при передаванні даних (передбачається, що імовірність приймання хибної команди } P_{\text{хибн}} \leq 10^{-9}, \text{ а імовірність пропуску команди } P_{\text{проп}} \leq 10^{-5}.$$

При передачі цифрової інформації на практиці ще використовують такий параметр, як інтенсивність бітових помилок (англ. *Bit Error Rate – BER*), що розраховується аналогічним чином (див. рис. 4.2).

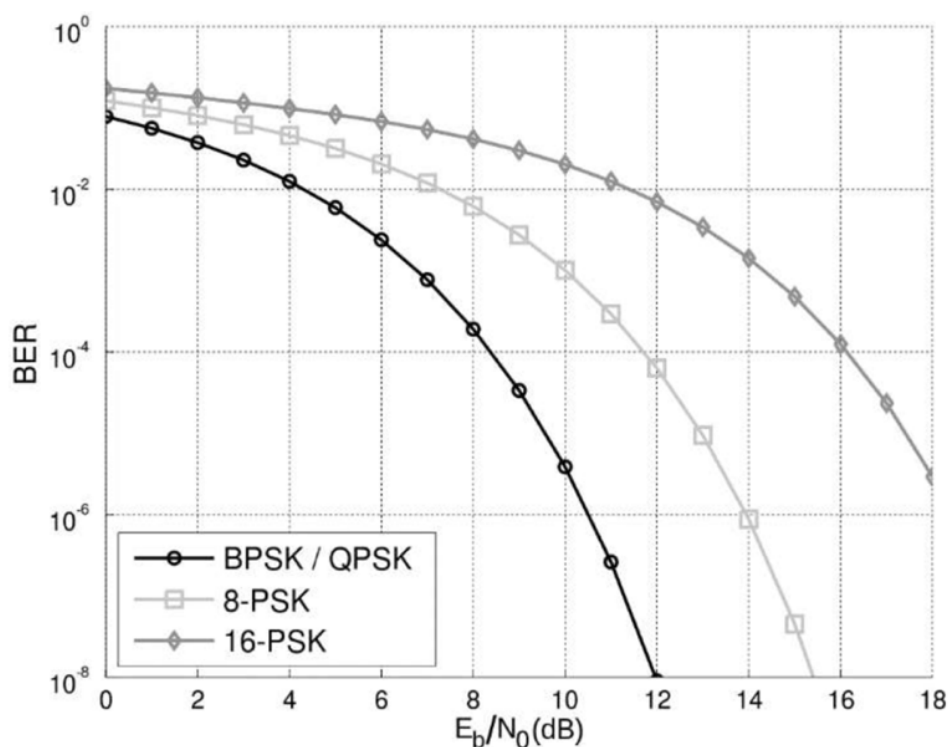


Рисунок 4.2. Залежність інтенсивності бітових помилок (BER) від співвідношення сигнал/шум (SNR) для різних радіосигналів

Основою для визначення припустимих значень P_c/P_z на виході приймального тракту при передаванні/прийманні аналогових повідомлень є необхідна розбірливість останніх, досліджувана артикуляційними методами.

Суб'єктивній оцінці якості зв'язку відповідають значення розбірливості, наведені в табл.4.1.

Таблиця 4.1

Відповідність між якістю зв'язку та відношенням сигнал/завада

Оцінка якості зв'язку	Складова розбірливість, %	Змістова розбірливість, %	P_c/P_z , рази; дБ
«Відмінно»	80-90	98-99	80...100; 19...20
«Добре»	60-80	97-98	20...80; 13...19
«Задовільно»	40-60	95-97	7...20; 8,45...13

Якщо змістова (фразова) розбірливість менша за 90%, то контакт між абонентами порушується.

Задана якість реалізується на відстані R між кореспондентами, яка називається **дальністю радіозв'язку**.

Отже, дальність радіозв'язку перебуває у взаємній залежності від таких чинників:

- класу випромінювань;
- умов ПРХ на трасі зв'язку (в обслуговуваній територіальній зоні);
- електромагнітної обстановки в місцях приймання радіосигналів;
- енергетичних параметрів радіопередавальних та радіоприймальних засобів, зокрема антенних пристроїв.

В найпростішому випадку модель поширення радіохвиль для корисного сигналу в радіоканалі прямої видимості у вільному просторі за відсутності віддзеркалень (рис. 4.3).

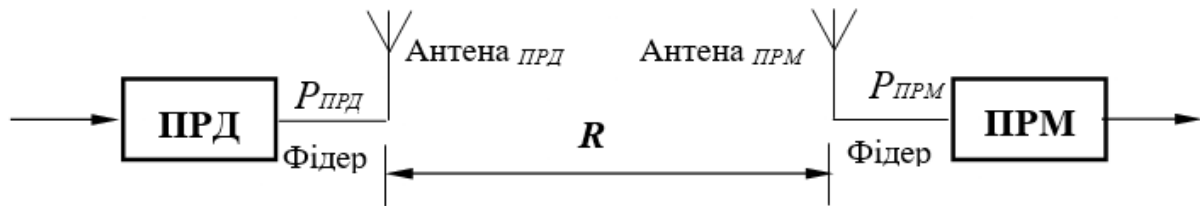


Рисунок 4.3. Загальні втрати в радіолінії

Взаємозв'язок між потужністю корисного сигналу на вході приймача P_c (або $P_{ПРМ}$), що потрібна для прийому інформації із визначеною якістю, потужністю передавача $P_{ПРД}$ та параметрам середовища ПРХ устанавлюється з таких міркувань.

Коефіцієнт спрямованої дії (КСД) D характеризує здатність антени **концентрувати** випромінюване електромагнітне поле в певному напрямі. Коефіцієнтом спрямованої дії називають відношення середнього значення **густини потоку потужності** (середнє значення вектора **Пойнтінга**), випромінюваного антеною у даному напрямі $\Pi(\Theta, \phi)$, до усередненого в усіх напрямках значенню густини потоку потужності $\Pi_{с\epsilon\rho}$:

$$D_A = \Pi(\Theta, \phi) / \Pi_{с\epsilon\rho}.$$

Таким чином, визначення КСД антени визначає порівняння конкретної антени з уявною абсолютно неспрямованою (**ізотропною**) антеною, що випромінює ту ж потужність, що й порівнювальна. Тобто, для ізотропної антени:

$$\Pi_{с\epsilon\rho} = P_{випр} / 4\pi r^2,$$

де $P_{випр}$ – потужність випромінювання, $P_{випр} = P_{ПРД} \cdot \eta_{ф.ПРД}$;
 $\eta_{ф.ПРД}$ – коефіцієнт корисної дії (ККД) фідера;
 $4\pi r^2$ – площа уявної сфери радіуса r , що охоплює антену.

Фідер – це лінія передачі, яка використовується для з'єднання передавача або приймача з антеною або іншим пристроєм.

В зв'язку з тим, що коефіцієнт спрямованої дії не характеризує втрат енергії в антені, введено параметр, що **враховує ці втрати**, який називають **коефіцієнтом підсилення** (КП) G антени.

$$G_A = D_A \cdot \eta_{А-ПРД},$$

де $\eta_{А-ПРД}$ – коефіцієнт корисної дії передавальної антени.

Коефіцієнт підсилення антени G_A – відношення потужності на вході еталонної антени до потужності, що підводиться до входу розглядуваної антени, за умови, що обидві антени створюють у даному напрямі на однаковій відстані рівні між собою напруженості поля або такої самої густини потоку потужності.

Потік потужності у вільному просторі через одиничну площинку сфери на відстані r від випромінювача, який має спрямовану антенну з коефіцієнтом підсилення $G_{A.ПРД}$ пропорційний до величини

$$P_{\text{ВИПР}}/4\pi r^2 = P_{\text{ПРД}}\eta_{\text{Ф.ПРД}}G_{A.ПРД}/4\pi r^2,$$

де $\eta_{\text{Ф.ПРД}}$, $G_{A.ПРД}$ – відповідно коефіцієнт корисної дії фідера та коефіцієнт підсилення передавальної антени.

Для апертурних антен

$$G_A = 4\pi S_A/\lambda^2,$$

де S_A – ефективна площа антени.

Приймальна антена “перехоплює” лише ту частину потоку енергії, яка пропорційна до ефективної площі приймальної антени S_A . Для апертурних антен

$$S_A = G_{A.ПРМ}\lambda^2/4\pi,$$

де $G_{A.ПРМ}$ – коефіцієнт підсилення приймальної антени; λ – довжина хвилі сигналу, що приймається.

Ефективна площа приймальної антени – площа, що визначається відношенням максимальної потужності, що її може віддати приймальна антена в узгоджене навантаження, до потужності, що припадає на одиницю площі в падаючій плоскій хвилі. Потужність, яка підводиться до фідера приймальної антени

$$P_{\text{ПРД}}\eta_{\text{Ф.ПРД}}G_{A.ПРМ}\left(\frac{\lambda^2}{16\pi^2 r^2}\right).$$

Потужність на вході приймача залежить ще й від ККД фідера приймальної антени $\eta_{\text{Ф.ПРМ}}$ та двох коефіцієнтів: узгодження K_{Z_A} вхідного опору приймача $Z_{\text{ПРМ}}=R_{\text{ПРМ}}+jX_{\text{ПРМ}}$ із приймальною антеною ($Z_{A.ПРМ}=R_{A.ПРМ}+jX_{A.ПРМ}$)

$$K_{Z_A} = \frac{4R_{A.ПРМ}R_{\text{ПРМ}}}{(|Z_{A.ПРМ}|+Z_{\text{ПРМ}})^2}, \quad (4.2)$$

та узгодження $K_{\text{ПОЛ}}$ передавальної та приймальної антен за поляризацією, який у найбільш простому випадку лінійної поляризації змінюється за рахунок неузгодженості поляризації та оцінюється функціональною залежністю

$$K_{\text{ПОЛ}} = \cos \gamma, \quad (4.3)$$

де γ – кут між площинами поляризації та дорівнює

$$P_C = \frac{P_{\text{ПРД}}\eta_{\text{Ф.ПРД}}G_{A.ПРД}G_{A.ПРМ}\eta_{\text{Ф.ПРМ}}K_{Z_A}K_{\text{ПОЛ}}\lambda^2}{4\pi r^2}. \quad (4.4)$$

Загасання енергії сферичних радіохвиль у вільному просторі визначається таким виразом:

$$W_0 = \frac{(4\pi r)^2}{\lambda^2}. \quad (4.5)$$

При розрахунках в логарифмічних одиницях зручніше замість загасання енергії W_0 використовувати термін *втрати* ПРХ – L_0 , дБ. Вираз (4.5) для розрахунку *втрат сигналу* L_0 у вільному просторі у логарифмічному вигляді має наступний вигляд (Рекомендація МСЕ-Р Р.525-5 [18]):

$$L_0 [\text{дБ}] = 32,4 + 20 \cdot \lg f_{[\text{МГц}]} + 20 \cdot \lg r_{[\text{км}]}, \quad (4.6)$$

де f – частота (в МГц), r – відстань (в км).

З урахуванням втрат сигналу при поширенні радіохвиль (ПРХ) потужність на вході приймача можна оцінити за допомогою виразу

$$P_C = \frac{P_{\text{ПРД}} G_{\text{А.ПРД}} G_{\text{А.ПРМ}}}{W_0}.$$

Напруженість поля, В/м, при поширенні хвиль у вільному просторі, виведена через вектор Пойнтінга, Вт/м², обчислюється як:

$$\Pi = E_0 H_d,$$

де E_0 – діюче значення напруженості електричного поля радіохвилі; H_d – діюче значення напруженості магнітного поля радіохвилі, $H_d = E_0 / 120 \pi$, де величина 120π – хвильовий опір вільного простору. Значення модуля вектору Пойнтінга, Вт/м² на відстані r

$$\Pi = \frac{E_A^2}{120\pi} = \frac{P_{\text{випр}}}{4\pi r^2}.$$

Діюче значення напруженості електричного поля, В/м, створюваного передавачем на відстані r , м:

$$E_0 = \frac{\sqrt{30 P_{\text{випр}}}}{r}. \quad (4.7)$$

На реальній трасі зв'язку *загасання енергії хвиль* W відрізняється від детермінованого W_0 на додаткове загасання енергії на трасі зв'язку W_T , $W = W_0 W_T$. Тому (без врахування втрат в фідерах, втрат за рахунок розбіжності поляризації та втрат за рахунок неузгодження вхідного опору)

$$P_C = \frac{P_{\text{ПРД}} G_{\text{А.ПРД}} G_{\text{А.ПРМ}}}{W_0 W_T}. \quad (4.8)$$

У зв'язку з тим, що значення P_C та $P_{\text{ПРД}}$ відрізняються на декілька порядків, для полегшення розрахунків, доцільно застосовувати значення

потужності у логарифмічних одиницях – *децибелах*. За опорний рівень приймають потужність відносно 1 Вт (дБВт), або мВт (дБмВт). Зазначимо, що рівень $P_{\text{дБВт}} = P_{\text{дБмВт}} + 30$.

Після логарифмування права частина виразу (4.8) перетворюється на алгебраїчну суму (у децибелах).

$$P_C = P_{\text{ПРД}} + G_{\text{А.ПРД}} + G_{\text{А.ПРМ}} - L_{\text{Ф.ПРД}} - L_{\text{Ф.ПРМ}} - L, [\text{дБ}] \quad (4.9)$$

де $L = L_0 + L_T$, дБ – втрати в радіоканалі (іноді зазначають $L_{\text{ПРХ}}$ або англ. L_{Prop} – **втрати поширення радіохвиль**) визначаються як сума втрат у вільному просторі (L_0) та додаткових втрат реальної траси поширення радіохвиль (L_T), які розраховані за обраним методом (з урахуванням механізму поширення радіохвиль на даній трасі); $L_{\text{Ф.ПРД}}$ і $L_{\text{Ф.ПРМ}}$ – втрати сигналу у фідерах.

Співвідношення (4.2, 4.6) можна використати для визначення не лише потужності сигналу на вході приймача, а й рівнів завад від відомих джерел радіозавад (або від передбачуваних джерел випромінювань радіосистем, запланованих до розгортання). У ньому під $P_{\text{ПРД}}$ розуміється потужність джерела завад $P_{\text{З.ПРД}}$, P_C змінюється на потужність завад у точці розміщення рецептора завад P_3 . При розрахунку рівня завад необхідно додатково врахувати розбіжності по несучим частотам та спектру завади і АЧХ рецептора завад FDR , розбіжність по поляризації, а також коефіцієнти підсилення антен во взаємному напрямку. Зазначені розрахунки неодмінно має бути виконано для забезпечення територіального рознесення засобів із метою забезпечення їхньої ЕМС. В результаті розв'язання виразу відносно P_3 можна знайти максимальний рівень завад, із перевищенням якого визначена якість радіозв'язку не забезпечується.

Способи зменшення рівнів завад і становлять основний зміст проблеми ЕМС технічних засобів.

Розв'язання нерівності відносно $P_{\text{С.ПРД}}$ приводить до основного співвідношення для енергетичного розрахунку радіоліній:

$$P_{\text{С.ПРД}} > \frac{(P_3 + P_{\text{Ш}}) \cdot K_{\text{прип}}^2 \cdot W_0 \cdot W_T}{\eta_{\text{ПРД}} \cdot \eta_{\text{ПРМ}} \cdot G_{\text{А.ПРД}} \cdot G_{\text{А.ПРМ}}}. \quad (4.10)$$

Найбільш невизначеними параметрами є рівень завад P_3 у точці приймання та додаткове загасання енергії на трасі зв'язку W_T .

Умови поширення радіохвиль (ПРХ) визначаються багатьма факторами. Основні фізичні ефекти та явища, які впливають на поширення радіохвиль:

- вплив поверхні Землі на випромінювані хвилі, формування хвиль, пов'язаних із земною поверхнею;

- відбиття радіохвиль від різних об'єктів як природних, так і штучних, розташованих на поверхні Землі та багатопроменеве формування підсумкового сигналу;
- ослаблення потужності радіохвиль через їх поглинання дощем, снігом, пилом;
- відбиття та розсіювання радіохвиль від дощу, снігу, пилу, зграй птахів;
- викривлення шляхів поширення радіохвиль через неоднорідність шарів атмосфери; огинання перешкод в тому числі, і за лінію горизонту тощо.

У багатьох випадках вплив рельєфу місцевості, рослинності та електричних параметрів поверхні землі може призвести до великих коливань рівнів як корисного, так і небажаного (завадного) радіосигналів. У разі застосування деяких методів визначення загасання у процесі ПРХ необхідні знання особливостей місцевості. Дані для деяких видів місцевості наведено в таблиці 4.2.

На визначення втрат ПРХ впливають також тип місцевості – море, інші водні басейни, пустеля, густий ліс, лісові галявини, сільські, приміські та міські зони.

Розмаїття видів рельєфу та структур місцевості у процесі ПРХ прямою хвилею вздовж поверхні Землі (наприклад, у системах мобільного радіозв'язку) може ставати причиною різного механізму ПРХ за конкретних обставин. Хвилі можуть відбиватися дзеркально (за законами оптики) від гладеньких поверхонь будівель або дифузно від грубошорстких, а також огинати перешкоди, розміри яких менші за довжину хвилі.

Таблиця 4.2

Електричні параметри різних типів місцевості

Поверхня	Діелектрична проникність ϵ	Провідність σ, с/м
Море у спокійному стані	80	1 ... 6
Прісна вода річок та озер	80	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Вологий ґрунт	10 ... 30	$3(10^{-3} \dots 10^{-2})$
Сухий ґрунт	3 ... 6	$10^{-5} \dots 10^{-3}$
Мерзлий ґрунт	3 ... 6	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Сніг ($t = -10^{\circ}\text{C}$)	1	10^{-6}
Лід ($t = -10^{\circ}\text{C}$)	4 ... 5	$10^{-2} \dots 10^{-1}$

Існує багато моделей ПРХ на трасах зв'язку, в яких слід урахувати як детерміновані, так і випадкові параметри середовища ПРХ.

4.2. Особливості поширення радіохвиль та моделі для розрахунку їх загасання

Задача з визначення напруженості поля на деякій відстані від джерела випромінювання має розв'язуватися за допомогою рівнянь Максвелла та системи граничних умов. Проте, Земля є неоднорідним поглинальним середовищем. Поверхня Землі нерівна. Навколо Землі міститься атмосфера, параметри якої змінюються за широтою, довготою та висотою, залежать від часу, частоти коливань і т. ін. З урахуванням зазначених чинників відшукування поля від джерела ускладнюється, а отже, точного розв'язку поставлена задача не має.

Задачу про ПРХ (сигналів і радіозавад) у реальному середовищі поділяють на кілька окремих задач. Кожна задача досліджує механізм ПРХ, зумовлений деякою частинною властивістю середовища ПРХ.

Для опису властивостей середовища ПРХ використовуються моделі.

Перелік моделей поширення радіохвиль наведений у Рекомендації МСЕ-Р Р.1144-12 “Посібник з використання методів прогнозування поширення радіохвиль”, якій розроблений 3-ю Дослідницькою комісією з радіозв'язку [26]. Посилання на деякі рекомендації стосовно ПРХ надані у списку літератури [13-26].

За умови постійної зміни умов ПРХ корисним стає імовірнісний підхід, що полягає в обчисленні імовірності досягнення даної якості обслуговування протягом певної частки (у відсотках) часу роботи за рік. В основу цього підходу покладено статистичний облік усіх змінних величин та аналіз імовірності нормальної роботи системи за різних припущень щодо використовуваної апаратури та застосовуваних робочих частот.

Кількісні прогнози щодо втрат на поширення сигналу (зменшення рівня сигналу у точці приймання) значною мірою базуються на теоретичних моделях, які описують механізм поширення та придатні для математичної та комп'ютерної обробки.

Статистичні моделі ПРХ створюються на підставі зібраної достатньої кількості статистичної інформації про величезну кількість змінних величин, що визначають середовище ПРХ, утворене поверхнею Землі та навколишньою атмосферою.

Радіохвилі різняться лише частотою. Суттєву частотну залежність має середовище, в якому відбувається ПРХ. Частотнозалежні параметри мають окремі елементи апаратури. Зазначені фактори впливають на припустиму швидкість передавання інформації. Частотна залежність поведінки електромагнітних хвиль призводить до необхідності окремо розглядати різні ділянки спектра радіочастот залежно від явищ, що визначають ПРХ даної частоти.

Вибір механізму поширення радіохвиль для даної системи радіозв'язку залежить від великої кількості чинників – виду передаваної

інформації та швидкості передавання, потрібної якості зв'язку, географічних і економічних міркувань та наявних робочих частот.

4.2.1. Механізми поширення радіохвиль

Розрізняють такі механізми поширення радіохвиль:

- поширення у *межах прямої видимості* між передавальною та приймальною антенами (наприклад, зв'язок пункту з пунктом на землі або зв'язок за напрямом Земля – супутник); таке поширення називають прямим поширенням радіохвиль. Ідеться про радіохвилі, що поширюються в однорідному чи слабонеоднорідному середовищі по прямолінійних або близьких до них траєкторіях;

- із задіянням земної хвилі *при дифракції* (дифракція радіохвиль – явище огинання радіохвилями перешкод, розміри яких порівнянні з довжиною радіохвилі), зокрема за лінію горизонту; вони поширюються в безпосередній близькості до поверхні землі;

- *шляхом одно' чи багаторазового відбиття* радіохвиль від природних іоносферних шарів атмосфери, утворюваних під впливом енергії Сонця (іоносферні хвилі, які іноді називають просторовими);

- *розсіювання енергії в тропосфері* (тропосферні хвилі);

- *хвилевідне*;

- *комбіноване поширення*, наприклад поєднання прямих хвиль із відбитими.

Додаткові втрати, які обумовлено вищезгаданими явищами, враховують *множником послаблення* V .

Множник послаблення пов'язує комплексну амплітуду електричного поля E_A реальної траси ПРХ з комплексною амплітудою поля у вільному просторі E_0 (вираз 4.7), $V = E_A/E_0$, тобто діюче значення напруженості електричного поля, В/м, створюваного передавачем для реальної траси ПРХ на відстані r , м:

$$E_A = \frac{\sqrt{30P_{\text{випр}}}}{r} \cdot V. \quad \text{В/м}$$

Квадрат множника послаблення V^2 є оберненою величиною загасання енергії W_T у виразі (4.8). Також зазначимо, що значення множника послаблення V у децибелах однакове для напруженості поля V_E та потужності V_P :

$$V_{\text{дБ}} = 20 \lg V_E = 10 \lg V_P = 10 \lg V_E^2.$$

На рис. 4.4 та рис. 4.5 схематично показані основні з перерахованих вище механізмів поширення сигналів (Рекомендація МСЕ–Р Р.452–15 [22]).

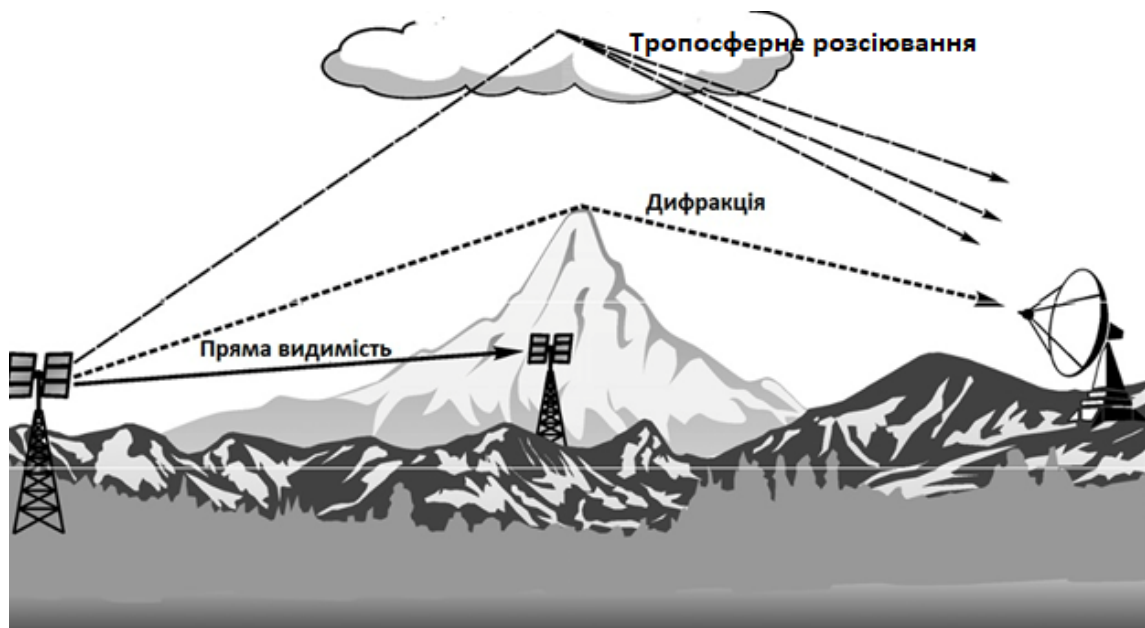


Рисунок 4.4. Довгострокові механізми розповсюдження сигналів

На рис. 4.4 показані довгострокові механізми розповсюдження сигналів (тропосферне розсіювання, дифракція і пряма видимість), які можуть бути носіями як корисного (КС), так і сигналу, що заважає (ЗС). На рис. 4.5 показано короткострокові механізми розповсюдження сигналів, обумовлені виникненням у тропосфері аномальних умов, таких, як інверсна зміна температури з висотою, випадання гідрометеорів, поява тропосферного хвильоводу та ін. та збільшення рівнів КС.

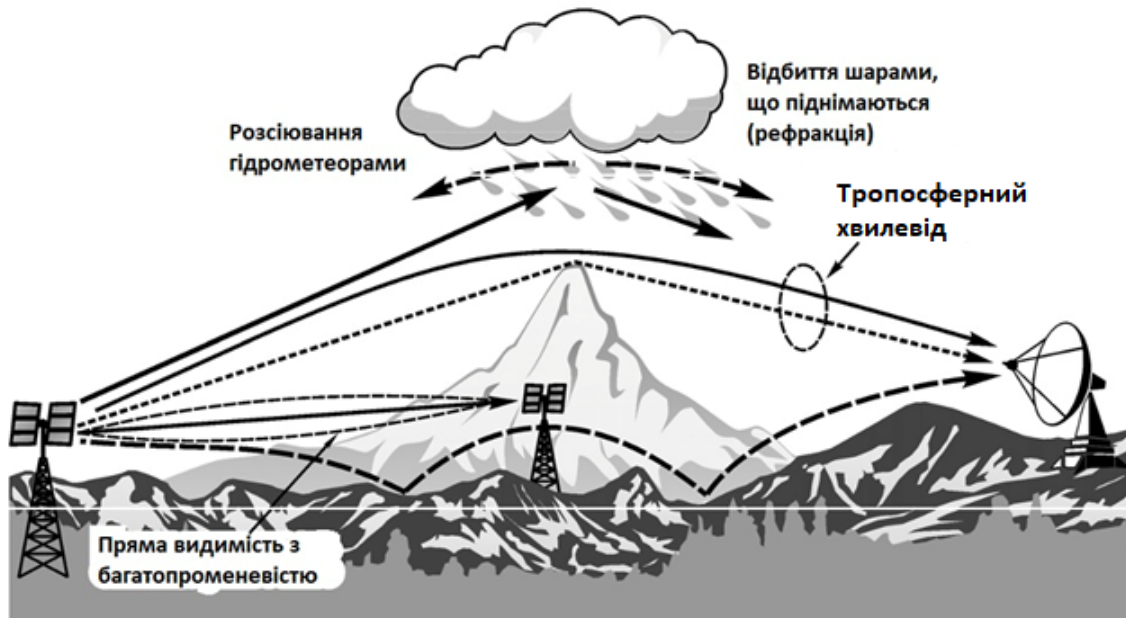


Рисунок 4.5. Аномальні (короткострокові) механізми розповсюдження сигналів

Рівень радіосигналу, прийнятого після його проходження по трасі поширення від передавальної антени, залежить від характеристик місцевості на трасі та від змінюваності іоносфери та тропосфери Землі. У

разі ретельного оцінювання напруженості поля сигналу (ступеня послаблення сигналу) необхідно враховувати місцезнаходження кінцевих станцій, пору року й час доби, а також потрібні статистичні параметри (наприклад, частку (у відсотках) часу, протягом якого ймовірність помилки не перевищує заданого значення). Для багатьох цілей аналізу спектра та присвоєння частот використовуються спрощені оцінки втрат енергії під час поширення.

Найчастіше розглядають чотири способи поширення радіохвиль, схематичні моделі радіотрас яких зображені на рис. 4.6. Еліпси обмежують область простору, яка істотна при поширенні радіохвиль.

Область простору, істотна для поширення радіохвиль – це область, в якій зосереджена *основна частина потужності*. Таку область спостерігають поблизу прямої, що з'єднує передавач з приймачем. Розміри та конфігурацію цієї області визначають на підставі *принципу Гюйгенса-Френеля*, згідно з яким *кожна точка фронту хвилі, що поширюється, є джерелом вторинної сферичної хвилі*. Тобто поле визначають складанням елементарних хвиль: які створені вторинними джерелами та які розташовані на деякій поверхні, що оточує первинне джерело.

Істотною для поширення радіохвиль є область простору, обмежена зонами Френеля декількох початкових номерів. Для спрощення вважають, що суттєвою в процесі поширення радіохвиль є область, обмежена еліпсоїдом з поперечним перерізом, який дорівнює *першій зоні Френеля*.

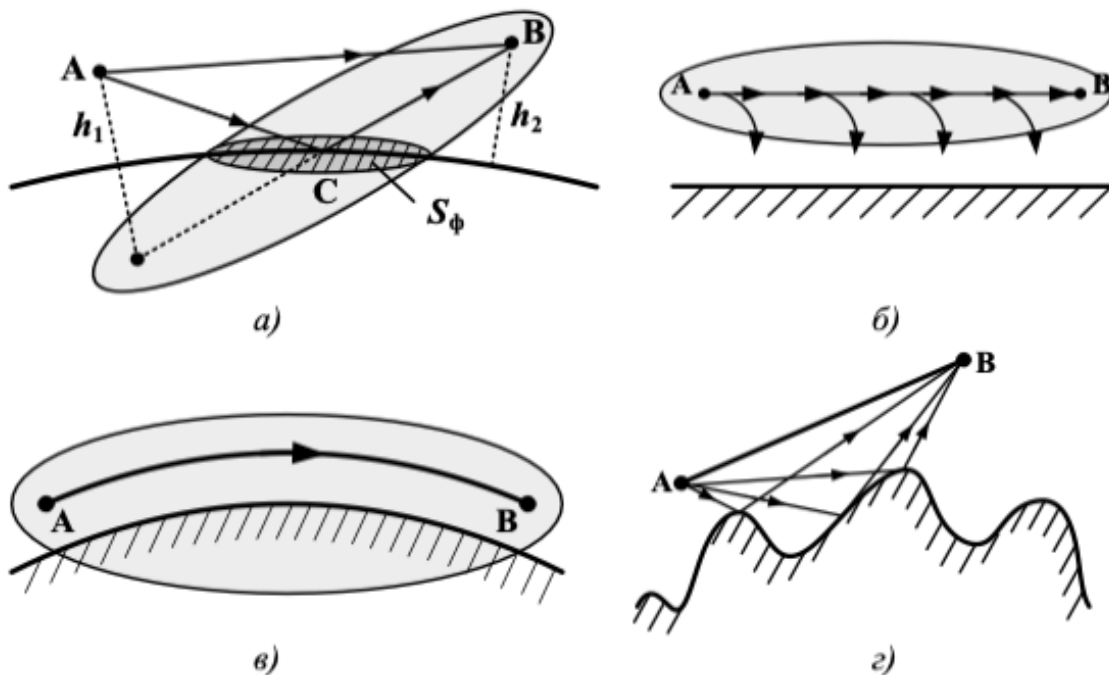


Рис. 4.6. Основні моделі радіотрас земних радіохвиль:

a – поширення в межах прямої видимості; *б* – поширення над плоскою землею; *в* – поширення за рахунок дифракції; *г* – поширення над нерівною поверхнею Землі.

Область прямої видимості простягається до радіогоризонту і зазвичай характеризується наявністю хвиль трьох типів: прямої, відбитої та земної.

Пряма та відбита хвилі спостерігаються при застосуванні антен, які підняті на висоту, що перевищує довжину хвилі.

При антенах А і В, піднятих над плоскою поверхнею Землі, хвилі поширюються як прямолінійними траєкторіями (АВ на рис. 4.6, а), так і ламаною траєкторією, якщо відбиваються від поверхні Землі (промінь АСВ). Якщо антени розміщені низько над Землею (висота підняття менша за довжину хвилі) або їхні фазові центри розташовані на поверхні Землі (рис. 4.6, б), траєкторія радіохвилі пролягає близько до поверхні Землі, радіохвилі зазнають поглинання в Землі і вважається земними. Траєкторія поширення радіохвиль може перекриватися випуклістю Землі (рис. 4.6, в). У цьому разі спостерігається дифракція радіохвиль і в приймальній антені В напруга наводиться завдяки дифрагованим хвилям. Область дифракції або тіні – це область земної поверхні, де немає прямої хвилі, а поширення відбувається внаслідок того, що хвиля огинає земну поверхню та її нерівності. Дифракційну здатність мають хвилі декаметрового та більш довгохвильових діапазонів. Хвилі метрового та дециметрового діапазонів дифрагують лише нерівності, сумірні з довжиною хвилі.

Якщо поверхня Землі має складний рельєф (рис. 4.6, г) – покрита пагорбами або різними спорудами, то радіохвилі розсіюються на неоднорідностях рельєфу.

Вплив атмосфери на земні хвилі зводиться до викривлення траєкторії поширення радіохвилі внаслідок рефракції та поглинання в водяних парах та молекулах кисню на частотах вищих 10 ГГц.

До тропосферних хвиль відносять радіохвилі, які поширюються за рахунок розсіяння на неоднорідностях тропосфери (рис. 4.7, а) або внаслідок утворення тропосферного хвилеводу (рис. 4.7, б).

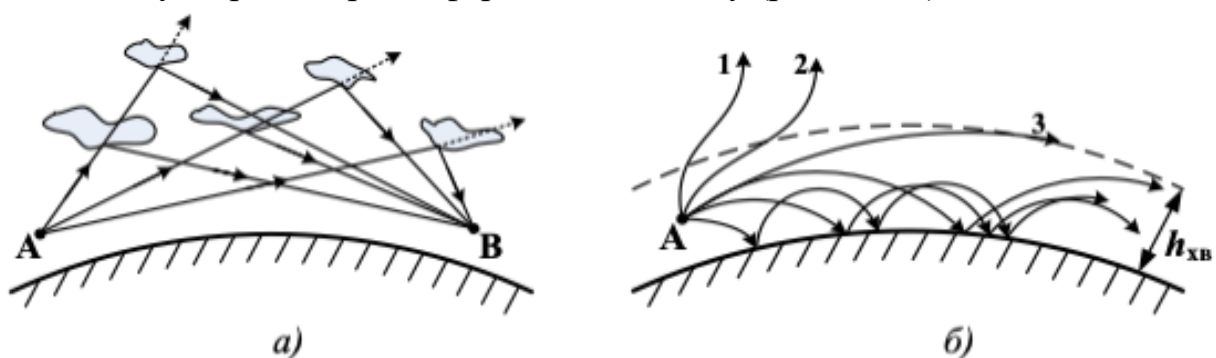


Рисунок 4.7. Поширення тропосферних радіохвиль:
а – розсіяння в тропосфері; б – тропосферний хвилевід

Розсіяння хвиль у тропосфері зумовлене наявністю неоднорідних за діелектричною проникністю локальних утворень. Коефіцієнт заломлення в неоднорідностях відрізняється від середнього значення на 10^{-6} , що призводить до виникнення розсіяних хвиль. При певних значеннях розмірів

неоднорідностей і їх висотах розташування розсіяні хвилі надходитимуть до приймальної антени В і дадуть можливість установити зв'язок на відстанях до 700 – 800 км у сантиметровому або дециметровому діапазонах [4].

Оскільки рівень напруженості розсіяних радіохвиль на 50 – 80 дБ нижчий, ніж при поширенні у вільному просторі [4], то при забезпеченні ЕМС радіоліній, що використовують земні хвилі, вплив поля тропосферних хвиль ураховують лише в зонах дифракції (рис.4.6, в).

Вплив тропосферних хвиль оцінюють статистичними методами на основі експериментальних даних.

Завади часто виникають унаслідок хвилевідного поширення. Імовірність виникнення хвилеводів між поверхнею Землі та іоносферно-тропосферними шарами доволі велика. Саме тому при прогнозуванні ЕМС ці завади слід ураховувати.

Тропосферний хвилевід (рис. 4.7, б) утворюється епізодично і його появу передбачити важко. Суть його полягає в тому, що в деякому шарі тропосфери, товщиною $h_{хв}$, градієнт індексу заломлення dN/dh (dh – приріст висоти в тропосфері) стає меншим від критичного значення

$$dN/dh \leq -0,157 \text{ 1/м.}$$

Таке явище в тропосфері називається надрефракцією. Тропосферний хвилевід розглядають як своєрідну лінію передачі, у якій верхня стінка – напівпрозора верхня границя шару тропосфери, охопленого надрефракцією, а нижня стінка – непрозора поверхня Землі. Тому через верхню стінку промені, які падають на неї під невеликим кутом (промені 1, 2, 3 рис. 6.2, б), проходять і поширюються за звичними траєкторіями. Решта променів поширюються за траєкторіями з малим радіусом, що призводить до їх відбиття від поверхні Землі.

Вплив різних видів рефракції в тропосфері наочно ілюструється на рис. 4.8 зображеними діаграмами спрямованості гостронаправленої антени.

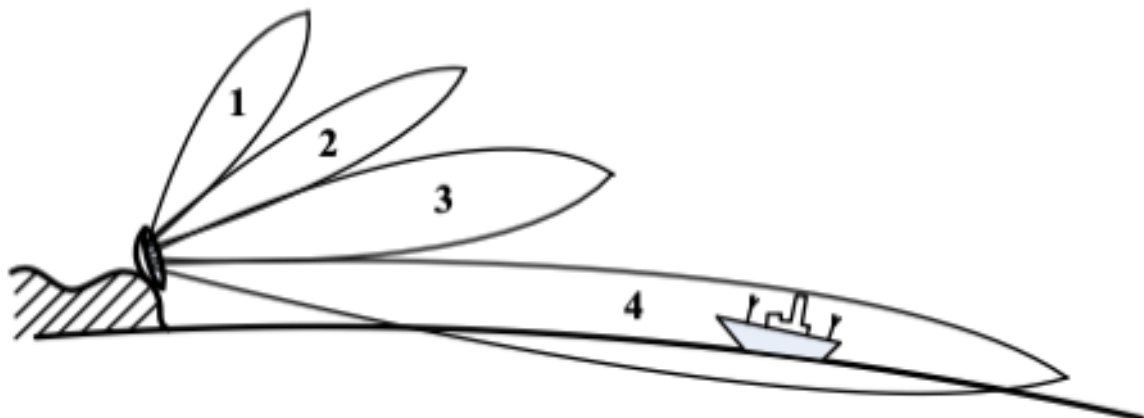


Рис. 4.8. Зони освітленості залежно від рефракції: 1 – від’ємна; 2 – занижена; 3 – нормальна; 4 – надрефракція або критична рефракція

З рис. 4.8 випливає, що утворення хвильоводного каналу порушує повністю функціонування радіосистеми. У випадку радіолокаційної станції спостереження за повітряним простором на екрані можуть з'явитися відмітки про наявність рухомого об'єкта, хоча відбиття хвиль відбувається від наземного об'єкта (пелюстка 4 на рис. 4.8). Отже, незважаючи на те, що теоретично особливості тропосферного хвильового каналу описані аналітично досить докладно [4], прогнозувати його вплив на електромагнітну обстановку дуже важко.

Нарешті, хвилі, на траєкторію поширення яких і на їхню структуру впливає іонізований газ верхніх шарів атмосфери відносять до іоносферних хвиль. З-поміж них передусім виокремлюють радіохвилі, що відбиваються від шарів іоносфери. Це найчастіше хвилі, довжина яких перевищує десять метрів. Траєкторії радіопромінів в іоносфері для різних довжин хвиль наведені на рис. 4.9 [50].

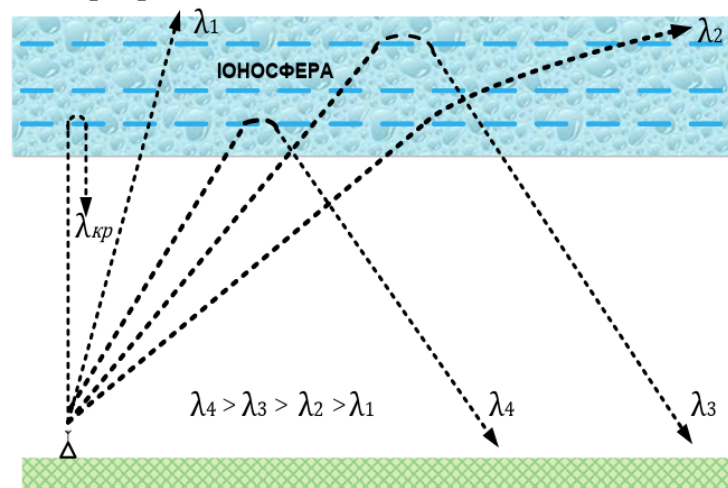


Рисунок 4.9. Траєкторії радіопромінів в іоносфері для різних довжин хвиль.

Виокремлюють також іоносферні радіохвилі, що розсіюються неоднорідностями в іоносфері. Завдяки розсіянню радіохвиль метрового діапазону на висотах 75–90 км можна здійснити зв'язок на відстанях до 2000–2300 км [4]. Утрати в таких лініях зростають з наростанням частоти електромагнітних коливань.

Третім різновидом іоносферних радіохвиль є радіохвилі, що відбиваються від метеорних слідів. Для регулярної роботи радіоліній використовують спорадичні метеори, які згорають на висоті 80–120 км. Лінійна електронна густина в метеорному сліді пропорційна масі метеора і знаходиться приблизно від 10^{10} до 10^{18} електронів на метр. Існує слід декілька часток секунди, тому для систем зв'язку обов'язковим є використання накопичувачів інформації.

Втрати передачі досить великі, але менші ніж у радіолініях з розсіянням радіохвиль в іоносфері. Так, наприклад, у радіолінії, яка працює на частоті 50 МГц, з протяжністю радіотраси 130 км втрати передачі досягають приблизно 170 дБ.

У табл. 4.3 наведено зведені дані про види поширення радіохвиль, дальність їх дії, використання смуг частот і можливі рівні завад для діапазонів частот від ДНЧ до ВВЧ.

Таблиця 4.3

Дані по видах поширення радіохвиль

Діапазон	Частота	Вид	Дальність	Ширина	Дальність дії завад	Використання розповсюдження полоси
ДНЧ дуже низькі частоти	3–30 кГц	Хвилевідний	декілька тисяч км	Дуже обмежена	Дуже велика	На світовому рівні, радіонавігаційний та стратегічний зв'язок на довгих відстанях
НЧ низькі частоти	30-300 кГц	Земна хвиля, іоносферна хвиля	декілька тисяч км	Дуже обмежена	Дуже велика	Радіонавігаційний та стратегічний зв'язок на довгих відстанях
СЧ середні частоти	0,3-3 МГц	Земна хвиля, іоносферна хвиля	декілька тисяч км	Середня	Дуже велика	Зв'язок двох пунктів між собою на середній відстані, радіомовний та морський рухомий зв'язок
ВЧ високі частоти	3-30 МГц	Іоносферна хвиля	до декількох тисяч км	Широка	Дуже велика	Зв'язок двох пунктів між собою на довгих та коротких відстанях, глобальне радіомовлення, рухомий зв'язок
ДВЧ дуже високі частоти	30-300 МГц	Пространственная хвиля, тропосферне розсіювання, дифракція	до декількох сотень км	Дуже широка	Обмежена	Зв'язок пункту з пунктом на короткі і середні відстані, рухомий зв'язок, локальні мережі, звукове та телевізійне радіомовлення, персональний зв'язок
УВЧ ультра високі частоти	0,3-3 ГГц	Пространственная хвиля, тропосферне розсіювання, дифракція, в межах прямої видимості	до 100 км, земля- космос	Дуже широка	Обмежена	Зв'язок пункту з пунктом на короткі і середні відстані, рухомий зв'язок, локальні мережі, звукове та телевізійне радіомовлення, персональний зв'язок, супутниковий зв'язок
НВЧ надвисокі частоти	3-30 ГГц	В межах прямої видимості	До 30 км; земля – космос	Дуже широка, до 1 ГГц	Зазвичай обмежена	Зв'язок пункту з пунктом на короткі відстані, звукове та телевізійне радіо-мовлення, локальні мережі, рухомий/персональний зв'язок, супутниковий зв'язок
ВВЧ вкрай високі частоти	30-300 ГГц	В межах прямої видимості	До 20 км; земля – космос	Дуже широка, до 10 ГГц	Зазвичай обмежена	Зв'язок пункту з пунктом на короткі відстані, мікро-стільникові мережі, локальні мережі та персональний зв'язок, супутниковий зв'язок

4.2.2. Особливості поширення радіохвиль різних діапазонів

Діапазон частот 10 кГц ... 30 МГц

На частотах, нижчих за 30 кГц, втрати при поширенні радіосигналів наближаються до рівня втрат при поширенні у вільному просторі. На ДНЧ проходження радіохвиль у режимі хвилевідного поширення між іоносферою та поверхнею Землі може спостерігатися у глобальному вимірі. У цьому діапазоні частот важливо враховувати два різні режими поширення:

- режим земної хвилі, що часто визначає рівні корисного сигналу (КС);
- режим іоносферної хвилі, за допомогою якого часто поширюються завадові сигнали (ЗС).

Амплітуда відбитого від іоносфери сигналу характеризується виразними добовими коливаннями, спричиненими змінами рівня поглинання в іоносфері. Природа іоносферного поширення передбачає, що лінії зв'язку великої довжини зазнаватимуть спотворень, зумовлених багатопроменевістю, завадами, які впливають на сигнал, та перервами в роботі.

У рамках моделей поширення на ВЧ застосовують числові карти іоносферних характеристик, а в Рекомендації МСЕ–Р Р.533 викладено метод прогнозування для будь-якої траси, будь-якої пори року та якої завгодно кількості сонячних плям основної і робочої завадної проміжної частоти (ЗПЧ), довільного рівня напруженості поля, рівня приймальної потужності та відношення С/Ш для частот від 2 до 30 МГц.

Питання поширення земних хвиль для частот від 10 кГц до 30 МГц розглядаються в Рекомендації МСЕ–Р Р.368 [16]. Через складність розрахунків у Рекомендації Р.368 використовується сім'я кривих напруженості поля при поширенні земної хвилі для низки типових значень частот та характеристик поверхні Землі (ϵ – відносної діелектричної проникності, σ – провідності) при використанні передавача з потужністю $P_1 = 1$ кВт, антенним пристроєм з КСД рівним 3 (приклад кривих при ПРХ над сушею наведено на рис. 4.10). Ці криві можуть використовуватися для визначення напруженості поля лише в тих випадках, коли відомо, що відбиття від іоносфери буде незначним за амплітудою, і коли приймальну антену розташовано низько над поверхнею Землі. Графіки дозволяють розрахувати напруженість поля як для плоскої, так і для сферичної поверхні Землі, тобто з урахуванням явища дифракції.

Якщо потужність передавача $P_{\text{пер}} \neq 1$ кВт, а коефіцієнт направленої дії $D \neq 3$, то для розрахунку поля використовується *формула перерахунку*, яка має вигляд

$$E = E^{(1)} \frac{\sqrt{P_1 \cdot D_1 \cdot \eta_{\Phi 1}}}{3000} = E^{(1)} \frac{\sqrt{P_1 \cdot G_1}}{3000}, \quad (4.11)$$

або

$$E_{\text{дБ}} = E^{(1)} + 10 \cdot \lg \frac{P_1 G_1}{3000},$$

де $E^{(1)}$ – величина напруженості поля (в мкВ/м або в дБ відносно 1 мкВ/м), отримана за графіками МСЕ.

Криві, наведені для однорідних трас, можуть також використовуватися для визначення напруженості поля на мішаних трасах згідно з методами, наведеними в Рекомендації Р.368 [16].

Основні втрати передавання L_b , дБ, можна знайти з такого рівняння:

$$L_b = 142,0 + 20 \lg f - E^{(1)},$$

де $E^{(1)}$ – напруженість поля, дБмкВ, f – частота в МГц,.

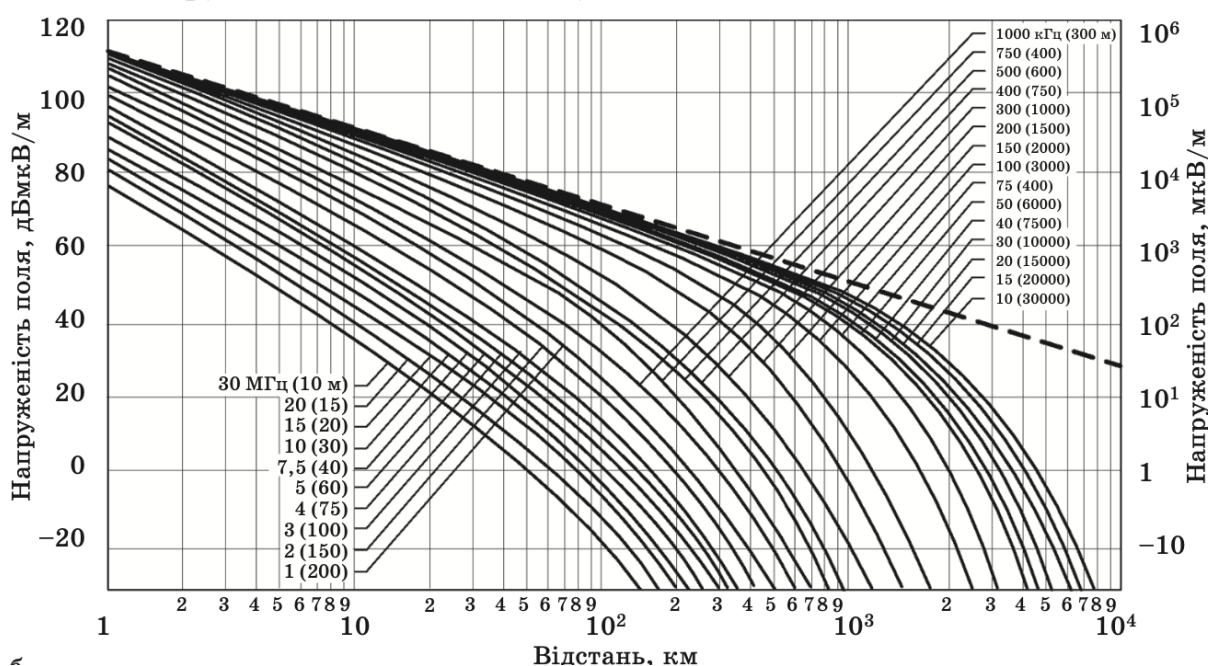


Рисунок 4.10. Криві поширення земної хвилі на частотах 10 кГц...30 МГц над сушею, ґрунт середньої сухості: $\sigma = 10^{-3}$ с/м; $\varepsilon = 15$

Діапазон частот 30 МГц ... 3 ГГц

У цьому діапазоні частот, за винятком найнижчої межі смуги, поширення радіохвиль через регулярну іоносферу не відбувається. Вплив погоди обмежується явищами надрефракції та хвилевідного поширення, які можуть спричинюватися інверсіями нормального градієнта індексу рефракції в атмосфері. Іншими істотними відхиленнями від поширення у вільному просторі є тропосферне розсіювання та дифракція, що викликаються впливом перешкод на трасі поширення, зокрема й опуклістю Землі, й дифракцією на рельєфі місцевості та будівлях.

Залежно від конкретних умов поширення радіохвиль для оцінювання втрат при поширенні можуть використовуватися такі дані.

Послаблення радіохвиль у вільному просторі. За певних умов достатньо припустити, що корисний сигнал послаблюється лише через поширення у вільному просторі (Рекомендація МСЕ–Р Р.525 [18]).

Дифракція навколо гладенької поверхні Землі. Для прогнозування рівня корисного сигналу на відстанях, що перевищують відстань прямої видимості, необхідно враховувати кривину Землі.

Поширення радіохвиль у конкретних регіонах світу або над земною поверхнею з певним ступенем нерівності. У Рекомендаціях МСЕ–Р Р.1546 – 6 (30 МГц – 4000 МГц), МСЕ–Р Р.528–5, наведено криві для різних радіо-служб (діапазонів частот, регіонів світу та висот антен).

Поширення радіохвиль у міській місцевості. Ця модель ґрунтується частково на Рекомендації МСЕ–Р Р.529 і використовує формулу Окамура – Хата для розрахунку послаблення залежно від відстані та еквівалентної висоти передавальної антени, частки (у відсотках) забудованої території навколо місця приймання, типу траси та ступеня нерівності земної поверхні.

Може знадобитися врахування інших механізмів поширення, що можуть призвести до виникнення завад. Ці механізми включають у себе такі явища.

Іоносферне поширення. У певні пори року та час доби режими іоносферного поширення, такі як поширення через спорадичний шар *E*, можуть забезпечувати поширення радіохвиль на великі відстані на частотах близько 70 МГц. Ці питання розглянуто в Рекомендації МСЕ–Р Р.534.

Хвилевідне поширення та надрефракція. Ці явища розглядаються в Рекомендаціях Р.834 та Р.452.

У Рекомендації МСЕ–Р Р.1546 використовується метод розрахунку для радіослужб мовлення на основі експериментальних кривих поширення, що подають значення напруженості поля у смугах ДВЧ (30 ... 250 МГц) та НВЧ (250 МГц ... 1 ГГц) як функції протяжності траси для різних ефективних висот передавальної антени на наземних і морських трасах та для 1–50% часу. Усі криві відповідають висоті приймальної антени $h_2 = 10$ м, а криві для наземних трас відповідають нерівності місцевості $\Delta h = 50$ м, що зазвичай застосовується в розрахунках для умов типової нерівної місцевості. Ефективну висоту антени необхідно визначати згідно з Рекомендацією МСЕ–Р Р.341.

Діапазон частот 3 ... 20 ГГц

В цьому діапазоні частот також діють описані чинники поширення радіохвиль (за винятком іоносферних хвиль). На додаток в цьому діапазоні необхідно враховувати явища послаблення, розсіювання та крос-поляризації, що виникають під впливом гідрометеорів та інших атмосферних частинок. На частотах, вищих приблизно за 15 ГГц, необхідно також враховувати послаблення в атмосферних газах.

Атмосфера Землі по-різному пропускає РХ різної довжини (λ). Електромагнітні коливання одних частот проходять через атмосферу майже

без втрат, в той час, коли для коливань інших частот вона – непрозора. На частотах, вищих приблизно за 10 ГГц, посилюється вплив дощу. Послаблення в дощових краплях може призвести до суттєвого погіршення якості сигналу (рис. 4.11).

При наземному поширенні радіохвиль за умов ясного неба можуть спостерігатися завмирання, зумовлені дифракцією, багатопроменевим поширенням в атмосфері та вздовж земної поверхні, розширенням променя, розфокусуванням антени, послабленням в атмосферних газах, а у деяких регіонах – піщаними та пиловими бурями.

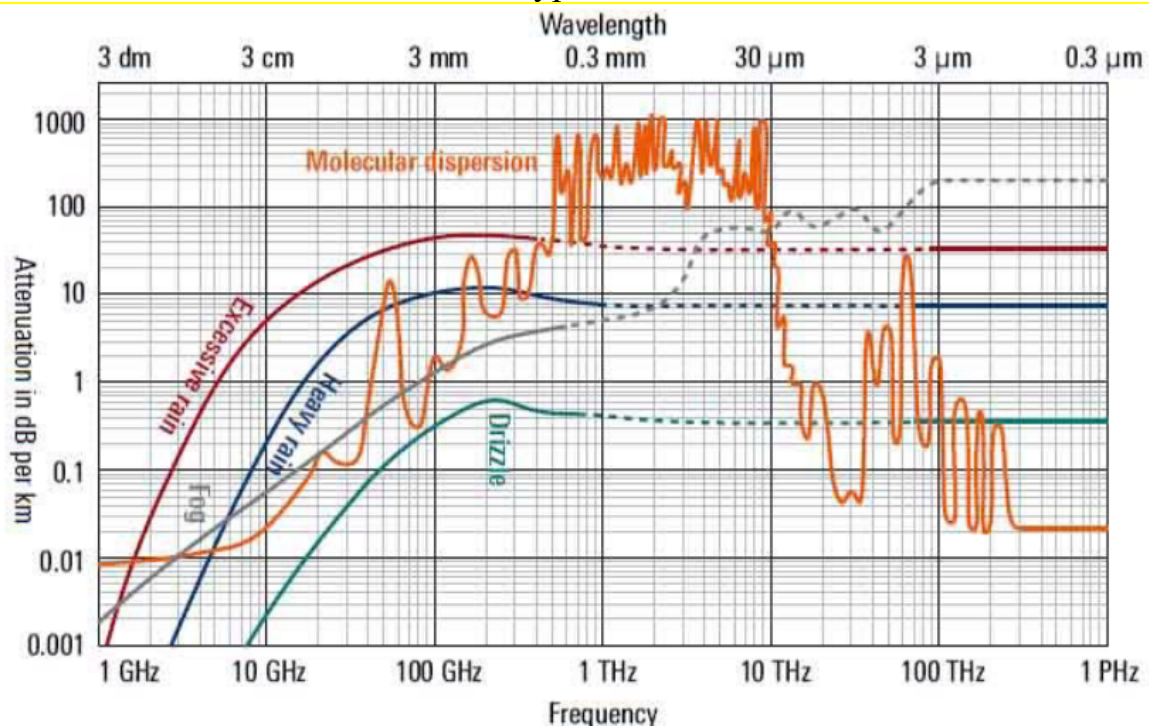


Рисунок 4.11. Втрати радіосигналу в атмосфері для різних атмосферних явищ в залежності від частоти (довжини хвилі) в дБ на 1 км (molecular dispersion – молекулярна дисперсія (розсіювання); excessive rain – надмірний дощ; heavy rain – сильний дощ; drizzle – мряка (густий туман))

У Рекомендації МСЕ-Р Р 530 описано методи прогнозування процесів поширення радіохвиль на трасах прямої видимості з урахуванням більшості цих явищ. При цьому використовується модель, що враховує такі основні чинники впливу на характеристики поширення:

- субрефракцію, яка призводить до екранування радіохвилі перешкодою;
- посилення сигналу через виникнення хвильовідних умов поширення;
- відбиття радіохвиль від шаруватих неоднорідностей тропосфери;
- відбиття радіохвиль від підстигальної поверхні;
- послаблення в гідрометеорах;
- деполяризація радіохвиль через багатопроменевість та дощі;
- спотворення сигналу через частотно-селективні завмирання (ЧСЗ).

Характеристики поширення радіохвиль і методи їх передбачення на трасах тропосферних РРЛ (ТРЛ) наводяться в Рекомендації МСЕ-Р Р.617 для дев'яти кліматичних регіонів світу у вигляді середньорічних втрат передавання для різних частот і часток (у відсотках) часу та різної довжини трас.

Моделі поширення радіохвиль у радіослужбах мовлення та системах «точка-зона» («точка-багатоточка», безпроводовий доступ, локальні радіомережі) у діапазоні частот від 300 МГц до 100 ГГц містяться в Рекомендаціях Р.1146, Р.1238, Р.1410, Р.1411, Р.1546-6.

Діапазон частот понад 20 ГГц

Основні переваги використання цього діапазону частот полягають у широкій доступній смузі частот та менших за розмірами антенах.

Головний недолік – висока схильність піддаватись атмосферним ефектам, що призводять до значних послаблень сигналу та обмежують або й унеможливають застосування багатьох систем радіозв'язку. Проте такі ефекти послаблення можна також використати заради забезпечення захисту систем від завад з огляду на значно вищі втрати у вільному просторі на цих частотах.

Цей діапазон частот характеризується «вікнами», які являють собою смуги з порівняно низьким послабленням, та смугами поглинання, де спостерігається дуже високе послаблення (див. рис. 4.7). Вікна та смуги поглинання визначаються, передусім, поглинальними властивостями газів, здебільшого кисню та водяної пари. Поглинання в кисні досягає максимуму на частотах 60 та 119 ГГц, а поглинання у водяній парі – поблизу частот 22 ГГц та 183 ГГц.

Проте сліди газів можуть істотно впливати на послаблення за відсутності водяної пари на частотах понад близько 70 ГГц. Методика визначення середніх значень густини водяної пари в атмосфері поблизу земної поверхні, що відчутно впливає на системи, які працюють на частотах понад 20 ГГц, наведено в Рекомендації МСЕ-Р Р.836.

Опади, особливо у вигляді дощу, сприяють сильному поглинанню та розсіюванню радіохвиль, а також, меншою мірою, обертанню площини поляризації хвиль. Ці ефекти мають схильність до поєднання, що викликає значне послаблення. Розрахунки погонного послаблення на даних частотах великою мірою залежать від мікроструктури дощу (наприклад, температури, розподілу кінцевої швидкості, розмірів і форми крапель тощо) та утруднюються через нестачу точних емпіричних даних та складність моделювання мікроструктури дощу.

4.3. Моделі поширення радіохвиль діапазону ультрависоких частот

Інтерес до цих моделей пояснюється передусім необхідністю розв'язання завдань частотно-територіального планування мереж

радіозв'язку (найчастіше – мобільного, що стрімко розвивається) на основі прогнозування можливих зон обслуговування та взаємозавад у мережах.

Для передбачення втрат на трасі поширення застосовують дві групи методів – **статистичні** та **детерміновані**. При цьому моделі можуть бути плоскими та об'ємними (тривимірними у просторі).

Прогноз – імовірне судження, висловлене на підставі спеціальних розрахунків. Для зменшення просторової невизначеності прогнозу спираються не на гіпотетичне розміщення випромінювачів та приймачів, а на реальний стан середовища.

Прогноз «покриття зони» електромагнітним полем випромінювачів визначається як імовірнісне судження про виконання вимог до якості функціонування системи. Якщо обмежуватися лише енергетичною моделлю в радіолініях, то характер флуктуації амплітуди напруженості поля можна оцінювати медіанним значенням рівня поля, середньоквадратичним відхиленням його флуктуації та параметром, що характеризує наявність (зв'язаність системи) або відсутність умов прямої видимості між антенами під час ПРХ.

Статистичні методи ґрунтуються на тривалому вивченні умов поширення сигналу в реальних умовах. Закономірності, виведені на основі відповідних вимірювань, дають уявлення про залежність втрат від відстані за тих чи інших стандартних умов, кількість яких скінченна.

Статистичні методи найчастіше застосовуються для розрахунку втрат на трасі поширення в умовах міста, тоді як детерміновані методи найбільш придатні тоді, коли траса пролягає по дуже нерівній місцевості з перешкодами великого розміру.

В даний час найбільш повною моделлю для прогнозування напруженості поля у системах рухомої радіослужби є рекомендація МСЕ-Р Р.1546 [26]. Медіанне значення напруженості поля визначається з «кривих поширення» (Рекомендації Р.1546–6 “Метод прогнозування «точка-зона» для наземних служб у діапазоні частот від 30 МГц до 4000 МГц”), які являють собою функціональну залежність напруженості поля від дальності зв'язку за певних параметрів радіомереж:

$$E = E(f, r, h_1, h_{ac}, t), \quad (4.12)$$

де f – частота (смуга частот); r – відстань між антенами випромінювача та приймача; h_1 – ефективна висота антени випромінювача, t – час, протягом якого напруженість поля перевищує прогнозований рівень, %.

У рекомендації МСЕ-Р Р.1546 [26] наведено сімейства кривих поширення радіохвиль для частот 100, 600, 2000 МГц. Криві поширення побудовані для потужності передавача 1 кВт при використанні напівхвильового вібратора як антени. Криві наведено для різних висот передавальної антени при висоті приймальної антени 10 м. Для висот, що відрізняються від прийнятих, застосовується лінійна апроксимація кривих.

Криві збудовані для сухопутних трас в умовах середньопересіченої місцевості з перепадом висот $\Delta h = 50$ м. Якщо значення робочих частот проєктованих радіомереж у смугах 30 - 4000 МГц відрізняються від значень, прийнятих при побудові графіків, то використовують відповідні поправочні коефіцієнти, які визначають шляхом інтерполяції або екстраполяції значень напруженості поля для кривих на частотах, наведених у рекомендації.

Приклад кривих напруженості електричного поля для 50 % відсотків часу на сухопутній трасі протяжністю до 1000 км в діапазоні UHF (600 МГц) для різних висот антен передавача над рівнем рельєфу місцевості при потужності передавача $P_{\text{пер}} = 1$ кВт зображені на рис. 4.12. Верхня крива ($E_{\text{макс}}$) вказує на рівень сигналу при поширенні у вільному просторі.

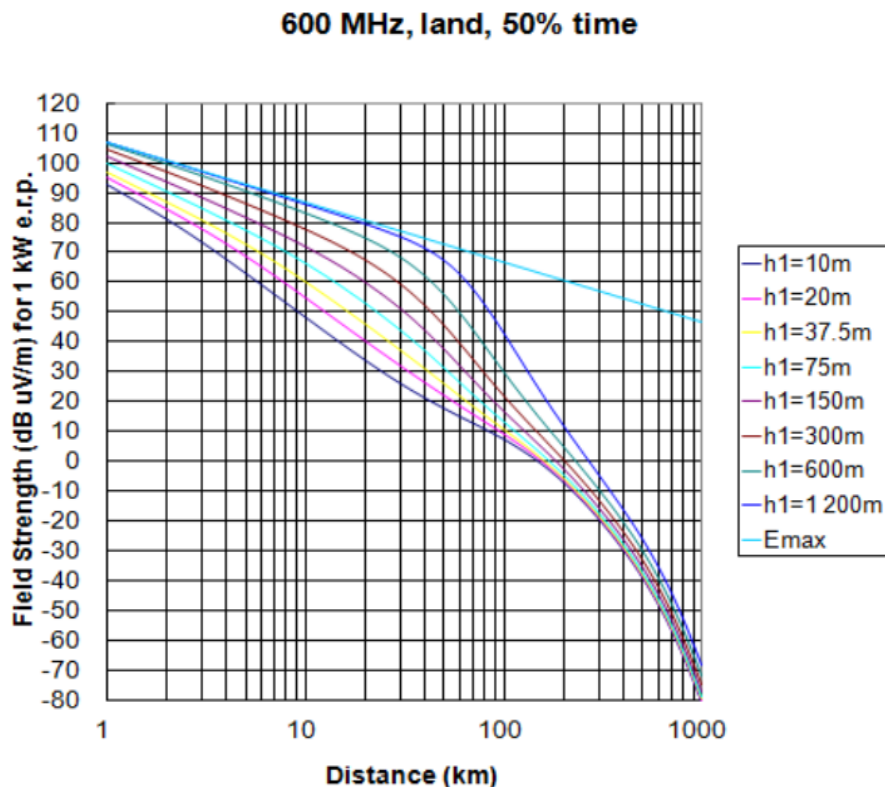


Рисунок 4.12. Криві напруженості поля для діапазону UHF

Загалом альтернативною статистичним методам прогнозування є детерміновані, в яких методики прогнозування якості зв'язку (або, коли йдеться про ЕМС, – рівня радіозавад) базуються на врахуванні двох чинників впливу перешкод на трасі ПРХ, а також впливу місцевих умов.

Детерміновані методи потребують побудови профілю траси радіозв'язку, а через це обсяг обчислень у цьому разі істотно більший.

Перешкоди апроксимуються геометричними фігурами, такими як паралелепіпед, пів нескінченна парабола, конус, циліндр, клин, призма тощо. При розрахунках кожній фігурі відповідає різна точність та швидкість розрахунку загасання електромагнітного поля. Найменшу точність за найвищої швидкості дає апроксимація перешкоди клином.

Для збільшення обсягу інформації, що передається або збільшення швидкості її передачі потрібно розширювати займану смугу радіочастот. Для цього необхідно використовувати більш високі радіочастоти. Але при збільшенні частоти втрати напруженості поля земної хвилі суттєво зростають. Це приводить до необхідності *використання антен, піднятих на висоту*.

Детерміновані методи розрахунку загасання в радіолініях УКХ діапазону передбачають побудову профілю траси радіозв'язку. Побудова профілю траси здійснюється відповідно до Рекомендації МСЕ-Р Р.452 [22].

Профіль траси – це графічне або цифрове представлення вертикального перерізу земної поверхні між двома точками (зазвичай між передавачем і приймачем), яке відображає рельєф місцевості та перешкоди на шляху поширення радіосигналу.

Область прямої видимості простягається до радіогоризонту і зазвичай характеризується наявністю хвиль трьох типів – **прямой, відбитой та земної**.

Область простору, істотна для поширення радіохвиль, – це область, в якій зосереджена *основна частина потужності*. Таку область спостерігають поблизу прямої, що з'єднує передавач з приймачем. Енергію хвиль сконцентровано у відповідних зонах, які мають вигляд еліпсоїда обертання р фокусами у місті розташування антен кореспондентів – так званих **зонах Френеля**. Як правило суттєвим для ПРХ розглядається об'єм першої зони Френеля.

Відстань прямої видимості R називається відстань між передавальною та приймальною антенами, при яких пряма лінія, що з'єднує ці антени, торкається земної поверхні.

Для розрахунку радіогоризонту в цих діапазонах ДВЧ/УВЧ з урахуванням рефракції використовують наступний вираз:

$$R_0[\text{км}] = 4,12(\sqrt{h_1[\text{м}]} + \sqrt{h_2[\text{м}]}) , \quad (4.13)$$

де h_1 і h_2 – висоти підвісу передавальної та приймальної антен відповідно.

Без урахування дифракції замість 4,12 використовується коефіцієнт 3,57.

Виходячи з відстані прямої видимості виділяють три характерні зони, в яких можуть бути довільно розташовані антени.

1). Якщо відстань між антенами $R < 0,8 \cdot R_0$, то кажуть, що антена знаходиться в **зоні освітленості**. Причому якщо $R < 0,2 \cdot R_0$, то поверхню землі можна вважати плоскою.

2). Якщо відстань між антенами $0,8 \cdot R_0 < R < 1,2 \cdot R_0$, то антена знаходиться в **зоні півтіні**;

3). Якщо відстань між антенами $R > 1,2 \cdot R_0$, то антена знаходиться в **зоні тіні**.

Для прогнозування втрат поширення радіохвиль при їх поширенні визначається **тип траси** між радіопередавачем та радіоприймачем за такою класифікацією:

- траси прямої видимості з просвітом у першій зоні Френеля;
- траси прямої видимості з дифракцією на субтрасах (частковим закриттям першої зони Френеля об'єктами рельєфу місцевості);
- заобрійні траси.

Розглядається або об'єм першої зони Френеля, або об'єм, який дає змогу врахувати можливість приходу радіохвилі в точку приймання багатьма шляхами («трасова багатошляховість»).

Радіус першого еліпсоїда Френеля R_{F1} (м) для будь-якої точки траси визначається у рекомендації МСЕ-Р Р.530-18 [21] за формулою:

$$R_{F1} = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}}, \quad (4.14)$$

де: f – частота (ГГц);

d – довжина траси (км);

d_1 і d_2 – відстань (км) від терміналів до перешкоди на трасі.

У природних середовищах поверхня Землі, якщо не розглядати пересічену місцевість, найчастіше має шорсткий характер. Такі поверхні в моделях радіотрас можуть розглядатися як **гладкі** за умови, що нерівності поверхні задовольняють **критерію Релея** – фронт хвилі, відбитої від шорсткої поверхні, може відхилитися від площини, перпендикулярній напрямку поширення хвилі, не більше чим на чверть довжини хвилі. З цього допущення випливає обмеження на величину нерівності поверхні

$$h_{\text{доп}} \leq \frac{\lambda}{8 \cdot \cos \theta}, \quad (4.15)$$

де $h_{\text{доп}}$ – відстань між площиною, проведеною над шорсткою поверхнею так, щоб вона торкалась верхівок найвищих нерівностей, і площиною, проведеною через найнижчі впадини нерівностей; λ – довжина хвилі; θ – кут падіння хвилі на шорстку поверхню.

Критерію Релея повинні задовольняти всі нерівності, що знаходяться в межах ділянки поверхні, істотної при відбитті радіохвилі (площа $S_{\text{ф}}$ на рис. 4.6, а). Уважають, що відбиття радіохвиль від такої поверхні буде дзеркальним.

Якщо відстань між кореспондентами задовольняє умові

$$r_{\text{км}} \leq 7 \cdot \sqrt[3]{\lambda_{\text{м}}}, \quad (4.16)$$

то поверхню Землі можна вважати **плоскою**, тобто задачу розповсюдження

радіохвиль вздовж поверхні Землі можна вирішити без урахування явища дифракції. Вираз (4.16) називають критерієм Фейнберга – **критерієм плоскої Землі**.

Для розрахунку напруженості поля у зоні освітленості для гладкої поверхнею землі використовують **інтерференційну формулу**. Повна інтерференційна формула показує, що в точці прийому величина напруженості поля визначається як *результат дії двох променів з урахуванням їх фазових співвідношень*, коефіцієнтів підсилення антен у напрямку точки відбиття від поверхні Землі, електричних та геометричних характеристик зони відбиття, поляризації хвилі тощо (рис. 4.13). Інтерференційний множник V пов'язує комплексну амплітуду сумарного електричного поля $E_{\text{ІНТЕРФ}}$ з комплексною амплітудою поля у вільному просторі E_0 .

Двопроменеву модель застосовують при розрахунках радіорелейних ліній прямої видимості та каналів рухомого радіозв'язку.

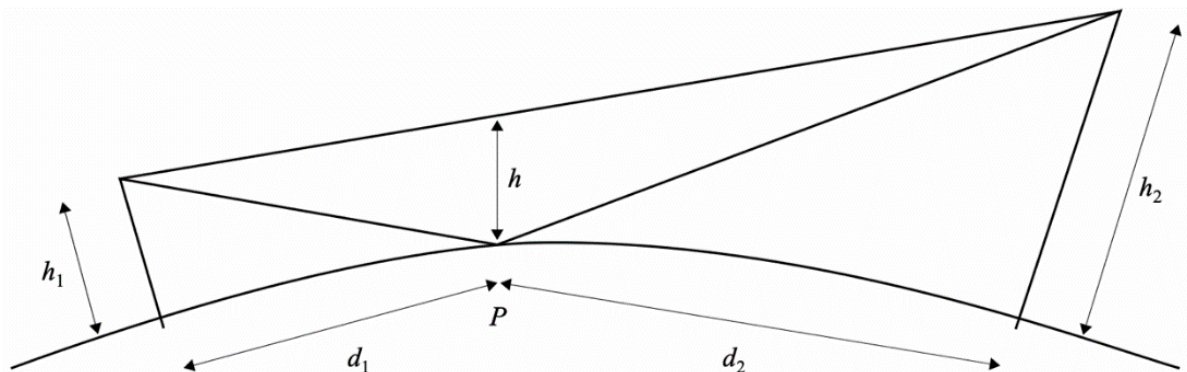


Рисунок 4.13. Щодо пояснення інтерференційної формули (двопроменева модель)

Якщо поверхня Землі плоска, а антени слабоспрямовані або не ненаправлені, інтерференційний множник послаблення визначається як

$$V = \sqrt[2]{1 + R^2 + 2R\cos(\Phi + k\Delta r)}, \quad (4.17)$$

де $R = Re^{j\Phi}$ – модуль і фаза коефіцієнта відбиття; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; $\Delta r = 2h_1h_2/r$ – різниця ходу відбитого і прямого променів.

На практиці, як правило, значення кута ковзання має значення $< 1^\circ$. При таких значеннях кута ковзання можна вважати $R = 1$, $\Phi = 180^\circ$, тобто $R = -1$. Формула для розрахунку множника ослаблення в цьому випадку суттєво спрощується:

$$V = 2 \sin \frac{2\pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot r}. \quad (4.18)$$

Вираз (4.18) називається спрощеною інтерференційною формулою і, як і повна інтерференційна формула, він характеризує інтерференційну структуру поля. В цьому випадку, на відміну від більш загального, максимальні значення множника ослаблення дорівнює двом, а мінімальні –

нулю. Це пов'язано з тим, що втрат при відбитті від землі не відбувається (рис. 4.13).

На великих відстанях r , коли кут падіння хвилі близький до максимального і різниця ходу променів стає менше половини довжини хвилі ($\Delta r < \lambda/2$), значення модуля та фази коефіцієнта відображення незалежно від поляризації випромінювання прагнуть значень $R = 1, \Phi = \pi$, та інтерференційний множник визначається за формулою Введенського [30]:

$$V_{\text{Введ}} \approx k \cdot \Delta r \approx \frac{4 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot r}. \quad (4.19)$$

На рис. 4.14 наведено графік залежності інтерференційного множника V від відстані.

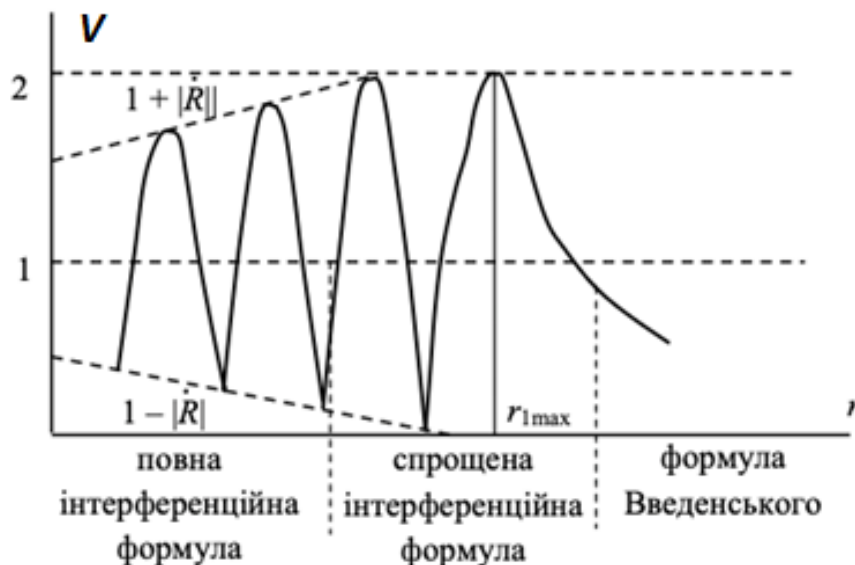


Рисунок 4.14. Графік залежності інтерференційного множника від відстані (двопроменева модель)

При зміні відстані множник ослаблення і величина напруженості поля в точці прийому проходять послідовно через ряд максимумів і ряд мінімумів (рис. 4.13). Причиною цього є синфазність або протифазність прямого і відбитого променів. На рис. 4.13 верхня пунктирна лінія є обвідною максимумів, а нижня – обвідною мінімумів V , що вказує на інтерференційну структуру напруженості поля.

Саме через це формула (4.17) отримала назву „інтерференційної”. При цьому необхідно мати на увазі, що як модуль коефіцієнта відбиття, так і його фаза залежать від відстані. Це відбувається внаслідок зміни з відстанню значення кута ковзання, а отже і значень вказаних величин.

При розрахунку напруженості поля за інтерференційними формулами досить знати електричні параметри землі в межах суттєвого для відбиття радіохвиль майданчика, тому що решта поверхні землі практично не впливає на напруженість поля в точці прийому.

На багатьох трасах поширення трапляються одна або кілька окремих перешкод, і тому доцільно оцінити втрати, спричинені такими перешкодами. Щоб здійснити такі розрахунки, необхідно ідеалізувати форму перешкод, припустивши, що вони або клиноподібними невеликою товщиною, або об'ємними гладкими об'єктами з добре позначеним радіусом кривизни у вершині. Реальні перешкоди, зрозуміло, мають складніші форми, отже дані, подані у цій Рекомендації, слід розглядати лише як наближені. У цих моделях не враховано профіль, перпендикулярний до напрямку радіолінії, який може суттєво вплинути на дифракційні втрати.

Область дифракції або тіні – це область земної поверхні, де немає прямої хвилі, а поширення відбувається внаслідок того, що хвиля огинає земну поверхню та її нерівності. Дифракційну здатність мають хвилі декаметрового та більш довгохвильових діапазонів. Хвилі метрового та дециметрового діапазонів дифрагують лише нерівності, сумірні з довжиною хвилі.

Область напівтіні є проміжною між областями прямої видимості та дифракції.

Дифракційні втрати залежать від типу місцевості та рослинності. При заданому просвіті траси дифракційні втрати варіюватимуться від мінімального значення у разі одиничного клиноподібного перешкоди до максимального у разі гладкої сферичної Землі. Методи розрахунку дифракційних втрат для цих двох випадків, а також для трас над пересіченою місцевістю обговорюються в Рекомендації МСЕ–Р Р.526 [19].

Розрахунок напруженості поля у зоні тіні.

При наближенні відстані R до відстані прямої видимості R_0 інтерференційні формули дають напруженість поля в точці прийому, що дорівнює нулю. Це не відповідає дійсності, бо їх досвіду відомо, що поле існує не тільки на межі прямої видимості, а й на значно більших відстанях. Це з дифракцією (огинанням) хвилями випуклості земної кулі.

Розрахунок напруженості поля у зоні півтіні проводиться також з допомогою дифракційних формул.

Посилення перешкодою. На трасах з високо піднятими антенами часто розташовуються перешкоди, що затіняють. Роль таких перешкод можуть грати гірські масиви чи гряди пагорбів, і навіть міські споруди, об'єкти іншого призначення.

Розрахунок базових втрат, які виникають внаслідок *дифракції радіохвиль*, проводиться відповідно до Рекомендацій МСЕ–Р Р.526-15 [19] та МСЕ–Р Р.452-15 [22]. Дифракція радіохвиль проявляється за наявності топографічних перешкод у першій зоні Френеля.

Для розрахунку втрат, породжених дифракцією радіохвиль, форму топографічних перешкод необхідно ідеалізувати і *віднести їх до клиноподібних (їхньою товщиною можна знехтувати) або об'ємних гладких об'єктів з відповідним радіусом кривизни біля верхівки*. Якщо на поверхні топографічної перешкоди є нерівності, висота яких не перевищує значень

$$\Delta h = 0,04 \sqrt[3]{R \times \lambda}, \text{ м}$$

де R – радіус кривизни топографічної перешкоди, а λ – довжина хвилі, м, топографічна *перешкода вважається гладкою*. У протилежному випадку вона вважається *клиноподібною*.

За розрахованим значенням параметра Δh визначається тип траси поширення радіохвиль:

- траса над гладкою місцевістю;
- траса з ізолюваними топографічними перешкодами, де можна визначити домінуючі перешкоди;
- траса над горбистою місцевістю, де жодна з перешкод не може бути класифікована як домінуюча.

Дифракційні втрати над усередненою місцевістю, якщо їх величина перевищує приблизно 15 дБ, можна апроксимувати за допомогою рівняння [21]:

$$A_d = -20h/F_1 + 10 \quad \text{дБ},$$

де h – різниця висот (в метрах) між найбільш значною перешкодою на трасі та її траєкторією (h має негативне значення, якщо верхня частина перешкоди, що розглядається, знаходиться вище фактичної лінії прямої видимості), а F_1 – радіус першого еліпсоїда Френеля,

Методики та формули для розрахунку базових втрат поширення радіохвиль з дифракцією для різних моделей перешкод наведені у вищеназваних рекомендаціях МСЕ [19].

Як приклад наведемо залежність базових втрат поширення радіохвиль з дифракцією $L_{\text{дифр}\Lambda}$ на одній ізолюваній клиноподібній топографічній перешкоді:

$$L_{\text{дифр}\Lambda} = J(v) = 6,9 + 20 \lg \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right),$$

де v – узагальнений безрозмірний параметр, який характеризує геометрію траси поширення радіохвиль. Значення параметра дифракції v розраховуються за однією з нижченаведених формул залежно від наявності даних щодо характеристик траси:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}; \quad v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}}; \quad v = \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}}; \quad v = \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \alpha_1 \alpha_2};$$

де h – висота верхівки топографічної перешкоди над прямою лінією, що з'єднує обидва кінці траси (якщо верхівка перешкоди знаходиться нижче цієї лінії, h вважається від'ємною величиною);

d_1 і d_2 – відстань від верхівки топографічної перешкоди до обох кінців траси, (км);

θ – кут дифракції (в радіанах);

α_1 і α_2 – кути між верхівкою топографічної перешкоди і одним з кінців траси, що визначають кут дифракції.

Розрахунок параметра v проводиться відповідно до рис. 4.15 з урахуванням такого: вважається, що дифракційні втрати на трасі поширення радіохвиль не перевищують 1 дБ, якщо значення параметра v менше мінус 0,78 (перешкода не потрапляє в ту частину першої зони Френеля, радіус якої становить $0,6 \cdot R_{F1}$, де R_{F1} – радіус першої зони Френеля, параметри h , d_1 , d_2 і λ повинні вимірюватися в однакових одиницях).

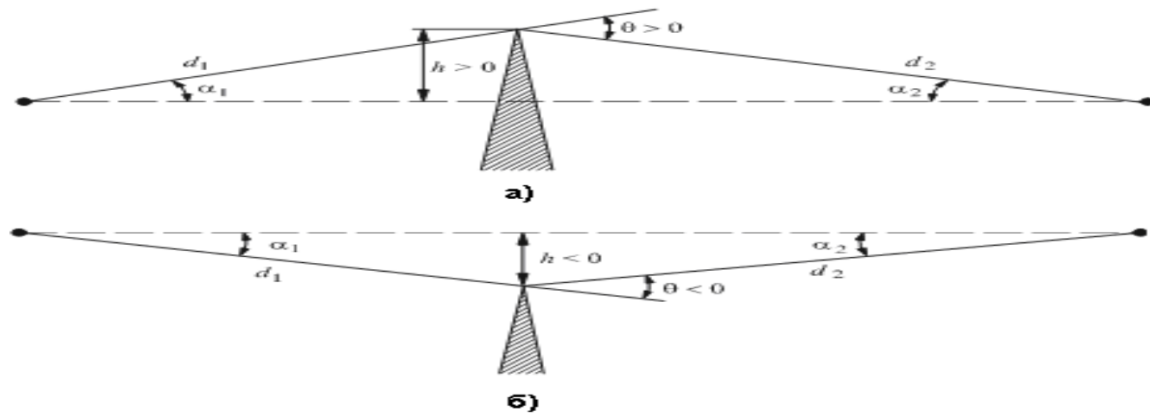


Рисунок 4.15. Параметри, які характеризують геометричні властивості траси з дифракцією радіохвиль на одинокій клиноподібній топографічній перешкоді

Для визначення базових втрат поширення радіохвиль на трасі з дифракцією на одній клиноподібній перешкоді можна скористатися експериментально отриманим графіком, наведеним на рис. 4.16.

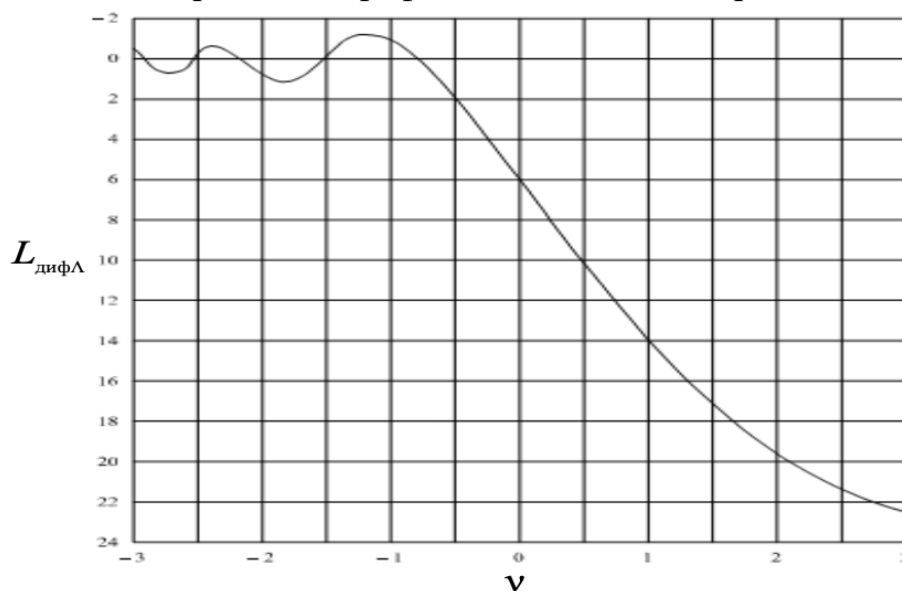


Рисунок 4.16. Залежність дифракційних втрат (посилення) на одинокій клиноподібній топографічній перешкоді від значення параметра дифракції v

Базові втрати поширення радіохвиль з дифракцією на одинокій заокругленій топографічній перешкоді розраховуються за формулою:

$$L_{\text{дифрR}} = L_{\text{дифр}\lambda} + T(m, n), \text{ дБ},$$

де: $L_{\text{дифр}\Lambda}$ – втрати на еквівалентній клиноподібній перешкоді, верхівка якої збігається з точкою перетинання проекцій променів вздовж “лінії обрію” від передавача і приймача для гладкої перешкоди, що розглядається, дБ;

$T(m,n)$ – додаткові втрати, обумовлені кривизною топографічної перешкоди, дБ.

Необхідні формули для розрахунку втрат поширення радіохвиль та визначення радіусу кривизни заокругленої топографічної перешкоди наведені у Рекомендації ITU-R P.526 (рис. 4.17).

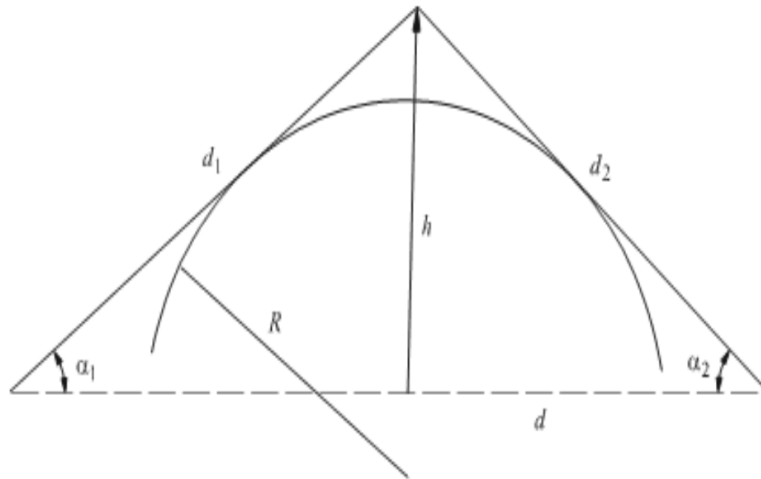


Рисунок 4.17. Параметри, які характеризують геометрію траси з дифракцією радіохвиль на одинокій заокругленій топографічній перешкоді

Базові втрати поширення радіохвиль з *дифракцією на двох одиноких клиноподібних топографічних перешкодах* розраховуються за формулою:

$$L_{\text{дифр}\Lambda} = L_{\text{дифр}1} + L_{\text{дифр}2} + L_{\text{кор}}, \quad \text{дБ}$$

де: $L_{\text{дифр}1}$ і $L_{\text{дифр}2}$ – втрати поширення радіохвиль на першій і другій дифракційних трасах, $L_{\text{кор}}$ – поправочний коефіцієнт, який враховує геометричне рознесення між верхівками топографічних перешкод.

Розраховуються здійснюються за формулами, які наведеною у Рекомендації МСЕ.

Геометрія траси наведена на рис. 4.18.

Якщо одна з клиноподібних топографічних перешкод значно більше впливає на загальне значення втрат ніж інша, необхідно визначити основну і другорядну перешкоду.

Якщо топографічних перешкод на трасі поширення радіохвиль більше ніж дві, базові втрати поширення радіохвиль розраховуються за методом “каскаду циліндрів” або методом каскадних клиноподібних перешкод (інша назва – метод Deugout).

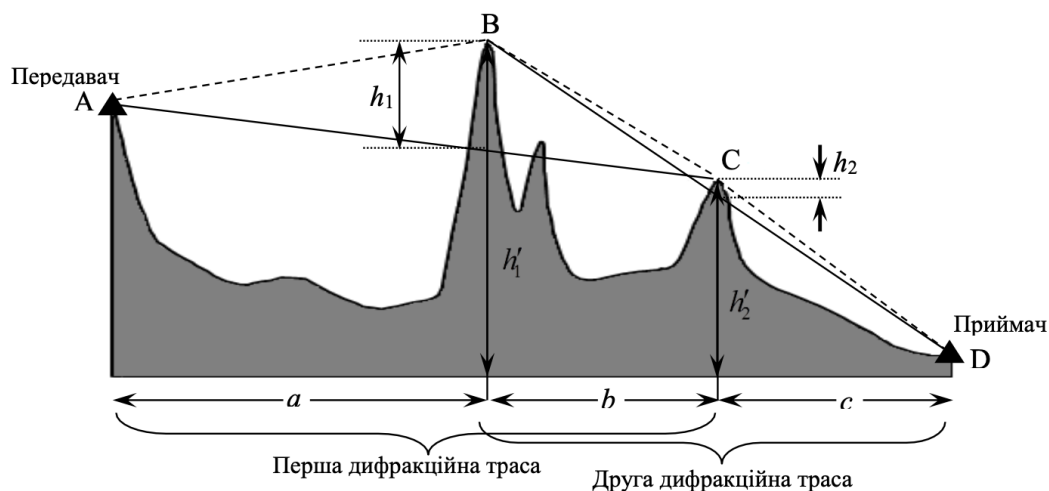


Рисунок 4.18. Параметри, які характеризують геометричні властивості траси з дифракцією радіохвиль на двох клиноподібних топографічних перешкодах

Якщо використовують метод “каскаду циліндрів”, закриту трасу між передавачем і приймачем необхідно розділити на декілька окремих ділянок (частин). Межами кожної такої ділянки є топографічні перешкоди, що закривають лінію прямої видимості між передавальною і приймальною антенами.

Траси поділяють на ділянки за методом “натягнутої струни”, відповідно до якого межі ділянок траси визначаються як точки дотику уявно натягнутої струни між передавачем і приймачем до поверхні землі (враховуючи її кривизну). Для поділу траси на ділянки за методом “натягнутої струни” використовуються пояснення, наведені на рис. 4.19.

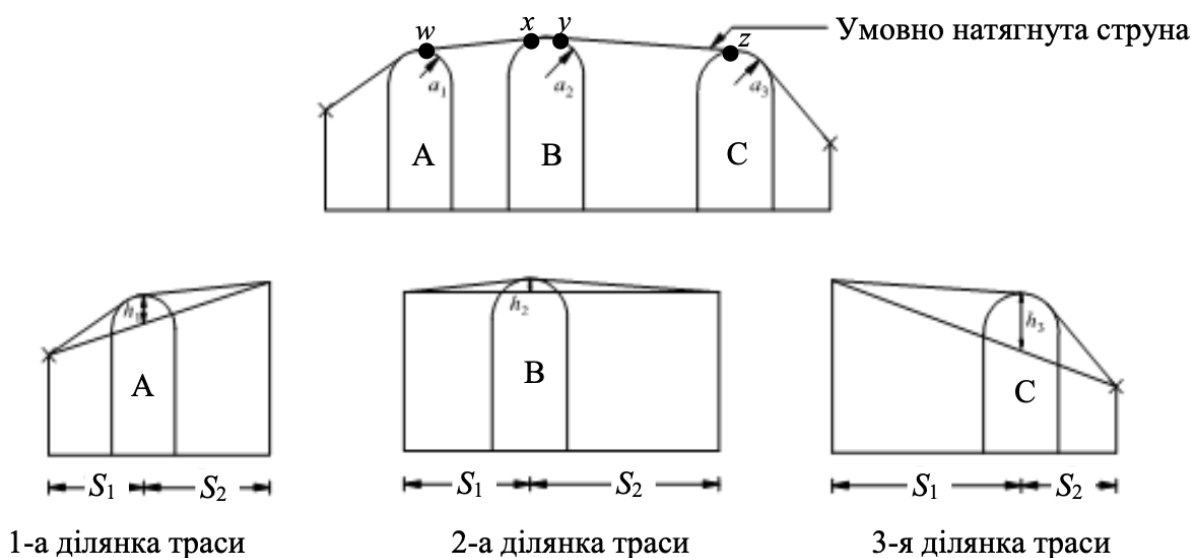


Рисунок 4.19. Ілюстрація з поясненнями до методу “каскаду циліндрів” і методу “натягнутої струни”

У разі використання методу “каскаду циліндрів” базові втрати поширення радіохвиль з дифракцією на декількох топографічних перешкодах розраховуються за формулою:

$$L_{\text{диф}} = \sum_{i=1}^N L'_{\text{диф}i} + L''(wx)_i + \sum_{i=1}^N L''(yz)_i - 20\lg C_N, \text{ дБ},$$

де: $L'_{\text{диф}i}$ – втрати за рахунок дифракції на i -му циліндрі;

$L''(wx)_i$ та $L''(yz)_i$ – втрати під час поширення радіохвиль вздовж лінії прямої видимості на відповідних ділянках між перешкодами;

w, x, y, z – точки на топографічних перешкодах, між якими існує пряма видимість;

C – поправочний коефіцієнт, який враховує кількість перешкод на трасі і особливості їхнього географічного розташування.

Складові $L''(wx)_i$ та $L''(yz)_i$ у наведеній формулі розраховуються відповідно до Рекомендації МСЕ–Р Р.526.

Варто зазначити, що програмна реалізація дифракційної аналітичної моделі доволі трудомістка.

Область далекого тропосферного поширення пролягає на відстані близько 100...1000 км від земної поверхні. У вигляді тропосферних хвиль можуть поширюватися коливання частот 40...10000 МГц. Поширення за рахунок розсіювання у тропосфері супроводжується великими втратами. Тому з огляду на завади, які виникають при тропосферному поширенні, на лініях зв'язку використовуються передавачі потужністю в десятки кіловат.

Втрати (додаткові до базових втрат поширення радіохвиль), спричинені **тропосферним розсіюванням радіохвиль**, розраховуються відповідно до Рекомендації МСЕ–Р Р.452 [22]. Відповідно до зазначеної Рекомендації втрати поширення радіохвиль, які виникають внаслідок їх тропосферного розсіювання $L_{\text{троп}}$ (значення яких не перевищені протягом будь-якого відсотка часу p , меншого за 50%), розраховуються за формулою:

$$L_{\text{троп}} = 190 + L_f + 20\lg d + 0,573 \cdot \theta - 0,15N_0 + L_c + A_g - 10,1[-\lg(p/50)]^{0,7} \text{ дБ},$$

де: L_f – втрати, що залежать від частоти: $L_f = 25\lg f - 2,2[\lg(f/2)]^2$, дБ,

L_c – втрати, які обумовлені взаємозв'язком апертури антен з навколишнім простором,

$$L_c = 0,051 \cdot e^{0,055(G_{\text{прд}} + G_{\text{прм}})}, \text{ дБ},$$

N_0 – заломлююча здатність поверхні на рівні моря всередині траси (табличне значення);

A_g – поглинання в атмосферних газах з урахуванням погонного ослаблення в парах води $\gamma_w(\rho)$ (зазвичай щільність парів води по всій довжині траси дорівнює 3 г/м³);

$$A_g = [\gamma_0 + \gamma_w(\rho)] \cdot d$$

θ – кутова відстань, яка враховує застосування моделі екранування місцевістю;

ρ – питома частка ділянки траси, що проходить над водою.

Впровадження стільникових мереж рухомого радіозв'язку стимулювало дослідження та розробку методів розрахунку рівнів сигналів в умовах міської забудови. Однією з перших була запропонована модель Окамура, яка розроблена на основі багаторічних експериментальних досліджень поширення радіохвиль у м. Токіо. Графоаналітичний метод розрахунку за моделлю Окамура створює певні незручності. Емпіричні формули, які апроксимують криві Окамура, були запропоновані М. Хата та отримали назву моделі Окамура – Хата [2]. Формули спеціально підібрані для умов розповсюдження радіохвиль у різних територіальних зонах: місто, заміська зона, сільська місцевість. Ця модель увійшла до складу рекомендації МСЕ–Р Р.529 для прогнозування напруженості поля в наземному сухопутному рухомому радіозв'язку.

Модель Окамури. Моделі Хати (1980 р.) передувала модель Окамури (1968 р.), згідно з якою напруженість поля в точці приймання визначається за емпіричною формулою, дБ:

$$E = E_0 - A(r/f) + H_1(h_1, r) + H_2(h_2, r) + K_1 + K_2 + K_3 + K_4, \quad (4.20)$$

де: E_0 – напруженість поля, що визначається загасанням енергії хвиль у вільному просторі;

$H_1(h_1, r)$ і $H_2(h_2, r)$ – “висотні” коефіцієнти для передавальних і приймальних антен;

K_1, K_2, K_3, K_4 – коефіцієнти, що враховують відповідно характер забудови місцевості, горбистість та гористість її рельєфу, наявність перешкод типу “суша–море–суша”.

Модель Окамури базується на великому обсязі експериментальних графіків залежності медіанного значення L від даних, які є вихідними для проектування на частотах 100...13000 МГц при висотах стаціонарних антен $h_1 = 20...1000$ м та мобільних $h_2 = 1...10$ м на відстанях між ними $r = 1...100$ км. Рельєф місцевості передбачається при цьому характерним для приміської зони, середнього за розміром міста та мегаполісу.

Модель Хати. Ця модель є найбільш універсальною статистичною моделлю для прогнозування втрат сигналу за різних умов. Вона ґрунтується на аналітичній апроксимації результатів практичних вимірювань. Набір емпіричних формул та поправочних коефіцієнтів, отриманий у результаті такої апроксимації, дає змогу обчислити середні втрати для різних типів місцевості [27].

У районах із типовою міською забудовою (typical urban) втрати становлять

$$L_{\text{urban}} = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_1 + (49,9 - 6,55 \lg h_1) \lg r + a(h_2) + a(v_r) + a(b) + a(h_1, f),$$

де f – робоча частота, МГц;

h_1 і h_2 – висота, м, розміщення відповідно передавальної і приймальної антени;

r – відстань, км, між ними.

$a(h_2)$ – поправочний коефіцієнт, що залежить від типу місцевості.

Для малих і середніх міст $a(h_2) = (1,1 \lg f - 0,7) h_2 - 1,56 \lg f + 0,8$

Для великих міст $a(h_2) = 8,29 (\lg 1,54 h_2)^2 - 1,1$ якщо $f < 200$ МГц

$a(h_2) = 3,2 (\lg 1,75 h_2)^2 - 4,97$ якщо $f > 200$ МГц

$a(v_r)$ – коефіцієнт, що враховує характер місцевості:

$$a(v_r) = (1 - v_r) [(1 - 2v_r) \gamma_1 + 4v_r \gamma_2]$$

$v_r = 0$ (для сільської місцевості), $v_r = 0,5$ (приміська зона), $v_r = 1$ (місто).

γ_1 та γ_2 – допоміжні коефіцієнти: $\gamma_1 = 4,78 (\lg f)^2 - 18,33 \lg f + 40,94$;

$$\gamma_2 = 2 [\lg(f/28)^2 + 5,4]$$

$a(b)$ – коефіцієнт, що залежить від щільності b міської забудови

$$a(b) = 25 \lg b - 30$$

$a(h_1, f)$ – коефіцієнт, що ураховує сферичність Землі.

Втрати для типових приміських районів (typical suburban), дБ

$$L_{\text{suburban}} = L_{\text{urban}} - 2 \lg(f/28)^2 - 5,4$$

Для напіввідкритої місцевості

$$L_{\text{suburban}} = L_{\text{urban}} - 4,78 \lg(f)^2 + 18,33 \lg(f) - 35,94$$

Для відкритої, сільської місцевості (rural)

$$L_{\text{suburban}} = L_{\text{urban}} - 4,78 \lg(f)^2 + 18,33 \lg(f) - 40,94.$$

Наведені формули забезпечують задану точність для $f = 100 \dots 3000$ МГц, $h_1 = 25 \dots 300$ м; $h_2 = 1 \dots 10$ м; $r = 1 \dots 100$ км.

Щільність міської забудови передбачається 3–50% (найбільш імовірне значення становить близько 16%), а ступінь урбанізації — від 0 до 1.

Залежності значення втрат L_{urban} , отримувані в результаті використання моделі Хати, від відстані r , частоти наведено на рис. 4.16.

Використовуються аналогічні залежності для інших смуг частот (1800 МГц) та для інших висот антен 50 м, 100 м).

Програмна реалізація моделі Хати не становить труднощів, оскільки функція містить усього п'ять аргументів:

- 1) середню частоту, МГц;
- 2) висоту встановлення передавальної антени, м;
- 3) відстань між передавальною та приймальною антенами, м;
- 4) тип місцевості, де відбувається ПРХ;
- 5) висоту приймальної антени, м.

На рис. 4.20 проставлені графіки, що показують залежність втрат L_{urban} , отримувані в результаті використання моделі Хати, від відстані r , частоти (для смуги частот 900 МГц) та висоти встановлення антен.

Модель Хати не охоплює всіх результатів, що їх здобув Окамура, і справджується для «квазіплоского» міста (з урахуванням обмежень моделі Хати). Моделі Окамури й Хати зафіксовано в документах МСЕ–Р Р.529.

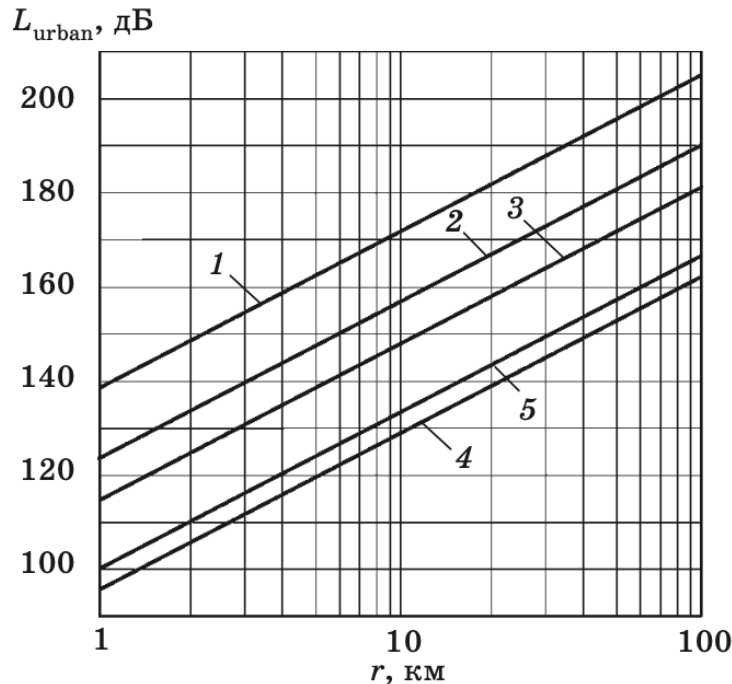


Рисунок 4.20. Графіки залежності втрат L_{urban} , обчислюваних згідно з моделлю Хати, від відстані r і частоти (смуга 900 МГц) для різних значень висоти встановлення антени базової станції (50 м,) та різних типів місцевості: 1 — усередині міських будівель; 2 — міська місцевість; 3 — приміська місцевість; 4 — відкрита місцевість; 5 — сільська місцевість

Асоціація телекомунікаційної промисловості (TIA) рекомендувала модифікувати модель Hata, щоб охопити ширший діапазон вхідних параметрів і відстаней. Модель відома як **модель Hata-Davidson** і враховує поправки для відстаней до 300 км і висот підвісу антен передавачів – до 2500 м. Це було опубліковано в TSB-88A [28]. Формули моделі Хата–Девідсона для розрахунку втрат такі:

$$L_{HD} = L_{Hata} + A(h_1, d_{[км]}) - S_1(d_{[км]}) - S_2(h_1, d_{[км]}) - S_3(f_{[МГц]}) - S_4(f_{[МГц]}, d_{[км]}),$$

де

$$L_{Hata} = 69,55 + 26,16 \cdot \lg f_{[МГц]} - 13,82 \cdot \lg h_{1[M]} - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \cdot \lg h_{1[M]}) \lg d_{[км]},$$

$a(h_2)$ – поправочний коефіцієнт для висоти встановлення антени абонентської станції:

$$a(h_2) = \begin{cases} (1,1 \lg f[\text{МГц}] - 0,7) \cdot h_2 - (1,56 \lg f[\text{МГц}] - 0,8) & \text{— для середнього та малого міста,} \\ & \text{квазівідкритої та відкритої місцевості;} \\ 8,29(\lg(1,54 \cdot h_2))^2 - 1,1 & \text{— для великого міста та } f_c \leq 300 \text{ МГц *;} \\ 3,2(\lg(11,75 \cdot h_2))^2 - 4,97 & \text{— для великого міста та } f_c > 300 \text{ МГц *;} \end{cases}$$

де f – несуча частота (30-1500 МГц);

h_1 – висота розміщення антени базової станції над середньою місцевістю (НААТ) (20-2500 м);

h_2 – висота розміщення антени абонентської станції (1-10 м);

d – це відстань від передавача (1-300 км);

Перший вираз застосовують для середнього та малого міста, квазівідкритої та відкритої місцевості, другий – для великого міста та $f_c \leq 300$ МГц*, третій – для великого міста та $f_c > 300$ МГц*; * – в деяких публікаціях замість 300 МГц використовують інші номінали частот.

A і S_1 – це коефіцієнти, які розширюють максимальне значення відстані d до 300 км (табл.4.4);

Таблиця 4.4

Значення коефіцієнтів A та S_1

Відстань d , км	$A(h_{1[M]}, d)$	$S_1(d)$
$d < 20$	0	0
$20 \leq d < 64,38$	$0,6237(d-20) \cdot [0,5+0,15 \lg(h_1/121,92)]$	0
$64,38 \leq d < 300$	$0,6237(d-20) \cdot [0,5+0,15 \lg(h_1/121,92)]$	$0,174(d-64,38)$

S_2 – це поправочний коефіцієнт, що збільшує максимальне значення висоти h_1 до 2500 м:

$$S_2(h_{1[M]}, d_{[км]}) = 0,00784 |\lg(9,98/d)| (h_1 - 300) \text{ для } h_1 > 300;$$

S_3 і S_4 – поправочні коефіцієнти, які розширюють робочу частоту:

$$S_3(f_{[МГц]}) = f_{[МГц]} / 250 \cdot \lg(1500/f_{[МГц]}),$$

$$S_4(f_{[МГц]}, d_{[км]}) = [0,112 \lg 10(1500/f_{[МГц]})] (d_{[км]} - 64,38) \text{ для } d_{[км]} > 64,38.$$

Напруженість поля розраховується по наступній формулі:

$$E_{[дБмкВ/м]} = ERP_{[дБВт]} - L_{HD[дБ]} + 20 \lg f_{[МГц]} + 109,35,$$

де: $ERP_{[дБВт]} = P_{Tx[дБВт]} + G_{ант[дБ]}$ – ефективна потужність, що випромінюється;

P_{Tx} – потужність передавача;

$G_{ант}$ – коефіцієнт підсилення антени у напрямку кореспондента.

Існують інші моделі, область застосовності яких обмежується різними факторами, такими як діапазон частот, висота та рівень розміщення антен, відстань між абонентами, параметри забудови, орієнтацією вулиць, наявністю лісу або парку тощо. Найбільш відомими є моделі Ксея – Бергоні, Волфіша – Ікегамі, Сакагамі – Кубої, Парсонса, Акеями, Бардіна–Димовича та інш, деякі з яких наведені у додатку Б [38].

У всіх моделях можна додатково врахувати втрати на проникнення енергії хвиль у будівлі та автомобілі.

Наприклад, орієнтовне значення втрат для частоти 1800 МГц на проникнення в будівлю становить 15 дБ, а в автомобіль – 8 дБ. Можна підвищити точність оцінювання втрат з урахуванням проникнення в будівлю через m залізобетонних перекриттів $L_{\text{буд}}(m)$, дБ.

Втрати передавання $L_{\text{буд}}(m)$ на частотах 1...2,7 ГГц у сухих дерев'яних та цегляних стінах досягають 5...8 дБ; у залізобетонних стінах 6...12 дБ (у вологих стінах втрати збільшуються у 3–4 рази). При проходженні через багатоповерхові перекриття сигнал із частотою 2,7 ГГц у цегляній будівлі послаблюється на 7,5, а в залізобетонній – на 12 дБ.

Одним із прикладів моделі для радіотехнології 5G є технічний звіт (TR), який було підготовлено ETSI “5G; Вивчення моделі каналу для частот від 0,5 до 100 ГГц” [29].

Статистичні моделі потребують незначного обсягу картографічної інформації, а відповідні алгоритми доволі прості, тож вони легко реалізуються програмно.

Але статистичні моделі не дають результатів, що гарантували б упевнене приймання в межах зони обслуговування із заданою якістю: в деяких місцях протягом певної частки часу рівні напруженості поля можуть бути недостатніми для прийнятної якості приймання.

Зі статистичних моделей найбільш універсальними є модель Окамури–Хати, яка дає змогу оцінити медіанне значення втрат для великих і середніх міст, а також приміської зони і сільських районів, та модель Ксея–Бертоні, яка забезпечує точніші результати для умов міста.

В даний час для вирішення практичних завдань прогнозування рівнів сигналів у каналах радіозв'язку різного призначення найбільш широко використовують моделі Введенського, Окамури–Хата та методику розрахунку за рекомендацією МСЕ–Р Р.1546, яка є базовою. На рис. 4.21 наведено результати розрахунків напруженості поля за найбільш поширеними моделями, виконані для умов, за якими побудовані криві поширення радіохвиль у рекомендації МСЕ–Р Р.1546 [30].

На рис. 4.21 крива 1 залежності напруженості поля E дБмкВ/м від відстані є базовою та відповідає рекомендації Р.1546 для частоти $f=100$ МГц при встановленні антени стаціонарної радіостанції на висоті $h_1=20$ м та антени рухомої приймальної радіостанції $h_2=10$ м при потужності передавача 1 кВт та використанні напівхвильових вібраторів як передавальної та приймальної антен. Для зручності та наочності зіставлення результатів розрахунку за іншими моделями (криві 2 – 6) виконані для цих же умов.

Більшість зон обслуговування на реальних трасах перебувають у межах, що описуються формулою Введенського. Результати розрахунків за

формулою Введенського прийнятих параметрів радіомережі представлені кривою 2.

Криві 3, 4, 5 розраховані за моделлю Окамури – Хата для різних умов поширення радіохвиль.

Крива 6 відповідає умовам поширення радіохвиль у вільному просторі. Співвідношення для вільного простору часто використовують як базову складову різних моделей поширення радіохвиль на реальних трасах радіозв'язку. Розрахункові формули визначення напруженості поля і втрат потужності сигналів наведено у рекомендації МСЕ–Р Р.525.

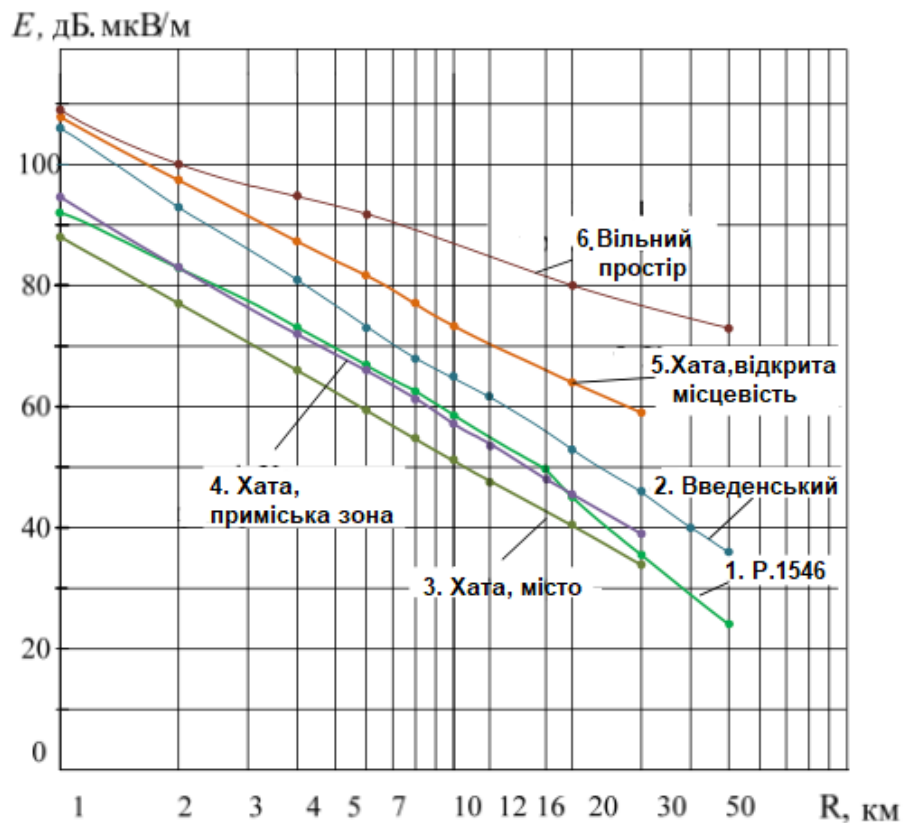


Рисунок 4.21. Залежність напруженості поля від відстані для різних моделей поширення радіохвиль

Результати розрахунків з різних моделей суттєво відрізняються, хоча це не суперечить фізичним уявленням про особливості застосування кожної з них [30].

Базова крива 1 відповідає рекомендації Р.1546 для середньопересічених умов місцевості. Результати розрахунків за формулою Введенського (крива 2) знаходяться вище за базову кривою на 10 дБ, що відповідає умовам відкритої місцевості, а чи не середньопересіченої.

Для реальних умов формулу Введенського доповнюють коефіцієнтом ослаблення напруженості поля $K_{ос}$, значення якого визначають для різних умов поширення радіохвиль за експериментальними даними.

Крива 3, розрахована для умов міста за моделлю Окамура –Хата, розташована нижче базової кривої Р.1546, що відповідає складнішим умовам поширення радіохвиль у містах. Але криві 4 для умов приміської території та 1 для Р.1546 майже збігаються. Різниця напруженості поля не перевищує 2 дБ. Крива 5 для відкритої місцевості за моделлю Окамура –Хата розташована значно вище Р.1546 і нижче напруженості поля у вільному просторі (крива 6), але при невеликих відстанях і значних висотах антен напруженість поля по кривій 5 наближається до умов вільного простору.

Висновки.

Для прогнозування зон втрат радіосигналу розрізняють три основні типи моделей поширення радіохвиль:

- *емпіричні моделі*, які базуються на даних вимірювань, вони прості та використовують статистичні дані, але вони не дуже точні;
- *напівдетерміновані моделі*, які базуються на емпіричних даних і детермінованих аспектах;
- *детерміновані моделі*, які базуються на теорії та вимагають багато геометричної інформації про місце та рельєф, потребують дуже значних обчислювальних зусиль, але вони точніші.

Розрахунок базових втрат лінії радіозв'язку у різних типах середовищ передбачає моделювання трас поширення радіохвиль і/або прогнозування рівня сигналу (напруженості поля сигналу) на заданій відстані від передавача, а також прогнозування зміни рівня сигналу залежно від ситуації на трасі (в середовищі) за відомими експериментально отриманими даними. Формули та моделі для розрахунку базових втрат поширення радіохвиль, які характеризують різні механізми поширення радіохвиль у різних типах середовищ наведені у Додатку 3 до Методики здійснення розрахунків електромагнітної сумісності [38].

У методиці надані наступні рекомендації.

Прояв різних механізмів поширення радіохвиль на трасі відповідного типу залежить від кліматичних умов, частоти, розглядуваного відсотка часу, довжини і топографічних характеристик траси.

На трасах у реальному середовищі одночасно можуть проявлятися декілька механізмів поширення радіохвиль.

Переважаючий механізм поширення радіохвиль для траси відповідного типу визначається з урахуванням такого:

1) у реальному середовищі залежно від задіяної ділянки смуги частот 30 – 4000 МГц діють такі механізми поширення радіохвиль:

поширення радіохвиль у вільному просторі (під яким розуміється однорідне безмежне непоглинаюче середовище, значення відносної діелектричної та магнітної проникності якого дорівнюють одиниці);

поширення радіохвиль в умовах прямої видимості;

дифракція радіохвиль (яка спостерігається на закритих і напівзакритих трасах, або може бути наслідком негативної атмосферної рефракції на трасах прямої видимості);

тропосферне розсіювання радіохвиль;

аномальне поширення радіохвиль (внаслідок рефракції, через штучні хвильоводи тощо);

2) через неоднорідний стан земної атмосфери у реальному середовищі спостерігаються явища, які впливають на поширення радіохвиль:

гідрометеорне розсіювання і поглинання радіохвиль;

рефракція радіохвиль;

відбиття радіохвиль від об'єктів місцевості;

3) для оцінювання впливу тропосфери на поширення радіохвиль використовуються експериментальні дані про фізико-хімічні властивості газів і парів води;

4) під час проходження радіохвилями нижніх шарів атмосфери з різною щільністю виникає явище атмосферної рефракції радіохвиль та викривлення траєкторії поширення радіохвиль у вертикальній площині, ступінь якого змінюється у часі через коливання атмосферного тиску, температури і вологості. Кількісною мірою заломлення радіохвиль є наведений коефіцієнт заломлення або індекс (градієнт) атмосферної рефракції N ;

5) для трас з дифракцією радіохвиль характерна наявність двох областей (зон) поширення:

освітленої зони (від передавача до об'єкта, що закриває трасу);

затіненої/напівзатіненої зони (за об'єктом у напрямку приймача);

6) у неоднорідному середовищі внаслідок випаровування води і насичення тропосфери її парами трапляються випадки утворення штучних атмосферних хвильоводів (переважно над водною поверхнею).

У Рекомендації МСЕ-Р Р.1058 наведено перелік типових об'єктів, які можуть відбивати радіохвилі, і характеристики їхньої відбиваючої здатності.

У розрахунках базових втрат лінії радіозв'язку для визначеного механізму поширення радіохвиль і траси відповідного типу використовуються положення таких Рекомендацій МСЕ-Р:

у розрахунках базових втрат поширення радіохвиль у вільному просторі – положення Рекомендації МСЕ-Р Р.525;

у розрахунках базових втрат поширення радіохвиль на трасах прямої видимості – положення Рекомендації МСЕ-Р Р.530;

у розрахунках базових втрат поширення радіохвиль на трасах з дифракцією радіохвиль – положення Рекомендації МСЕ-Р Р.526;

у розрахунках базових втрат поширення радіохвиль між близько розташованого РО і РО локальних радіомереж, які працюють у смузі частот від 300 МГц до 100 ГГц – положення Рекомендації МСЕ-Р Р.1411;

у розрахунках базових втрат поширення радіохвиль між РО, розташованими всередині приміщень і РО локальних зонних радіомереж, які працюють у смузі частот 0,9 ГГц – 100 ГГц, – положення Рекомендації МСЕ-Р Р.1238.

Формули для розрахунку базових втрат лінії радіозв'язку, які характеризують різні механізми поширення радіохвиль на трасах відповідного типу, наведені у пункті 1 додатка 3 до Методики [38].

Для прогнозування втрат поширення радіохвиль між джерелом і рецептором *корисного сигналу* використовуються графіки для 50% часу і 50% місць розташування. Під час прогнозування базових втрат поширення радіохвиль між джерелом і рецептором *радіозавад* використовуються графіки для 10% часу і 50% місць розташування.

Для отримання більш точних результатів прогнозування базових втрат лінії радіозв'язку між джерелом і рецептором радіозавади виконується з урахуванням положень Рекомендації МСЕ-Р Р.452.

Розрахунки базових втрат лінії радіозв'язку між джерелом і рецептором радіозавади, які відповідають положенням вищезазначеної рекомендації, наведено у пункті 4 додатка 3 до Методики [38].

4.4. Модель нерегулярного рельєфу Лонглі-Райса

Якщо траса поширення радіохвиль перекриває три характерні зони – освітленості, півтіні та зоні тіні, розрахунок втрат поширення радіохвиль необхідно проводити по різним методами з використанням емпіричних, напівдетермінованих та детермінованих моделей. Для проведення таких розрахунків потрібно враховувати дані стосовно рельєфу місцевості, електричні параметри поверхні, рослинність, географічний регіон (стан тропосфери) та ін. Зручно мати таку методику визначення втрат ПРХ, яка універсальна та придатна для комп'ютерного моделювання.

Така модель розроблена Лонглі і Райсом і отримала назву “Модель нерегулярного рельєфу” (*Irregular Terrain Model - ITM*). Метод нерегулярного рельєфу (*ITM*) Лонглі–Райса (LR) [31-33] використовується при прогнозуванні втрат радіосигналів для ліній зв'язку в діапазоні частот від 20 МГц до 20 ГГц. Вона була створений вченими Анітою Лонглі та Філом Райсом з тодішньої Центральної лабораторії поширення радіохвиль у Боулдері, штат Колорадо, для потреб частотного планування телевізійного мовлення в Сполучених Штатах у 1960-х роках і широко використовувався при складанні таблиць розподілу каналів для мовлення VHF/UHF та досі використовується в цих цілях Федеральною комісією зі зв'язку. Він визначає послаблення радіосигналу в порівнянні із поширенням у вільному просторі з використанням профілів місцевості залежно від дальності, безпосередньо враховуючи три основні механізми поширення:

- 1) інтерференція на лінії прямої радіовидимості;
- 2) дифракція на нерегулярному рельєфі місцевості;
- 3) тропосферне розсіяння.

Втрати в радіоканалі (L) визначаються як сума втрат у вільному просторі (L_0) та додаткових втрат реальної траси поширення радіохвиль (L_{LR}), розрахованих за даним методом:

$$L = L_0 + L_{LR}, \text{ дБ}$$

Втрати у вільному просторі розраховуються згідно Рекомендації МСЕ–Р Р.525-4 по формулі (4.4).

Прогнози втрат сигналу для трас у межах радіогоризонту засновані на геометрооптичній теорії променів (двопроменевої теорії) і використовують інтерференційні формули з урахуванням рельєфу місцевості та рефракції. Радіохвиля, що відбивається від ділянок рельєфу місцевості, може прийти в точку приймання кількома траєкторіями. Тобто в цьому випадку спостерігається багатопроменеве поширення радіохвиль. Суттєве значення мають характеристики не тільки зон, що прилеглі до місць розташування антен та зон відбиття (розмір, форма та рельєф ділянки місцевості), а також їх електричні параметри (діелектрична проникність та провідність ґрунту, наявність та тип рослинності).

Зона дифракції передавача простягається від відстані, що відповідає лінії прямої видимості, де просвіт траси становить 60% радіуса першої зони Френеля, до відстані, що знаходиться далеко за межами горизонту передавача, де переважає механізм тропосферного розсіювання. Для трас із загальним горизонтом застосовується теорія дифракції Френеля–Кірхгофа на клиноподібній перешкоді, яка розширюється для прогнозування дифракційного загасання над ізольованими округлими перешкодами. Для трас подвійного горизонту, які лише трохи виходять за обрії, використовується модифікований метод Ван дер Поля–Бреммера для розрахунку напруженості поля в дальній дифракційній області [36].

Для розробки емпіричної моделі довгострокових медіанних еталонних значень втрат сигналу при тропосферному поширенні використовувалася велика вибірка радіоданих регіональних, сезонних та добових змін для декількох кліматичних регіонів і періодів часу.

Для загоризонтних трас – ділянок, що знаходяться за межами радіогоризонту, значення втрат визначаються або втратами при дифракції, або втратами при тропосферному розсіянні, залежно від того, що з них менше. Приклад геометрії загоризонтної траси, який використовуються в Рекомендації МСЕ [40] та у методиці Лонглі–Райса наведений на рис. 4.22.

Оскільки це – емпірична модель, то для розрахунку послаблення радіосигналу для фактичної довжини реальної траси, враховують задані користувачем відсоток часу, відсоток території, де забезпечується радіопокриття, а також відсоток ситуацій.

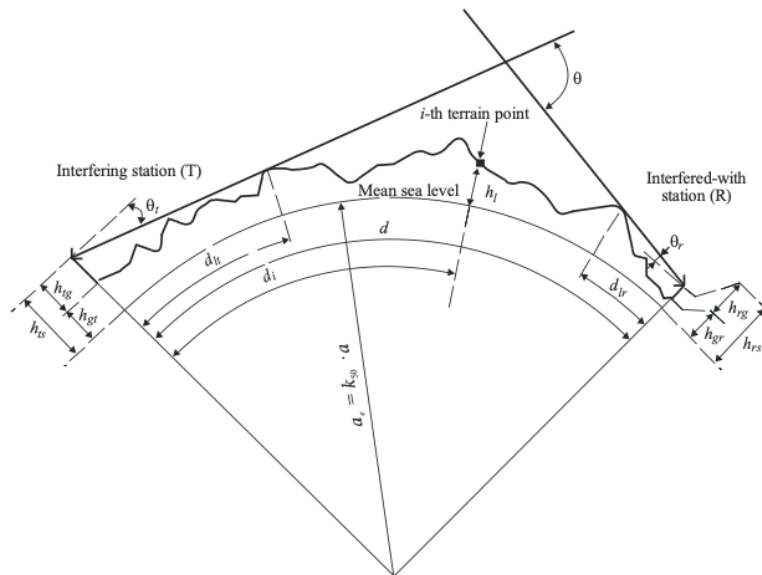


Рисунок 4.22. Приклад профілю загоризонтної траси

Застосування моделі Лонглі–Райса, яка базується на теорії електромагнітного поля (рефракція, інтерференція, дифракція), а також на емпіричних моделях, які розроблені екстраполяцією даних багаточисельних вимірювань у широкому діапазоні рельєфу та кліматичних умов *вручну обтяжливе*, або не неможливо навіть для однієї радіолінії точка–точка [33].

Тому авторами [31, 32] модель Лонглі–Райса була оптимізована для комп'ютерного моделювання, яка у тому числі реалізує об'єднання результатів розрахунків втрат для різних інтервалів радіотраси різними методами.

Модель Лонглі–Райса де-факто є індустріальним стандартом розрахунку зон радіопокриття в Північній Америці.

Об'єктивну оцінку достовірності результатів, які отримані по різним моделям, можуть надати натурні випробування та порівняння експериментальних вимірювань напруженості поля з результатами моделювання.

В [34] наведені порівняння експериментальних вимірювань напруженості поля, які зроблені портативним аналізатором спектру Rohde & Schwarz FSH-3, з результатами моделювання, отриманими з використанням моделі прогнозування покриття ITM (*Irregular Terrain Model* – модель нерегулярного рельєфу), також відомої як модель Longley-Rice, у поєднанні з географічними даними SRTM (*Satellite Radar Topography Mission* – цифрової моделі висот Землі з даних, отриманих спеціально модифікованою радарною системою місії супутникової радіолокаційної топографії) [35] з прогнозами поширення радіохвиль по Рекомендації МСЕ–Р Р.1546 [26] та емпіричною моделлю Хата-Девідсона [28] з використанням НААТ (висоти центру випромінювання антени над середньою висотою місцевості) для цифрового телевізійного мовлення стандарту DVB–T.

Криві поширення в Рекомендації МСЕ-Р Р.1546-6 є дуже точними для коротких відстаней (менше 50 км), але ця модель стає все більш неточною для більших відстаней, сильно занижуючи потужність отриманого сигналу [34]. Нарешті, модель Хата-Девідсона, що використовує НААТ, хоча й досить проста у реалізації та базується на аналітичних наближених рівняннях, є достатньо точною та в середньому дозволяє отримати кращі результати ніж модель МСЕ-Р Р.1546-6.

Моделі МСЕ-Р Р.1546 і Hata-Davidson демонструють збільшення похибки на великих відстанях. Це зрозуміло, тому що межа зони покриття телевізійним мовленням знаходиться як правило за межами населених пунктів, а модель Hata-Davidson була створена насамперед для міської та приміської територій. Зокрема, результати вимірювань показують, що МСЕ-Р Р.1546 в середньому занижує напруженість поля на відстанях, довших за 50 км. Модель Лонглі-Райса, що використовує інформацію про рельєф місцевості (цифрові карти висот) та електричні характеристики поверхні (включаючи рослинність) Землі є більш точнішою, а її результати наближаються до даних реальних вимірювань [34].

Моделі ПРХ реалізовані у різноманітному програмному забезпеченні з використанням цифрових карт місцевості. Огляд програмного забезпечення для розрахунку радіоліній наведено у додатку В.

Контрольні питання та завдання

1. Що таке втрати при передачі радіохвиль?
2. Яким чином визначаються втрати сигналу у вільному просторі?
3. За якою формулою (в логарифмічних одиницях) розраховується потужність сигналу на вході приймача?
4. Наведіть основне рівняння для енергетичного розрахунку радіоліній.
5. Що впливає на значення додаткових втрат енергії на трасі зв'язку?
6. Що таке відстань прямої видимості?
7. Профілі трас. Зона Френеля. Області або зони радіоліній.
8. Поясніть труднощі визначення загасання енергії радіохвиль у середовищі поширення. Чим вони зумовлені?
9. Механізми поширення радіохвиль Наведіть характеристику кожного із можливих механізмів ПРХ.
10. Що таке земні радіохвилі?
11. Що таке прямі радіохвилі?
12. Що таке іоносферні радіохвилі?
13. Поясніть явище інтерференції радіохвиль.
14. Поясніть явище рефракції.
15. Поясніть явище дифракції.
16. Який основний механізм поширення радіохвиль діапазонів частот понад 30 МГц?

17. Який основний механізм поширення декаметрових хвиль?
18. Криви напруженості поля (криви поширення радіохвиль) МСЕ-Р, сфера застосування.
19. Дайте визначення зони покриття (охоплення) та зони обслуговування. За яких умов вони збігаються?
20. Обґрунтуйте доцільність використання статистичної та детермінованої моделей ПРХ.
21. Які методики використовують для розрахунку множника ослаблення під час поширення радіохвиль в умовах міста?
22. Яка зі статистичних (емпіричних) моделей поширення радіохвиль діапазону ультрависоких частот є найбільш універсальною, її сфера застосування, можливості та точність.
23. Що означає “завмирання сигналів”? Чим вони обумовлені, типи завмирань.
24. Як умови поширення радіохвиль впливають на забезпечення ЕМС РЕЗ?

Задача 1 (приклад): розрахувати втрати в логарифмічних одиницях (в дБ) в реальних умовах при передаванні радіосигналу на відстань 8 км для частоти 433 МГц, якщо додаткові втрати при передаванні становлять $L_{\text{дод}} = 27$ дБ.

Розв’язання:

$$1) \text{ визначаємо основні втрати у вільному просторі за формулою (5.7):}$$

$$L_0 [\text{дБ}] = 10 \cdot \lg L_0 = 32,4 + 20 \cdot \lg f + 20 \cdot \lg R = 32,4 + 20 \cdot \lg 433 + 20 \cdot \lg 8 =$$

$$= 32,4 + 52,73 + 18,06 = 102,76 \text{ (дБ);}$$

2) визначаємо загальні втрати в радіоканалі:

$$L = L_0 + L_{\text{дод}} = 102,76 + 27 = 129,76 \text{ (дБ).}$$

Відповідь: втрати передавання в реальних умовах становлять 129,76 дБ.

Задача 2 (приклад): розрахувати відстань прямої видимості між антенами, які встановлені на щоглах висотою 36 на 25 метрів без урахування з урахуванням рефракції.

Розв’язання: Для розрахунку радіогоризонту в діапазонах ДВЧ/УВЧ – з урахуванням рефракції (в діапазонах ДВЧ/УВЧ) використовують наступний вираз

$$R_0 [\text{км}] = 4,12 (\sqrt{h_1 [\text{м}]} + \sqrt{h_2 [\text{м}]}) =$$

$$= 4,12 (\sqrt{36} + \sqrt{25}) = 4,12 (6 + 5) = 4,12 \cdot 11 = 45,32 \text{ км;}$$

– без урахування явища рефракції

$$R_0 [\text{км}] = 3,57 (\sqrt{h_1 [\text{м}]} + \sqrt{h_2 [\text{м}]}) = 3,57 \cdot 11 = 39,27 \text{ км.}$$

Відповідь: Відстань прямої видимості в діапазонах ДВЧ/УВЧ з урахуванням рефракції становить 45,32 км, без урахування рефракції (в інших діапазонах частот) становить 39,27 км.

5. Методи забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів

На початку 90-х років в Україні почався процес широкого впровадження нових телекомунікаційних технологій. Можна говорити про створення нового вітчизняного телекомунікаційного середовища. Зокрема, за останні роки одержали широке поширення нові технології стаціонарного (фіксованого) та рухомого радіозв'язку:

- системи стільникового рухомого радіотелефонного зв'язку загального користування;
- системи транкінгового рухомого радіозв'язку;
- системи відомчого та технологічного радіозв'язку;
- системи цифрового теле- (*DVB-T2*) та радіомовлення (*T-DAB*);
- системи індивідуального супутникового зв'язку (*StarLink, Iridium, 5G* з можливістю прямого супутникового зв'язку та ін.);
- інформаційні мережі тощо.

Зросла також кількість компаній, що здійснюють ЧМ-радіомовлення в діапазоні ДВЧ з різних об'єктів у міському й сільському середовищі.

Таке стрімке збільшення кількості приймально-передаючих засобів призвело до виникнення необхідності приділити увагу забезпечення їх ЕМС. Це достатньо складне завдання, для рішення якого не існує універсальних прийомів. Більше того, через комплексний характер проблеми в цілому це можна ефективно вирішити тільки за допомогою заходів різного характеру, здійснюваних на всіх етапах – від стадії проектування засобів до їхньої експлуатації включно.

Відповідно до Закону України “Про електронні комунікації” [9] **забезпечення електромагнітної сумісності - сукупність організаційно-технічних заходів**, що проводяться з метою забезпечення сумісного користування радіочастотним спектром, зменшення або виключення впливу радіозавад між радіобладнанням, випромінювальними пристроями, радіоелектронними засобами та випромінювальними пристроями спеціального призначення.

Заходи забезпечення ЕМС радіозасобів, що застосовуються на практиці, можна умовно розділити на:

- організаційні;
- технічні.

До технічних заходів відносять сукупність системотехнічних, схемотехнічних, конструкторських і технологічних прийомів, спрямованих на вдосконалювання характеристик радіоелектронних, електронних і електротехнічних засобів. Застосування цих мір має на меті зниження рівнів випромінювання, що створюються завадами, збільшення їхнього ослаблення на шляху поширення, ослаблення сприйнятливості рецепторів до ненавмисних електромагнітних завад, ослаблення дії їх за рахунок удосконалювання способів передачі та обробки інформації тощо.

Організаційні заходи полягають в розподілі смуг частот між різними видами радіоелектронного устаткування, виборі просторового положення РЕЗ, значень потужностей радіопередавачів, роботу передавачів по черзі тощо. Вони містять у собі також розробку та застосування деяких правил обмежувального характеру й ряд інших прийомів, спрямованих на впорядкування роботи різних РЕЗ із метою усунення ненавмисних завад. Організаційні міри визначають напрямки і шляхи розробки й виробництва радіоелектронних, електронних і електротехнічних засобів з урахуванням вимог ЕМС.

Грань, що розділяє перераховані міри, умовна, а їхній конкретний зміст взаємозалежний і взаємообумовлене. Так, застосування ефективних схемотехнічних рішень, спрямованих на зменшення небажаних випромінювань передавачів і підвищення вибіркової прийнятності приймачів, дозволяє реалізувати організаційний захід – зменшити мінімально припустиме частотне рознесення між окремими радіозасобами, наприклад, у мобільному зв'язку. З іншого боку, реалізація організаційних мір, наприклад переведення пристрою деякої служби в інший діапазон частот змінює вимоги до технічних характеристик, а також структури й складу приймачів і передавачів, тобто приводить до застосування технічних мір.

Співвідношення та питома вага цих мір істотно залежить від ієрархічного рівня, на якому розглядається завдання ЕМС на рівні елементів і блоків, пристроїв, об'єкта, служби. Крім того, через розходження факторів, що визначають причини виникнення й шляхи поширення ненавмисних завад, досить специфічні завдання забезпечення ЕМС на об'єкті й між об'єктами.

5.1. Технічні способи забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів

Технічні заходи спрямовані на ослаблення завад в джерелах їх виникнення (і в середовищі поширення) і на захист від їх впливу.

Технічні засоби і способи забезпечення ЕМС РЕЗ реалізуються в принципах побудови РЕЗ, способах приймання та обробки інформації і застосовуються перш за все при конструюванні та частково в процесі експлуатації РЕЗ.

Вони принципово не відрізняються від способів захисту від навмисних завад та ґрунтуються на використанні частотних, просторових, часових, інформаційних та інших відмінностей між корисним сигналом і завадами.

До технічних заходів забезпечення ЕМС відносять:

1. *Вдосконаленням технічних параметрів* (характеристик) радіообладнання (зниження потужності побічних і позасмугових випромінювань радіопередавачів і чутливості неосновних каналів приймання радіоприймачів шляхом вибору форми випромінювань сигналів,

виду і параметрів модуляції, схем підсилювачів і генераторів, а також застосовуваних у цих схемах активних елементів; правильного вибору проміжних частот приймача; збільшення коефіцієнта прямокутності вибіркового тракту; фільтрації випромінювань радіопередавальних пристроїв).

2. Застосування спрямованих та адаптивних антен.

3. Застосування схем компенсації завад, заснованих, наприклад, на прийманні сигналів на дві рознесені антени тощо.

3. Зниження рівнів бічних пелюсток діаграми спрямованості антен РЕЗ, що взаємно впливають одна на одну.

4. Застосування схем поляризаційної селекції корисного сигналу та завади.

5. Часова регламентація (заходи обмежувального характеру в часовій області).

6. Часове бланкірування (засноване на припиненні приймання сигналу деякими РЕЗ на час дії потужної імпульсної завади, що дозволяє уникнути перевантаження входних каскадів приймача й пов'язаних з ним нелінійних явищ).

До технічних заходів забезпечення ЕМС РЕЗ також відносять:

- формулювання тактико-технічних характеристик до РЕЗ в частині ЕМС на етапі їх розробки;

- нормування і стандартизація ряду технічних характеристик РЕЗ (ширини смуги основного випромінювання передавачів; рівнів позасмугових і побічних випромінювань передавачів; стабільності частоти передавачів, чутливості неосновних каналів прийому; рівнів бічних пелюсток діаграми спрямованості).

При створенні нової техніки та будівництві об'єктів, що оснащені РЕЗ, створюють моделі очікуваної електромагнітної обстановки (ЕМО), які дозволяють оцінити рівні ненавмисних завад і визначити місця розміщення РЕЗ та їх антенних систем.

Перевірку виконання вимог і норм, спрямованих на забезпечення ЕМС, а також вимірювання параметрів РЕЗ здійснюють за допомогою спеціальних програмно-апаратних комплексів.

Виявлення завад

Ознаками проходження радіозавад через антену за ефектом, що спостерігається на виході ПРМ є:

- повне зникнення завад на виході при від'єднанні антени від ПРМ та підключення замість неї еквівалента антени;

- зміна рівня завад синхронно зі зміною напрямку антени приймача-рецептора завад при нерухомій антені джерела завад;

- суттєва залежність рівня завад від типу використовуваної антени або місця її розташування на об'єкті;

– значне зменшення рівня завад при повному чи частковому екрануванні апертури антени.

Ознаками проходження завад через екран ПРМ є суттєве збільшення завад на виході ПРМ при штучному погіршенні якості його екранування та навпаки – зменшення завад при покращенні якості екранування. Зазначені ефекти можуть бути досягнуті наступними прийомами:

- частковим або повним вилученням шасі з кожуха при підключенні ПРМ через подовжувальні ремонтні кабелі;
- поміщенням ПРМ на додатковий екран.

Якщо під час виконання зазначених вище операцій виявиться, що завади на виході ПРМ практично не змінюються, то з цього випливає, що вони проникають у ПРМ **по ланцюгах електроживлення, управління та комутації**. Для підтвердження цього проводять вимірювання радіозавад у вказаних ланцюгах. Виміряні рівні радіозавад у різних ланцюгах порівнюють з вимогами щодо сприйнятливості ПРМ до завад у цих ланцюгах, і на цій основі розробляють рекомендації щодо усунення виявлених радіозавад.

Для визначення виду завади за характером їхньої дії, що заважає, слід керуватися наступними положеннями:

- завади, що викликані *позасмуговими* випромінюваннями ПРД, сприймаються як *збільшення рівня шумів* на виході ПРМ;
- завади, що викликані *побічними* випромінюваннями ПРД та обумовлені наявністю побічних каналів прийому ПРМ, сприймаються як *невизначна модуляція* ПРД – джерела ненавмисних радіозавад;
- ефект *блокування* ПРМ проявляється в *одночасному зменшенні рівня корисного сигналу та шумів* (індустріальних радіозавад). Завада ніби пригнічує (блокує) корисний сигнал, при цьому модуляція ПРД – джерела завад на виході ПРМ не прослуховується;
- завади *інтермодуляції* прослуховуються зазвичай на виході ПРМ *виразно як модуляція одного з працюючих одночасно ПРД – джерел радіозавад*.

На жаль, до цього часу не всі параметри, що впливають на ЕМС, нормуються стандартами і відповідно контролюються під час виробництва обладнання. Найбільш яскравим прикладом є характеристика блокування ПРМ та інтермодуляційне випромінювання. Відсутність норм цих параметрів ускладнює проведення розрахунків ЕМС РЕЗ при їхній спільній роботі на одному об'єкті. У цих випадках доводиться проводити спеціальні вимірювання обладнання з метою визначення необхідних параметрів або орієнтуватися на найгірші показники цих параметрів, які відомі з літератури.

5.2. Організаційні способи забезпечення електромагнітної сумісності

Організаційні заходи реалізуються при експлуатації РЕЗ, а саме:

1). *Раціональний розподіл частот* – основний захід забезпечення ЕМС РЕЗ, що працюють в одному районі; при цьому призначаються незбіжні частоти, а ефективність розподілу та призначення частот характеризується наступним:

- рознесення робочих частот РЕЗ на десятки-сотні кілогерц в метровому і сотні тисяч кілогерц – в короткохвильовому діапазоні практично повністю виключає взаємні завади між РЕЗ, навіть при розміщенні їх на одній позиції;

- рознесення РЕЗ по частоті не вимагає значних витрат часу і може бути здійснено на етапі частотного планування.

В даний час завдання розподілу та призначення частот детально вирішується для засобів радіозв'язку. Завдання раціонального використання радіочастотних діапазонів і нормування радіовипромінювань введені в державні стандарти.

2). *Просторове рознесення РЕЗ*. Для полегшення вибору районів розміщення РЕЗ встановлюють *норми частотно-територіального рознесення (ЧТР)*, які полягають у встановленні необхідних значень частотних розлаштувань між потенційно несумісними РЕЗ визначеного типу при заданих відстанях між ними.

3). *Узгодження роботи РЕЗ за часом* (встановлення черговості їх роботи), накладення заборон на роботу окремих РЕЗ в певні інтервали часу (виходячи з пріоритету одних засобів над іншими в різних ситуаціях), введення обмежень на режими роботи (наприклад по потужності).

4). *Вибір і обладнання позицій розміщення РЕЗ*, який полягає в правильному використанні екрануючих властивостей місцевості і місцевих предметів (перешкод поширенню радіохвиль), а в ряді випадків – і у встановленні штучних екранів, що призводять до ослаблення потужності взаємних завад. Ненавмисні завади помітно послаблюються, якщо радіозасоби УКХ-діапазону, що знаходяться в межах прямої видимості, розташовуються так, щоб між ними знаходилися складки місцевості, лісові масиви і населені пункти з будівлями. Так, наприклад, листяний ліс глибиною 100 м в метровому діапазоні може послабити енергію випромінювання в 10 разів, в дециметровому діапазоні – в 100 разів, а в сантиметровому діапазоні – у 1000 разів; дерев'яні будови можуть послабити енергію в 10-20 разів, цегляні будівлі – в 100 разів на кожен погонний метр проходження радіохвиль.

Організація забезпечення ЕМС РЕЗ відповідно до викладених вище заходів і способів не виключає повністю можливість виникнення взаємних радіозавад. У зв'язку з цим з метою виключення раптово виникаючих інтенсивних завад організовується виявлення джерел таких завад і усунення їх дії. Щоб запобігти виникненню взаємних завад, передбачається контроль

за дотриманням користувачами радіочастотного спектру встановлених норм випромінювання та режимів роботи РЕЗ.

5.3. Особливості забезпечення внутрішньооб'єктової електромагнітної сумісності

Для забезпечення внутрішньооб'єктової ЕМС РЕЗ використовують такі самі принципи поділу сигналів (випромінювань) РЕЗ: *частотне, часове та просторове*.

Перший із названих методів полягає у забезпеченні ЕМС РЕЗ за рахунок використання таких **правил призначення частот**, які виключали б роботу РЕЗ на збігаються частотах, а також можливість попадання основних, позасмугових та побічних випромінювань ПРД в основні, сусідні та побічні канали ПРМ об'єкта. У разі неможливості підбору таких частот можливе використання часового рознесення випромінювань РЕЗ, при яких робота деяких РЕЗ здійснюється в різні інтервали часу, що не перекриваються.

Можна зменшити завади, зумовлені позасмуговими та побічними випромінюваннями радіопередавачами (ПРД), а також завади по побічних каналах прийому, застосовуючи на виході радіопередавача **додаткові спеціальні фільтри**, що зменшують рівень випромінювання за межами основної смуги частот, яку займає сигнал, що передається. Інший метод полягає у **підвищенні розв'язки між антенами та фідерами** РЕЗ, що розташовані на одному об'єкті. Ще один метод забезпечення ЕМС РЕЗ, що розміщені на одному об'єкті, заснований на **застосуванні електромагнітних екранів, заземленні, а також фільтрів у низькочастотних ланцюгах**.

Найбільш ефективними заходами, спрямованими на запобігання та усунення завад об'єктового походження, розглядаються наступні [8]:

- корегування частотних планів;
- видалення (заміна) частот, що беруть участь в утворенні великої кількості небезпечних комбінацій;
- збільшення просторового рознесення антен (по вертикалі та горизонталі);
- зниження випромінюваних потужностей;
- встановлення фільтрів в антенно-фідерні тракти;
- точне налаштування устаткування (номінали несучих частот, позасмугові випромінювання, режими роботи підсилювальних каскадів, узгодження фідерів з антенами тощо);
- заміна в антенних щоглах "холодних" з'єднань зварними;
- очищення металевих поверхонь, захист від корозії;
- поділ кабельних трас;
- герметизація кабельних з'єднань;
- проведення періодичного контролю параметрів устаткування;
- аналіз об'єктової ЕМС на стадії проектування знов встановлюваного

радіообладнання з обліком всіх діючих на даному об'єкті засобів (принцип «Останній відповідає за все»).

А. Вибір частот для додаткових РЕЗ на об'єкті

Одним із важливих заходів при розміщенні додаткового РЕЗ на чинному об'єкті є вибір таких частот прийому та передачі, при яких забезпечується спільне функціонування РЕЗ при допустимо малому рівні ненавмисних взаємних радіозавад. При розрахунках зазначених частот має бути виключено неприпустимий вплив основного, позасмугових та побічних випромінювань нового ПРД на основні та побічні канали прийому діючих ПРМ, а також неприпустимий вплив основних, позасмугових та побічних випромінювань ПРМ об'єкта та випромінювань гетеродинів ПРМ об'єкта на основний та побічні канали прийому нового ПРМ.

Для визначення частот, заборонених для застосування, необхідно виконати частотний аналіз та енергетичний розрахунок з урахуванням параметрів усіх РЕЗ об'єкта, включаючи і додаткові РЕЗ.

Завдання вибору частоти, вільної від завад інтермодуляції в ПРМ і від інтермодуляційних випромінювань ПРД об'єкта, для нововстановлюваного РЕЗ на об'єкті може бути вирішена з використанням методу, посилення на який наведено у [2]. Метод, що дозволяє визначити канали, вільні від інтермодуляційних завад 3-го і 5-го порядку, заснований на аналізі різниць номерів каналів і сум цих різниць: *канали повинні вибиратися так, щоб різниця між порядковими номерами будь-яких двох каналів не дорівнювала сумі будь-яких двох інших різниць каналів із послідовно розташованих каналів з фіксованим кроком сітки частот.*

Для перевірки частот на відсутність завад інтермодуляції 3-го порядку можна використовувати також чисельний і графічний методи, описані в [2]. Графічний метод дозволяє визначити частоти каналів, що поповнюють цю групу; таке завдання виникає при доповненні кількох груп ще одним, наприклад, викликом каналом. Для визначення загальної кількості рівновіддалених каналів, з яких можна вибрати групу із заданим числом каналів, можна використовувати таблиці, також наведені в [2]. Так, *для вибору 8 каналів, вільних від завад інтермодуляції 3-го порядку, мінімальна кількість каналів дорівнює 40.* Маючи одну групу каналів, можна утворити безліч подібних груп, додаючи до кожного каналу вихідної групи будь-яке, але те саме число. *Наприклад, якщо вихідна група має номери каналів 1, 3, 7, 17, 20, 28, 35, 40, то група каналів 2, 4, 8, 18, 21, 29, 36, 41 також вільна від завад інтермодуляції 3-го порядку.*

Завдання визначення частоти, вільної від завад інтермодуляції в ПРМ і від інтермодуляційних випромінювань ПРД об'єкта, для РЕЗ, що знову встановлюється, на об'єкті може бути також вирішена методом вибору частот, що не входять до переліку частот інтермодуляційних випромінювань ПРД об'єкта. При відсутності частот, вільних від завад інтермодуляції на об'єкті, необхідно виконати енергетичний розрахунок для

всіх частот згаданого переліку та визначити частоти, на яких умови ЕМС РЕЗ виконуються.

Б. Технічні методи зменшення завад у комплексі РЕЗ об'єкта

Зменшення взаємних завад під час спільної роботи РЕЗ на одному об'єкті досягається в основному шляхом поліпшення параметрів ПРД та ПРМ, що визначають їх ЕМС (захищеність по ланцюгах живлення та управління, позасмугові та побічні випромінювання ПРД, побічні канали прийому ПРМ), збільшення електромагнітної розв'язки між пристроями об'єкта, в першу чергу між їх антено-фідерними пристроями. Для цього використовують додаткові фільтри в ланцюгах живлення та управління, фільтри на входах ПРМ та виходах ПРД, феритові циркулятори у фідерних трактах багатоканальних радіопередаючих пристроїв, а також додаткові екрани для окремих вузлів, пристроїв загалом, фідерів та антен.

Для придушення побічних випромінювань у трактах ПРД використовують різні типи НВЧ-фільтрів, що підключаються до їх виходів. За принципом дії фільтри поділяються на ті що відбивають, тобто неузгоджені з НВЧ-трактом поза смуги пропускання, і поглинаючі - узгоджені у всій смузі частот.

Високий рівень вихідної потужності ПРД (до одиниць кіловат) накладає спеціальні вимоги до конструкції фільтра. Можна вважати, що характеристики фільтра у смузі пропускання є задовільними, якщо внесені втрати не перевищують кількох десятих часток децибел, а рівень узгодження, що характеризується коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХ), значення 1,3. Вищі значення цих параметрів можуть призводити до теплового перегріву елементів фільтра, до явищ НВЧ-пробою, погіршення якості та надійності передавальної системи в цілому. Втрати, які фільтр вносить у смузі загородження, повинні знижувати рівні побічних випромінювань ПРД до значень, що не перевищують існуючі норми.

Для придушення гармонік та побічних складових сигналу радіопередавача застосовують смугозатримуючі фільтри (СЗФ) різних структур.

У багатоканальних системах передачі при об'єднанні декількох радіопередавачів на одну антену для зменшення інтермодуляційних завад, що виникають на нелінійностях вихідних каскадів ПРД, поряд з фільтрами використовують феритові циркулятори, що пропускають з мінімальними втратами сигнал радіопередавача в антену і перешкоджають проходженню його на виходи. Крім позитивного ефекту по зменшенню інтермодуляційних складових у випромінюваному багатоканальному сигналі, використання циркуляторів підвищує надійність роботи ПРД, оскільки циркулятори поглинають також власний сигнал, відбитий від антени у разі її неузгодженості чи поломки. ПРД із використанням циркуляторів завжди працюють на навантаження з КСХ близьким до 1, що різко підвищує надійність роботи ПРД та системи загалом.

Зниження чутливості ПРМ побічними каналами переважно вирішується на етапі розробки апаратури на схемотехнічному рівні. Деякий ефект може дати увімкнення додаткового фільтра на вході ПРМ. Зниження рівня прямого наведення на входи підсилювачів ПЧ та НЧ досягається додатковим екрануванням цих каскадів або ПРМ загалом.

В. Методи підвищення розв'язки між антенами РЕЗ

Анени конфліктуючих РЕЗ, розміщених на локальному об'єкті можуть бути рознесені у просторі по горизонталі, по вертикалі, або змішано. На рис. 5.1 представлені загальні приклади розміщення антен, які ілюструють розв'язку антен для випадків горизонтальної ($R_{\text{гор}}$), вертикальної ($H_{\text{верт}}$) та змішаної (SI) конфігурації [39]:

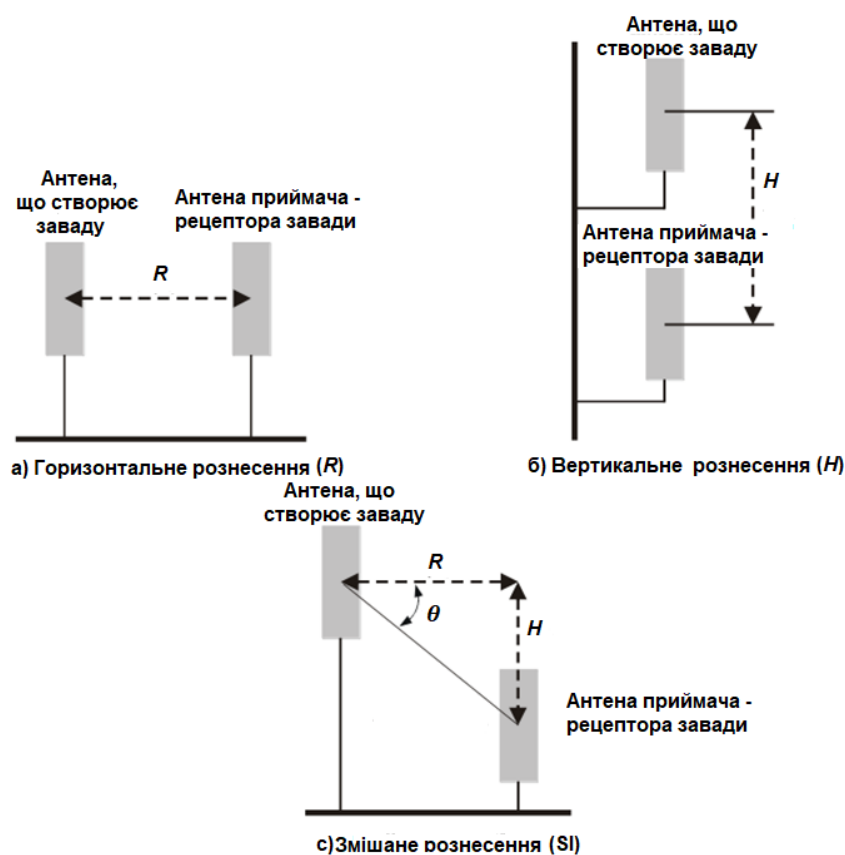


Рисунок 5.1. Розв'язка антен при горизонтальному, вертикальному та змішаному рознесенні

Розв'язка антен в основному залежить від територіального рознесення та довжини хвилі λ (м). Територіальний рознесення між двома антенами – це відстань від центру антени, що створює завади до центру антени приймача, що відчуває заваду (антенa приймача – рецептора завади) [39]. Розв'язка антен зазвичай виражається у значеннях ослаблення у дБ.

Розв'язка між двома дипольними антенами $L_{\text{антНР}}$ може бути приблизно розрахована за допомогою наступних рівнянь [39]:

$$L_R(\text{дБ}) \approx 22 + 20 \log (R/\lambda), \quad (5.1)$$

$$L_H(\text{дБ}) \approx 28 + 40 \log (H/\lambda), \quad (5.2)$$

$$L_{SI}(\text{дБ}) \approx (L_H - L_R) \cdot 2\theta/\pi + L_H, \quad (5.3)$$

де $\theta(\text{рад})$ це $\tan^{-1}(H/R)$, R – горизонтальна відстань, та H – вертикальна відстань. Дані рівняння застосовуються, якщо R більше 10λ та u більше λ .

З виразів 5.1-5.3 можна зробити висновок, що *максимальна розв'язка антен при однаковому територіальному рознесенні досягається при їх вертикальному рознесенні. Застосування спрямованих антен збільшує розв'язку.* Варіанти конструкцій вертикального рознесення антен системи радіозв'язку в діапазоні *UHF* наведено на рис. 5.2.

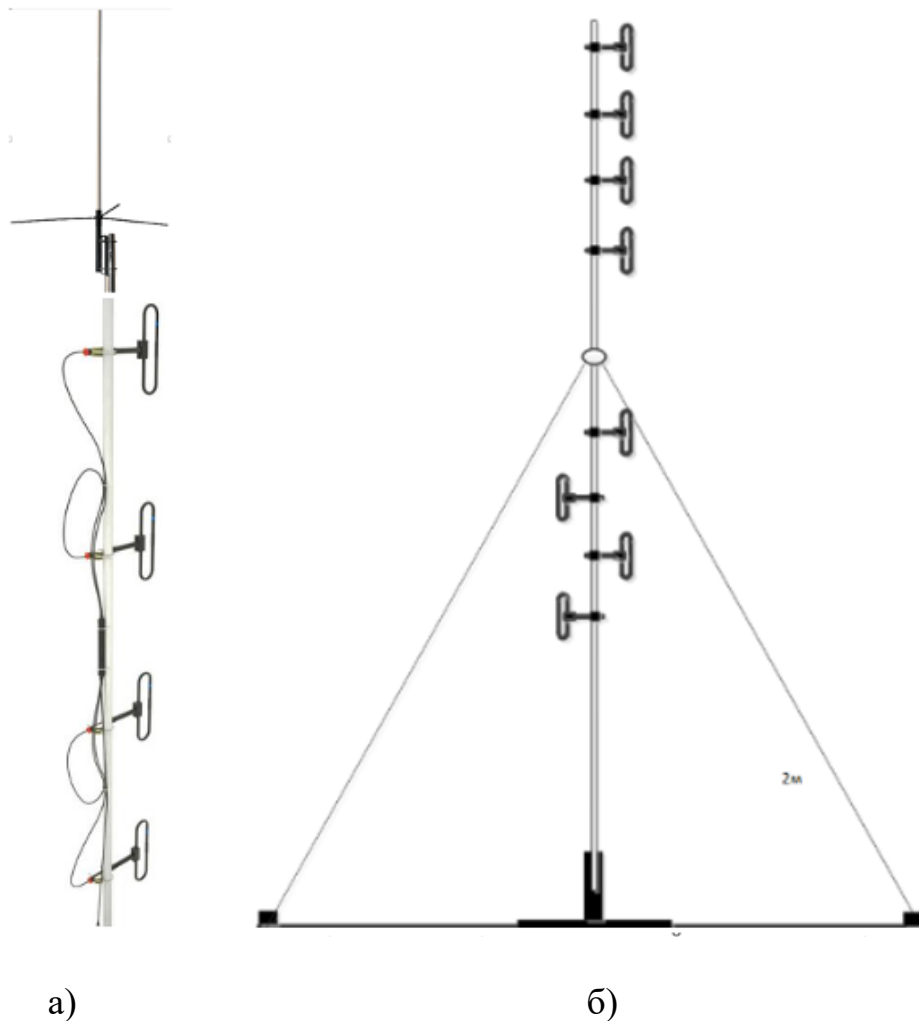


Рисунок. 5.2. Варіанти вертикального рознесення антен в діапазоні *UHF*

Основні механізми виникнення завад в антено-фідерних трактах різних радіотехнічних систем зумовлюють доцільність використання таких основних методів підвищення розв'язки:

- оптимальне взаємне розташування антен на прийомо-передаючих радіотехнічних об'єктах;

- застосування поляризаційного рознесення (використання ближчих випромінювачів з різним типом поляризації);
- рахування при розміщенні на об'єкті спрямованих властивостей антен, а також впливу металоконструкцій опор;
- використання екрануючих властивостей елементів металоконструкцій опори, а також додаткових екрануючих структур.

Зупинимось докладніше на останньому методі.

На рис. 5.1 та у формулах 5.1-5.3 розглянута розв'язка антен без врахування впливу опор. Але антени встановлюються на опори, які можуть як погіршити, так й покращити розв'язку антен.

Металева антена опора впливає як на характеристики окремої антени, так і на характеристики розв'язки між антенами при їх розміщенні на загальній опорі або, якщо опори різних антен розташовані поруч. При цьому вплив металоконструкцій може як збільшувати, так і зменшувати рівень розв'язки. Точний розрахунок розв'язки між близько розташованими антенами з урахуванням елементів опори та інших металоконструкцій повинен проводитися на основі використання строгих електродинамічних методів з включенням до складу моделі електродинамічної системи всіх провідників досліджуваних антен і металоконструкцій, включаючи додатково пасивні елементи, що додатково вводяться. При цьому за рахунок зміни геометричних параметрів електродинамічної системи (з урахуванням обмежень принципового та конструктивного характеру) може бути обраний варіант, оптимальний як за характеристиками призначення, так і з погляду ЕМС.

Водночас наближена оцінка ступеня та характеру впливу окремих металоконструкцій на розв'язку між антенами може бути проведена на основі аналізу результатів розв'язання щодо простих модельних завдань. Це дозволяє оцінити рівень розв'язки, обґрунтувати використання додатково пасивних елементів і вибрати компонування, близьке до оптимального, яке потім може бути уточнено на основі електродинамічного аналізу.

У якості завдань для моделювання доцільно розглянути такі основні варіанти взаємного розташування антен і металоконструкцій:

- 1) два вертикальні симетричні вібратори, рознесені по горизонталі і розташовані на одній висоті по обидва боки від металоконструкції, яка являє собою вертикально орієнтований циліндричний провідник (рис. 5.3);
- 2) два вертикальні симетричні вібратори, рознесені по вертикалі і розташовані поблизу вертикально орієнтованого циліндричного провідника (рис. 5.4);
- 3) два горизонтальні симетричні вібратори, рознесені по вертикалі і розташовані поблизу вертикально орієнтованого циліндричного провідника (рис. 5.5).

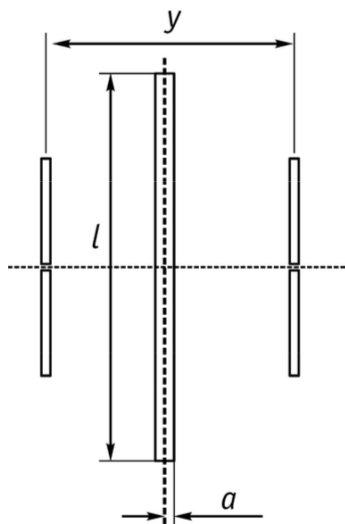


Рис. 5.3
Два вертикальні
симетричні вібратори,
що рознесені по
горизонталі

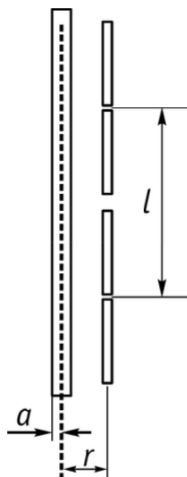


Рис. 5.4
Два вертикальні
симетричні вібратори,
що рознесені по
вертикалі

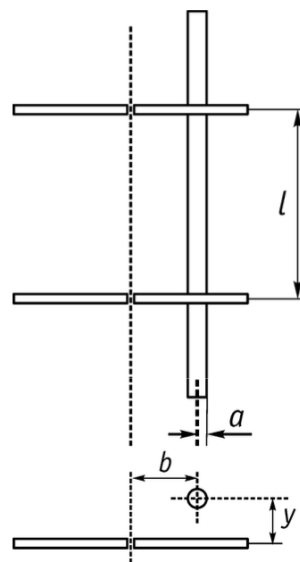


Рис. 5.5
Два горизонтальні
симетричні вібратори,
що рознесені по
вертикалі

Варіант 1 (рис. 5.3) відповідає модельному завданню дослідження впливу на розв'язку обмежених за висотою металоконструкцій (наприклад, зі складу технологічного обладнання вежі або щогли) або поясу опори (при досить великій довжині вертикального провідника).

При горизонтальній орієнтації вібраторів та провідника можна досліджувати вплив горизонтальних елементів, зокрема розпірки веж.

Варіант 2 (рис. 5.4) відповідає модельній задачі дослідження розв'язки у випромінюючих системах, розміщених на загальній електрично тонкій опорі або на поясі вежі з рознесенням по висоті взаємодіючих антен. При горизонтальній орієнтації виникає можливість досліджувати розв'язку при горизонтальному рознесенні антен уздовж розпірки чи іншого горизонтального елемента опори.

Варіант 3 (рис. 5.5) відповідає модельному завданню дослідження впливу на розв'язку горизонтального зміщення вертикального елемента щодо площини електричної симетрії горизонтальних вібраторів, що взаємодіють.

На рис. 5.6 як приклад наведено результати розрахунків для варіанта 1. Графіки розв'язки B дано залежно від вертикального розміру l металоконструкції. При цьому різним кривим відповідають такі значення інших геометричних параметрів:

- крива 1: відстань між вібраторами по горизонталі $r = 1,25 \lambda$, радіус вертикального провідника (металоконструкції) $a = 0,0075 \lambda$;
- крива 2: $r = 1,25 \lambda$, $a = 0,015 \lambda$;
- крива 3: $r = 0,625 \lambda$, $a = 0,0075 \lambda$;

– крива 4: $r = 0,625 \lambda$, $a = 0,015 \lambda$.

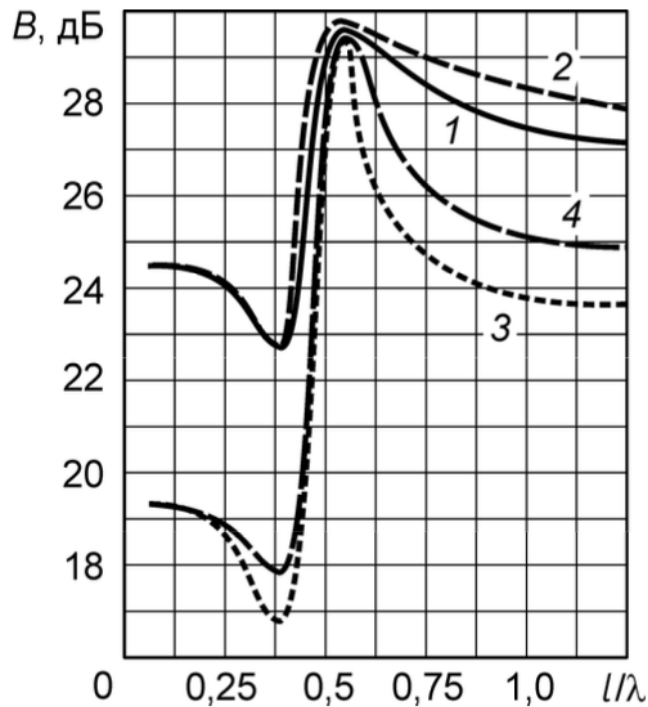


Рисунок. 5.6. Залежність розв'язки напівхвильових вібраторів, які зображені на рис. 5.3 від розмірів елемента опори:

1 - $r = 1,25 \lambda$, $a = 0,0075 \lambda$; 2 - $r = 1,25 \lambda$, $a = 0,015 \lambda$;
3 - $r = 0,625 \lambda$, $a = 0,0075 \lambda$; 4 - $r = 0,625 \lambda$, $a = 0,015 \lambda$

Граничні значення розв'язки B при $l \rightarrow 0$ відповідають повному відсутності металоконструкції, тобто взаємодії вібраторів у вільному просторі.

Асимптотичні значення B при $l \rightarrow \infty$ відповідають розташуванню вібраторів поблизу дуже протяжних елементів – поясів, розпірок і т.п. Розрахункові асимптотичні значення для різних кривих:

- крива 1: $B = 26,8$ дБ;
- крива 2: $B = 27,5$ дБ;
- крива 3: $B = 23,5$ дБ;
- крива 4: $B = 24,3$ дБ.

З графіків рис. 5.6 видно, що вплив металоконструкції досить великий. При відносно малої її довжини розв'язка зменшується, потім (поблизу резонансного значення довжини) різко збільшується, після чого монотонно зменшується, асимптотично прагнучи до відповідних граничних значень. Збільшення розв'язки поблизу резонансного значення l досить помітно: приблизно на 5 дБ (стосовно асимптотичного значення) при $r = 1,25 \lambda$ і на 10 дБ при $r = 0,625 \lambda$. При цьому максимальне значення розв'язки відносно слабо залежить від відстані між вібраторами r . Це дозволяє за наявності обмежень на просторове рознесення антен збільшити розв'язку за рахунок використання спеціальних пасивних елементів. Слід зазначити, що з цих же цілей можуть використовуватися і штатні елементи конструкцій опор,

електрично «розсічені» у необхідних місцях за допомогою металевих ізоляторів типу «чвертьхвильова склянка».

Що стосується впливу радіусу металоконструкції a , то з результатів розрахунку випливає, що воно зводиться до деякого зменшення резонансної довжини металоконструкції та деякого збільшення екрануючої дії (розв'язки) зі збільшенням радіусу. На максимальне значення величини розв'язки (поблизу резонансного значення l) радіус металоконструкції впливає відносно слабо.

Експериментальні дані стосовно розв'язки та коефіцієнта підсилення антен у ближній зоні та методика врахування позасмугових характеристик антен наведені у додатку Ж [38].

Г. Методи забезпечення ЕМС РЕЗ за допомогою електромагнітних екранів

При конструюванні різних РЕЗ зазвичай досягають досить високої ефективності екранування корпусів та інших конструктивних вузлів та елементів, що забезпечує виконання вимог до рівня паразитних електромагнітних випромінювань виробу або (і) його електромагнітної сприйнятливості. Однак в умовах неординарної електромагнітної обстановки при недостатній ефективності інших заходів для забезпечення вимог ЕМС можуть використовуватися додаткові електромагнітні екрани. При цьому метою екранування є або захист обладнання від впливу зовнішніх полів, або, навпаки, локалізація випромінювання будь-яких засобів, що перешкоджає прояву цих випромінювань у довкіллі.

Установка додаткових екранів у разі потреби застосовується у місцях розміщення передавального та приймального обладнання, у трасах (каналах) прокладання високочастотних фідерів тощо. Поряд із забезпеченням ЕМС РЕЗ застосування електромагнітних екранів дозволяє вирішувати й низку інших завдань, серед яких захист інформації в приміщеннях та технічних каналах, захист персоналу від підвищеного рівня електромагнітних полів тощо.

Ефективність екранування, дБ визначається ступенем ослаблення складових (електричної, магнітної) або енергії поля, що визначається як відношення діючих значень напруженості полів або щільності потоку енергії в даній точці простору за відсутності та наявності екрану:

$$K_E = 20 \cdot \lg \frac{E_0}{E_1}; \quad K_H = 20 \cdot \lg \frac{H_0}{H_1}; \quad K_{\Pi} = 20 \cdot \lg \frac{E_0 H_0}{E_1 H_1} = \frac{K_E + K_H}{2}, \quad (5.4)$$

де K_E – коефіцієнт екранування за електричною складовою, K_H – коефіцієнт екранування за магнітною складовою, K_{Π} – коефіцієнт екранування за щільністю потоку енергії, E_0 (H_0) – напруженість електричної (магнітної) складової поля без екрана, E_1 (H_1) – напруженість електричної (магнітної) складової поля за наявності екрана у той самий точці простору.

Суворе вирішення електродинамічної задачі екранування, тим більше у загальному вигляді, дуже важко. Зазвичай залежно від типу розв'язуваної задачі розглядають різні види екранування: *електричне, магнітостатичне чи електромагнітне*. Останнє є найзагальнішим і найчастіше застосовуваним, оскільки у більшості випадків екранування доводиться мати справу або зі змінними, або з флюктуючими і рідше – справді зі статичними полями.

Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що форма екрану незначно впливає на його ефективність. Головними факторами, що визначають якість екрану, є радіофізичні властивості матеріалу та конструкційні особливості. Для оцінки ефективності екранування екранів, дБ широко використовують наближений аналіз, заснований на поданні коефіцієнта екранування як суми окремих складових:

$$K_{\Pi} = K_{\text{ПОГЛ}} + K_{\text{ОТР}} + K_{\text{НОТР}}, \quad (5.5)$$

де додток $K_{\text{ПОГЛ}}$ пов'язане з поглинанням електромагнітної енергії в матеріалі екрану, $K_{\text{ОТР}}$ – з відбиттям електромагнітної хвилі екраном, а $K_{\text{НОТР}}$ враховує багаторазові внутрішні перевідбиття хвилі від поверхонь екрану.

Для електрично товстих екранів (товщина екрану суттєво перевищує товщину скін-шару), до яких відносяться практично всі екрани, що застосовуються з метою забезпечення ЕМС, двома останніми складними (6.5) можна знехтувати. Тоді ефективність екранування, дБ, визначається загасанням хвилі в металі (по експоненційному закону), і для екрану завтовшки d , мм, коефіцієнт екранування

$$K_{\Pi} = K \cdot d, \quad (5.6)$$

де K – коефіцієнт ослаблення, що визначається електрофізичними властивостями металу, дБ/мм.

У табл. 5.1 наведено коефіцієнти ослаблення деяких поширених матеріалів.

Таблиця 5.1.

Коефіцієнт ослаблення електромагнітних хвиль у металах, K , дБ/мм

Частота МГц	Метал				
	Сталь	Мідь	Алюміній	Цинк	Латунь
0,1	47,6	32,3	29,5	26,4	25,6
0,3	52,0	37,1	34,3	31,2	26,8
1,0	56,5	42,3	39,5	37,5	35,6
3,0	60,8	47,2	44,1	40,8	40,0
10,0	65,6	52,3	49,5	46,4	45,6
30,0	69,5	57,1	54,3	51,1	50,4
100,0	75,6	62,3	59,5	56,3	55,6
300,0	77,4	67,6	64,1	60,8	60,0
1000,0	81,6	72,3	69,5	66,4	65,6

Д. Методи забезпечення ЕМС РЕЗ за допомогою заземлення та протизавадних фільтрів у низькочастотних ланцюгах

Уземлення – один з основних засобів зменшення завад (небажаних сигналів, шумів і наведень) для забезпечення внутрішньоапаратної ЕМС [7].

Проектування систем з уземленням за критерієм ЕМС має дві основні мети. Перша полягає в тому, щоб **мінімізувати напругу завад**, які виникають в процесі проходження струмів від двох або більше кіл крізь загальний опір землі. Інша – пов'язана з необхідністю **запобігання виникнення контурів уземлення**, чутливих до магнітних полів та **різниці** потенціалів “землі”. Разом з цим некоректно виконане уземлення може стати основною причиною **небажаного зв'язку** за завадами.

Узагальнено шина уземлення (нульова шина) може бути визначена як еквіпотенційна точка або поверхня, потенціал якої є для функціонального вузла (ФВ) чи системи рівнем відліку напруги. Приймають, що поверхні еквіпотенціальні, якщо різниця потенціалів не перевищує:

- для аналогових систем до 100 мВ;
- для цифрових – до 200 мВ.

Існує *три основні причини необхідного уземлення: забезпечення електробезпеки, забезпечення опорного еквіпотенційного рівня для сигнальних напруг та забезпечення ЕМС*. Шина захисного уземлення завжди має мати потенціал Землі, в той час як для сигнальної землі ця умова не є обов'язковою.

Існують такі види уземлення:

- 1) **захисна земля** – земля, потенціал якої дорівнює потенціалу фізичної Землі;
- 2) **сигнальна земля** – для реалізації опорного еквіпотенційного рівня для відліку сигналів напруги та живлення;
- 3) **корпусна земля** – для з'єднання фізичної землі з корпусом;
- 4) **силова земля** – для з'єднання шляхів проходження зворотних струмів від джерела живлення;
- 5) **екранна земля** – для з'єднання з екранами вузлів, що сприймають або випромінюють електромагнітні завади;
- 6) **«шумова» земля** – спільний провід яким з'єднані різні електромеханічні елементи, що створюють значні рівні електромагнітних завад (контактори, електричні двигуни, реле тощо);
- 7) **антенна земля** – для створення опорних площин приймальних та передавальних антен.

Зазвичай в апаратурі деякі з цих видів “землі” можуть бути об'єднані.

За призначенням апаратури та функціональними властивостями можна визначити такі типи «землі» – інформаційні, низьковольтні, комутаційні тощо.

Для забезпечення ЕМС потрібно проводити уземлення екранованих кабелів і фідерів, корпусів, захисних екранів, антенних щогл та інших елементів радіобладнання.

В більшості систем вимагають, як мінімум, **три роздільні зворотні кола “землі”** (рис. 5.7). **Сигнальну землю** слабкострумових електричних кіл слід відділяти від **“шумової” “землі”**, яку застосовують для електромеханічних елементів (реле, двигунів тощо). Третю, **корпусну землю** слід застосовувати для корпусів, шасі тощо. Якщо провідники мережі розподілені у всій системі, **землю електроживлення** слід підключати до **корпусної землі**. Три окремі кола “землі” слід з'єднувати разом тільки в **одній точці**. Застосування такої конфігурації уземлення для всього устаткування може значно зменшити проблеми, пов'язані з уземленням.

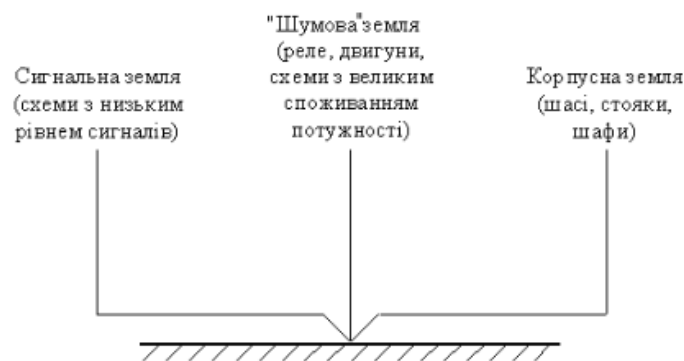


Рисунок 5.7. Основна схема виконання уземлювальних з'єднань

На низьких частотах (до 1 МГц) слід застосовувати систему уземлення **в одній точці**, а **на високих** (вище 10 МГц – в **декількох точках**. У смузі (1...10) МГц можна застосовувати уземлення в одній точці, якщо найдовший провідник уземлення коротший від $1/20$ довжини хвилі ($0,05\lambda$).

На високих частотах звичайно уземлюють екран з обох кінців. Для довгих кабелів може бути необхідним уземлювати екран з інтервалом $1/10$ довжини хвилі ($0,1\lambda$).

Неумисне утворення контурів уземлення і неякісне екранування частіш за все є в кабельних системах, особливо у тих випадках, якщо різні складові пристрою виконують різні розробники. Там, де це можливо, не слід об'єднувати в одному кабелі сильнотрумові і слабкострумові проводи. Якщо ж цього не можливо запобігти, тоді сильнотрумові проводи слід об'єднати і помістити в екран.

Провідники сильнотрумових і слабкострумових кіл слід пропускати через різні розніми або крізь контакти одного розніму, між якими залишені контакти проводів уземлення.

Там, де необхідно екранування кабелів з малими рівнями сигналів і уземлення тільки в одній точці, необхідна ізоляція екрану. Це запобігає випадковому контакту екрану з землею в будь-якій іншій точці, крім передбаченої.

Протизавадні фільтри застосовують з метою забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) у сигнальних (інформаційних) та силових колах. Функція фільтрів у **сигнальних (інформаційних) колах** – беззаперечно це обмеження до необхідної (за заданою швидкістю передавання та якості інформації) робочої смуги частот тракту [7]. Щодо фільтрів у **силових колах (мережних)** – вони за сучасних умов виконують три основні функції:

- **забезпечення рівнів** кондуктивних завад у **електричній мережі електроживлення**, які **не перевищують** значень, визначених **нормативними** національними, регіональними та міжнародними документами;

- **запобігання несанкціонованого доступу** до конфіденційної інформації із застосуванням спеціальних засобів взаємодії з силовими кабелями системи енергозабезпечення інформаційних комплектів.

- **запобігання проходження електромагнітних завад** від електромережі до навантажувального кола.

Слід підкреслити, що для забезпечення вимог за першим призначенням смуга робочих частот фільтра складає зазвичай 150 кГц...30 МГц; за спеціальними вимогами: 10 кГц...1 ГГц із загасанням (40...60) дБ, – за другим призначенням верхня межа смуги частот сягає (10...18) ГГц й вище до 40 ГГц із загасанням (100...120) дБ.

Як відомо, одним з двох шляхів поширення електромагнітних завад є **провідне середовище**: силові та сигнальні кабелі, шасі, проводи уземлення тощо. Зазначене середовище забезпечує **кондуктивний шлях** поширення, і ним, відповідно, поширюються **кондуктивні завади**: **симетричні** (між прямим та зворотнім – в різних напрямках – **differential mode** провідниками) та **несиметричні** (між прямим та зворотним – в одному напрямі – **common mode** і землею).

Підкреслимо, що кондуктивні завади є в сигнальних та силових (мережевих) провідниках. Тому й фільтри є **сигнальні й мережеві**.

Застосування **завадодавлюючих фільтрів** – основний спосіб ослаблення кондуктивних завад у ланцюгах управління та електроживлення РЕЗ. Для придушення таких завад переважно використовують різні види LC-фільтрів, що складаються з Г-, Т- і П-подібних ланок, поздовжні гілки яких містять індуктивності, а поперечні – ємності. Поєднання різних типів таких ланок дозволяє отримати крутість характеристики згасання фільтра 100 дБ на декаду та більше. Фільтри завад підключають якомога ближче до джерела завади на шляху її поширення до рецептора завади. Ефективність фільтру характеризується параметром ослаблення завади в місці її впливу на рецептор.

Зі зниженням робочої частоти LC-фільтри стають громіздкими, у цих випадках використовують активні фільтри з використанням мікросхем (операційних підсилювачів). В активному фільтрі операційний підсилювач

перетворює імпеданс RC –ланцюга, що підключається до нього так, що такий підсилювач веде себе як індуктивність.

5.4. Частотно–територіальне рознесення радіоелектронних засобів

Однією з головних завдань аналізу ЕМС РЕМ є визначення мінімально-допустимих територіальних розносів (ТР) потенційно несумісних радіопередавачів та радіоприймачів сумісних служб за різних частотних рознесеннях і за різних варіантах взаємної орієнтації їх антен. Якщо реальні значення ТР більші за потрібні ТР, які також називають координаційною відстанню (КР), то вважається, що умови ЕМС аналізованих РЕЗ виконуються.

Одним із ефективних способів узгодження умов ЕМС РЕЗ є застосування норм частотно-територіального рознесення (ЧТР) між взаємодіючими РЕЗ, дотримання яких становить важливу частину процесу управління частотами для більшої частини радіосистем. Норми ЧТР є сукупність взаємопов'язаних значень координаційної відстані (КР), частотного рознесення (ЧР) та кутового рознесення (КТР), за яких забезпечується ЕМС РЕЗ. На основі норм ЧТР визначають конкретні робочі частоти (присвоєння) прийомопередавачів РЕЗ сумісних служб на певній території. Крім того, норми ЧТР дозволяють сформулювати більш конкретно вимоги до характеристик спрямованості та орієнтації антен взаємодіючих РЕЗ при заданих робочих частотах.

Визначення норм ЧТР виробляють з умови виконання критерію ЕМС, які статистично нормують показники ЕМС, що мають випадковий характер через вплив завмирань корисного (КС) та завадового (ЗС) сигналів. Завмирання КС і ЗС виникають у процесі їх поширення і мають випадковий характер. Розподіли ймовірностей рівнів КС та ЗС на вході приймача задаються емпірично на підставі результатів вимірювань у вигляді моделей поширення, котрі розглянуті в розд. 4. У службах рухомого зв'язку та мовлення розподіл рівнів КС та ЗС сигналів приймається логнормальним [2]. Враховується також запас на завмирання.

На рис. 5.8 – 5.10 наведено статистичні розподіли глибини замирань завадових сигналів для трьох основних механізмів поширення ЗС: в умовах прямої видимості для сухопутних трас (рис. 5.8), за рахунок дифракції на трасах з відкритою місцевістю з помірним кліматом (рис. 5.9) та за рахунок тропосферного розсіювання на сухопутних трасах (рис. 5.10) [2].

Критерій ЕМС допускає погіршення якості прийому інформації у визначений відсоток часу $T_{п, доп}$, протягом якого може перевищуватись припустиме значення завад на виході системи $P_{з, доп}$. Умова виконання ЕМС має вигляд

$$T_z(P_{з, доп}) \leq T_{з, доп},$$

де $T_3(P_{з,доп})$ – значення інтегральної функції розподілення (ІФР) завод за умови $P_3=P_{з,доп}$.

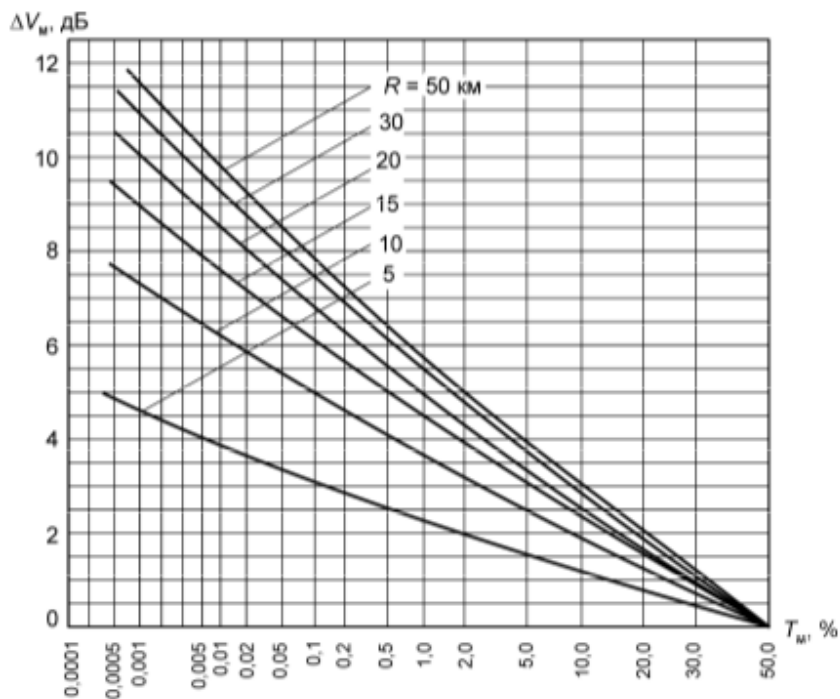


Рисунок 5.8. Статистичний розподіл глибини замирань ЗС на відкритих трасах із прямою видимістю

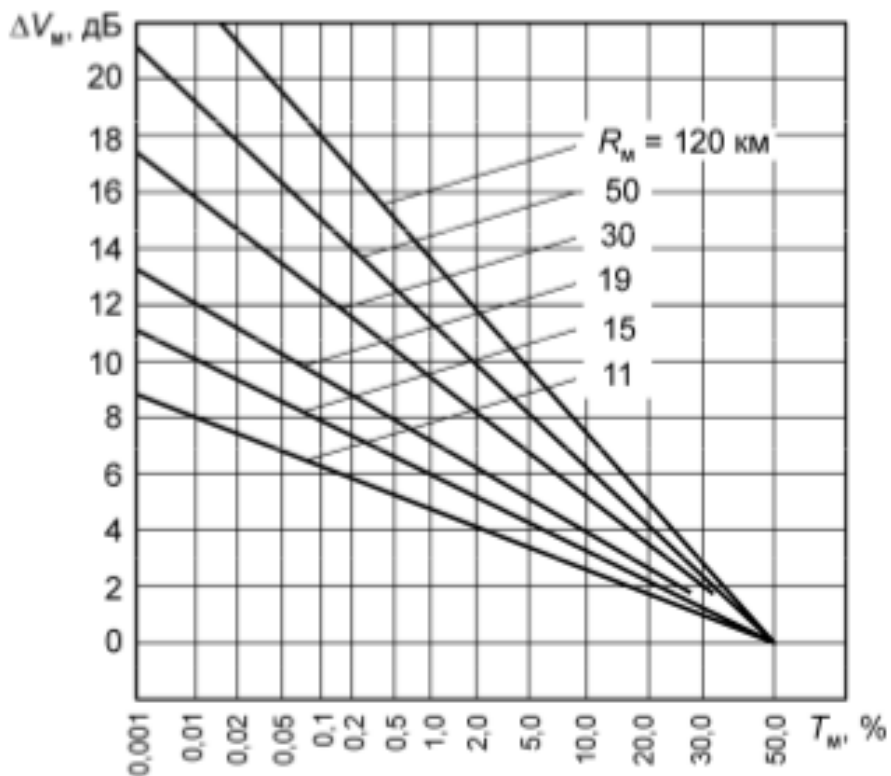


Рисунок. 5.9. Статистичний розподіл глибини замирань ЗС на дифракційних трасах розповсюдження з відкритою місцевістю

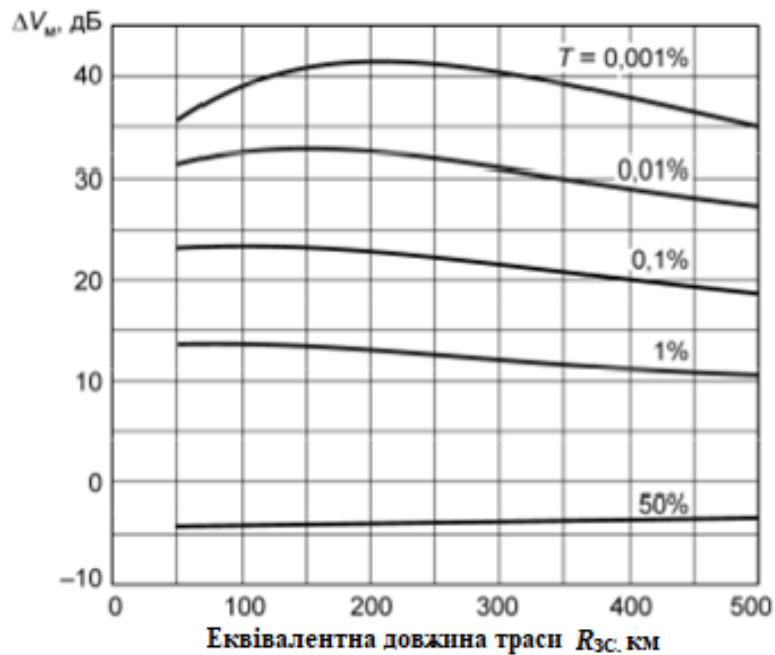


Рисунок. 5.10. Статистичний розподіл глибини замирань ЗС на сухопутних трасах поширення через тропосферне розсіювання

Для ряду служб використовується захисне відношення A на вході приймача станції-реципієнта, нижче якого поточне значення відношення сигнал / завада $Q_{\text{вх}}$ може бути не більше $T_{\text{з,доп}}$ відсотка часу місяця. В цьому разі умова ЕМС має вигляд

$$T_z(A) \leq T_{\text{з,доп}},$$

де $T_z(A)$ – значення ІФР відношення сигнал/завада $Q_{\text{вх}}$ за умови $Q_{\text{вх}}=A$.

В деяких випадках можуть застосовуватись інші критерії забезпечення ЕМС.

Відношення рівня сигналу до завад і шуму на вході приймального пристрою $Q_{\text{вх}}$ визначається для заданих частотного и просторового рознесення джерел корисного сигналу та завади.

Далі змінюється частотне рознесення Δf та для кожного частотного рознесення розраховується необхідна відстань від джерела завади r , при якій забезпечується потрібне захисне відношення A .

Оцінками ефекту взаємодії корисних сигналів, завад та характеристик приймача для різних частот та частотно–територіальних розносів можуть бути [39]:

- частотно–залежне придушення завади (FDR), яке є мірою ослаблення спектра випромінювання сигнала завади за рахунок характеристики вибірконості приймача;

- характеристика частота/відстань (англ. *Frequency/Distance* – FD), яка є мірою мінімальної величини територіального рознесення між схильним до завади приймачем і джерелом завад як функція різниці їх частот налаштування;

– відносне захисне відношення по радіочастоті A (див. Рекомендацію МСЕ-Р BS.560), яке є різницею, вираженою в децибелах, між захисним відношенням, коли несучі корисного та заважаючого передавача відрізняються на Δf , і захисним відношенням при рівності частот обох передавачів.

Характеристика частота/відстань та частотно-залежне придушення дозволяють оцінити вплив механізму зв'язку між джерелом завад та приймачем і є в більшості випадків основними рішеннями багатьох ситуацій при впливу завад. Звернення до цих характеристик полегшує вирішення проблем спільного використання частоти в сумісному каналі та завад у сусідній смузі або каналі шляхом оцінки *критеріїв мінімального частотного та територіального рознесення між приймачем та джерелом завади, при яких забезпечується прийнятна якість роботи приймача.*

Розрахункове завдання з визначення норм частотно-територіального рознесення (ЧТР) розв'язується стосовно пари РЕЗ (приймач-передавач), які можна розглядати або окремо (дуельна ситуація), або при розміщенні РЕЗ в угрупованні.

Розрахунок норм частотно-територіального рознесення здійснюється в такому порядку: оцінювання завадної обстановки, оцінювання забезпечення ЕМС РЕЗ, обчислення кількісних значень величин за частотним (і/або територіальним) рознесенням РЕЗ.

Норми частотно-територіального рознесення розраховують

- або визначенням потрібної різниці між робочими частотами приймача i -го РЕЗ і передавачем j -го РЕЗ (який створює ненавмисні завади при заданих відстанях, на яких забезпечується ЕМС між ними);
- або визначенням мінімальних відстаней між РЕЗ, при яких для заданих частот приймача та передавача i -го РЕЗ і завадного передавача j -го РЕЗ між ними забезпечується ЕМС.

В основу методик аналізу ЕМС РЕЗ, реалізовуваних на практиці, покладено математичний опис трьох основних структурних складових, які визначають проблему:

- джерела електромагнітних випромінювань, що може утворювати завади навколишнім радіоприймальним пристроям;
- радіоприймального пристрою, який зазнає впливу електромагнітних випромінювань;
- шляху, яким завада від джерела надходить до приймача (або утворюється у приймачі). Невід'ємною частиною методики оцінювання ЕМС є певний критерій ЕМС.

В абсолютній більшості ситуацій, що виникають при аналізі ЕМС РЕЗ, джерелом завадних випромінювань є радіопередавач. При аналізі інтермодуляційних завад (незалежно від того, де вони утворюються – у передавачі чи у приймачі) джерелом завади є група передавачів.

Розв'язування завдань ЕМС базується передусім на оцінюванні забезпечення ЕМС РЕЗ за прийнятими критеріями та розробці норм частотно-територіального рознесення РЕЗ.

Рівень корисного сигналу визначається формулою (4.6) з урахуванням втрат передачі для радіолінії (Рекомендація МСЕ-Р Р.341-15 [15]).

Рівень радіозавади у приймачі розраховується з врахуванням коефіцієнта частотної вибірконості приймача (додаток Є) для даної завади, коефіцієнтів підсилення антени джерела завади та антени рецептора завади у взаємному напрямку, потужності передавача завади, втрат поширення радіохвиль (відстань до передавача) завади, необхідного захисного відношення по методиці, яка наведена у додатку 3 [38].

Для досягнення показників надійності, що виключають вплив ненавмисних завад, норми частотно-територіального рознесення розраховуються стосовно найгірших (із позиції ЕМС) умов функціонування РЕЗ. Для цих умов характерні:

- взаємна орієнтація діаграм спрямованості антен передавача та приймача головними пелюстками одна на одну;
- мінімально можливі рівні корисних сигналів на вході приймального пристрою;
- максимально можливі рівні ефективно випромінюваної потужності передавальних пристроїв (зокрема й тих, що створюють ненавмисні завади) і т. ін.

У багатьох випадках прийняті умови функціонування РЕЗ, отримані на підставі розрахунків норм рознесення, відрізняються від реальних. Тому методи оцінювання ЕМС, що ґрунтуються на використанні гарантованих норм частотно-територіального рознесення, не забезпечують високої вірогідності результатів практичного оцінювання ЕМС РЕЗ.

Існує метод оцінювання ЕМС, що дає змогу підвищити вірогідність отримуваних результатів завдяки адаптації норм частотно-територіального рознесення до реальних умов функціонування РЕЗ. Для цього до складу норм рознесення пропонується включити додаткові дані, що характеризують перевищення потужності ненавмисної завади на вході приймального пристрою над припустимим за умовами ЕМС рівнем. Показано, що використання “адаптивних” норм дозволило знизити вимоги до необхідного рознесення розглянутих радіозасобів на 10–30%.

Методика розрахунку норм ЧТР визначена в рекомендації МСЕ-Р SM.337-6 [39] та наведена в додатку 3.

У якості **прикладу** наведемо результати дослідження можливості спільного використання радіоканала авіаційної та наземної радіосистем, які працюють у смузі частот 380-400 МГц [49]:

- наземна система радіозв'язку (передачі даних) сил громадської безпеки *TEDS (TETRA Enhanced Data Service)*;
- військова система радіозв'язку з літаком: станція літака наземна станція – станція літака, *Air – Ground – Air (AGA)*.

Проаналізований сценарій:

- завади базовій станції (*BS*) *AGA* та станції літака;
- приймач працює на мінімальному рівні вище чутливості;
- визначення мінімальної відстані між *BS TEDS* і приймачем *AGA*.

Необхідне рознесення:

- необхідне рознесення між *BS TEDS* та літаком;
- використання іншої ширини каналу передачі даних для *BS TEDS*.

Результат:

- неможливе використання спільного каналу;
- необхідна захисна смуга до 300 кГц.

На рис. 5.11 наведено розрахункові графіки частотно-територіального рознесення двох систем радіозв'язку для випадків ширини смуги каналу передачі даних наземної системи 25 кГц і 150 кГц.

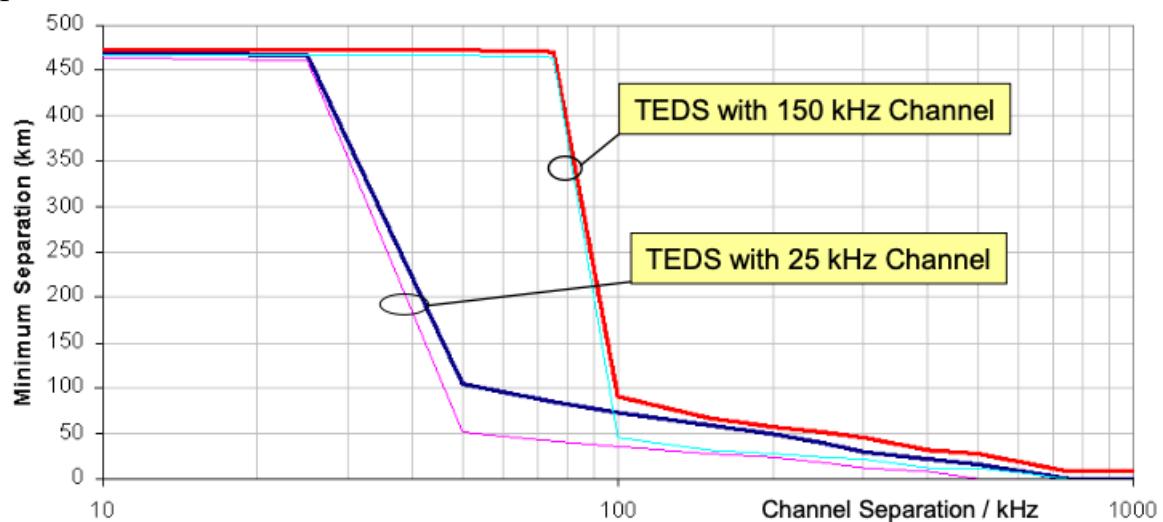


Рисунок 5.11. Частотно-територіальне рознесення двох систем радіозв'язку

5.5. Призначення частотних каналів для РЕЗ

Основна мета призначення частотних каналів у тому, щоб виключити насамперед роботу РЕЗ на одних і тих же частотах при розміщенні РЕЗ у загальних територіях у межах координаційних зон радіостанцій, тобто зон біля РО за межами якої станції інших РЕЗ, що спільно використовують ту ж смугу частот, не створюють заважають випромінювань, що перевищують допустимий рівень, і не піддаються їхнього впливу [2].

Для виключення ненавмисних радіозавад між РЕЗ при одночасної їхньої роботи в загальних територіальних районах більшість РЕЗ, особливо

масового застосування, мають сітки або кілька фіксованих частотних каналів з певним мінімальним рознесенням за частотою (кроком сітки частот).

Наприклад, для радіостанцій сухопутної рухомої служби, що працюють у смузі частот 1,6...8 МГц, мінімальний частотний рознесення між сусідніми каналами сітки частот становить 5 кГц, а працюючих у діапазоні понад 30 МГц – 25 кГц [2]. Сучасні цифрові радіостанції здатні забезпечити роботу з кроком сітки частот 12,5кГц і майже 6,25 кГц, що визначено також у “Плані розподілу і користування радіочастотним спектром в Україні”.

Для роботи РЕЗ різних радіоліній без взаємних радіозавад робочі частоти РЕЗ призначаються так, щоб частотне рознесення (ЧР) між ними становило не менше деякого необхідного значення $\Delta f_{\text{необх}}$, яке в загальному випадку має задовольняти умову

$$\Delta f_{\text{необх}} = |f_c - f_3| \geq (\Delta f_c + \Delta f_3)/2, \quad (5.7)$$

де Δf_c – ширина смуги пропускання приймача станції-рецептора завади; Δf_3 – смуга частот, займана випромінюванням передавача ЗС на заданому рівні –30 дБ або –60 дБ.

При призначенні частотних каналів конкретним РЕЗ повинні враховуватися норми ЧТР, які визначають взаємні видалення між РЕЗ, допустимі потужності випромінювання передавачів та чутливості приймачів, допустимі значення захисних відносин, коефіцієнти підсилення антен, наявність у РЕЗ сіток або виділених номіналів частот та низку інших характеристик. Мініально необхідний ЧР $\Delta f_{\text{необх}}$, який забезпечує роботу РЕЗ без взаємних завад, визначається насамперед видом модуляції використовуваних у РЕЗ сигналів. Тому з достатньою для практики точністю чисельні значення Δf_c і Δf_3 повинні відповідати нормам на ширину смуги радіочастот радіопередаючих пристроїв [2].

Завдання раціонального призначення частот є особливо актуальним при організації роботи РЕЗ без взаємних завад у метровому, дециметровому та сантиметровому діапазонах радіохвиль, де працює найбільша частина різних РЕЗ фіксованої та рухомої служб, радіо- та телевізійного мовлення, і навіть інших служб [2].

Якщо процесі призначення частотних каналів виявляється, що виділене під час розподілу будь-якій службі число каналів виявляється менше необхідного до роботи РЕЗ, то одні й самі частоти можуть повторно призначатися іншим РЕЗ, зокрема і однотипним. Умовою такого призначення є суворе виконання норм ЧТР та розміщення РЕЗ, що поєднуються, за межами координаційних зон відповідних станцій або роботи РЕЗ у різні інтервали часу. Такий метод призначення частотних каналів РЕЗ суттєво підвищує ефективність використання радіоспектру та широко використовується, наприклад, у сучасних сухопутних системах

рухомого зв'язку. Основою реалізації способу повторного призначення частотних каналів у таких системах є застосування принципів стільникового покриття загальної території обслуговування, принципу кластування частотно-територіального ресурсу системи та принципу секторування сот.

Результатом такої організації стільникової інфраструктури зв'язку досягається можливість багаторазового використання щодо невеликої кількості частотних каналів на невеликій території.

Для РЕЗ, розташованих на одному об'єкті, частотні канали призначаються так, щоб виключити роботу РЕЗ не тільки на частотах, що збігаються, але і на таких частотах, які призводять до збігу випромінювань передавачів на гармоніках з основними каналами прийому сумісних РЕЗ або основних випромінювань передавачів з побічними каналами приймачів сумісних РЕЗ.

Ефективність призначення частотних каналів як один з основних та найважливіших способів забезпечення ЕМС РЕМ характеризується таким:

- рознесення частотних каналів РЕМ відповідно до умови (5.7), як правило, практично повністю виключає взаємні завади між РЕЗ, оскільки залежно від значень Δf_c та Δf_z рівень взаємних завад послаблюється на – (40...60) дБ;

- призначення частотних каналів не вимагає значних часових та матеріальних витрат у порівнянні, наприклад, з територіальним рознесенням РЕЗ і здійснюється при видачі дозволу на експлуатацію РЕЗ або під час експлуатації.

Для незначних за кількістю (одиниці) сукупностей РЕЗ на обмежених по території районах призначення частотних каналів виконується просто методом перебору виділеного числа частотних каналів з урахуванням умови (5.7) та норм ЧТР. В умовах обмеженого часу на практиці для підбору вільної частоти з переліку дозволених також використовують портативні аналізатори спектра.

Для значних за кількістю (десятки – сотні і більше) сукупностей РЕЗ у великих районах методи призначення частотних каналів досить складні, ґрунтуються на використанні ЕОМ і відповідного програмного забезпечення.

В дуплексному радіозв'язку забезпечується одночасний двосторонній радіозв'язок з різними частотами для прийому і передачі. Призначення частотних каналів для таких радіосистем та забезпечення ЕМС ускладнюються, особливо у багатоканальних радіосистемах, в яких забезпечується множинний доступ з поділом каналів за частотою (*FDMA*, англ. *Frequency Division Multiple Access*).

На перший погляд здається, що для забезпечення зв'язку кількох абонентів один із одним на певній площі (географічній зоні обслуговування) потрібно виділити кожному з них лише смугу частот ($\Delta F_{\text{сигн}}$) передавання

(на несучий частоті f_1) і смугу частот приймання (на несучий частоті f_2) із шириною, що дорівнює смузі частот радіосигналу $\Delta F_{\text{сигн.}}$. Якщо приймач і передавач мають працювати одночасно (дуплексний радіоканал), то для уникнення блокування приймання власним передавачем частоти f_1 і f_2 мають різнитися (бути “рознесеними”, звідси термін – “дуплексне рознесення”) на величину, значення якої визначається багатосинальною вибірністю приймача (навіть якщо приймач і передавач працюють на різні антени). Ця пара частот для радіозв’язку еквівалентна проводовій лінії, за допомогою якої утворюється канал зв’язку. Тому часто замість терміна “радіоканал, утворюваний однією частотою або парою частот приймання і передавання”, вживається скорочений термін “канал”.

Отже, виділена ділянка частот для РЕЗ із частотним розділенням каналів (*FDMA*) найчастіше, поділяється на дві частини:

- смуга частот на передавання; вона є діапазоном частот приймача кореспондента;
- смуга частот на приймання, яка не збігається з попередньою; вона є діапазоном частот передавача кореспондента (рис. 5.12).

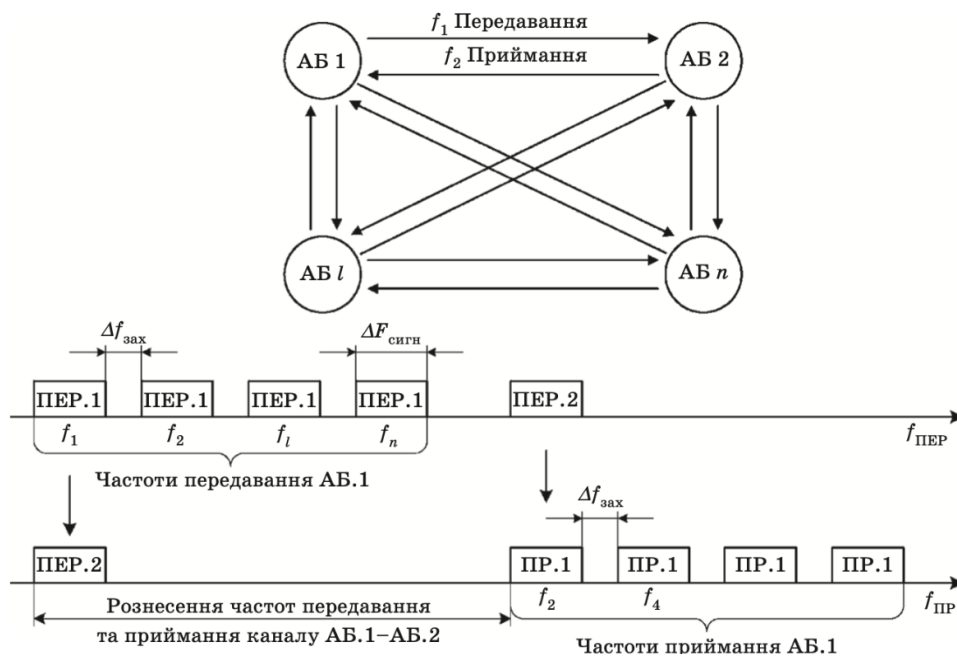


Рисунок 5.12. До розміщення закріплених частот передавання та приймання в системі зв’язку «кожний із кожним»

Необхідність рознесення частот передавання та приймання радіостанції зумовлена близьким розміщенням передавача та приймача, їх підімкненням до однієї антени або необхідністю їх одночасної роботи в разі дуплексного радіозв’язку.

Кожна із зазначених частин поділяється на розрахункову кількість каналів (частот зв’язку), кожний із яких займає спектр шириною $\Delta F_{\text{сигн.}}$.

Значення $\Delta F_{\text{сигн}}$ визначається параметрами модулюючого сигналу. Якщо потрібен зв'язок абонентів "кожного з кожним", то загальна кількість N_k необхідних каналів (пар частот) за такого (частотного) розділення каналів для кількості $N_{\text{аб}}$ абонентів становитиме

$$N_k = N_{\text{аб}} (N_{\text{аб}} - 1).$$

У разі великого числа $N_{\text{аб}}$ (тобто при $N_{\text{аб}} \gg 1$) необхідну кількість пар можна взяти згідно з такою наближеною рівністю: $N_k \approx N_{\text{аб}}^2$.

У разі частотного розділення каналів між каналами зазвичай передбачається захисний інтервал $\Delta f_{\text{зах}}$. Значення $\Delta f_{\text{зах}}$ залежить від вибірності приймача щодо сусіднього каналу $D_{\text{с.к}}$, абсолютної нестабільності частоти передавача та приймача, ефекту Доплера і т. ін.

Потрібна кількість пар частот пов'язана з шириною діапазону виділених частот $f_{\text{мін}} \dots f_{\text{макс}}$ співвідношенням

$$N_k \approx (f_{\text{макс}} - f_{\text{мін}}) / (\Delta F_{\text{сигн}} + \Delta f_{\text{зах}})$$

Отже, у разі *жорсткого закріплення частот* за абонентами в інтервалі $f_{\text{мін}} \dots f_{\text{макс}}$ можлива *одночасна* робота $N_{\text{аб}}$ абонентів, причому

$$N_{\text{аб}} \approx [(f_{\text{макс}} - f_{\text{мін}}) / (\Delta F_{\text{сигн}} + \Delta f_{\text{зах}})]^{0.5}$$

Звідси випливає, що збільшення $N_{\text{аб}}$ (задоволення зростаючого попиту на частотний ресурс) можливе лише за рахунок розширення діапазону використовуваних частот $f_{\text{макс}} - f_{\text{мін}}$, максимально можливого звуження смуги частот $\Delta F_{\text{сигн}}$, займаної радіосигналом (якщо дозволяє швидкість передавання інформації) і зменшення захисного інтервалу $\Delta f_{\text{зах}}$.

Викладене аргументує *виправданість суворих заходів щодо дотримання норм на ширину смуги випромінюваного спектра для кожного виду випромінювань*. Саме тому в Регламенті радіозв'язку наведено розрахункові співвідношення для необхідних смуг частот різних видів радіовипромінювань. Завжди зі схваленням зустрічаються технічні рішення, що сприяють звуженню смуги $\Delta F_{\text{сигн}}$.

У деяких системах звуженню спектра сприяє застосування методів цифрової обробки сигналів (низькошвидкісні цифрові кодеки, багатопозиційні радіосигнали із квадратурною амплітудно-фазовою маніпуляцією). Як відомо з теорії електрозв'язку, чим нижча швидкість передавання (вужча смуга частот модулюючого сигналу), тим менша смуга частот $\Delta F_{\text{сигн}}$.

Щоб зменшити інтервал $\Delta f_{\text{зах}}$, у радіосистемах намагаються максимально можливо *зменшувати абсолютну нестабільність частоти* радіовипромінювань. Цього досягають поступовим (у процесі реалізації

дедалі вищої стабільності частоти радіопередавачів і радіоприймачів) підвищенням жорсткості норм на припустимі відхилення частоти радіозасобів.

Зауважимо, що реалізація техніко-економічного ефекту від застосування більш “ущільненої” сітки частот має супроводжуватися значним поліпшенням вибірності радіоприймачів і зниженням рівня шумових та позасмугових випромінювань радіопередавачів.

Одним із організаційних заходів щодо дотримання норм на ширину смуги спектра та норм припустимих відхилень частоти є радіоконтроль (із подальшим вжиттям заходів у разі недотримання встановлених норм аж до економічних санкцій).

При призначення дуплексних частотних каналів у радіосистемах, особливо у багатоканальних, для забезпечення ЕМС необхідно ретельно проводити аналіз можливого впливу радіозавад, у тому числі інтермодуляційних, по усіх каналах прийому кожного з приймачів.

5.6. Активні просторові та поляризаційні способи захисту від завад

Завдання підвищення стійкості до завад приймальних пристроїв радіоелектронних засобів (РЕЗ) є класичним і не втрачає своєї актуальності протягом десятиліть. Розв'язання задачі підвищення завадостійкості досягається за рахунок вдосконалення засобів та способів формування та обробки сигналів та характеристик антен.

Для покращення ЕМС у системах радіозв'язку використовують різні методи: розширення спектру сигналу, адаптацію по частоті, адаптацію по потужності, адаптацію по швидкості передачі даних та відповідно методу модуляції, завадостійке кодування та ін.

Вибірні властивості приймальної антени дають змогу відрізнити й виокремлювати корисний радіосигнал на тлі заваданих випромінювань за рахунок різниці в напрямі приходу радіохвиль і/або їх поляризації.

Для захисту від завад використовуються як *активні методи (адаптивні антенні решітки – ААР та автокомпенсатори завад – АКЗ)* так й пасивні методи – зменшення рівня бокових пелюсток ДСА (корекція діаграм спрямованості антен з допомогою додаткових елементів, бленди, захисні екрани та ін.). Вибір методу залежить від характеру завади (навмисна або не навмисна), кількості завад, динаміки зміни завадової обстановки, типу антен, які використовуються та від інших причин.

Пристрої обробки сигналів (ПОС) входять до складу приймальних пристроїв РЕЗ (рис. 5.13), де ПФС – пристрій формування сигналів; ПРД – передавач; ПРМ – приймач) і забезпечують виділення корисних сигналів $u_s(t)$, що містять повідомлення $s(t)$, з прийнятої суміші сигналів, шуму та завад $x(t)$. Крім того, на засоби обробки покладаються завдання щодо компенсації впливу небажаних властивостей каналів зв'язку, наприклад, боротьба з багатоприменовістю поширення і, отже, із завмираннями $s(t)$

рівня сигналу на вході приймача, компенсація спотворень, викликаних характеристиками каналу зв'язку та ін. Найкращим вважається такий засіб обробки, який дозволяє виділити на приймальній стороні повідомлення $s^*(t)$ з найменшими відмінностями від переданого повідомлення $s(t)$.



Рисунок. 5.13. Система радіозв'язку

Виділення корисного сигналу $u_s(t)$ із суміші з шумом $n(t)$ і завадами $u_n(t)$ можливе на основі використання відмінностей за фізичними параметрами: *поляризації, частотним, часовим параметрам, у напрямку приходу, формою сигналів*. У тих чи інших умовах вигіднішим може бути якийсь із цих ознак. Однак в умовах зростання кількості одночасно функціонуючих РЕЗ та непередбачуваності параметрів їх випромінювань (особливо для рухомих систем радіозв'язку) недостатньо використання будь-якої однієї ознаки. Для ефективного вирішення завдання забезпечення необхідного рівня завадостійкості прийому потрібне використання всіх наявних фізичних можливостей виділення сигналів із завад (заважають сигнали різної природи). Тільки тоді може бути досягнуто максимальної пропускної здатності системи радіозв'язку при заданій достовірності зв'язку.

Рухливість абонентів, часта зміна місць встановлення базових станцій призводять до високої динаміки зміни сигнально-завадової обстановки (СЗО) та непередбачуваності параметрів завад. Це говорить про необхідність підстроювання характеристик засобів обробки сигналів для кожного конкретного випадку СЗО. Таке підстроювання можливе за рахунок адаптивної обробки сигналів.

Адаптивна обробка сигналів є одним із способів вирішення низки проблем у радіотехнічних системах та системах зв'язку. З адаптивною обробкою сигналів пов'язують можливість реалізації потенційних характеристик радіоелектронних систем в умовах електромагнітної обстановки, що динамічно змінюється і постійно ускладнюється. Загострення проблем забезпечення необхідного рівня стійкості до завад, електромагнітної сумісності, збільшення потреб у пропускній здатності, підвищення вимог до якості функціонування радіотехнічних систем і систем зв'язку ставлять нові завдання, що вимагають якнайшвидшої розробки ефективних способів адаптивної обробки сигналів.

Інтерес до адаптивної обробки сигналів істотно підвищується у зв'язку з їх можливостями з придушення сигналів, що заважають, у тому числі при мінімумі апріорних відомостей про їх параметри. У системах рухомого і

фіксованого зв'язку третього, четвертого і п'ятого поколінь (3G, 4G і 5G) передбачається застосування адаптивних антен (в англomовній літературі «інтелектуальні» антени), що дозволяють боротися з ефектами багатопроменевості, розширити зону обслуговування однієї базової станції, та базових станцій, підвищити кількість одночасно працюючих в одній зоні обслуговування абонентів, підвищити пропускну здатність каналів управління та трафіку, усунути вплив внутрішньосистемних та міжсистемних завад, що діють у смузі частот корисного сигналу, вирівняти потужності сигналів від різновіддалених абонентів на вході приймального пристрою, здійснювати оперативне управління потужністю випромінювання, вирішувати завдання місцезнаходження, забезпечення мінімуму випромінювання в напрямках радіoeлектронних засобів, що які можуть бути схильні до дії завад, та ін. Всі ці можливості реалізуються завдяки здатності налаштування адаптивних передаючих фазованих антенних решіток (АФАР) і приймальних адаптивних антенних решіток (ААР) на максимально ефективний прийом корисного сигналу та придушення завад.

До традиційних засобів обробки сигналів, використовуваних нині, можна віднести адаптивний рознесений прийом сигналів, поділ сигналів за рахунок технології МІМО. У обладнанні фіксованого радіодоступу використовуються спрямовані властивості антен, адаптивне (динамічний) управління доступним у зоні обслуговування частотним ресурсом.

У зарубіжних публікаціях велика увага приділяється розвитку напряму «інтелектуальних» антен та «програмованого» радіо». Системи наступних поколінь радіозв'язку (5G) нерозривно пов'язуються з поняттям адаптації на всіх рівнях, починаючи з фізичного рівня радіoeлектронних засобів і закінчуючи інтерфейсом користувача, вибором мережі зв'язку, доступної в даний момент і найбільш підходящої для отримання необхідних послуг зв'язку.

Для розробки ідеології адаптивних та «інтелектуальних» засобів радіозв'язку створено безліч дослідницьких груп у Європі, США та інших країнах.

Величезний інтерес до адаптивним системам обробки сигналів проявляється військовими відомствами, оскільки однією з найважливіших завдань військових систем є стійке функціонування за умов впливу навмисних завад.

Наступний етап розвитку засобів обробки буде заснований на спільному використанні різних способів адаптивної обробки сигналів та адаптивне управління частотно-часовими ресурсами з прив'язкою до конкретної території.

Найважливішу роль адаптивних систем обробки здатні зіграти при **вирішенні проблеми електромагнітної сумісності**. З їх використанням можлива мінімізація впливу ненавмисних випромінювань, що заважають (теоретично до нуля) і придушення будь-яких сигналів, що заважають у

смузі частот корисного сигналу. Це відкриває нові можливості для повторного використання одних і тих же смуг частот системами зв'язку різних операторів в одній зоні обслуговування. Застосування адаптивних систем обробки здатне дати реальне скорочення норм частотно-територіального рознесення систем радіозв'язку у десятки та сотні разів. Приклади вирішення подібного завдання для випадку рознесення РЕЗ фіксованих супутникової та наземної служб, що працюють на одних частотах, відомі.

Таким чином, особливості завдань, які пов'язані з необхідністю забезпечення необхідних завадостійкості, електромагнітної сумісності РЕЗ в умовах невизначеності в параметрах випромінювань, вимагають використання засобів поляризаційної, просторової, часової обробки та пристроїв кореляційної (когерентної) обробки.

Застосування ААР дозволяє поряд з вирішенням проблеми підвищення завадостійкості вирішити завдання підвищення пропускної спроможності і стійкості зв'язку з випадковим множинним доступом з кодовим поділом сигналів за рахунок використання ефекту захоплення одного з корисних сигналів. За рахунок застосування ААР можливим є збільшення пропускної спроможності таких методів доступу на 20 –30 %, що робить їх порівнянними з протоколами детермінованого доступу.

Використання у складі ААР просторового та поляризаційного фільтрів дозволяє вирішувати завдання щодо визначення просторових координат джерел випромінювань (у тому числі заважають), наприклад несанкціонованих РЕЗ та абонентів системи, з високою точністю. Висока точність досягається застосуванням методів надрозв'язання.

Застосування ААР фізично здатне призвести до зростання ефективності в значній частині областей застосування радіозв'язку, що безпосередньо позначається на якості виконання функціональних завдань елементів систем зв'язку.

5.6.1. Поняття про адаптивні антени

Характеристика адаптивних методів формування та обробки сигналів

Основними методами адаптивного формування та обробки сигналів на радіочастоті є методи формування та обробки у просторовій, поляризаційній та часовій (частотній) областях, які добре поєднуються з кореляційною обробкою сигналів. Спільними для методів просторової, поляризаційної та часової обробки є можливості побудови високоефективних алгоритмів адаптивної настройки, які націлені на застосування у конкретній сигнально-завадовій обстановці.

Застосування адаптивних просторово-часових методів формування та обробки сигналів (ПЧОС) забезпечує високу ефективність придушення завад, просторове становище яких відрізняється від розташування джерела корисного сигналу. Методи адаптивної ПЧОС мають важливі переваги, що впливають з їх властивостей:

- їх використання не пов'язане із втратою пропускну здатності каналів зв'язку в режимі передачі інформації;
- вони не призводять до ускладнення електромагнітної обстановки;
- спільно з ПЧОС можуть застосовуватися інші методи обробки, наприклад, МІМО та кореляційна обробка, при цьому результуюча ефективність підвищується;
- виявлення та придушення завад методами адаптивної ПЧОС можливе без апріорної інформації про їх параметри.

Застосування методів ПЧОС пов'язане з низкою складнощів:

- обмеження кількості завад, що пригнічуються, числом ступенів свободи адаптивної антенної решітки;
- неможливість або низька ефективність придушення завад, що надходять з напрямків, близьких до напрямку приходу корисного сигналу;
- ускладнення радіоелектронних засобів систем зв'язку;
- поява інерційності, пов'язаної із процесом адаптації.

Методи адаптивної поляризаційної обробки знаходять все більше застосування (наприклад, у технології телемовлення DVB-NGH), і в ряді випадків дають не менший вииграш у завадостійкості, ніж просторово-часові методи. Крім того, при відмінності корисного сигналу та завад з поляризації з'являється можливість виділення корисних сигналів і натомість завад у випадках збігу напрямів їхнього приходу, тобто при збігу просторових спектрів сигналу та завади. Методи поляризаційно-часової обробки також допускають поєднання практично з усіма іншими методами запобіжного захисту. Введення їх до складу радіоелектронних засобів систем зв'язку дозволяє підвищити пропускну здатність за рахунок повторного використання частоти, дозволяє виключити ефект «засліплення» антенної решітки при попаданні завади в головну пелюстку діаграми спрямованості тощо.

Недоліки цих методів аналогічні недолікам просторово-тимчасової обробки та пов'язані:

- з неможливістю придушення більше однієї завади що є наслідком наявності лише одного ступеня свободи (за умов далекої зони);
- з неможливістю придушення завад із поляризацією, що збігається з поляризацією корисного сигналу;
- з неможливістю придушення частково—поляризованих завад [48];
- з інерційністю, пов'язаною із процесом адаптації.

Загальні відомості про адаптивні антени

Основною особливістю адаптивних антен (АА) є можливість управління формою характеристики (діаграми) спрямованості (ДС) з метою ослаблення впливу завад до повного їх придушення. Управління ДС АА здійснюється шляхом зміни амплітудно-фазового розподілу (АФР) поля в

апертурі антени. При відомому розподілі у просторі джерел сигналів і завад визначення оптимального у певному сенсі АФР може бути виконано щодо простими засобами (наприклад, рішенням відомої задачі синтезу ДС). Однак можливе формування оптимального АФР та в умовах апріорної невизначеності сигнально-завадової обстановки. У цьому випадку управління АФР проводиться за допомогою процесора з використанням мінімальної інформації про сигнали та їх джерела.

Необхідна для роботи АА інформація може включати відомості про просторові, поляризаційні, часові, частотні параметри сигналів і завад. ***Сукупність апріорних відомостей, необхідні роботи конкретної АА, прийнято називати опорним сигналом.*** Підвищення відношення сигналу до суміші шуму та завади (скорочено відношення сигнал/(завада + шум) або ВСШЗ) досягається шляхом формування мінімумів ДС у напрямках на джерела завад. При цьому можливий автоматичне врахування взаємного зв'язку між антенними елементами, не ідентичності каналів АА, виходу з ладу окремих елементів і т. п. Таким чином, форма ДС як би пристосовується до конкретної сигнально-завадової обстановці з урахуванням всіх факторів. Звідси походить назва адаптивних антен (адаптація і означає пристосування). Придушення завад в АА можливе лише за різних кутах приходу корисних сигналів і завад, або за їх поляризаційних параметрів. Чим більша ця відмінність, тим вища ефективність АА. У процесі адаптації обробка сигналів, що приходять на АА, проводиться в реальному масштабі часу.

Адаптивною антеною називається сукупність багатoelementної антени та адаптивного процесора, за допомогою якого здійснюється автоматична зміна АФР у розкритті антени.

Процес адаптації полягає у цілеспрямованій зміні параметрів керованих елементів антено-фідерного тракту, що впливають на АФР поля у розкритті. Управління цими елементами здійснюється на підставі апріорних даних та інформації, що отримується з різних джерел: з виходів елементів антени, з виходу всієї антени, а також з опорного сигналу. Мета та результат такого управління полягають у досягненні екстремуму заданого показника якості.

Параметри та характеристики адаптивних антен змінюються для покращення якості роботи в умовах невизначеності параметрів сигнально-завадової обстановки, просторового положення антени та ін.

В адаптивних антена під впливом керуючих сигналів процесора змінюється АФР поля в розкритті антени.

Основним методом управління є зміна ***комплексних коефіцієнтів передачі каналів*** окремих елементів АР.

Комплексні коефіцієнти передачі включають коефіцієнти передачі амплітуди та фазові зсуви окремих каналів. Ці коефіцієнти називають ваговими коефіцієнтами (ВК).

Операція комплексного зважування сигналу решітки антени зазвичай здійснюється за допомогою пристрою з квадратурними каналами, схема якого показана на рис. 5.14. Сигнал кожного елемента решітки поділяється на синфазну та квадратурну складові за допомогою фазообертача, що здійснює зсув фаз на 90° . Кожна зі складових піддається операції множення на змінний ваговий коефіцієнт, після чого результати множення підсумовуються і формується вихідний сигнал.

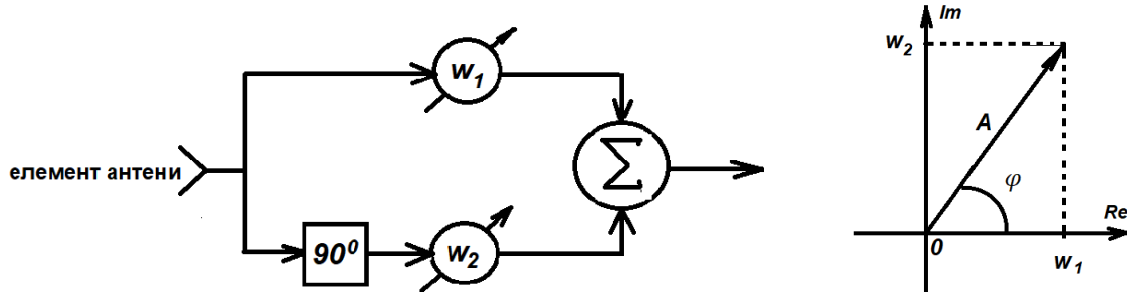


Рисунок 5.14. Структурна схема пристрою з квадратурними каналами для виконання операції комплексного зважування

Результуючий комплексний коефіцієнт передачі дорівнює $Ae^{j\varphi}$, де $\varphi = -\arctg(w_1/w_2)$ і $A = (w_1^2 + w_2^2)^{1/2}$. Вважається, що вагові коефіцієнти w_1 і w_2 приймають як позитивні, так і негативні значення і діапазон зміни амплітуди A обмежується лише діапазоном зміни цих коефіцієнтів.

На рис. 5.15 наведено узагальнену структурну схему N -елементної адаптивної антени. Основними елементами АА є діаграмоутворююча схема (ДУС) і адаптивний процесор.

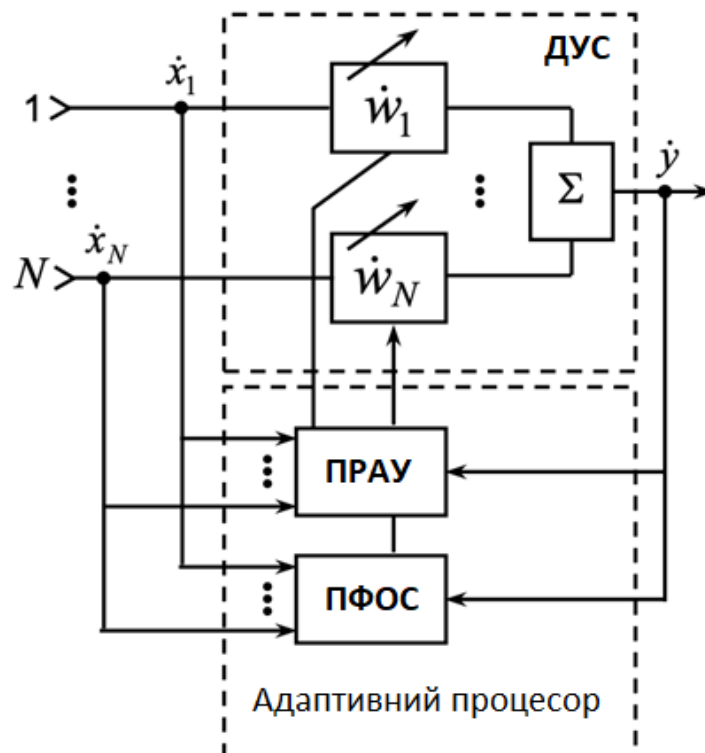


Рисунок 5.15. Структурна схема N -елементної адаптивної антени

Процесор здійснює підстроювання вагових коефіцієнтів у каналах ДУС та складається з пристрою реалізації алгоритму управління (ПРАУ) та пристрої формування опорного сигналу (ПФОС). Принцип дії АА полягає в наступному. На виході кожного з N антенних формується комплексний сигнал $\dot{x}_n$ (n -номер елемента). Цій сигнал надходять у відповідний канал ДУС, при проходженні якого, множиться на ВК w_n . Потім всі сигнали надходять до суматора і на його виході утворюється результуючий y_n .

Адаптивні антени здійснюють вагову обробку сигналів у всіх приймальних каналах. Вагова обробка полягає у підсумовуванні сигналів $\dot{x}_i$, які отримані з N виходів різних антен з урахуванням вагових коефіцієнтів w_i , тобто

$$\dot{y} = \sum_1^N \dot{w}_i \dot{x}_i . \quad (5.8)$$

В адаптивних антенних решітках керування характеристикою спрямованості здійснюється регулюванням амплітуд та фаз напруг сигналів x_{cn} і x_{zn} , що знімаються з виходів окремих елементів (груп елементів) АР. Це досягається множенням зазначених напруг на відповідні комплексні ВК $\dot{w}_n$. Після множення напруг сигналу та завад на комплексні вагові коефіцієнти $\dot{w}_n$ і наступного підсумовування, отримаємо:

$$\dot{y} = \sum_1^N \dot{w}_i (x_{cn} + x_{zn}) = y_c + y_z , \quad (5.9)$$

де y_c, y_z - напруга корисного сигналу та завади відповідно на виході суматора решітки.

Вагові коефіцієнти в адаптивних решітках підбираються автоматично таким чином, щоб у суматорі напруги корисного сигналу склалися приблизно у фазі, а напруги завади компенсувалися.

Опорний сигнал, необхідний функціонування процесора, виробляється в ПФОС. Для цього використовуються апріорні дані або безпосередньо сигнали $\dot{x}_n$ і $\dot{y}$. На процесор поряд із опорним сигналом надходять також сигнали $\dot{x}_n$ і (або) $\dot{y}$. Процесор із закладеного в нього алгоритму управління обробляє ці дані і формує керуючі сигнали на вагові коефіцієнти. У процесі адаптації ВК підлаштовуються до тих пір, поки якість вихідного сигналу не задовольнятиме заданий критерій. Реалізація того чи іншого критерію якості (КЯ) вихідного сигналу забезпечується алгоритмом управління процесора.

Для досягнення заданого КЯ за умов апріорної невизначеності використовуються різні методи теорії оптимізації. Алгоритм адаптації є реалізацію конкретного КЯ у вигляді обраного методу адаптації. Алгоритми адаптації та наявний набір вихідних даних істотно впливають на структурну схему АА. Тому в реальній антені можуть бути не всі зв'язки, показані на рис. 5.14.

Найбільш поширені такі критерії адаптації:

- максимум відношення сигнал/шум;
- мінімум потужності власних шумів на виході ААР;
- мінімум потужності залишків завад на виході ААР.

Двома основними підходами до просторової фільтрації є управління положенням нуля діаграми направленості антени (null-steering) і формування головної пелюстки ДН антени (beamforming) [53]. У випадку формування ДН відбувається регулювання антени для максимізації відношення сигнал/шум. Якщо напрямок надходження корисного сигналу відомий, метод beamforming може ефективно максимізувати SNR. Проте іноді складно отримати інформацію про напрямок надходження сигналу і місцезнаходження об'єкта.

На рис. 5.16 наведені діаграми спрямованості адаптивної антени для випадків відсутності та наявності завади.

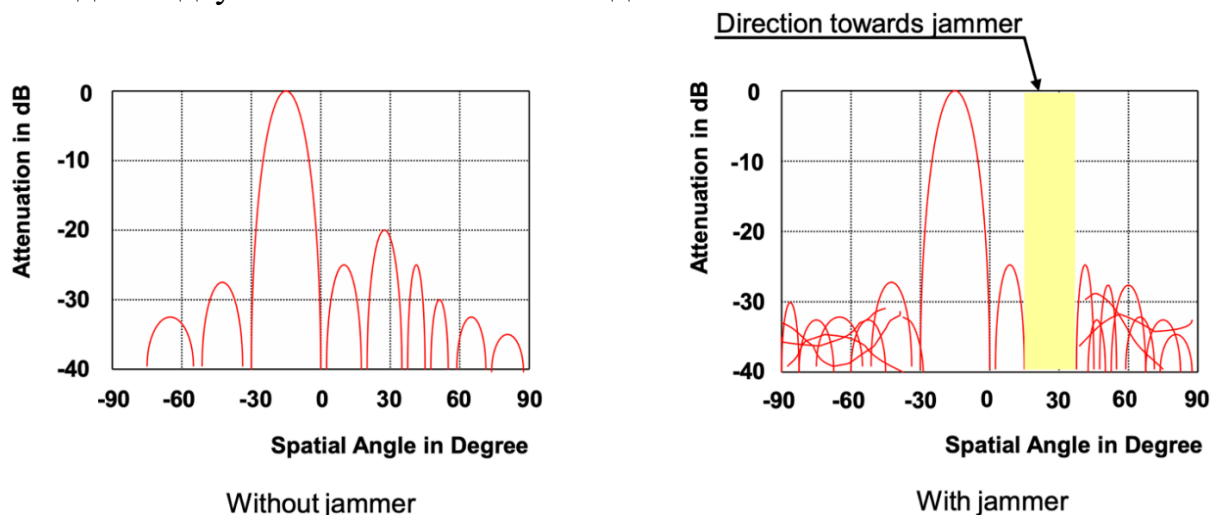


Рисунок 5.16. Діаграми спрямованості адаптивної антени для випадків відсутності та наявності завади.

Зазначені методи дають змогу боротися з найрізноманітнішими завадовими сигналами (ЗС), зокрема й з такими, вид модуляції яких збігається з видом модуляції корисного сигналу (КС), а поляризаційні методи дозволяють боротися з завадами, які мають той же самий напрямок приходу, що й корисний сигнал.

Чім більш відрізняється напрям приходу завади від напрямку приходу сигналу, тем вище ефективність придушення завад. Крім того, чим більше елементів містить ААР, тим краще придушення і тим менший рознос за кутом приходу потрібне для придушення завад.

Число завад, що пригнічуються в ААР, не перевищує число $(N_a - 1)$.

5.6.2. Компенсатори завад

За принципами обробки сигналів (принципів придушення завад) адаптивні антени поділяються на АР фільтрації сигналів та адаптивні компенсатори (АК).

В АР адаптивної просторової фільтрації сигналів одночасно у непрякій формі проводиться оцінка сигналів, що надходять. При цьому вся АР сприймається як єдиний просторовий фільтр, який характеризується передавальною характеристикою. В адаптивних компенсаторах важливим є наявність основного та додаткового (компенсаційного) каналів, причому зважування сигналів здійснюється тільки в додатковому каналі, а в основному – не здійснюється. Додатковий канал часто називають компенсаційним, тому що в режимі придушення завад він призначений для компенсації сигналів основного каналу (рис. 5.17). У суматорі відбувається віднімання компенсаційного сигналу з основного.

На відміну від ААР просторової фільтрації сигналів адаптивні компенсатори призначені тільки для придушення завад та не дозволяють стежити за джерелом корисного сигналу.

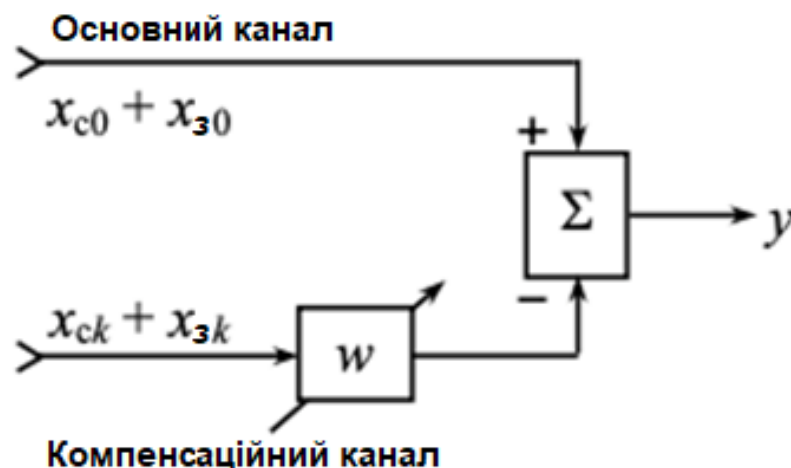


Рисунок 5.17. Схема адаптивного компенсатора завад

Принцип придушення завад в адаптивному компенсаторі наступний. Нехай на адаптивний компенсатор впливає корисний сигнал та завада. На виході антенного елемента основного каналу є сигнал x_{c0} , завада x_{z0} , а на виході компенсаційного антенного елемента каналу -корисний сигнал x_{ck} і завада x_{zk} . Ваговий коефіцієнт компенсаційному каналі w змінюється таким чином, щоб значення сигналу після зважування у компенсаційному каналі $w^+(x_{ck} + x_{zk})$ прагнуло значення x_{z0} . Тоді сигнал на виході компенсатора буде визначатися виразом

$$y = x_{c0} + x_{z0} - w^+(x_{ck} + x_{zk}) . \quad (5.10)$$

У випадку, коли $|x_{zk}| \gg |x_{ck}|$ та $|x_{c0}| \gg |x_{ck}|$ отримаємо:

$$y \cong x_{c0} + x_{z0} - w^+ x_{zk}.$$

Якщо ваговий коефіцієнт w підібрати таким, щоб виконувалося рівність

$$w^+ x_{zk} = x_{z0},$$

то на виході компенсатора отримаємо тільки корисний сигнал основного каналу, тобто

$$y \cong x_{c0}.$$

Із умови $|x_{zk}| \gg |x_{ck}|$ слід, що принцип адаптивний компенсації завад доцільно застосовувати тоді, коли на виході антени компенсаційного каналу потужність завади набагато перевищує потужність корисного сигналу. При цьому у практичних ситуаціях компенсаційна антена може бути як гостронаправленою, так і слабоспрямованою. Якщо у якості компенсаційної використовується гостронаправлена антена, то максимум її ХН орієнтується на напрям джерела завади. При слабоспрямованій компенсаційній антени її ХН має перекривати зону можливої наявності джерел завад. При цьому у обох випадках виконуються нерівності $|x_{zk}| \gg |x_{ck}|$ і $|x_{c0}| \gg |x_{ck}|$.

Залежно від кількості елементів компенсаційної решітки розрізняють одно-і багатоканальні компенсатори. Для придушення однієї завади здебільше достатньо одноканального компенсатора. Якщо завад кілька, то використовують багатоканальні компенсатори.

В одноканальних АК для регулювання у процесі адаптації використовується один ВК. Такі АК дозволяють придушувати тільки одну заваду, але на практиці саме вони, як найпростіші, здобули найбільшого поширення.

В АК відбувається мінімізація потужності сумарного сигналу виході компенсатора. Зауважимо, що мінімізація цієї потужності досягається шляхом компенсації корельованих складових сигналів, прийнятих в основному та компенсаційному каналах. На виході АК залишаються лише некорельовані складові сигналів. Тому сигнали на виході та входах адаптивного компенсатора виявляються декорельованими між собою.

Особливістю АК є те, що у якості опорного використовується сигнал, що знімається з виходу основної антени.

Для максимальної підтримки рівня сигналу на виході АК необхідно, щоб коефіцієнт передачі допоміжної антени у напрямку приходу корисного сигналу був мінімальний, т. е. прагнув нулю.

У таких КЗ використовують додаткову антену, орієнтовану на джерело радіозавади, і пов'язаний із нею додатковий приймач.

У напрямі до джерела КС коефіцієнт підсилення додаткової антени має бути незначним, аби на цьому вході відношення завада/сигнал було

якогомога більшим (понад 50 дБ). Це зумовлено тим, що значення цього відношення обмежує можливості компенсації завад у основному тракті.

Характеристика спрямованості адаптивної антени у разі дії однієї завади з бокових пелюсток має вигляд, показаний на рис. 5.18. У напрямку приходу завади до ХН антени існує глибокий мінімум.

Технічно КЗ можна створити для роботи на радіо-, проміжній частоті або у цифровому вигляді після аналого-цифрового перетворення сигналів. Можливо комбінування цих варіантів.

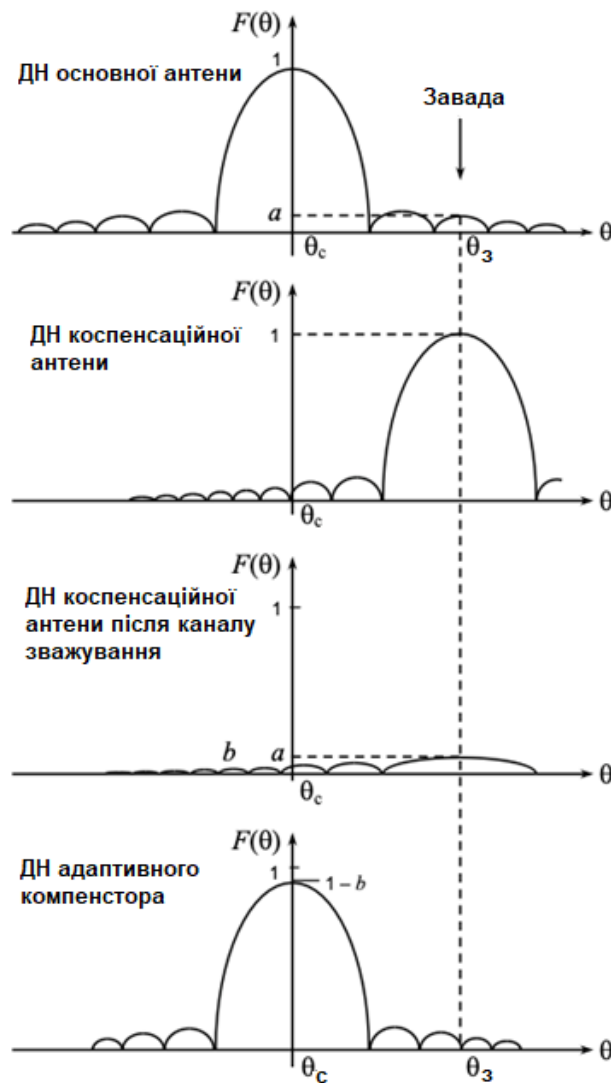


Рисунок 5.18. Діаграми направленості адаптивного компенсатора завади

Ефективність застосування компенсаторів завад

Результати теоретичних і експериментальних досліджень показали, що завдяки використанню КЗ можна досягти придушення завад на 20...40 дБ.

Застосування такого обладнання дає змогу істотно поліпшити ЕМС різних радіосистем, які працюють у спільній смузі частот, а також підвищити ефективність використання РЧС.

Розглянуті раніше КЗ у багатьох практично важливих випадках дозволяють розв'язувати проблеми забезпечення ЕМС насамперед тоді, коли з тієї чи іншої причини традиційні методи розв'язання цих проблем, які передбачають забезпечення ЧТР між взаємно заважаючими системами, не дають бажаного ефекту.

Компенсатори завад можуть використовуватися в наземних радіослужбах, таких як РРЛ, що працюють у сантиметровому діапазоні хвиль, для зменшення як територіального чи кутового рознесення між станціями, що взаємодіють, так і припустимого кутового рознесення між геостаціонарними супутниками, що працюють у системах фіксованої супутникової служби.

Ефективність роботи КЗ визначається за допомогою коефіцієнта K_3 придушення завад:

$$K_3 = 10 \lg \frac{\sigma_{\text{вх}}^2}{\sigma_{\text{вих}}^2},$$

де $\sigma_{\text{вх}}^2$, $\sigma_{\text{вих}}^2$ середньоквадратичне значення завади відповідно на вході основного каналу та на виході КЗ.

Потенційно досяжний коефіцієнт придушення завад у КЗ істотно залежить від значення коефіцієнта взаємної кореляції ρ завадних сигналів на входах КЗ. Потенційно досяжний коефіцієнт придушення завад визначається за формулою:

$$K_3 = \frac{1}{1-\rho^2}. \quad (5.11)$$

Коефіцієнт взаємної кореляції сигналів завад визначається ідентичністю амплітудних, частотних і фазових характеристик каналів приймання.

Максимально досяжний коефіцієнт придушення в реальних приймальних системах обмежений динамічним діапазоном приймальних каналів. В разі впливу на приймальну систему потужних завад, рівень яких перевищує динамічний діапазон приймальних каналів, відбувається міжканальна декореляція сигналів. Вона зумовлена тим, що підсилювачі приймальних трактів основного і додаткового каналів починають працювати в нелінійних режимах, що призводить до виникнення численних комбінаційних складових (некорельованих міжканально) у спектрах прийманих сигналів.

Приклади реалізації активних завадозахищених антен наведені у Додатку І.

Контрольні питання та завдання:

1. Які розрізняють заходи забезпечення ЕМС радіозасобів та в чому полягає їх суть?
2. Назвіть основні технічні заходи забезпечення ЕМС.
3. Назвіть основні організаційні заходи забезпечення ЕМС.
4. Особливості забезпечення внутрішньооб'єктової електромагнітної сумісності.
5. Аргументуйте доцільність та корисність використання адаптивних антенних решіток та адаптивних компенсаторів завад на користь ЕМС.
6. Структурна схема та принцип роботи адаптивної антенної решітки
7. Структурна схема та принцип роботи адаптивного компенсатора завад.
8. Дайте визначення ЧТР та наведіть його графічну інтерпретацію.
9. Який критерій визначення ЧТР?
10. Що таке територіальне рознесення та у чому його відмінність від ЧТР?
11. Що таке координаційне рознесення та у чому його відмінність від ТР?
12. Що таке кутове рознесення і як він впливає значення ЧТР?
13. Що таке частотне рознесення і від чого воно залежить? Поясніть це рисунком.
14. Яким чином визначається мінімальне-необхідне частотне рознесення між сумісними радіоканалами різних РЕЗ?

Задача № 1 (приклад).

Обчислити мінімальну товщину стінок екранувального сталевих боксу для встановлення радіоприймача, якщо в цьому місці присутня потужна завада (густина потоку енергії дорівнює 5 Вт/см^2 на частоті 320 МГц), а за умовами експлуатації радіоприймача рівень завади має не перевищувати 1 мВт/см^2 .

Розв'язання:

1) необхідний коефіцієнт екранування за густиною потоку енергії визначаємо за формулою:

$$K_e = 10 \lg \frac{P_0}{P_1},$$

де P_0, P_1 — густина потоку енергії завади відповідно за відсутності та за наявності екрана.

Виконуючи відповідні обчислення, розраховуємо:

$$K_e = 10 \lg \frac{5000}{1} \approx 37 \text{ дБ}$$

2) із таблиці 6.1 для сталі на частоті 300 МГц знаходимо коефіцієнт послаблення електромагнітних хвиль $K=77,4 \text{ дБ/мм}$.

Використання даних для частоти 300 МГц , а не 320 МГц у цьому разі виправдане, оскільки ефективність екранування підвищується зі зростанням

частоти. Отже, здобутий результат забезпечує виконання заданої вимоги з деяким запасом.

3) враховуючи співвідношення $K_e = K \cdot d$, для екрана товщиною d маємо:

$$d = \frac{K_e}{K} = \frac{37 \text{ дБ}}{77,4 \text{ дБ/мм}} = 0,48 \text{ мм}$$

Відповідь: товщина сталевих екрана має бути не меншою за 0,5 мм.

Задача № 2 (приклад).

Обчислити потенційно досяжний коефіцієнт придушення завад у компенсаторі завад (дБ), якщо значення коефіцієнта взаємної кореляції ρ завадних сигналів на його входах дорівнює 0,995.

Розв'язання:

1) потенційно досяжний коефіцієнт придушення завад визначаємо за формулою

$$K_3 = \frac{1}{1-\rho^2}.$$

Виконуючи відповідні обчислення, розраховуємо:

$$K_3 = \frac{1}{1-0,995^2} = \frac{1}{1-0,990025} = \frac{1}{0,009975} = 100,25;$$

або в дБ:

$$K_{3,\text{дБ}} = 10 \lg K_3 = 10 \lg 100,25 \approx 20 \text{ дБ}.$$

Відповідь: потенційно досяжний коефіцієнт придушення завади становить 20 дБ. Для збільшення придушення завади потрібно покращити ідентичність трактів прийому до входів компенсатора завад.

Задача 3 (приклад). Розрахувати розв'язку між двома антенами для випадків горизонтального та вертикального рознесення, якщо відносна відстань між ними однакова (R/λ та H/λ) та дорівнює 10.

Розв'язання:

У разі рознесення по горизонталі розв'язка розраховується за формулою:

$$L_R(\text{дБ}) \approx 22 + 20 \lg (R/\lambda) \approx 22+20 = 42 \text{ дБ}$$

У разі рознесення по вертикалі:

$$L_H(\text{дБ}) \approx 28 + 40 \lg (H/\lambda) \approx 28+40 = 68 \text{ дБ}.$$

Відповідь: розв'язка між антенами при однаковому рознесенні становить 42 дБ при рознесенні по горизонталі, та 68 дБ при рознесенні по вертикалі.

6. Методи оцінювання електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів

6.1. Дослідження електромагнітної обстановки

Сукупність електромагнітних полів у певній частині простору, смуги частот та інтервалу часу, що впливають на якість функціонування РЕЗ і ВП, становлять собою **електромагнітну обстановку (ЕМО)** в цій області.

Причому такий вплив може проявлятися як разом із корисним сигналом, так і без нього, як через антену, так і без неї.

Спецкористувачі радіочастотного спектра (РЧС) застосовують також термін *електромагнітне середовище* (ангд. *electromagnetic environment, EME*) – результат частотно-часового розподілу потужності, основного та/або побічного електромагнітного випромінювання, з якими стикаються засоби, системи та/або об'єкти при виконанні покладених на них завдань у визначеному просторі.

Електромагнітна обстановка створюється всіма видами електромагнітних випромінювань, що існують у розглянутій ситуації, і залежить як від характеристик ЕМС пристроїв та їхніх елементів, так і від умов поширення радіохвиль. Будь-яке РЕЗ не тільки функціонує в певній електромагнітній обстановці, але й бере участь у створенні електромагнітної обстановки іншим засобам. ЕМО визначає частотно-часовий розподіл напруженості електричного поля корисного, завадових та шумових сигналів у визначеному просторі (місцевості).

Слід мати на увазі що у місце розташування приймальної антени (на її вході) рівень сигналу вимірюється густиною потоку потужності P (Вт/м²) або напруженістю електричного поля E (В/м). На виході приймальної антени та на вході приймача рівень сигналу вимірюється напругою U (В) або потужністю $P_{\text{ПРМ}}$ (Вт).

Аналіз ЕМО – це знаходження умов, в яких повинні функціонувати конкретне РЕЗ або група засобів, і розробка кількісних оцінок по ступені впливу завад на конкретний засіб.

За станом ЕМО класифікують таким чином:

- сприятлива ЕМО, якщо зміни параметрів її складових не впливають на інформаційні характеристики вихідного сигналу досліджуваної системи;
- допустима ЕМО, якщо її параметри зумовлюють допустиме зниження якості корисного сигналу на виході досліджуваного РЕЗ;
- несприятлива ЕМО, якщо вона зумовлює неприпустимі зміни інформаційних параметрів сигналів на виході досліджуваного РЕЗ або їх маскування.

Як сприятлива, так і несприятлива ЕМО може бути стабільною або нестабільною за часом. Нестабільна ЕМО спостерігається особливо часто, якщо приймальна та передавальна радіоапаратура встановлена на рухомих об'єктах. У разі переміщенні точки спостереження, наприклад, разом з рухомих об'єктом, ЕМО змінюється в ній як у кількісному, так і в якісному аспектах. Кількісні зміни ЕМО залежать від відстаней до окремих джерел електромагнітних випромінювань, енергетичних та просторових показників їхніх антен. Якісні зміни пояснюються тим, що в загальному випадку точка спостереження може знаходитись постійно в зоні дії одних випромінювальних антен і водночас виходити або потрапляти в зону дії сторонніх РЕЗ чи інших джерел ненавмисних електромагнітних

випромінювань, наприклад, ліній електропередач, транспортної артерії з інтенсивним автомобільним рухом тощо.

Щодо групи РЕЗ ЕМО умовно можна поділити на зовнішню та внутрішню. Якщо антени РЕЗ, взаємовплив яких досліджується, знаходяться в далеких (хвильових) зонах, ЕМО розглядається як зовнішня. Зовнішню електромагнітну обстановку створюють електромагнітні поля, які складаються з корисного сигналу (КС), заводових сигналів (ЗС) та зовнішніх шумів.

Якщо ж антени незалежних РЕЗ містяться у відповідних ближніх зонах (зони індукції), ЕМО розглядається як внутрішня.

ЕМО, яка виникає в корпусі радіоелектронного апарата під впливом випромінювань окремих конструктивних елементів або блоків, називається внутрішньоапаратурною електромагнітною обстановкою.

Радіохвилі, що випромінюються антенами РЕЗ, характеризуються несучою частотою та шириною зайнятої смуги частот, напрямом та видом поширення, типом поляризації, часовими характеристиками та ін.

Слід пам'ятати, що електромагнітні випромінювання антени передавача зосереджені в основному в смузі робочих частот, але випромінювання РЕЗ виявляються також за межами цієї смуги. Радіохвилі максимальної інтенсивності, завдяки властивостям антени, поширюються в заданих напрямках всередині деякого тілесного кута. Однак і за межами цього тілесного кута антени випромінюють радіохвилі, причому як на робочій частоті, так і на інших частотах, не передбачених конструкцією РЕЗ (див. додаток Ж). У приймальній антені і в трактах приймального пристрою для виділення електромагнітних коливань робочого радіоканалу застосовують різні види селекції – частотну, просторову, поляризаційну та інші.

Якість ЕМО в точці нагляду спостереження залежить також від небажаних випромінювань радіопередавальних пристроїв, які супроводжують основне випромінювання і виникають через нелінійності ВАХ активних елементів пристроїв. Ці випромінювання, часто непередбачувані, істотно ускладнюють реальну ЕМО в точці розміщення антени радіоприймача.

Основними чинниками, які впливають на стан електромагнітної обстановки, можна вважати такі:

- поляризаційні особливості електромагнітних полів у точці розміщення антени радіоприймача;
- відношення потужності корисного сигналу до потужності завади на виході антенно-фідерного пристрою радіоприймача, тоб-то на його вході;
- спектральний склад напруг, які виникають на вході радіоприймача;
- амплітуди та потужності радіохвиль окремих джерел у певній точці спостереження;

- частоти радіохвиль у цій точці та спектральний склад відповідних сигналів, що містить бажані й небажані компоненти;
- напрямок поширення або приходу радіохвиль від певних джерел у конкретну точку спостереження;
- поляризацію радіохвиль на певних трасах їхнього поширення в конкретну точку спостереження;
- імовірність перевищення попередньо наданих енергетичних рівнів радіозавад на вході радіоприймача.

Визначення параметрів ЕМО є необхідною умовою для розв'язання практичних задач електромагнітної сумісності РЕЗ, оскільки всі вказані параметри є вихідними даними для оцінювання якості ЕМС та розробки конкретних дій щодо її забезпечення.

У цілому, в процесі проектування об'єктів радіозв'язку електромагнітна сумісність (ЕМС) розглядається на трьох рівнях [8]:

- *системна* ЕМС – дослідження показників ЕМС пристроїв однієї системи та їхніх елементів;
- *міжсистемна* ЕМС – дослідження електромагнітної обстановки між різними системами радіозв'язку;
- *об'єктова* ЕМС – дослідження виконання ЕМС у конкретній групі засобів (у локальному угрупованні).

Аналіз і розрахунки *системної ЕМС* розглядаються, переважно, в процесі проектування та мають на меті забезпечити відсутність взаємних завад для радіообладнання, що застосовується в кожній конкретній мережі. Основним критерієм системної ЕМС є величина відносини “сигнал/завада”, що не повинна бути нижче значення, встановленого відповідними стандартами для радіообладнання, що застосовується.

Аналіз і розрахунки *міжсистемної ЕМС* мають на меті забезпечити відсутність взаємних радіозавад між радіозасобами кожної конкретної радіосистеми, що вводиться в дію, і радіоелектронними засобами (РЕЗ) загального та спеціального призначення, що працюють у відповідних частотних діапазонах у межах координаційних відстаней. Основою для забезпечення міжсистемної ЕМС є поділ частотного діапазону, обумовлений Планом розподілу та користування РЧС в Україні. Аналіз міжсистемної ЕМС, включаючи аналіз ЕМС між мережами декількох користувачів в одному територіальному районі, проводиться на етапі видачі ліцензій НКЕК та дозволів УДЦР на експлуатацію РЕЗ операторами зв'язку.

Аналіз об'єктової ЕМС (або ЕМС локального угруповання РЕЗ) має на меті забезпечення ЕМС всіх радіозасобів, встановлених на даному об'єкті. Поняттям “об'єктова ЕМС” виділяється специфічна область аналізу та розрахунків ЕМС, що полягає в тому, що в силу об'єктивних фізичних причин, має місце ряд факторів, що впливають на встановлене на об'єкті радіообладнання і не розглядаються в рамках аналізу міжсистемної й внутрісистемної ЕМС:

- гармоніки випромінюваних частот;
- продукти інтермодуляції;
- прямий вплив сигналів завад на прийомні тракти;
- електромагнітні наведення;
- взаємовплив антен (розв'язка) і конструктивних елементів антенних опор, параметри антен у ближній зоні;
- якість екранування та заземлення, вплив нелінійних елементів металоконструкцій опор тощо.

Поява гармонік і продуктів інтермодуляції обумовлена, як відомо, впливом каскадів приймачів і передавачів, що працюють у нелінійному режимі або містять нелінійні елементи.

Під *прямим впливом* на приймальні тракти сигналів завад, насамперед, маються на увазі:

- вплив співканальних завад, обумовлених помилками, що допущені на стадії частотно-територіального планування радіосистем і не були виявленими при аналізі системної ЕМС;
- спільна робота на одному об'єкті широкосмугових і вузькосмугових радіосистем, а також радіосистем з різним кроком частотної сітки.

Взаємовплив антен (недостатня розв'язка антен при близькому розташуванні) проявляється також у впливі внесених опорів на їхні електричні параметри. Це погіршує погодження опорів антен з фідерами та, як наслідок, зменшення потужності випромінювання передавача та потужності сигналу на вході приймача. Вплив, що здійснюється близько розташованими до антен конструктивними елементами антенних опор приводить до викривлень діаграм спрямованості. Обидва фактори спричиняють зміну напрямку та потужності випромінювання антен, що, в остаточному підсумку, може привести до посилення впливу сигналів завад.

В якості електромагнітних наведень (*індуктивних та кондуктивних*) розглядають:

- ефірні наведення на антено-фідерні тракти від розташованих на даному об'єкті радіозасобів;
- індуктивні та ємнісні наведення, переважно між кабелями, що проходять по загальних кабельних трасах;
- наведення струмів високої частоти на електромережі та ланцюги електроживлення обладнання;
- високочастотні наведення за рахунок неузгодженості та асиметрії антено-фідерних трактів.

Процес аналізу об'єктової ЕМС може бути розділений на кілька етапів, залежно від джерел і причин виникнення завад:

- *комбінаторний аналіз.*
- *просторовий аналіз.*
- *енергетичний аналіз.*
- *конструктивний аналіз.*

Комбінаторний аналіз має на меті виявити можливі комбінації частот, що збігаються із частотами приймання радіозасобів, розміщених на об'єкті.

За результатами комбінаторного аналізу, залежно від наявного частотного ресурсу та технічних параметрів радіосистем, можуть бути ухвалені рішення про корегування частотних планів шляхом заміни уражених частот приймання або частот передачі, що беруть участь в утворенні “небезпечних” комбінаційних продуктів.

Просторовий аналіз проводиться для тих радіозасобів об'єкту, випромінювання яких беруть участь в утворенні комбінаційних продуктів, що збігаються із частотами приймання. Метою просторового аналізу є дослідження можливостей скорочення списку “небезпечних” частот за рахунок наявної просторової розв'язки антен або шляхом створення (збільшення) такої розв'язки на стадіях проєктування та монтажу відповідних радіозасобів.

Енергетичний аналіз проводиться для тих радіозасобів об'єкта, випромінювання які беруть участь в утворенні комбінаційних продуктів, що збігаються із частотами приймання та для яких просторова розв'язка антен недостатня і по системних або конструктивних міркуваннях не може бути збільшена до необхідної величини.

Конструктивний аналіз, тобто аналіз конструкцій і матеріалів опори, безпосередньо антени та пристроїв її кріплення, проводиться з метою виявлення джерел завадового впливу.

Наявність декількох етапів аналізу пояснюється тим, що залежно від передбачуваних причин виникнення завад він проводиться за принципом “від простого – до складного” і при проведенні аналізу об'єктової ЕМС можуть бути реалізовані не всі зазначені етапи. Кількість етапів залежить від результатів реалізації заходів, проведених після виконання кожного попереднього етапу аналізу.

Аналіз об'єктової ЕМС (ЕМС локального угруповання) проводиться на основі баз даних, що включають інформацію про діючі об'єкти зв'язку, випромінювання яких може бути причиною виникнення об'єктових завад

Сукупність сигналу та завад у точці приймання є повним груповим сигналом та визначає **сигнально-завадову обстановку (СЗО)**. Власно груповий сигнал визначає якість ЕМО. Точний математичний опис повного групового сигналу утруднюється через об'єктивні чинники: невизначеної кількості їх джерел та відстаней до них, класів випромінювань та ін. В реальних умовах до групового сигналу надходять сотні й тисячі складових. При цьому в антенному пристрої приймача можуть виникати електрорушійні сили (ЕРС) амплітудою від часток мікрвольт до кількох вольт, що є вельми значущим чинником. Тому в аналізі групового сигналу доцільно враховувати лише ті його компоненти, які займають смуги частот, що збігаються, перекривають та прилягають до тих, які відводяться

корисному сигналу. Аналізуючи ЕМС РЕЗ в груповому сигналі в першому наближенні слід відокремити компоненти, амплітуди яких одного порядку з амплітудою корисного сигналу або такі, що його перевищують. Оскільки в багатьох випадках інтенсивності корисного сигналу та окремих компонентів групового сигналу штучного походження на порядок перевищують інтенсивності сигналів і завад джерел природного походження (атмосферні завади, космічні та теплові шуми тощо), то в першому наближенні наявністю цих завад у груповому сигналі можна знехтувати, тобто їх можна не враховувати.

Дослідження виконання ЕМС у конкретній групі засобів проводяться з метою встановлення факту електромагнітної сумісності та при її порушенні – знаходження конкретних причин несумісності, включаючи виявлення джерел ненавмисних завад, причин поширення завад і шляхів їхнього впливу на рецептори.

Аналіз ЕМС у групі засобів базується на результатах дослідження ЕМО і параметрів, що впливають на ЕМС. Це дозволяє з'ясувати, які саме завади діють у конкретному випадку і які їх енергетичні, спектральні та статистичні характеристики. Для вирішення питання про наявність або відсутність сумісності необхідно встановити характер впливу цих завад і оцінити результати цього впливу на якість функціонування РЕЗ у даній групі.

Аналіз ЕМС для конкретної ситуації проводиться на основі використання моделей взаємодії, які доцільно розрізняти:

а) **по виду оцінки ЕМС – парна оцінка, групова й комплексна** (при парній оцінці враховується вплив завад, що створюються кожним із двох засобів, при більшому їх числі – попарна дія кожного із засобів групи на кожне інше; групова оцінка передбачає дослідження впливу групи джерел на один рецептор або по черзі на всі рецептори групи; при комплексній оцінці розглядається вплив групи джерел на всі рецептори, що входять до складу даної сукупності засобів; комплексна оцінка базується на використанні групової оцінки, групова – на використанні парної, але ні групова, ні комплексна оцінки в загальному випадку не є простою сумою деякого числа парних оцінок);

б) **по характеру функціональних зв'язків**, які враховуються, між засобами, що аналізуються – **проста та складна логіка впливу** (проста логіка припускає, що кожний пристрій у групі можна розглядати як функціонально незалежне від інших засобів; складна логіка передбачає те, що в загальному випадку окремі засоби в групі можуть мати функціональні зв'язки один з одним, що приводить до того, що вплив завад на деякий *i*-й рецептор не тільки призводить до погіршення його індивідуальних показників, але й спричинить зміну якості іншого засобу, наприклад *j*-го, що має з ним функціональний зв'язок);

в) **по характеру оцінки ЕМО – детерміновані та імовірнісні;**

г) *по характеру оцінки якості функціонування – детерміновані та імовірнісні.*

Можливі різні комбінації перерахованих моделей.

При *детермінованому* підході (відображають процеси, для яких передбачається відсутність випадкових впливів) рівні завад, їхній спектральний склад та характеристики оцінюють детермінованими величинами та функціями. При *імовірнісній* оцінці величини описують в імовірнісних категоріях – щільності імовірності розподілу потужностей, імовірності існування неприпустимих завад у межах певних зон тощо.

Імовірнісний підхід до аналізу ЕМО у групі засобів пов'язаний з характером ряду факторів, що впливають на ЕМС РЕЗ. До їхнього числа відносять:

- розкид рівнів небажаних випромінювань, ослаблень сигналів і завад, параметрів ЕМС конкретних радіоприймачів тощо, а також деяка невизначеність значень цих величин;
- флуктуації ослаблення сигналів і завад, які пов'язані з поширенням радіохвиль;
- в аналізованій групі засобів можуть змінюватися в часі робочі частоти випромінювання та приймання, режими роботи, рівні сигналів і завад внаслідок обертання антен тощо;
- в групі рухомих засобів відбуваються зміни рівнів сигналів і завад під впливом переміщення об'єктів у просторі та зміни їхньої взаємної орієнтації.

6.2. Захисне відношення та його використання як критерію електромагнітної сумісності

Критерій ЕМС – це припустиме відношення сигнал/завада на вході приймального пристрою за умови, що його числове значення визначається за припустимим ефектом впливу завади на якість прийнятого сигналу, тобто за припустимим числовим відношенням сигнал/завада *на виході пристрою*. Це значення визначається втратою інформації (спотвореннями) у прийнятому сигналі, що залежить від призначення системи радіопередавання та вимог до якості сигналу при його використанні.

Для систем радіозв'язку повинен виконуватися критерій ЕМС, тобто потужність корисного сигналу P_C на вході приймача має перевищувати сумарну потужність завад $P_З$ та власних шумів $P_{ш}$ на величину припустимого відношення сигнал/(завада+шум) *на виході пристрою* $K_{прип}$, визначеного для заданих умов, при якому забезпечується необхідна якість приймання корисного сигналу:

$$Q_{вх} = P_C / (P_З + P_{ш}) \geq K_{прип}^2,$$

Відношенню сигнал/завада на виході приймача ставиться у відповідність аналогічне відношення на вході приймача (розрахункове значення див. вирази 3.2 та 3.3, або експериментальне, яке отримано при випробуваннях по рекомендованій методиці [38]).

В Рекомендації МСЕ–Р SM.337-6 та методиках розрахунку ЕМС, які затверджені Адміністратором зв'язку України, замість коефіцієнта $K_{\text{прип}}$ **на виході** приймача використовують *припустиме відношення сигнал/(завада+шум)* (англ. *Signal Interference + Noise Ratio – SINR*) **на вході** приймача A :

$$(P_c - (P_z + P_{\text{ш}})) \geq A(f), \text{ дБ.} \quad (6.1)$$

Захисне відношення (ЗВ) A – мінімальне значення відношення рівня корисного сигналу до рівня сигналу радіозавади *на вході приймача* $Q_{\text{вх.}}$, визначене для заданих умов, переважно виражене в децибелах, з яким забезпечується належна якість прийому корисного сигналу. Значення захисного відношення визначаються у логарифмічних одиницях.

Залежність захисного відношення від частоти означає необхідність врахування частотно-залежного подавлення завади приймачем при розрахунку потужності завади (відмінність спектра сигналу завади від АЧХ приймача та різницю несучої частоти завади і частоти налаштування приймача).

Захисні відношення $A_{\text{доп}}$ визначаються аналітичним або експериментальним шляхом. Експериментальне визначення величини захисного відношення проводиться вимірюванням мінімально допустимого рівня корисного радіосигналу і максимально припустимого рівня радіозавади на вході радіоприймача за умови забезпечення необхідної якості функціонування РО.

Критерій ЕМС залежить від класу прийманих випромінювань та виду завади.

Для більшості радіослужб встановлено певні норми й стандарти якості роботи РЕЗ, що враховують технічну здійсненність та економічну доцільність такої роботи.

Для систем фіксованої наземної та фіксованої супутникової служб встановлено *максимально припустимі рівні шуму в телефонному та телевізійному каналах* у точках із певними рівнями КС на виходах гіпотетичних еталонних кіл.

Для систем передавання цифрових сигналів встановлено *максимально припустиму частоту помилок* приймання символу на виході гіпотетичного еталонного цифрового тракту.

Свої критерії якості функціонування мають РЕЗ служб радіовизначення, радіомовлення тощо. Наприклад, для радіомовних служб критерієм ЕМС слугує «захисне відношення».

Для деяких служб критерієм ЕМС слугує такий *рівень завадного сигналу (ЗС) на вході приймача, який перебуває на 5...10 дБ нижче від рівня власних шумів приймача.*

Під час роботи кількох радіослужб у спільних смугах частот можуть виникати взаємні завади, тому для забезпечення нормального функціонування РЕЗ установлюються *критерії ЕМС суміщуваних служб*. Ці критерії не повинні утруднювати розвиток суміщуваних систем відповідних служб, а мають ґрунтуватися на компромісі між припустимим рівнем завади для однієї служби та мінімальним рівнем потужності передавання, який забезпечує задану якість функціонування іншої служби.

Критеріями ЕМС зазвичай слугують такі значення взаємних завад, при яких забезпечується нормальна робота РЕЗ суміщуваних служб. Наприклад, для фіксованої наземної та супутникових служб зазвичай це невелика (10% ... 20%) частка від повного припустимого рівня шуму.

Критерії ЕМС радіослужб розробляє МСЕ-Р і вони знаходять відображення у відповідних звітах і рекомендаціях. До таких Рекомендацій зокрема належать Рекомендації МСЕ-Р:

F.240-6 – Різні захисні відношення, зокрема загасання;

BS.412-9 – Захисні відношення для звуку з ЧМ у діапазоні ДВЧ;

F.566 – Визначення захисних відношень для радіомовлення;

F.589 – Захисні відношення для радіонавігації;

ВО.600-1 – Стандартна група умов тестування та вимірювальних процедур для суб'єктивного і об'єктивного визначення захисних відношень для телебачення в наземній радіомовній та радіомовній супутниковій службах;

F.638 – Захисні відношення щодо РЧ/ЗЧ для звуку;

F.641 – Захисні відношення для звуку з ЧМ;

669-1 – Захисні відношення при дослідженнях спільного використання спектра;

S.792 – Захисні відношення щодо завад для радіомовної (телевізійної) супутникової служби в діапазоні частот 12 ГГц;

SF.1271-0 – Ефективне використання спектра із застосуванням імовірнісних методів;

ВО.1297 – Захисні відношення для використання з метою планування при перегляді Планів;

інші рекомендації.

Найчастіше ЗВ використовують як критерій ЕМС аналогових і цифрових систем радіозв'язку. Вибір такого критерію пояснюється тим, що якість сигналу на виході приймача зазвичай монотонно залежить від

вхідного відношення сигнал/завада. Дія завад призводить до погіршення характеристик КС на виході приймача, наприклад до збільшення коефіцієнта помилок, до зниження якості вихідного зображення і/або розбірливості мови.

На значення ЗВ впливає багато чинників, зокрема частотне рознесення між носійними КС і ЗС, вид і глибина їхньої модуляції, спосіб обробки сигналу й метод його кодування, характеристики приймача (його чутливість, вибірність) тощо.

Задана якість пройма́ння КС за присутності ЗС забезпечується тоді, коли виконується критерій ЕМС у вигляді

$$Q_{\text{ВХ}} \geq A,$$

де $Q_{\text{ВХ}}$ і A – відповідно відношення сигнал/завада на вході приймача і припустиме (потрібне) ЗВ, дБ.

Відношення сигнал/завада на вході приймача $Q_{\text{ВХ}}$ змінюється в часі випадковим чином, унаслідок чого умова ЕМС (5.1) протягом певної частки T (у відсотках) часу роботи каналу зв'язку може не виконуватися, а через це якість вихідного корисного сигналу на деяких часових інтервалах (при $Q_{\text{ВХ}} < Q_{\text{ВХ.МІН}}$) буде нижчою від заданої. Наприклад, у цифрових системах передавання в цьому разі коефіцієнт помилок перевищує припустиме значення протягом T відсотків часу. Тому в суміщуваних радіослужбах нормується частка часу ($T\%$) будь-якого місяця, протягом якого коефіцієнт помилок може перевищувати припустиме значення. Наприклад, у цифрових радіорелейних лініях (РРЛ) прямої видимості за наявності завад із боку фіксованої супутникової служби (ФСС) припускається збільшення тривалості періоду часу, коли коефіцієнт помилок перевищує 10^{-6} протягом не більш як 0,04% часу будь-якого місяця.

Потрібне значення ЗВ залежить від характеристик модуляції КС і ЗС, а також від різниці їхніх носійних частот. Зазвичай при передаванні аудіо-чи відеоінформації визначення ЗВ для систем радіозв'язку здійснюється за допомогою суб'єктивних оцінок якості сигналів на їхньому виході. Умови вимірювань ЗВ визначено рекомендаціями МСЕ, а якість приймання оцінюється за п'ятибальною шкалою. У телевізійних каналах якість вихідного сигналу з оцінкою 4,5 бала відповідає появі ледь помітної завади на зображенні. Втрати якості вихідного КС під дією завад і залежність цих втрат від вхідного відношення сигнал/завада оцінюють безпосередньо отримувачі повідомлень або група кваліфікованих експертів. Результати їхнього суб'єктивного оцінювання піддають статистичній обробці й подають у вигляді таблиці або графіка.

Наприклад, значення захисних відношень для аналогових систем звукового ДВЧ ЧМ радіомовлення наведено у “Методиці розрахунків електромагнітної сумісності” [38].

Значення захисних відношень для аналогових систем звукового ДВЧ ЧМ радіомовлення визначені положеннями Регіональної угоди “Женева-84”

стосовно використання діапазону частот від 87,5 МГц до 108 МГц для частотної модуляції звукового радіомовлення.

Значення захисних відношень, наведені нижче, визначені для таких класів систем звукового мовлення:

система 1 – монофонічне мовлення (максимальна девіація ± 75 кГц);

система 2 – стереофонічне мовлення, пілот-тон (максимальна девіація ± 75 кГц);

Значення захисних відношень, необхідні для забезпечення задовільного монофонічного прийому протягом 99 % часу для системи 1, наведені на рисунку 6.1 (крива M1 – для постійної завади, крива M2 – для тропосферної завади)

Значення захисних відношень, необхідні для забезпечення задовільного стереофонічного прийому протягом 99 % часу для системи 2, наведені на рисунку 6.1 (крива S1 – для постійної завади, крива S2 – для тропосферної завади).

Потрібне ЗВ на вході приймача можна визначити аналітичним (розрахунковим) способом, якщо відомі максимально припустимі значення рівня завад на виході приймача (у каналі зв'язку), або на вході демодулятора (для цифрових систем). Норми на гранично припустимі рівні взаємних завад для забезпечення ЕМС різних космічних і наземних радіослужб наведено в відповідних рекомендаціях МСЕ. Наприклад, у разі спільного використання смуг частот понад 1 ГГц фіксованими наземними службами (РРЛ) і фіксованими супутниковими службами (ФСС) при передаванні телефонних повідомлень в аналоговій формі припустима середньохвилинна психофотрична потужність шумів на виході телефонного каналу (1000 пВт) може бути перевищена не більш ніж протягом 20% часу будь-якого місяця.

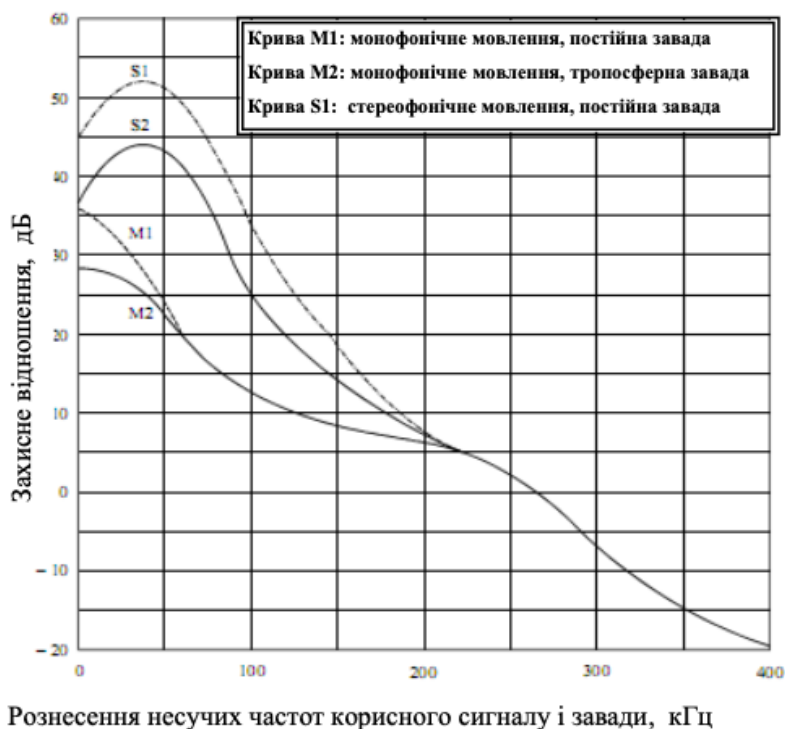


Рисунок 6.1. Захисні відношення для систем звукового мовлення у разі впливу тривалої та тропосферної завади

У разі суміщення цифрових фіксованої супутникової та фіксованої рухомої служб максимальна потужність ЗС на вході приймача не повинна перевищувати такого значення, при якому частка завади становить не більш як 10% від загальної потужності шумів на вході демодулятора, що викликають появу помилок на його виході з імовірністю 10^{-6} . Припускається збільшення коефіцієнта помилок до 10^{-4} , але не більш ніж протягом 0,03% місяця. Наведені параметри норм визначають критерії ЕМС різних космічних і наземних радіослужб, даючи змогу обчислювати припустимі рівні взаємних завад і потрібні ЗВ у разі їхньої спільної роботи у смугах частот, що перекриваються.

6.3. Розрахунок рівня корисного сигналу і радіозавад

Рівень корисного сигналу на вході приймача у разі узгодження антен за поляризацією розраховується за формулою (4.9):

$$P_C = P_{C.ПРД} + G_{A.ПРД}(\varphi_{ПРМ}) + G_{A.ПРМ}(\varphi_{ПРД}) - L_{Ф.ПРД} - L_{Ф.ПРМ} - L, \text{ дБВт} \quad (6.2)$$

де: $P_{C.ПРД}$ – потужність передавача джерела корисного сигналу, дБВт;

$G_{A.ПРД}(\varphi_{ПРМ})$, $G_{A.ПРМ}(\varphi_{ПРД})$ – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен кореспондентів во взаємному напрямку. Якщо антени спрямовані максимумами головних пелюсток ДСА одна на одну $G_A(\varphi) = G_{A.МАКС}$;

$L_{Ф.ПРД}$ і $L_{Ф.ПРМ}$ – втрати сигналу у фідерах;

$L = L_0 + L_T$, дБ – базові втрати в радіоканалі (іноді зазначають $L_{ПРХ}$ або англ. $L_{гор}$ – *втрати поширення радіохвиль*) визначаються як сума втрат у вільному просторі (L_0) та додаткових втрат реальної траси поширення радіохвиль (L_T), які розраховані за обраним методом (з урахуванням механізму поширення радіохвиль на даної трасі);

Відповідно до Рекомендації МСЕ–Р Р.341 [15] та Методики [38] під час розрахунків ЕМС РО визначаються базові і загальні втрати лінії радіозв'язку, вираз (5.2) подається у вигляді:

$$P_C = P_{C.ПРД} - L_{ЗАГ.С}, \text{ дБВт}, \quad (6.3)$$

де $L_{ЗАГ.С}$ – загальні енергетичні втрати передавання у лінії радіозв'язку визначаються характеристиками апаратурних елементів лінії (фільтрами, фідерами, антенами і властивостями середовища поширення радіохвиль (станом середовища, атмосферними явищами тощо):

Розрахунок загальних втрат лінії радіозв'язку між джерелом і рецептором корисного сигналу проводиться за формулою:

$$L_{\text{ЗАГ.С}} = L_{\text{А.ПРД}} - G_{\text{А.ПРД}}(\varphi_{\text{ПРМ}}) + L_{\text{А.ПРМ}} - G_{\text{А.ПРМ}}(\varphi_{\text{ПРД}}) + L, \text{ дБ} \quad (6.4)$$

де: $L_{\text{А.ПРД}}$ і $L_{\text{А.ПРМ}}$ – втрати в антені передавача і приймача відповідно з урахуванням ослаблення у фідерах і фільтрах, дБ;

L – базові втрати лінії радіозв'язку.

Розрахунок рівня радіозавади проводиться при виконанні частотного критерію, тобто у разі можливого прийому основного чи небажаного випромінювання передавача завади по основному або неосновним каналам прийому приймача.

Рівень завади на вході приймача від одного джерела завади розраховується за формулою:

$$P_3 = P_{3.\text{ПРД}} - L_{\text{ЗАГ.З}}, \text{ дБВт}, \quad (6.5)$$

Пояснення загальних втрат у лінії радіозв'язку наведені на рис. 6.2

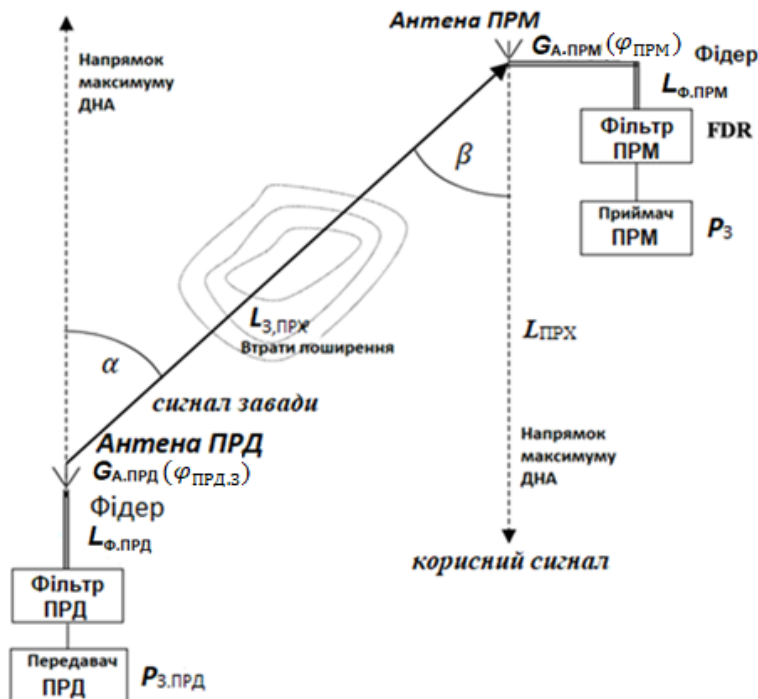


Рисунок 6.2. Загальні втрати в радіолінії

Розрахунок загальних втрат у лінії радіозв'язку між джерелом і рецептором радіозавади проводиться за формулою: $(\varphi_{\text{ПРМ}})$

$$L_{\text{ЗАГ.З}} = L_{\text{А.ПРД.З}} - G_{\text{А.ПРД.З}}(\varphi_{\text{ПРМ}}) + L_{\text{А.ПРМ}} - G_{\text{А.ПРМ}}(\varphi_{\text{ПРД.З}}) + L + XPB + FDR, \text{ дБ} \quad (6.6)$$

де: $L_{\text{А.ПРД.З}}$ і $L_{\text{А.ПРМ}}$ – втрати в антені передавача сигналу завади і в антенах приймача-рецептора радіозавади з урахуванням ослаблення у фідерах і фільтрах, дБ;

$G_{A.ПРД.З}(\varphi_{ПРМ})$ – коефіцієнт підсилення антени передавача, що створює радіозавади у напрямку приймача, на який здійснюється вплив сигналу радіозавади;

$G_{A.ПРМ}(\varphi_{ПРД.З})$ – коефіцієнт підсилення антени приймача, на який впливає сигнал радіозавади, у напрямку передавача, що створює радіозавади;

FDR – коефіцієнт частотної вибірконості приймача, який визначає ступінь ослаблення радіозавади через різні несучі частоти корисного сигналу і сигнал радіозавади та різну ширину смуги пропускання приймача і смуги випромінювання передавача;

XPD – коефіцієнт додаткового послаблення, яке залежить від поляризаційної вибірконості антен;

L – базові втрати лінії радіозв'язку завади.

При розташуванні антени передавача завади та антени приймача корисного сигналу на одному об'єкті (у ближній зоні антен коли відстань між ними $r < 10\lambda$) при розрахунку загальних втрат для сигналу завади $L_{ЗАГ.З}$ (в формулі 5.6) замість втрат поширення радіохвиль, коефіцієнтів підсилення антен та поляризаційних втрат враховують розв'язку $L_{АНТ.Р.Н}$ між антенами. Для умов ближньої зони загальні втрати для сигналу завади розраховуються за формулою:

$$L_{ЗАГ.З} = L_{АНТ.Р.Н} + L_{A.ПРД.З} + L_{A.ПРМ} + FDR, \quad (6.7)$$

де індекси R і Н в $L_{АНТ.Р.Н}$ означають горизонтальне і вертикальне рознесення між антенами. На розв'язку антен крім відстані у різних площинах впливають також наявність і взаємне розташування металевих конструкцій (щогл, опір, огорож та ін.), які можуть грати роль захисних екранів.

Фізичний зміст коефіцієнта частотної вибірконості приймача (FDR) полягає у визначенні частини потужності завади, яка попадає в смугу пропускання приймача (рис. 6.3 а).

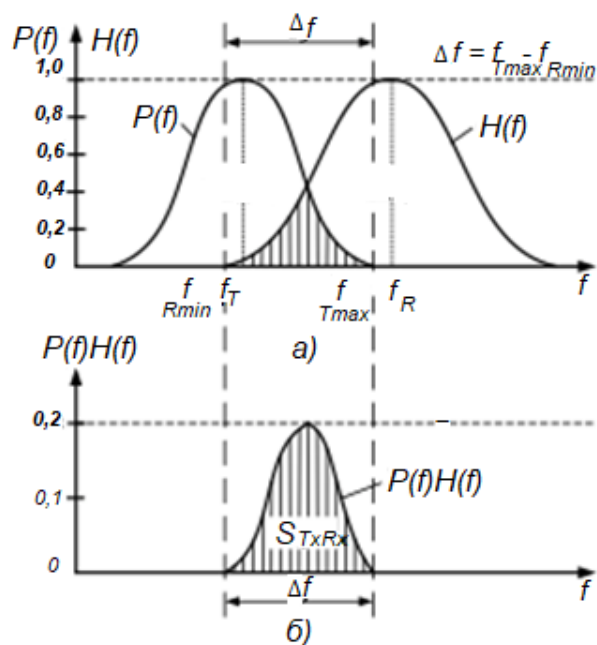


Рисунок 6.3. Фізичний зміст коефіцієнта частотної вибірконості приймача (FDR)

Значення коефіцієнта частотної вибірконості приймача визначається шляхом розрахунку площі перекриття спектральної маски випромінювань передавача-джерела завади і АЧХ фільтра (вхідної або проміжної частоти), приймача-рецептора цієї завади та заданому частотному рознесенні несучих частот сигналу завади і корисного сигналу.

Обвідна геометричної фігури, яка спирається на смугу частотного перекриття Δf обох масок (рис. 6.3, б), визначається їх добутком $P(f) \cdot H(f + \Delta f)$.

Методика та формули для розрахунку коефіцієнта частотної вибірконості приймача наведені у Рекомендації МСЕ-Р [39]:

$$FDR(\Delta f) = 10 \times \lg \frac{\int_0^\infty P(f) df}{\int_0^\infty P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}, \text{ дБ}, \quad (6.8)$$

де: $FDR(\Delta f)$ – коефіцієнт частотної вибірконості приймача, який визначається ступеню збігу АЧХ приймача спектру сигналу завади та різницею частоти завади та частоти налаштування приймача;

$P(f)$ – еквівалентна спектральна густина потужності сигналу завади на проміжній частоті (ПЧ), спектральна маска передавача;

$H(f)$ – частотна характеристика тракту ПЧ (вибірковість приймача);

Δf – рознесення частот між передавачем, що заважає, і приймачем, що зазнає заваду:

$$\Delta f = f_3 - f_c, \quad (6.9)$$

де: f_3 – частота налаштування передавача завади;

f_c – частота налаштування приймача.

У свою чергу, частотно-залежне подавлення FDR може бути розбитий на два члени: – коефіцієнт співканальної вибіркковості на частоті настроювання (*on-tune rejection* – OTR), дБ, і коефіцієнт позаканальної вибіркковості (*off-frequency rejection* – OFR) яка являє собою додаткове подавлення в результаті розстроювання між джерелом завади та приймачем.

$$FDR(\Delta f) = OTR + OFR(\Delta f), \text{ дБ.} \quad (6.10)$$

$$OTR = 10 \times \lg \frac{\int_0^\infty P(f) df}{\int_0^\infty P(f) |H(f+\Delta f)|^2 df},$$

$$OFR(\Delta f) = 10 \times \lg \frac{\int_0^\infty P(f) df}{\int_0^\infty |H(f+\Delta f)|^2 df}.$$

Коефіцієнт позаканальної вибіркковості (OFR) являє собою ослаблення сигналів у вхідних ланцюгах приймача (преселектора) на відповідній частоті (див. рис. 3.10).

Для розрахунку коефіцієнта частотної вибіркковості приймача необхідні дані стосовно спектральної маски випромінювань передавача-джерела завади і АЧХ приймача-рецептора цієї завади та заданому частотному рознесенні несучих частот сигналу завади і корисного сигналу.

Для спрощення розрахунків замість спектральної маски у розрахунках використовують модель обвідної для основного та позасмугових випромінювань передавача (див. рис. 3.6). Замість АЧХ приймача (для основного та позасмугових випромінювань) також застосовують модель обвідної, яка як правило береться такою, що відповідає спектральній масці корисного сигналу.

Але можливі ситуації прийому сигналу завади по інших каналах – проміжної частоти, сусідньому, інших побічних каналах. У таких випадках використовують відомий (або нормований) рівень позасмугового випромінювання передавача завади M (див. табл. 3.3) та відому (або нормовану) сприйнятливість приймача – рецептора завади по неосновних каналах прийому S (див. табл. 3.4). У таких випадках у формулі 5.6 замість FDR використовують рівень позасмугового випромінювання передавача завади M або сприйнятливість приймача – рецептора завади по неосновних каналах прийому S .

При впливі завади повинні розглядатися наступні ситуації:

а) по основному каналу приймача приймається позасмугове випромінювання передавача завади. У цьому випадку:

$$P_3 = P_{3.ПРД} - L_{ЗАГ.З} - M(\Delta f), \text{ дБВт,} \quad (6.11)$$

де $M(\Delta f)$ – різниця (дБ) в рівнях потужності позасмугового та основного випромінювань передавача при рознесенні частоти Δf , що визначається за спектральною маскою сигналу передавача для позасмугового випромінювання. Якщо Δf – поза межами частот маски, то значення M береться з даних передавача по придушенню позасмугових випромінювань (зазвичай 70 дБ);

б) основне випромінювання передавача приймається побічним (дзеркальним, ПЧ) каналом приймача. У цьому випадку:

$$P_3 = P_{3.\text{ЛРД}} - L_{\text{ЗАГ.З}} - S(\Delta f) \text{ , дБВт,} \quad (6.12)$$

де $S(\Delta f)$ – сприйнятливість приймача – рецептора завади по побічним каналам прийому (з урахуванням рівня сприятливості по різних каналах прийому, дБ).

З двох результатів (M або S) вибирається більший рівень завади для проведення подальших розрахунків.

У разі прийому побічним каналом приймача побічного випромінювання передавача завади ($M \neq 0$ та $S \neq 0$) рівень завади на вході приймача настільки малий, що при проведенні розрахунків його враховувати немає сенсу.

Придушення сигналу на частотах налаштування (основних каналах) відсутні ($M=0$, $S=0$), застосовується коефіцієнт частотної вибірконості FDR .

Способи розрахунку коефіцієнта частотної вибірконості приймача графічним та спрощеним методом наведені у додатку Є.

Значення коефіцієнта додаткового послаблення XPD залежить від поляризаційних характеристик антени приймача-рецептора завади у напрямку на заваду і антени передавача завади у напрямку антени приймача корисного сигналу та узгодження цих поляризаційних характеристик.

Значення XPD у разях називається коефіцієнтом ослаблення впливу радіозавад за рахунок розбіжності поляризацій $K_{\text{пол}}$. У разі збігу головних пелюсток ДН антен джерела та рецептора завади $K_{\text{пол}}$ приймає одне з значень, наведених у табл. 6.1 [2].

При розбіжності головних пелюсток діаграм спрямованості $K_{\text{пол}}$ приймається рівним 0.

Таблиця 6.1.

Поправковий коефіцієнт поляризаційних втрат $K_{\text{пол}}$

Поляризація радіохвилі корисного сигналу		Поляризація радіохвилі сигналу завади						
		Горизонтальна		Вертикальна		Похила 45°	Кругова	
		$G_3 < 10$	$G_3 \geq 10$	$G_3 < 10$	$G_3 \geq 10$		Права	Ліва
Горизонтальна	$G_C < 10$	1	1	0,025	0,025	0,5	0,5	0,5
	$G_C \geq 10$	1	1	0,025	0,01	0,5	0,5	0,5
Вертикальна	$G_C < 10$	0,025	0,025	1	1	0,5	0,5	0,5
	$G_C \geq 10$	0,025	0,01	1	1	0,5	0,5	0,5

Похила 45^0		0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5
Кругова	Права	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,003
	Ліва	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,003	1

Навіть хоча теоретично розв'язка між антенами лінійної поляризації може бути як завгодно великий (вираз 4.3), на практиці в силу різних причин, у тому числі малої імовірності перпендикулярності площин поляризації, сигнал, що заважає рідко вдається придушити більше, ніж на 20 дБ. У разі радіорелейних ліній, які працюють у діапазоні надвисоких частот (НВЧ), що відрізняються високою якістю антен, забезпечується поляризаційна розв'язка від 25 до 30 дБ.

Формули для розрахунку поляризаційної розв'язки в разі хвиль з еліптичною поляризацією мають достатньо складний вигляд та у розрахунках ЕМС як правило не використовуються.

Деякі антени нелінійної конструкції (наприклад дзеркальні) випромінюють як на основної так й кросової (ортогональної) поляризації, приклади діаграм спрямованості наведені на рис. 3.18 та рис. 3.21. Наявність випромінювання на кросової поляризації означає можливість прийому сигналу завади антеною, основна поляризація якої ортогональна основної поляризації сигналу завади. Рівень випромінювання на кросової поляризації у головної та перших бокових пелюстках ДСА може досягати -20 дБ відносно рівня максимуму випромінювання на основної поляризації.

Розрахунок поляризаційних характеристик більшості типів антен потребує значних обчислювальних зусиль та у розрахунках ЕМС як правило не виконується.

Також при поширенні радіохвиль можлива деполаризація сигналу, тобто до детермінованої компоненти поляризації сигналу додається випадкова компонента. У такому разі розрахувати XPD можливо тільки імовірнісними методами для обраних моделей каналу ПРХ.

З вищеназваних причин замість розрахунків XPD використовуватися експериментально отримані значення для найбільш типових поляризаційних ситуацій.

Замість розрахованого значення показника XPD можуть використовуватися такі експериментально отримані значення [38]:

- у разі горизонтальної поляризації антени рецептора радіозавади і вертикальної поляризації антени джерела радіозавади XPD дорівнює від мінус 16 дБ до мінус 20 дБ (залежно від величини коефіцієнта підсилення антени);
- у разі горизонтальної антени рецептора радіозавади і кругової поляризації антени джерела радіозавади XPD дорівнює мінус 3 дБ (незалежно від величини коефіцієнта підсилення антени);
- у разі вертикальної поляризації антени рецептора радіозавади і горизонтальної поляризації антени джерела радіозавади XPD дорівнює від

мінус 16 дБ до мінус 20 дБ (залежно від величини коефіцієнта підсилення антени);

- у разі вертикальної антени рецептора радіозавади і кругової поляризації антени джерела радіозавади XPD дорівнює мінус 3 дБ (незалежно від величини коефіцієнта підсилення антени);

- у разі кругової поляризації антени рецептора радіозавади і горизонтальної поляризації антени джерела радіозавади XPD дорівнює мінус 3 дБ (незалежно від величини коефіцієнта підсилення антени);

- у разі кругової поляризації антени рецептора радіозавади і вертикальної поляризації антени джерела радіозавади XPD дорівнює мінус 3 дБ (незалежно від величини коефіцієнта підсилення антени);

- у разі кругової поляризації антени рецептора радіозавади і кругової поляризації антени джерела радіозавади XPD дорівнює мінус 16 дБ (у разі різного напрямку обертання вектора поляризації), у протилежному випадку – $XPD = 0$ дБ.

У разі впливу декількох радіозавад розраховується еквівалентний рівень множинної (сукупної) завади.

У розрахунках рівнів завад на вході приймача від одного або декількох джерел враховуються наслідки частотного відбору потенційно небезпечних (щодо створення завад) РЕЗ, при якому визначені канали можливого проникнення завад.

Сумарний рівень завад від декількох джерел на вході приймача-рецептора завади (іноді – їх нелінійне поєднання) розраховується за формулою:

$$P_{\Sigma ij}(f_j) = \sum_{j=1, j \neq i}^j P_{zij}, \text{ Вт.} \quad (6.13)$$

У формулі (6.13) враховуються результати розрахунків потужності усіх видів завад на вході приймача, які були обрані за частотним критерієм від усіх передавачів завад та потужності інтермодуляційних завад.

Для практичного забезпечення умов ЕМС певного угруповання РЕЗ необхідними даними є топографічний план розміщення всіх антенних пристроїв, номенклатура їх параметрів, відомості про захисні відношення приймачів та пріоритети РЕЗ. Відомості про стан електромагнітної обстановки, а саме – параметри електромагнітних випромінювань певних джерел у певній ділянці простору, є вихідними даними для подальшого розв'язання задач ЕМС певного угруповання РЕЗ.

6.4. Порядок розв'язування завдань із забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів

Визначення ЕМС технічні методами розрізняються для окремого РЕЗ (обладнання) та для системи.

Для оцінки ЕМС використовується два різних типи комп'ютерного моделювання [49]:

- з використанням **детермінованих** моделей (параметричне дослідження), яке передбачає:

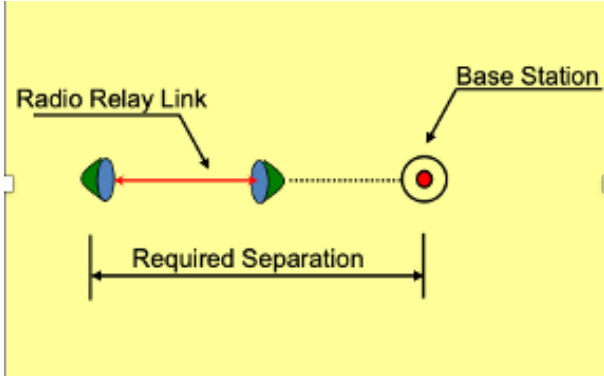
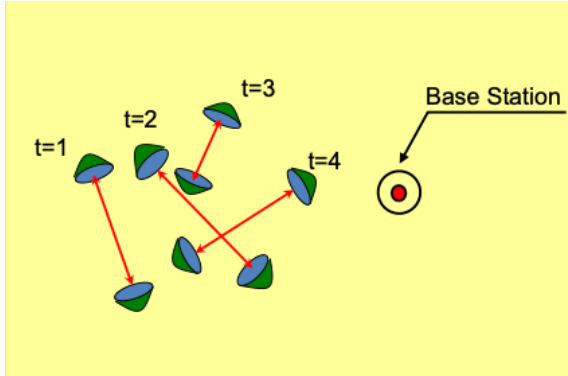
- аналіз одного або кількох сценаріїв відносно завадових ситуацій;
- кожен сценарій визначається набором параметрів;
- результати зазвичай базуються на найгіршому сценарії.

- з використанням **імовірнісних** моделей – моделювання методом Монте-Карло:

- параметри для сценарію змінюються в заданому діапазоні;
- для кожної комбінації параметрів проводиться аналіз завад;
- за цими результатами створюється статистика;
- результати – це, наприклад, імовірність завад.

Порівняння типів комп'ютерного моделювання для визначення ЕМС базової станції, на яку впливають радіозавади, що створені радіолініями, наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Параметричний підхід	Монте-Карло
– аналіз найгіршого випадку – зв'язок з базовою станцією – результат: потрібне рознесення радіолінії від базової станції (ЧТР).	– варіація розташування радіоліній – зміна довжини радіоліній – результат: імовірність співіснування або придушення (втручання) завадами
	

Вихідні дані для обчислень поділено на п'ять груп (рис. 6.4):

- дані, що визначають ЕМО, в якій може працювати радіозасіб із присвоєною частотою радіоканалу (файл 1);
- дані про радіозасоби, на які вже видано ліцензії (файл 2);
- дані про технічні параметри (характеристики) ЕМС засобів, що перебувають у експлуатації (файл 3);
- дані про наявні рекомендації, стандарти, норми й технічні вимоги, що містяться в міжнародній і національній НТД (файл 4);
- топографічні дані, що включають у себе профіль місцевості, рослинний покрив та інші чинники, необхідні для розрахунку умов поширювання радіохвиль між передавачем та приймачем (файл 5).

Вихідні дані використовуються для розрахунків за допомогою заздалегідь підготовлених моделей, із переліку яких вибираються необхідні:

- моделі можливих джерел завад (моделюються параметри ЕМС радіопередавачів, радіоприймачів та антен);
- моделі призначення частот, які базуються на врахуванні вимог НТД організаційного характеру, оскільки розрахунки можливого забезпечення ЕМС ґрунтуються на існуючих і майбутніх частотних призначеннях і присвоєннях;
- моделі загасання радіохвиль при поширенні на реальній трасі; оскільки значення загасання залежать від частоти, то використовується серія моделей;
- моделі територіального розміщення засобів і визначення площ обслуговування радіозасобами з урахуванням топографічних даних;
- моделі розрахунків потужностей приманного сигналу та завади (і відношення сигнал/завада); за наявності даних про можливі зміни відношення сигнал/завада розрахунок критеріїв ЕМС виконується залежно від наявності або відсутності таких змін.

Для прикладу у додатку Г наведений алгоритм розрахунків електромагнітної сумісності для присвоєння радіочастот радіоелектронним засобам рухомої служби.

Технічні характеристики та параметри РЕЗ, які необхідні для розрахунку ЕМС, можуть бути отримані з технічної документації РЕЗ (паспорту, формуляру), оцінка відповідності яких з проводиться під час сертифікації. До заяви щодо включення радіообладнання до Реєстру радіообладнання та випромінювальних пристроїв замовником надається **картка тактико-технічних даних радіообладнання**, форма якої наведена у додатку Д. Реєстр розміщений на сайті НКЕК.

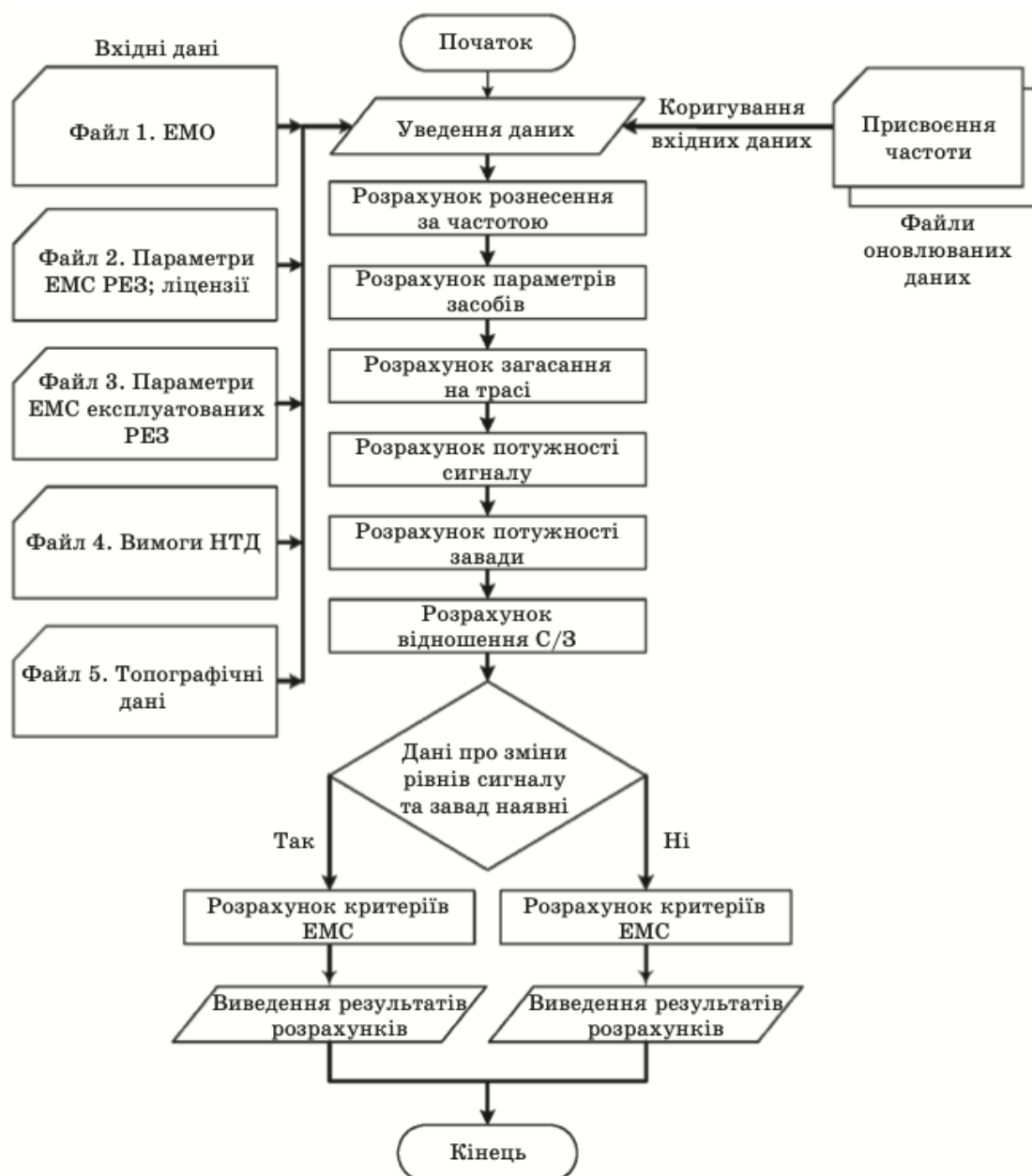


Рисунок 6.4. Початкові дані для розв'язування задач щодо ЕМС РЕЗ

Параметри РЕЗ, який планується встановити за конкретним місцем розташування, можуть бути отримані з *матеріалів заявки до ДП УДЦР щодо розрахунку ЕМС радіообладнання* (форма якої наведена у додатку Е), а на РЕЗ, що беруть участь у розрахунках ЕМС у регіоні планування, із загальної бази даних частотних присвоєнь (УДЦР). Перелік полів у замовленні для виконання та надання Розрахунку електромагнітної сумісності (ЕМС) радіообладнання (РО) залежить від типу радіотехнології.

Оцінювання ЕМС РЕЗ має здійснюватися на всіх етапах їхнього життєвого циклу (експлуатація, випробування, розробка, проектування, перспективне планування).

Так, на *стадіях планування та проектування* формується тип РЕЗ, їхній вигляд та основні характеристики. Важливо, щоб нові РЕЗ відповідали

сучасним вимогам норм ЕМС. На стадії планування слід проводити попереднє оцінювання ЕМС. При цьому мають бути визначено частотні діапазони планованих до розробки РЕЗ, виявлено потенційно несумісні РЕЗ і сформульовано вимоги щодо забезпечення ЕМС. Якщо вимоги ЕМС на цих стадіях не враховано, то на наступних стадіях виникнуть додаткові труднощі із забезпеченням беззавадної роботи РЕЗ.

На **стадії розробки** (проектування) засобів і комплексів має здійснюватися всебічне оцінювання ЕМС розроблюваних засобів із усіма існуючими РЕЗ, які передбачається експлуатувати разом із новорозроблюваною апаратурою. Під час розробки РЕЗ вживаються технічні заходи із забезпечення ЕМС, що, у свою чергу, зумовлює необхідність оцінювання цих заходів.

Якщо передбачається робота РЕЗ у складі комплексів, то оцінювання ЕМС має виконуватися з урахуванням сукупності засобів усього комплексу, а також умов їхнього функціонування.

На **стадії випробувань** оцінювання ЕМС здійснюється переважно експериментально. Проте й теоретичні (розрахункові) методи можуть бути корисними при плануванні експериментів (для правильного вибору складу РЕЗ, що підлягатимуть випробуванням, а також режимів роботи). Під час проведення натурних випробувань розрахункові методи розширюють і доповнюють межі експериментальних оцінок, сприяючи тим самим скороченню термінів і вартості випробувань.

Етап експлуатації (використання РЕЗ за призначенням) є основним етапом, на якому найбільш гостро відчувається проблема ЕМС РЕЗ. Саме на цьому етапі постають реальні завдання щодо забезпечення беззавадної роботи засобів (наприклад, при розміщенні їх на об'єктах, на місцевості, у повітрі та космічному просторі, при переміщенні та зміні умов експлуатації тощо).

Планування застосування та використання РЕЗ з урахуванням вимог ЕМС, швидке вжиття заходів для зниження (уникнення) взаємних завад потребують попереднього розрахункового оцінювання ЕМС, наявності відповідних розрахункових методик, інструкцій і посібників із забезпечення ЕМС РЕЗ.

Розрахункові методи оцінювання ЕМС застосовуються під час:

- прогнозування електромагнітної обстановки;
- перспективного планування та раціонального використання РЧС;
- підготовки матеріалів для висновків (рішень) щодо права на користування певними ділянками частот, на виділення смуг частот для новостворених (придбаних) РЕЗ;
- призначення частот для РЕЗ, що експлуатуються;
- визначення ступеня забезпечення ЕМС РЕЗ;
- розробки вимог до параметрів ЕМС і нормативно-технічних документів із ЕМС;

- оцінювання ступеня впливу ненавмисних завад на якість функціонування РЕЗ і комплексів РЕЗ;
- оцінювання ефективності заходів із забезпечення ЕМС;
- розроблення норм частотно-територіального рознесення РЕЗ тощо.

За ступенем складності та характером зв'язків між РЕЗ останні можна поділити на три види.

До *першого виду* відносять найпростіше поєднання (вироджене угруповання) із двох РЕЗ. Це парна (дуальна) ситуація, в якій оцінюється вплив випромінювача одного РЕЗ (однієї ненавмисної завади) на один рецептор (приймач) іншого РЕЗ. Згідно з викладеним раніше джерелом завад може бути не лише радіопередавач РЕЗ. Розв'язування завдання ЕМС зазвичай просте, добре розроблене і використовуване у складніших ситуаціях.

До *другого виду* належать *угруповання* РЕЗ. Вони складаються з функціонально пов'язаних між собою РЕЗ і забезпечують розв'язування одного чи кількох функціональних завдань. Такі угруповання зазвичай утворюються на окремих об'єктах (корабель, літак, бойова машина управління тощо) і часто називаються радіоелектронними комплексами. Небезпека виникнення в них ненавмисних завад набагато вища, ніж у парній ситуації, через близьке розміщення РЕЗ один до одного. У такому разі постає завдання комплексного оцінювання ЕМС великої кількості засобів, які попарно взаємодіють. Іноді дія кількох завад зводиться до дії однієї (еквівалентної).

До *третього виду* належать угруповання РЕЗ, що складаються із самостійних комплексів (об'єктів). Вони займають у просторі більш або менш обмежену область і тому називаються *локальними угрупованнями* (морський порт, аеродром, радіоцентр тощо). Тут окрім завдання внутрішньосистемної ЕМС об'єкта має розв'язуватися й завдання забезпечення міжсистемного ЕМС угруповання, причому ЕМО значною мірою буде імовірнісною (випадковою).

6.5. Оцінювання електромагнітної сумісності

Рішення щодо забезпечення ЕМС має ухвалюватися з огляду на оцінки збереження потрібної якості функціонування кожного засобу розглядуваного угруповання. Показник якості функціонування РЕЗ визначається для конкретного детермінованого (або імовірнісного) стану завадної обстановки з використанням критеріїв ЕМС.

В загальнішому вигляді реалізується чотирьохетапна схема оцінювання ЕМС (рис. 6.5). При цьому відбувається оцінювання ЕМО, якості функціонування окремих РЕЗ і сукупності РЕЗ у разі комплексного оцінювання, а також безпосереднє оцінювання забезпечення ЕМС. Показник якості функціонування окремих РЕЗ визначається для конкретної

завадної обстановки, тобто при конкретному відношенні сигнал/завада з використанням критеріїв ЕМС.

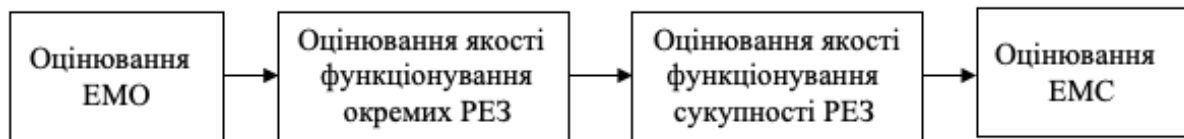


Рисунок 6.5. Чотириетапна схема оцінювання ЕМС

Усі завдання ЕМС розпочинають з оцінювання завадної обстановки виявленням потенційно несумісних РЕЗ, виходячи з аналізу (згідно з тривимірним об'ємом РЧС:

- частотних збігів шляхом виявлення каналів проникнення ненавмисних завад на вхід приймача $i(j)$ -го РЕЗ від передавача $j(i)$ -го РЕЗ;
- можливого збігу за часом роботи приймача $i(j)$ -го РЕЗ та передавача $j(i)$ -го РЕЗ;
- можливих збігів орієнтації діаграм спрямованості антен $G_A(\varphi, \theta)$ i -го та j -го РЕЗ.

Ураховуючи ці стани, обчислюють потужність (або густину потоку потужності) завад для кожного приймача від кожного передавача при конкретному співвідношенні частот передавання і приймання та за відомих умов розміщення РЕЗ.

Розрахункове завдання щодо оцінювання забезпечення ЕМС можна розв'язувати трьома методами:

- парного оцінювання (приймач – передавач завади),
- групового оцінювання (приймач – кілька джерел завад) та
- комплексного оцінювання.

Метод парного оцінювання найпростіший, добре розроблений і найчастіше використовуваний. Метод групового оцінювання часто зводиться до обчислення кількох парних оцінок, або до заміни кількох ненавмисних завад однією еквівалентною за впливом завадою. Метод комплексного оцінювання передбачає врахування впливу ненавмисних завад, зумовлених функціонуванням об'єкта (угруповання) РЕЗ, і має брати до уваги функціональні взаємозв'язки РЕЗ між собою. Методи парного та групового оцінювання являють собою вищу ієрархічну ланку й базуються на використанні результатів обчислень за допомогою нижчих ланок.

Потенційно несумісні РЕЗ виявляються за допомогою частотного аналізу кожної пари РЕЗ із метою визначення джерел і рецепторів ненавмисних завад, а також каналів їх проникнення.

У разі детермінованого оцінювання якості функціонування i -го та j -го РЕЗ порівнюють потужність завади в точці приймання із припустимим (за критерієм якості) її значенням. За результатами порівняння доходять висновку про прийнятність (або неприйнятність) якості функціонування для

кожного РЕЗ. Якщо хоча б для однієї пари РЕЗ зроблено висновок про неприйнятність якості функціонування, то ЕМС вважається не забезпеченою.

Імовірнісне оцінювання завадової обстановки здійснюється для умов із випадковими чинниками виникнення завад. При цьому крім можливих значень потужності ненавмисної завади обчислюються імовірність частотного, просторового та часового збігу приймального сигналу та завади. При цьому розрахунковим значенням інтенсивності завади та сигналу ставиться у відповідність імовірність (або щільність імовірності) їх виникнення, а сприйнятливість РЕЗ до завад оцінюється з використанням статистичних моделей завади та сигналу.

Якість функціонування в разі випадкової завадової обстановки можна оцінити усередненою (за всіма станами завадової обстановки) імовірністю прийнятності або неприйнятності якості функціонування.

Висновку про неприйнятність якості функціонування доходять на основі порівняння отриманої (у результаті обчислень) і припустимої імовірності прийнятної якості функціонування РЕЗ за даної випадкової завадової обстановки.

На рис. 6.6 наведений приклад сценарію моделювання Монте-Карло з розподілом станцій у просторі [49].

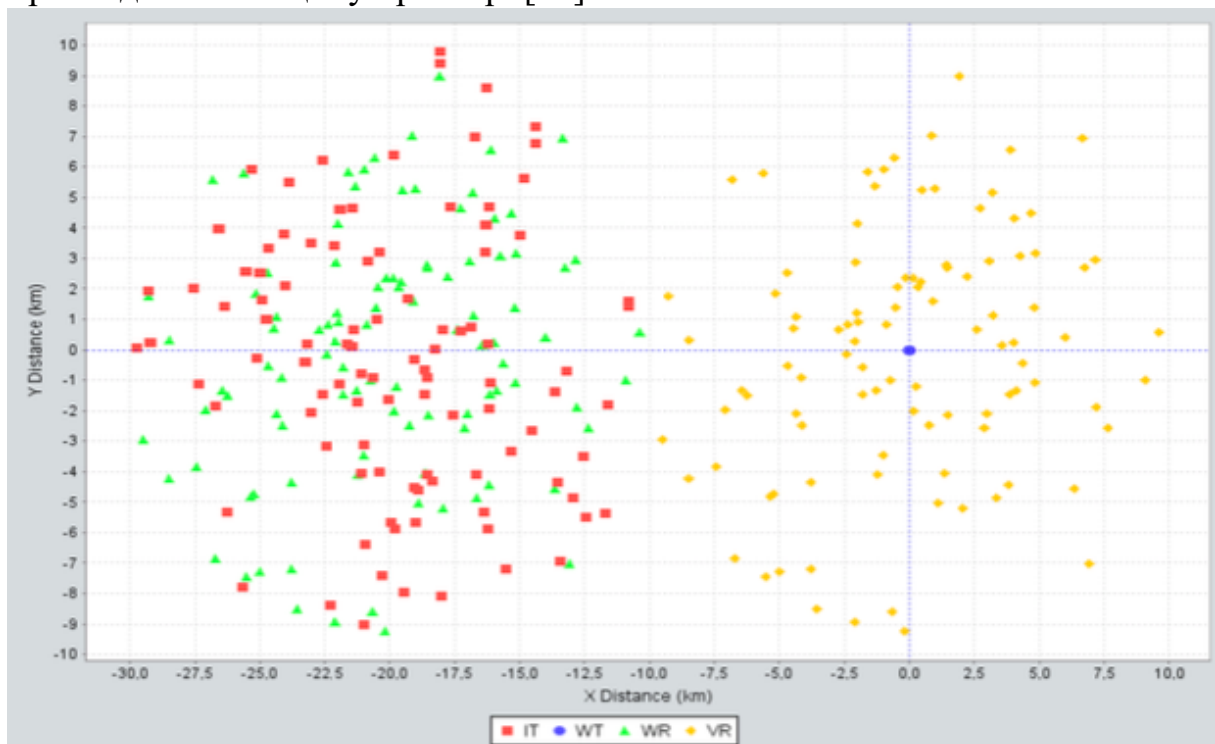
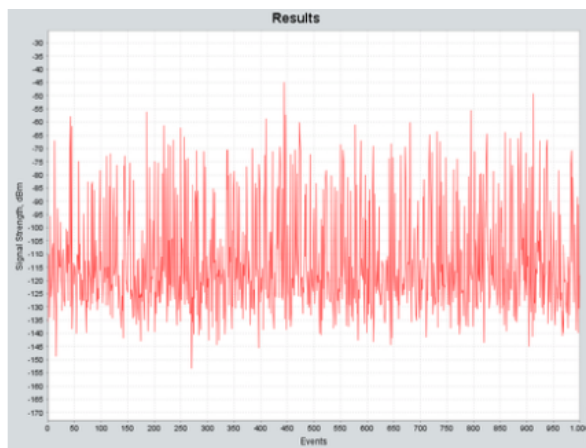
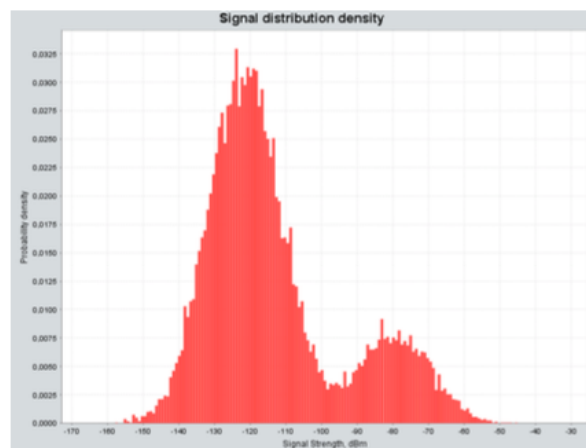


Рисунок 6.6. Приклад розміщення РЕЗ за сценарію моделювання Монте-Карло

На рис. 6.7 а) наведені результати розрахунків потужності сигналу завад для різних вибірок, а на рис. 6.7 б) результати статистичної обробки розрахунку (І) - щільність розподілу заважаючого сигналу (розподіл щільність вірогідності для різних сигналів різної потужності).



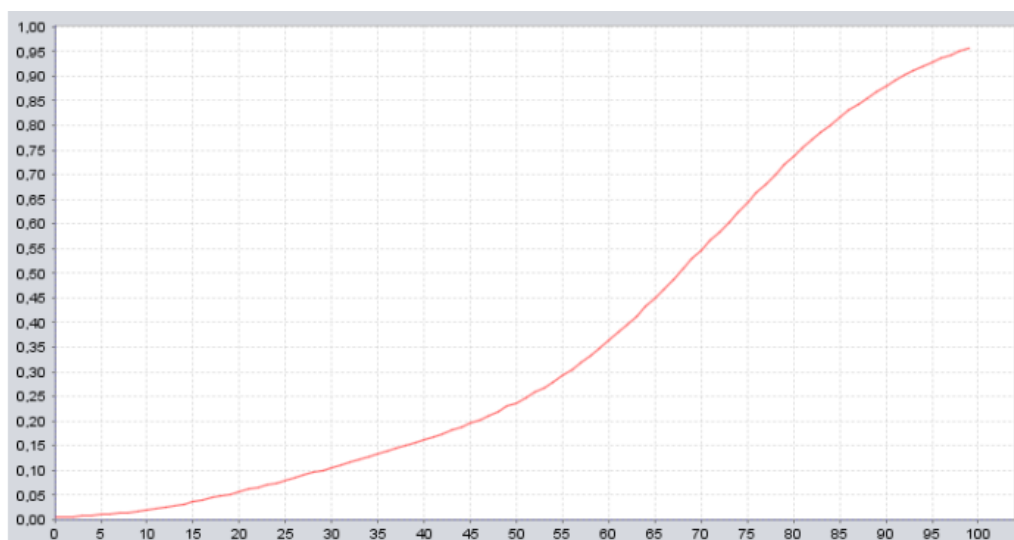
а)



б)

Рисунок 6.7. Приклад результатів моделювання методом Монте-Карло

На рис. 6.8 наведені статистичні результати (II) – приклад розрахунку імовірності впливу завад в залежності від їх потужності.



Потужність завад/дБВт

Рисунок 6.8. Імовірність впливу завад в залежності від їх потужності

Наведені вище методи оцінювання електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів з врахуванням відповідних Рекомендацій МСЕ, а також з застосуванням відповідного критерію ЕМС, параметрів РЕЗ (передавачів, приймачів та антен), впливу поширення радіохвиль на ЕМО враховані у методиці розрахунків ЕМС для різних радіослужб [38], яку затвердило Міністерство цифрової трансформації України, яке виконує функції Адміністратора зв'язку України.

Адміністрація зв'язку – центральний орган виконавчої влади, який здійснює функції України як держави – члена Міжнародного союзу електрозв'язку, забезпечення виконання зобов'язань України за Статутом та

Конвенцією Міжнародного союзу електрозв'язку і зобов'язань за Адміністративними регламентами, а також з питань співпраці з міжнародними організаціями та органами, що виконують функції адміністрацій зв'язку іноземних держав.

Для прикладу у додатку Г наведений витяг з “Методики здійснення розрахунків електромагнітної сумісності” для присвоєння радіочастот РЕЗ рухомої служби [38].

Оцінка ЕМС

Після розрахунку сумарного рівня завад на вході приймача P_{Σ} за формулою (6.13), оцінюють відношення рівня корисного сигналу до суми рівня шуму та рівня усіх завад на вході радіоприймача $Q_{\text{вх}}$ за наступною формулою:

$$Q_{\text{вх}} = (P_{\text{с}} - (P_{\Sigma} + P_{\text{ш}})) - A, \quad (6.14)$$

де: A – необхідне захисне відношення сигнал/(завада+шум) (дБ).

$P_{\text{ш}}$ – потужність власних шумів приймача, яка перерахована до його входу.

При $Q_{\text{вх}} \geq 0$ приймається рішення про повне виконання вимог ЕМС і можливості присвоєння частоти.

При $Q_{\text{вх}} < 0$ плановане частотне присвоєння з заданими технічними характеристиками неможливі через невиконання умов ЕМС з існуючим РЕЗ. Для забезпечення ЕМС необхідне або зміна частоти, або зміна технічних характеристик передавача, антен або місць розташування РЕЗ, що планується.

Якщо рівень корисного сигналу перевищує рівень множинної завади та шумів на дуже невелику величину відносно захисного відношення, рекомендується проводити натурні випробування на місці експлуатації, за результатами яких здійснити остаточний вивід щодо забезпеченості ЕМС.

Проведення розрахунків електромагнітної сумісності для загальних користувачів здійснюється Українським державним центром радіочастот на підставі ст. 69 Закону України “Про електроні комунікації” і нормативних документів НКЕК та оформлюється у вигляді висновка на бланку встановленого зразка.

УДЦР проводить розрахунки ЕМС РЕЗ, за потребою відбувається погодження і міжнародна координація. У випадках, які в примітках до “Плану розподілу та користування радіочастотного спектру України” визначені літерою “У”, потрібно погодження з ГШ ЗСУ.

При проведенні розрахунків ЕМС РЕЗ враховуються:

- існуючі та заплановані частотні присвоєння України;
- завантаженість смуг радіочастот, електромагнітна обстановка та наявність необхідного радіочастотного ресурсу в конкретному регіоні та

пункті, де планується експлуатація РЕЗ, а також, у разі потреби, результати радіомоніторингу;

- частотні присвоєння, занесені в Довідковий Міжнародний Реєстр частот Міжнародного союзу електрозв'язку (далі – МСЕ), чи відповідні частотні плани;

- міжнародні зобов'язання, прийняті Адміністрацією зв'язку України в рамках МСЕ, Європейської конференції адміністрацій пошт і телекомунікацій (СЕРТ), двосторонніх або багатосторонніх угод з адміністраціями зв'язку інших держав;

- рекомендації МСЕ, СЕРТ, захисні критерії, умови забезпечення ЕМС РЕЗ різного призначення;

- існуючі обмеження на використання окремих смуг радіочастот.

Висновки щодо ЕМС РЕЗ надаються на підставі:

- перевірки повноти та правильності оформлення заяви;
- експертизи документів на предмет визначення принципової можливості використання заявлених частот;

- визначення відповідності радіочастот та радіотехнології, що заявляються, Плану розподілу та користування радіочастотного спектру України;

- перевірки відповідності заявлених типів РЕЗ умовам їх застосування на території України згідно реєстру РЕЗ, що дозволені для використання в Україні;

- розрахунків (експертизи) ЕМС для РЕЗ із заявленими технічними характеристиками;

- результатів погоджень та міжнародної координації.

При підготовці рішення про надання висновку щодо ЕМС РЕЗ може визначатися необхідність проведення натурних (тестових) випробувань щодо забезпечення ЕМС з РЕЗ інших користувачів, про що зазначається в особливих умовах висновку щодо ЕМС РЕЗ. Натурні випробування проводяться Заявником за участю представників УДЦР (Філій) та інших користувачів РЧС (у разі потреби).

У разі, якщо у висновку щодо ЕМС РЕЗ (ВП) не зазначено строк проведення натурних випробувань, вони можуть бути проведені до подання заяви про видачу дозволу на експлуатацію РЕЗ (ВП) або після подання відповідної заяви, але не пізніше закінчення терміну дії висновку щодо ЕМС РЕЗ.

Відмова в наданні висновку щодо ЕМС РЕЗ надається Заявнику в разі:

- невиконання умов ЕМС з діючими або раніше запланованими РЕЗ на заявлених радіочастотах, у зазначеному місцезнаходженні РЕЗ;

- негативних результатів погодження Генеральним штабом Збройних Сил України (у разі, якщо таке погодження необхідно);

- негативних результатів міжнародної координації.

Висновок щодо ЕМС РЕЗ надається УДЦР на кожний окремий РЕЗ стаціонарного розташування, параметри якого потребують розрахунків ЕМС і погоджень.

Як зазначалося, метою проведення натурних випробувань є експериментальне визначення забезпечення ЕМС РЕЗ (ВП) Заявника з іншими РЕЗ загальних та/або спеціальних користувачів радіочастотного ресурсу України.

Результати, зазначені в розрахунку електромагнітної сумісності, можуть бути позитивними або негативними.

До позитивних результатів розрахунків електромагнітної сумісності належать:

- 1) позитивні без обмежень;
- 2) позитивні, за умови позитивних результатів натурних випробувань, тестових випробувань, тестових включень на місці експлуатації;
- 3) позитивні з особливими умовами, що враховують результати погодження Генеральним штабом Збройних Сил України та здійснення міжнародної координації, заявлення і реєстрації використання радіочастот;
- 4) позитивні на обмежений строк.

У разі невиконання умов електромагнітної сумісності між задіяними, запланованими або заявленими присвоєннями радіочастот результати розрахунків електромагнітної сумісності вважаються негативними.

Розрахунок здійснюється з використанням Автоматизованої системи управління використанням спектру **ICS Suite**, яка розроблена компанією **ATDI S.A.** (Франція).

При розрахунках ЕМС РЕЗ використовується дані з Реєстру присвоєнь радіочастот загальних користувачів, реєстру радіообладнання та випромінювальних пристроїв, ГІС (геоінформаційна система), моделі поширення радіохвиль, та інші необхідні інструменти (рис. 6.4).

6.6. Натурні випробування електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів

Залежно від результатів розрахунку електромагнітної сумісності визначається необхідність проведення одного чи кількох таких заходів:

- 1) *первинний технічний контроль та/або натурні випробування;*
- 2) *тестові випробування;*
- 3) *тестове включення.*

Натурні випробування – це експериментальне підтвердження електромагнітної сумісності заявленого радіообладнання з іншим радіообладнанням та/або радіоелектронними засобами та випромінювальними пристроями спеціального призначення.

Необхідність проведення натурних випробувань щодо забезпечення ЕМС з РЕЗ і ВП інших загальних та/або спеціальних користувачів

зазначається в особливих умовах висновку щодо ЕМС РЕЗ, що надається згідно наступних документів:

- Положення про порядок присвоєння радіочастот радіоелектронним засобам загального призначення,
- Порядку надання висновків щодо електромагнітної сумісності та дозволів на експлуатацію радіоелектронних засобів і випромінювальних пристроїв,
- Порядку проведення приймальних випробувань радіоелектронних засобів та випромінювальних пристроїв на місці експлуатації тощо.

Натурні випробування передбачають проведення:

- комплексу заходів з аналізу та оцінки електромагнітної обстановки;
- перевірки параметрів випромінювання РЕЗ та експериментальних досліджень з визначення умов забезпечення ЕМС РЕЗ, яке замовляється із РЕЗ спеціального та загального призначення.

На підставі особливих умов висновку щодо ЕМС РЕЗ Заявник організовує проведення натурних випробувань РЕЗ (ВП).

Під час проведення натурних випробувань РЕЗ (ВП) здійснюються інструментальна оцінка параметрів випромінювання РЕЗ та вимірювання параметрів РЕЗ.

Оформлені протоколи вимірювання параметрів РЕЗ та/або інструментальної оцінки параметрів випромінювання РЕЗ (ВП) не пізніше п'яти робочих днів після проведення натурних випробувань суб'єкт господарювання, що їх проводив, передає Заявнику.

Інструментальну оцінку параметрів випромінювання РЕЗ (ВП) здійснює УДЦР або його відповідна Філія.

Вимірювання параметрів РЕЗ можуть здійснювати:

- УДЦР або відповідна регіональна Філія, у якій проводяться натурні випробування РЕЗ;
- заявник за наявності у нього необхідного вимірювального обладнання, що пройшло державну метрологічну атестацію, та кваліфікованих фахівців;
- суб'єкт господарювання, що має атестат акредитації на технічну компетентність та незалежність з правом проведення вимірювань показників об'єктів у відповідній галузі (вимірювальна лабораторія).

Результати натурних випробувань враховуються УДЦР (Філією) під час прийняття рішення про видачу дозволу на експлуатацію РЕЗ.

У разі встановлення під час натурних випробувань створення неприпустимих радіозавад для РЕЗ інших користувачів, що можуть бути усунені під час проведення натурних випробувань, Заявник усуває причини виникнення радіозавад. Причини виникнення радіозавад та спосіб їх усунення зазначаються в протоколі натурних випробувань.

Заявник здійснює заходи з усунення причини створення радіозавад (у разі потреби спільно з користувачами, що зазнають впливу радіозавад).

У цьому разі проводяться повторні натурні випробування. За потреби Заявник звертається до УДЦР (Філії) стосовно подовження терміну тестового включення.

Натурні випробування не замінюють первинного технічного контролю. Результати вимірювання параметрів РЕЗ та/або інструментальної оцінки параметрів випромінювання РЕЗ (ВП), отримані під час натурних випробувань та оформленні відповідними протоколами, можуть бути враховані при проведенні первинного технічного контролю у разі відсутності зауважень до РЕЗ (ВП) Заявника в протоколі натурних випробувань.

Контрольні питання та завдання:

1. Які основні завдання аналізу ЕМС?
2. Що розуміють під електромагнітною обстановкою?
3. Від яких обставин залежить якість ЕМО в точці нагляду?
4. Що розуміють під критерієм ЕМС РЕЗ?
5. У чому полягають відмінності між поняттями ЕМО та ЕМС?
6. Яким показником визначається якість прийому корисного сигналу.
7. Дайте визначення *захисного відношення*. Поясніть застосування захисного відношення як критерію ЕМС систем радіозв'язку.
8. Чим оцінюється ступінь впливу завади на рівень вихідного сигналу?
9. Від чого залежить рівень корисного сигналу на вході радіоприймача?
10. Від яких параметрів залежать втрати в радіоканалі і яким чином?
11. Поясніть фізичну сутність *FDR*. Від яких обставин залежить кількісне значення цього чинника?
12. Які основні завдання аналізу ЕМС?
13. Назвіть вихідні дані для розв'язання завдань щодо ЕМС РЕЗ.
14. Які можливі моделі проведення аналізу ЕМС для конкретної ситуації? В чому полягає їх особливість?
15. В чому особливість детермінованих аналітичних оцінок? Який основний енергетичний критерій забезпечення ЕМС рецептора завади?
16. Яка мета та порядок проведення натурних випробувань?
17. Потужність першої завади на вході рецептора завади становить 10 дБВт (відносно Вт), другої завади 3 дБВт. Яка загальна потужність множинної (сукупної) завади у Вт?

Задача 1 (приклад). Розрахувати мінімально необхідні втрати сигналу завади між джерелом завади (ДЗ) і рецептором завади (РЗ) $L_{\text{необх}}$, якщо

потужність ДЗ дорівнює 1000 Вт, що відповідає 30 дБВт, чутливість рецептора завад $P_{PЗmin}$ складає – 100 дБВт, захисне відношення $A = 10$ дБ.

Які фактори впливають на втрати сигналу завади.

Розв'язання:

Визначимо необхідне ослаблення завади за формулою

$$L_{необх} = P_{ДЗ} - P_{PЗmin} + A = 30 - (-100) + 10 = 140 \text{ (дБ)}$$

Відповідь: необхідна розв'язка між ДЗ і РЗ буде становити $L_{необх} = 140$ дБ.

Таблиця даних для побудови моделі обвідної для деяких випромінювань

Клас випромінювання	Ширина необхідної смуги частот B_n	Ширина контрольної смуги частот B_K	Формули для обчислення координат обмежувальної оцінки	
			по осі рівнів (мінус дБ)	по осі частот
Амплітудна модуляція				
A1A (A1B)	$B_n = k B$ Значення k (3 або 5) установлюється залежно від призначення передавача та діапазону використовуваних частот: $k = 5$ для ліній, що зазнають завмирань; $k = 3$ для ліній без завмирань	$B_K = B_n$	$X_1 = 40$ $X_2 = 50$ $X_3 = 60$	$B_{x1} = 1,3 B_n$ $B_{x2} = 1,6 B_n$ $B_{x3} = 2,0 B_n$
A2A	$B_n = 2F + B$	$B_K = 2F + 6,8B$	$X_1 = 35$	$B_{x1} = 2F + 10B$
J2A	$B_n = 5B$	$B_K = B_n$	$X_1 = 40$ $X_2 = 50$ $X_3 = 60$	$B_{x1} = 1,3 B_n$ $B_{x2} = 1,6 B_n$ $B_{x3} = 2,0 B_n$
A3E (мовлення)	$B_n = 2F_n$	$B_K = 1,2 B_n$	$X_1 = 40$ $X_2 = 45$ $X_3 = 50$ $X_4 = 60$	$B_{x1} = 1,35 B_n$ $B_{x2} = 1,4 B_n$ $B_{x3} = 1,9 B_n$ $B_{x4} = 3,3 B_n$
R3E (мовлення)	$B_n = F_n$	$B_K = 1,15 B_n$	$X_1 = 35$ $X_2 = 40$ $X_3 = 50$ $X_4 = 60$	$B_{x1} = 1,2 B_n$ $B_{x2} = 1,4 B_n$ $B_{x3} = 2,4 B_n$ $B_{x4} = 4,4 B_n$
J3E (мовлення)	$B_n = 2F_n - F_n$	$B_K = 1,20 B_n$	$X_1 = 40$ $X_2 = 50$ $X_3 = 60$	$B_{x1} = 2,2 B_n$ $B_{x2} = 4,0 B_n$ $B_{x3} = 6,9 B_n$
R8E, J8E	$B_n = 2F_n$	$B_K = 1,1 B_n$	$X_1 = 40$ $X_2 = 50$ $X_3 = 60$	$B_{x1} = 2,0 B_n$ $B_{x2} = 3,7 B_n$ $B_{x3} = 6,4 B_n$
Частотна модуляція				
F1A(F1B)	$B_n = 2,61D + 0,55B$ для $1,5 \leq m < 5,5$; $B_n = 2,1D + 1,9B$ для $5,5 \leq m \leq 20$; $B_n = 2D + 5B$ для $m > 20$	$B_K = 4,3B\sqrt{m}$ для $1,5 \leq m < 5,5$; $B_K = (m + 7)B$ для $5,5 \leq m \leq 20$	$X_1 = 40$ $X_2 = 50$ $X_3 = 60$	$B_{x1} = 5,8B\sqrt{m}$ для $1,5 \leq m < 5$; $B_{x1} = (1,2m + 7) B$ для $m \geq 5$; $B_{x2} = 8,1B\sqrt{m}$ для $1,5 \leq m < 12$; $B_{x2} = (1,2m + 15) B$ для $m > 12$; $B_{x3} = 11B\sqrt{m}$ для $1,5 \leq m < 16$; $B_{x3} = (1,3m + 23) B$ для $m \geq 16$;
F3A; G3E (мовлення)	$B_n = 2D + 2 F_n$	$B_K = 1,15B_n$		
F3E; G3E	$B_n = 2D + 2 F_n$	$B_K = B_n$	$X_1 = 40$	$B_{x1} = (7,8m'' + 3) F_n$ для $0,25 \leq m'' \leq 1,3$; $B_{x1} = (7,8m'' + 4) F_n$

Клас випромінювання	Ширина необхідної смуги частот B_n	Ширина контрольної смуги частот B_K	Формули для обчислення координат обмежувальної оцінки	
			по осі рівнів (мінус дБ)	по осі частот
			$X_2 = 50$	$B_{x2} = (8,4m'' + 4,4) F_a$ для $0,25 \leq m'' \leq 1,3$;
			$X_3 = 60$	$B_{x3} = (9m'' + 6) F_b$ для $0,25 \leq m'' \leq 1,3$; $B_{x3} = (8,8m'' + 8)$

Статистичні моделі, які використовуються у розрахунках базових втрат поширення радіохвиль у різних типах середовищ у сценаріях за участю РО фіксованої служби

Модель поширення радіохвиль (тип середовища)	Умови застосування моделі і типові значення вихідних даних	Визначення параметрів моделі
1	2	3
Модель Хати (для міста і приміських зон) $L_{\text{місто}} = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_1 + (44,9 - 6,55 \lg h_1) \lg d + a(h_2) + a(v_r) + a(b) + a(h_1; f);$ $L_{\text{передмістя}} = L_{\text{місто}} - 21 \lg (f/28)^2 - 5,4;$ $L_{\text{передмістя}} = L_{\text{місто}} - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 35,94$ (напівзакрита місцевість); $L_{\text{село}} = L_{\text{місто}} - 4,78 (\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94$ (відкрита місцевість).	Смуга частот від 100 МГц до 3 000 МГц; $h_1 = (30 - 200)$ м; $h_2 = (1 - 10)$ м; $d = (1 - 1\,000)$ км; v_r (сільська місцевість) = 0; v_r (передмістя) = 0,5; v_r (місто) = 1; $b = (0 - 50)\%$.	f – робоча частота; h_1 – висота передавальної антени; h_2 – висота приймальної антени; d – довжина траси; b – щільність міської забудови; d_0 – відстань прямої видимості; $a(h_2)$, $a(v_r)$, $a(b)$, $a(h_1; f)$ – поправочні коефіцієнти. Розрахунок параметрів моделі: $a(h_2) = (1,1 \lg f - 0,7) h_2 - 1,56 \lg f + 0,8$ – для малих міст; $a(h_2) = 8,29 (\lg 1,54 h_2)^2 - 1,1$ – для великих міст, якщо $f < 200$ МГц; $a(h_2) = 3,2 (\lg 1,75 h_2)^2 - 4,97$ – для великих міст, якщо $f > 200$ МГц; $a(v_r) = (1 - v_r) [(1 - 2 v_r) \gamma_1 + 4 v_r \gamma_2];$ $\gamma_1 = 4,78 (\lg f)^2 - 18,33 \lg f + 40,94;$ $\gamma_2 = 2 [\lg (f/28)^2 + 5,4];$ $a(b) = 25 \lg b - 30;$ $a(h_1; f)$ – поправка, яка враховує сферичність Землі, якщо $0,2r_0 < d \leq 0,8r_0;$ $d_0 \approx 3,57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}).$

1	2	3
Модель Уолфіша-Ікегамі (для систем GSM, які розгортаються в місті або приміській зоні) $L_{\text{заг}} = L_{\text{вп}} + L_{\text{відб}} + L_{\text{диф}};$ $L_{\text{вп}} = 32,5 + 20 \lg(d; f);$ $L_{\text{відб}} = -16,9 - 10 \lg(w) + 10 \lg(f; \Delta h_2) + L_{\text{орієнт}};$ $L_{\text{диф}} = L_c + L_a + L_d + k_d \lg d + k_f \lg f - 9 \lg r.$	Смуга частот від 800 МГц до 2 000 МГц; $h_1 = (4 - 50)$ м; $h_2 = (1 - 3)$ м; $d = (0,02 - 100)$ км; $h_6 \leq 80$ м; $r = (20 - 50)$ м; $\varphi = (0 - 90)^\circ;$ $w = (10 - 15)$ м.	h_6 – висота споруд, найближчих до передавальної антени; d – довжина траси; r – відстань між спорудами; φ – орієнтація вулиці відносно напрямку надходження сигналу; W – ширина вулиці; $h_{\text{б.ср}}$ – середня висота споруд; Розрахунок параметрів моделі: $L_{\text{орієнт}} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi, & \text{для } 0 < \varphi < 35^\circ; \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ), & \text{для } 35^\circ < \varphi < 55^\circ; \\ 4 + 0,114(\varphi - 55^\circ), & \text{для } 55^\circ < \varphi < 95^\circ; \end{cases}$ $L_c = \begin{cases} 0, & \text{для } h_1 < h_{\text{б.ср}}; \\ 18 \lg(1 + (h_1 - h_{\text{б.ср}})), & \text{для } h_1 > h_{\text{б.ср}}; \end{cases}$ $L_a = \begin{cases} 54, & \text{для } h_1 > h_{\text{б.ср}}; \\ 54 - 0,8(h_1 - h_{\text{б.ср}}), & \text{для } d > 0,5 \text{ км і } h_1 \leq h_{\text{б.ср}}; \\ 54 - 0,4(h_1 - h_{\text{б.ср}}), & \text{для } d \leq 0,5 \text{ км і } h_1 \leq h_{\text{б.ср}}; \end{cases}$ $k_d = \begin{cases} 18, & \text{для } h_1 > h_{\text{б.ср}}; \\ 18 - 15(h_1 - h_{\text{б.ср}}), & \text{для } h_1 \leq h_{\text{б.ср}}; \end{cases}$ $k_f = \begin{cases} -4 + 0,7(\frac{f}{925} - 1), & \text{для міст з середнім розміром}; \\ 18 - 15 \frac{h_1 - h_{\text{б.ср}}}{h_{\text{б.ср}}}, & \text{для мегаполіса.} \end{cases}$

1	2	3
Модель Парсона (для міської зони з визначеним ступенем урбанізації) $L_{\text{зат}} = 20 \lg(0,7h_1) + 81 \lg h_2 - 0,025f - 26 \lg(0,025f) + 86 \lg \left(\frac{f+100}{156} \right) - \left(40 + 14,51 \lg \left(\frac{f+100}{156} \right) \right) \lg d - 0,265b + 0,37(h_1 - h_2) - 0,87v + 5,5$	Смуга частот від 150 МГц до 1 000 МГц; $h_1 = (30 - 300)$ м; $h_2 \leq 3$ м; $d \leq 10$ км; $v = (0 - 100)\%$.	h_0 – висота споруд, найближчих до передавальної антени; d – довжина траси; v – ступінь урбанізації середовища.
Модель Окамури-Хати (для міста і приміських зон) $E = 69,82 - 6,16 \lg f + 13,82 \lg h_1 + a(h_2) - (44,9 - 6,55 \lg h_1)(\lg d)^b$	Смуга частот від 100 МГц до 2 000 МГц; $h_1 = (30 - 200)$ м; $h_2 = (1 - 10)$ м; $d \leq 30$ км; відносно пласка місцевість; $b = 1$, якщо $d < 20$ км; $b = b_{\text{кор}}$, якщо $20 < d < 30$ км.	E – напруженість поля в точці приймання, дБмкВ/м; f – робоча частота; h_1 – висота передавальної антени; h_2 – висота приймальної антени; d – довжина траси; $a(h_2)$ – поправочний коефіцієнт. Розрахунок параметрів моделі: $a(h_2) = (1,1 \lg(f) - 0,7)h_2 - (1,56 \lg(f) - 0,8)$; $b_{\text{кор}} = 1 + (0,14 + 0,000187f + 0,00107h_1)(\lg(0,05d))^{0,8}$; $h_1' = h_1 \sqrt{1 + 0,000007 h_1^2}$.
Модель COST 231 (модифікована модель Хати для 2 ГГц) $L_{\text{місто}} = 46,3 + 33,91 \lg f - 13,82 \lg h_1 - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \lg(h_1)) \lg d + C_m$	Смуга частот від 1 500 МГц до 2 000 МГц; $h_1 = (30 - 200)$ м; $h_2 = (1 - 10)$ м; $d = (1 - 20)$ км; $C_m = 0$ дБ – для міст середніх розмірів; $C_m = 3$ дБ – для міст зі щільною забудовою.	d – довжина траси; C_m – додаткові втрати. Розрахунок параметрів моделі: $a(h_2) = (1,1 \lg(f) - 0,7)h_2 - (1,56 \lg(f) - 0,8)$
Модель розрахунку базових втрат у разі поширення радіохвиль із зовнішнього середовища в будівлі $L(R) = L_{\text{fs}} + L_{\text{rts}} + L_{\text{msd}}$	$\Delta h_2 = 10,5$ м (місто і передмістя); $x = 15$ м (місто і передмістя); $l = 80$ м.	λ – довжина хвилі; d – довжина траси; L_{fs} – втрати у вільному просторі; L_{rts} – дифракційні втрати (від дахів споруд); L_{msd} – дифракційні втрати (від топографічних перешкод); Δh_2 – різниця між висотою забудов h_2; x – віддалення приймальної станції від граней дифракції; l – середня відстань між рядами будівель. Розрахунок параметрів моделі: $L_{\text{fs}} = -10 \lg \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$; $L_{\text{rts}} = -10 \lg \left(\frac{\lambda}{2\pi^2 d} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right)$; $L_{\text{msd}} = -10 \lg Q_m^2$; $\theta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{ \Delta h_2 }{x} \right)$; $r = \sqrt{(\Delta h_2)^2 + x^2}$; $Q_m = l/d$.

Програмне забезпечення для розрахунку радіоліній

Проектування – один із найбільш складних та відповідальних етапів розгортання систем зв'язку, оскільки він повинен забезпечити найбільш оптимальну побудову мережі. При проектуванні необхідно визначити місця встановлення базових станцій (БС) таким чином, щоб забезпечити обслуговування зв'язком заданої території необхідною якістю за мінімальної кількості БС, тобто за мінімальної вартості інфраструктури мережі.

Фактично це завдання важко здійснити. З одного боку, надмірно часта розстановка БС не вигідна, оскільки тягне у себе невиправдані витрати. З іншого боку, дуже рідкісне розташування базових станцій (БС) може призвести до появи ділянок території, що не обслуговуються, що неприпустимо. Завдання додатково ускладнюються проблемою аналітичної оцінки властивості розташування сигналів. При аналітичному розрахунку слід враховувати рельєф місцевості, наявність рослинності, заселеність території, тип ґрунту, кліматичну обстановку та інші фактори, які можуть вплинути на зміну рівня сигналу на окремих ділянках конкретної території. З урахуванням даних параметрів аналітичний розрахунок стає дуже трудомістким, що змушує витрачати нею багато часу. Тому використання ефективного програмного забезпечення, що виконує аналітичний розрахунок за короткий проміжок часу з найменшими похибками є найбільш грамотним вирішенням проблеми проектування мереж.

Рекомендовані моделі ПРХ реалізовані у різноманітному програмному забезпеченні. У більшості випадків програмне забезпечення дозволяє розрахувати як зони обслуговування БС, так й окремі радіолінії, що потрібно для врахування впливу завад. У програмному забезпеченні зазвичай використовуються як *статистичні* та *детерміновані* методи розрахунку втрат корисного сигналу та завад при поширенні радіохвиль.

Існують програмне забезпечення, яке дозволяє користувачу обрати модель поширення радіохвиль для прогнозування радіопокриття, наприклад з переліку, якій наведений у табл. В.1.

Таблиця В.1

Модель	Діапазон частот
ITU-R P.1812-6	30 МГц - 6 ГГц
Лонглі-Райса (ITM)	20 МГц - 20 ГГц
Окамура–Хата	100 МГц - 1.5 ГГц
3GPP TR 38.901	500 МГц - 100 ГГц
ITU-R P.1546-6	30 МГц - 4 ГГц
ITU-R P.528-3 + P.526-14	125 МГц - 15.5 ГГц

У деяких програмах заздалегідь враховані характеристики та параметри систем радіозв'язку різних стандартів (від модуляції і відповідно потрібне захисне співвідношення $P_C/(P_3+P_{ш})$, потужності передавачів та чутливості приймачів БС і абонентського обладнання, смуги радіочастот та інші параметри). Тому у вихідних даних програм достатньо задати стандарт радіозв'язку.

Окреме професійне ПЗ крім розрахунків, пов'язаних з ПРХ, дозволяють також при проектуванні радіомереж проводити радіочастотне планування (в тому числі проводити розрахунки ЕМС) та враховувати мережеві параметри (кількість абонентів, їх розподіл по території, навантаження та інші).

Деякі програми призначені для розрахунків тільки систем радіозв'язку окремих стандартів, наприклад Wi-Fi.

Крім того програмне забезпечення поділяється по доступності для користувача: доступне (безкоштовне), умовно-доступне (умовно-безкоштовні, що надає демо-версію або версію з достатнім для роботи безкоштовним функціоналом) та комерційне (платне).

Далі проведено короткий перелік програмного забезпечення призначеного для планування та розрахунку різних радіомереж.

Безкоштовні:

D-Link WiFi Planner Pro. Онлайн сервіс для планування розгортання WLAN мереж усередині приміщень на основі WiFi обладнання від компанії D-Link.

RadioWORKS. Це програмне забезпечення для обчислення різних параметрів, пов'язаних як з поширенням радіохвиль, і з самими радіохвилями.

CRC-COVWEB. Веб-ресурс Канадського Науково-дослідного центру зв'язку. Онлайн калькулятор зони радіопокриття за методом Longley Rice з прив'язкою до Google-карт. Враховує лише рельєф місцевості. Цей веб-сайт має освітній характер.

Radio Mobile – універсальна програма комп'ютерного моделювання поширення радіохвиль та зон впевненого прийому для різних бездротових мереж, яка розроблена радіоаматорами (Англія). Вона може використовуватись для розрахунку зон охоплення базової станції, ретранслятора чи інших радіомереж.

Умовно-безкоштовні:

WiMAP-4G є програмним забезпеченням, розробленим для планування мереж широкопasmового бездротового доступу, наприклад, на основі стандарту WiMAX або WLAN.

Xirio – умовно-безкоштовний онлайн сервіс з великим функціоналом та підтримкою різних стандартів зв'язку та моделей ПРХ. Типи систем зв'язку, що підтримуються: радіонапрямки; радіомережі; стільникові мережі; транспортні мережі; широкомовні мережі.

Сервіс є умовно-безкоштовним, без оплати доступний тільки розрахунок з роздільною здатністю 400 м, що не дозволяє використовувати цей сервіс в умовах міста.

Asset – продукт міжнародної компанії Aircom International. Це багатофункціональний модульний продукт (тобто для отримання доступу до розширених функцій програми – наприклад, розрахунок покриття для мереж LTE – необхідно купити ліцензію на використання спеціального модуля для розрахунку покриття для мереж LTE). Використовує точні карти висот, доступні після придбання продукту.

У пакет вбудовані автоматичний планувальник частот, модуль планування трафіку та ряд інших, що значно спрощують роботу інженерів-проектувальників.

Комерційні:

AWE ProMan. Відмінною особливістю системи є те, що вона може проводити аналіз створеної моделі мережі зв'язку з точки зору теорії масового обслуговування та моделювати різні ситуації (наприклад, ЧНН) виходячи із щільності населення у зазначеному районі, та відсотки (від загального населення) потенційних користувачів. Підтримуються як MIMO і DAS, так і розширення для повітряних інтерфейсів

Ekahau Site Survey. Найпопулярніший комплекс рішень з планування та подальшому аналізу мереж WiFi.

Atoll – програмне забезпечення Atoll виробництва компанії Forsk (<http://www.forsk.com/>). Призначене для планування бездротової мережі починаючи від дизайну, закінчуючи мережевою оптимізацією. Одне з найпопулярніших у світі рішень для побудови стільникових систем зв'язку. Дозволяє працювати з великими проектами (десятки тисяч секторів) доповнюється підтримкою розподілених обчислень.

Програмне забезпечення – Atoll це професійний програмний інструмент який потребує професійного підходу в при його використанні. Програма рекомендується для використання великим операторам зв'язку для роботи з великими мережами.

CelPlanner – продукт американської компанії CelPlan Technologies. Це модульна програма, призначена для створення бездротових мереж.

Дане ПЗ дозволяє проводити планування та подальший аналіз Wi-Fi мереж різного призначення та ємності. До складу входить як сам планувальник, так і програма-аналізатор щодо радіовимірювань вже існуючих мереж.

Mentum Planet – модульний продукт міжнародної компанії Mentum, що є комплексним рішенням для високоточного планування мереж радіодоступу за технологіями 2G, 3G, 4G та Wi-Fi.

ICS Telecom – продукт міжнародної компанії ATDI (<http://www.atdi.us.com/ICSTelecom.aspx>), який є ключовим рішенням для планування телекомунікаційних мереж та управління. Під час розрахунків використовуються практично всі відомі моделі поширення.

Наведемо приклади розрахунку зон обслуговування з допомогою комерційного ПЗ **ICS Telecom**, яка використовується в тому числі ДП **Український державний центр радіочастот** та дозволяє також виконувати розрахунки ЕМС.

Можливості програмного забезпечення:

- аналіз практично всіх видів бездротових мереж, включаючи мобільні GSM/CDMA/LTE, WiFi/WiMAX, радіорелейні, ширококомовні, телеметричні, а також радары, супутникові наземні станції та інше;

- планування і випробування мереж, рішення задач системного адміністрування, бізнес-модельювання, визначення розмірів інфраструктури.

Програма працює з проектами, в які входять різні шари:

- цифрова модель місцевості;
- зображення карти;
- колірна палітра;
- шар перешкод;
- шар будівель;
- шар об'єктів зв'язку.

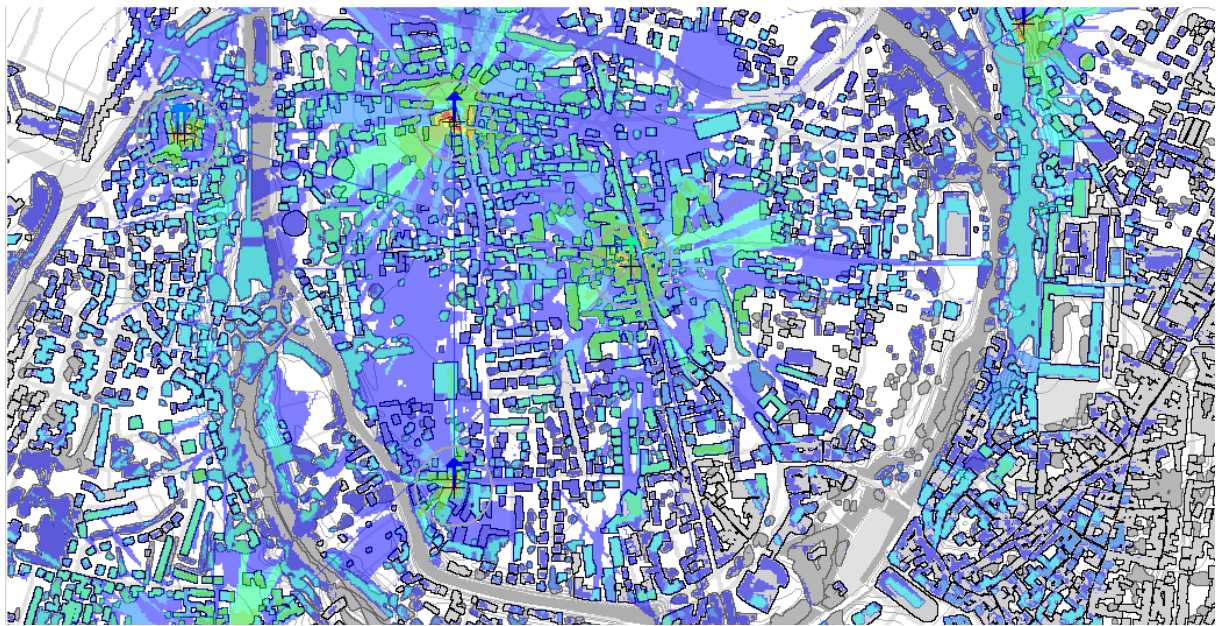


Рисунок В.1. Приклад розрахунку зони покриття (ПЗ ICS Telecom)

ICS Telecom дозволяє проводити аналіз взаємного впливу базових станцій, вести базу даних обладнання, генерувати абонентів, в тому числі і випадковим чином, проводити статистичний аналіз, розраховувати покриття (рис. 4.19.), підбирати автоматично мінімально необхідну висоту для стійкої роботи прольоту радіорелейної лінії та інші параметри потрібні при якісному та детальному плануванні бездротових мереж зв'язку.

Крім вказаних програм великий список комерційного ПЗ, призначеного для планування різних радіомереж представлений на сайті Університету Британської Колумбії (The University of British Columbia).

Друга з найпоширеніших програм ПЗ – безкоштовне ПЗ **Radio Mobile**, у якій використовується модель ПРХ ІТМ Лонглі-Райса. Модель Лонглі-Райса застосовується також і в іншому програмному забезпеченні для планування радіомереж, а саме – *Nautel*, *SPLAT!*, *QRadioPredict*, *Probe*, *TowerCoverage.co*, онлайн калькуляторі *CRC-COVWEB* тощо.

Radio Mobile – універсальна програма комп'ютерного моделювання поширення радіохвиль та зон впевненого прийому для різних бездротових мереж, яка була створена розробником Roger Coudé для моделювання поширення радіохвиль в діапазоні частот від 20 МГц до 20 ГГц [37].

Radio Mobile надає можливість створювати карти конкретних районів, використовуючи дані SRTM (*Satellite Radar Topography Mission*) від служби радіолокаційного картографування місцевості з космічних кораблів багаторазового використання, з подальшим додаванням рельєфу місцевості та доріг [35]. Потім у вибраних місцях можна встановити станції. Усі радіоканали між станціями можна проаналізувати з погляду профілю траси та параметрів сигналу. За потреби для кожної окремої станції можна визначити зону охоплення (обслуговування). Можна також визначити *Best Sites* (краще місце розташування), щоб забезпечити зони охоплення кількох певних станцій. За допомогою нової функції *Route Radio Coverage* можна відтворити характеристики станції, яка переміщається певним маршрутом на карті. Також можна вибрати *Best Unit* (найкращу станцію) з максимальним рівнем сигналу в заданому місці.

Вона може використовуватись для розрахунку зон охоплення (обслуговування) базової станції, ретранслятора чи інших радіомереж. При розрахунках враховуються висота навколишньої місцевості та різні параметри радіосистем. Наприклад:

- розташування передавача;
- вихідна потужність передавача;
- чутливість приймача;
- частота;
- тип антени;
- діаграма спрямованості антени (можна обирати із запропонованих або ввести по точках);
- коефіцієнт посилення антени;
- згасання в лінії, включаючи фільтри та багатоканальні розгалужувачі;
- дані про місцевість (у тому числі рослинність) та висоти.

Контур зони охоплення може відображатися за допомогою критеріїв “Вище/нижче рівня сигналу, визначеного користувачем”. Зона охоплення може також відображатися з використанням багатобарвного стилю оформлення з показом рівнів сигналів різний колір.

Програма також може об'єднувати карту зображення зони охоплення з дорожньою або будь-якою іншою географічною картою (Google Map, Open Street Map та ін.). Створена схема може використовуватися для швидкого визначення можливості комунікацій із конкретного розташування.

Програма дозволяє розраховувати та відображати рівні сигналу та:

- зони покриття (охоплення), наприклад для систем радіо та телевізійного мовлення;
- зони обслуговування для систем двостороннього радіозв'язку, к тому числі для абонентського обладнання з різними енергетичними характеристиками;
- рівень напруженості електричного поля в обраному напрямку, у тому числі візуалізацію профілю траси із зонами Френеля.

На рис. В.2 наведений приклад профілю траси з прив'язкою до карти місцевості та позначенням рівня сигналу з обох сторін.

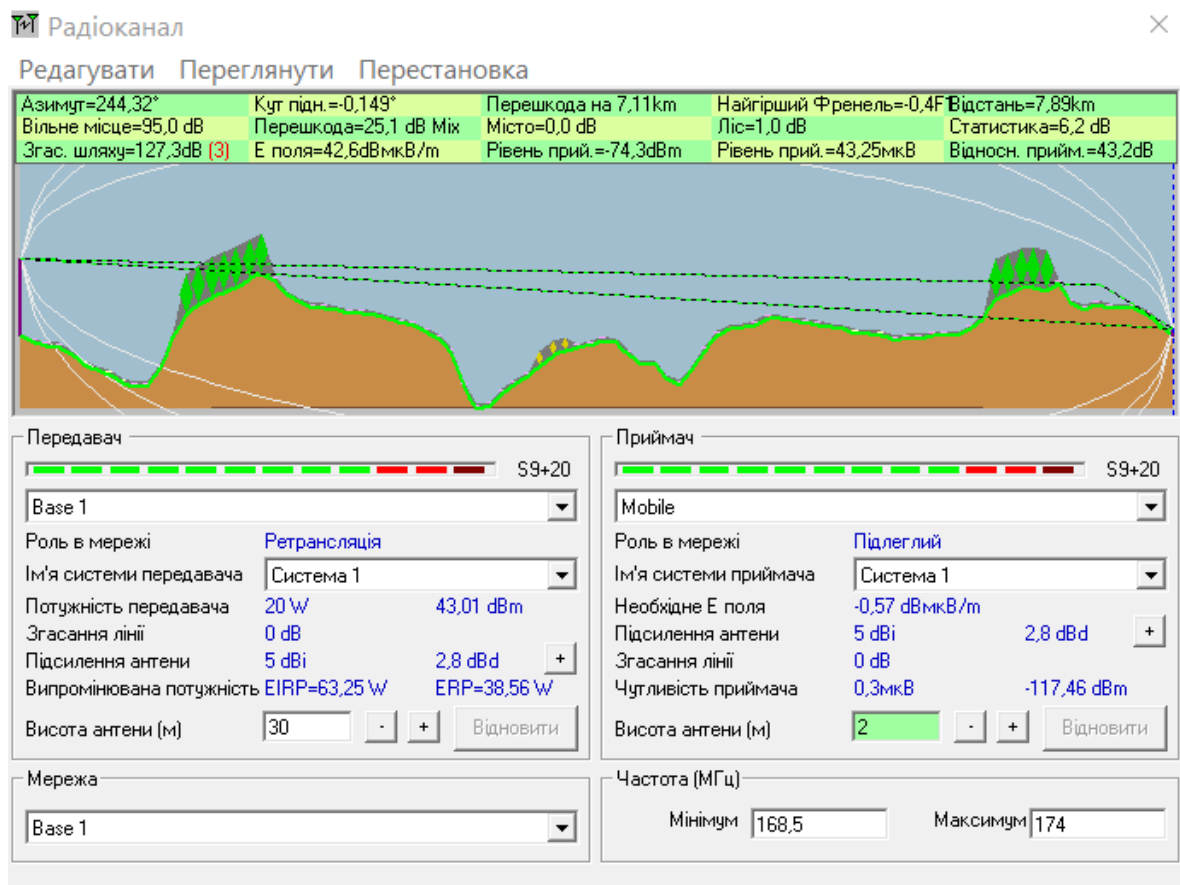


Рисунок В.2. Приклад профілю траси з позначенням рівня сигналу вдовж траси поширення та зон Френеля

На рис. В.3 наведений приклад розрахунку зони покриття. Для позначення рівня сигналу використовуються різні кольори.

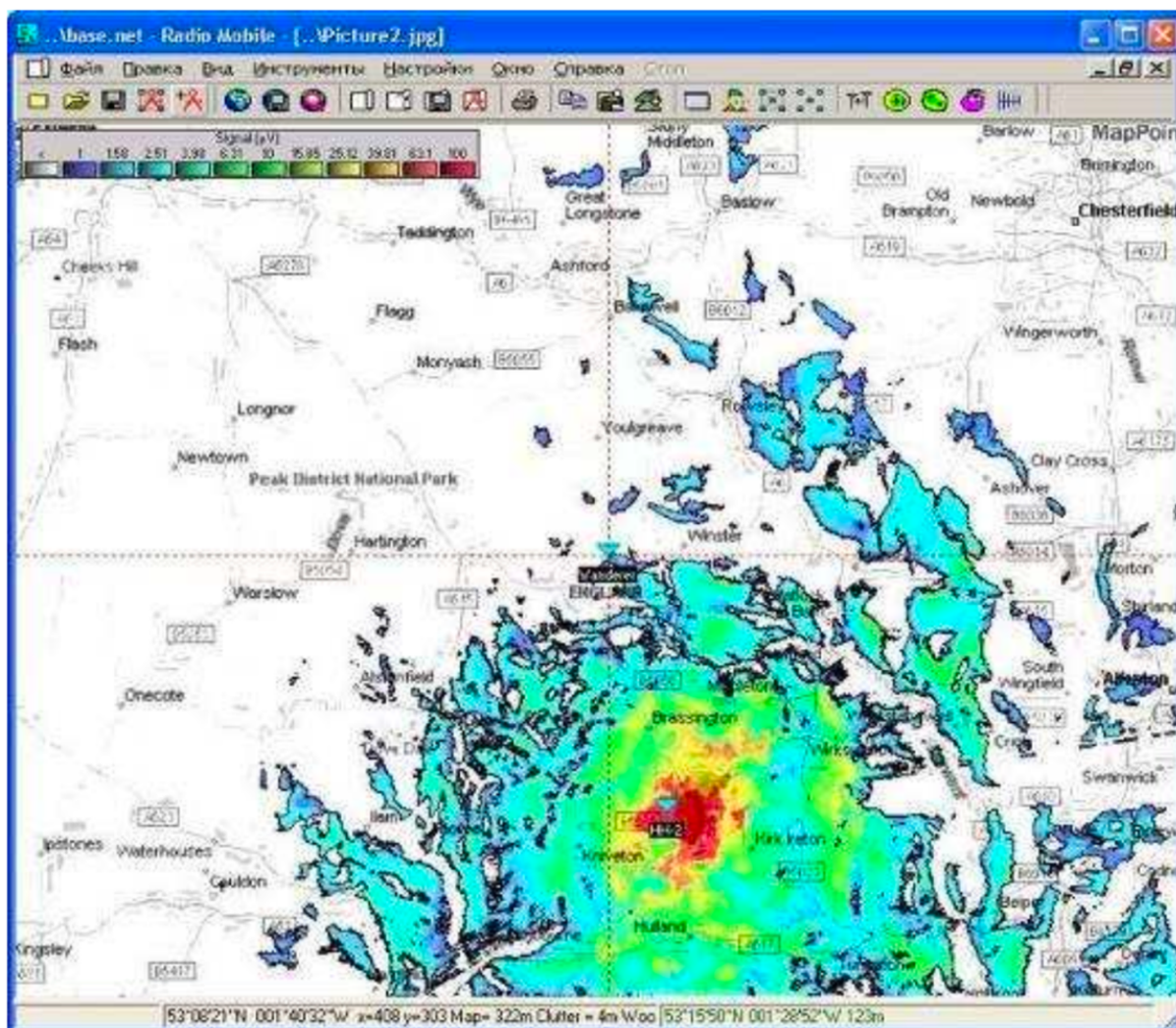


Рисунок В.3. Приклад розрахунку зони покриття ПЗ

На вибір моделі ПРХ та ПЗ впливають різні фактори – доступність ПЗ, від місцевості (місто або сільська місцевість), кваліфікація користувача та ін. На практиці для самостійного розрахунку мереж радіозв'язку у різних умовах у більшості випадків застосовують ПЗ Radio Mobile.

Об'єктивну оцінку достовірності результатів, які отримані по різним моделям, можуть надати натурні випробування та порівняння експериментальних вимірювань напруженості поля з результатами моделювання.

Методика тестування зон покриття, а також узагальнені питання стосовно ПРХ наведені у довіднику МСЕ-Р [36].

Для планування застосування радіорелейних та тропосферних засобів зв'язку у Збройних силах України та інших військових формуваннях рекомендоване використовувати програмний комплекс **“Ракурс”**.

При побудові радіорелейних ліній часто складається ситуація, коли один інтервал не може забезпечити зв'язок із заданою якістю. Тоді постає задача планування радіорелейної лінії з використанням станцій –

ретрансляторів (багатоінтервальних РРЛ). Вибір місця розташування ретрансляторів залежить від багатьох чинників: можливості встановлення зв'язку, мінімізації кількості ретрансляцій, геопросторової інформації щодо рельєфу місцевості та наявності в місті встановлення відповідної інфраструктури (забудов, електроживлення, точок прив'язки, веж тощо).

Для організації радіорелейного зв'язку можеу програмному комплексі використовуватися додаткова геопросторова інформація, зокрема щодо висотних об'єктів на місцевості (споруди, вежі Концерну радіомовлення, радіозв'язку та телебачення (КРРТ) та інших операторів зв'язку).

У програмному комплексі використовуються наступні вихідні дані.

1. РРС з відповідними технічними характеристиками:
 - потужність передачі P , дБВт;
 - коефіцієнт підсилення антени G , її тип, поляризація випромінювання і втрати в антенно-фідерному тракті η ;
 - чутливість приймача, дБВт, мВ/м (коефіцієнт шуму, дБ);
 - швидкість цифрового потоку, біт/с;
 - припустимий рівень помилок і величина захисного відношення для заданого % часу.
2. Смуги частот, які використовуються, f_l-f_n .
3. Характеристики місць розташування початкової та кінцевої РРС:
 - географічні координати розташування початкової та кінцевої РРС, широта/довгота;
 - висота основи РРС над рівнем моря, м;
 - висота підвісу антени над рівнем Землі, м.
4. Характеристики місцевості навколо РРС: висота над рівнем моря (м) та покриття (забудова, вода, рослинність), погодні умови тощо.
5. Додаткова геопросторова інформація щодо забудови, висотних об'єктів на місцевості:
 - розташування/межі (координати), висота (м), додаткові характеристики.

У програмному комплексі передбачено вибір радіозасобів з відповідним набором технічних даних, включаючи максимально можливу паспортну дальність радіозв'язку. При вводі нових радіозасобів визначається: назва радіозасобу, відповідний тип ("КХ", "УКХ", "DMR", "РРС", "ТРС"), відповідні технічні характеристики, тип антени з випадуючого списку.

На карті обраного регіону можливо відображення веж КРРТ та операторів стільникового зв'язку.

На рисунку В.4 наведено приклад розрахунку радіорелейного інтервалу.

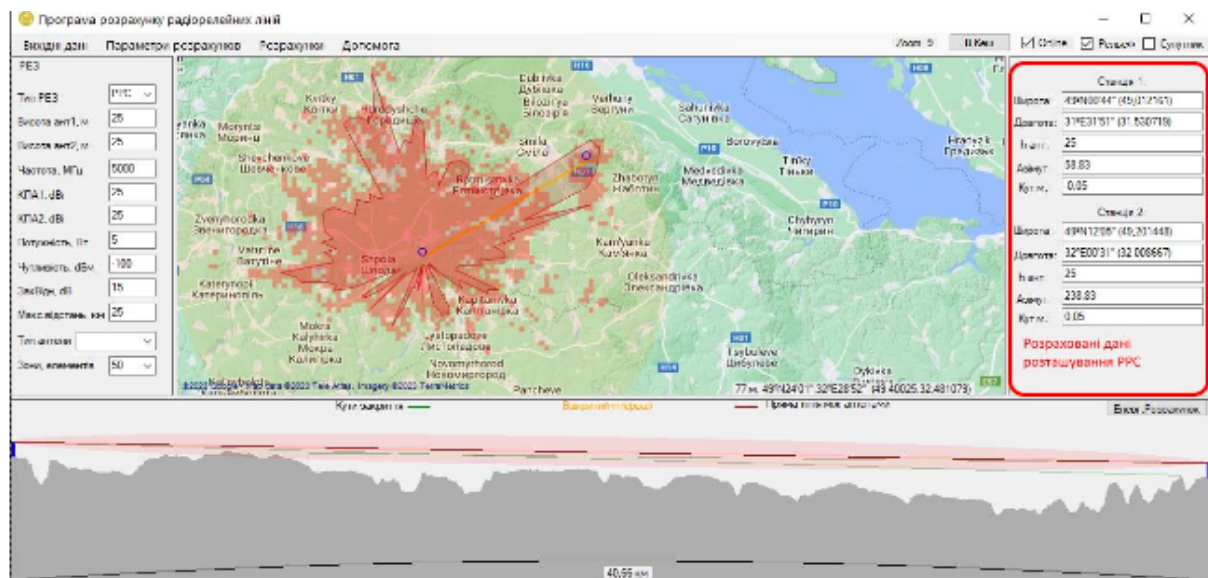


Рисунок В.4. Приклад розрахунку радіорелейного інтервалу

На карті відображаються профіль траси та зони з максимальною прямою видимістю (суцільна червона лінія). В окремому вікні наводиться результат енергетичного розрахунку радіорелейного інтервалу, в якому вказується розрахунковий рівень сигналу та його перевищення відносно мінімально допустимого.

ВИСНОВОК: Поведений короткий огляд програмного забезпечення, у якому використовуються цифрові карти для урахування впливу рельєфу місцевості на поширення радіохвиль, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Для великих провайдерів та операторів мереж безпроводового стільникового зв'язку (3G, 4G/LTE) найбільш зручне програмне забезпечення Atoll. Ця програма дозволяє крім розрахунків зон обслуговування визначати параметри радіомережі, навантаженість, кількість потрібних каналів для базової станції та інші мережеві параметри.

2. Для державних органів які управляють та регулюють використання радіочастотного спектра, найбільш зручна програма – це програмний комплекс ICS Telecom. Ця програма крім розрахунку зон обслуговування дозволяє розраховувати електромагнітну сумісність. Для цього програмний комплекс має доступ до наступних реєстрів:

- реєстр присвоєних частот;
- реєстр ліцензій на використання радіочастот;
- реєстр радіообладнання, яке дозволено для використання в Україні, в якому наведено технічні характеристики радіоелектронних засобів.

3. Для оперативного вирішення завдань з проектування мереж радіозв'язку як у межах, так й за межами міст, найбільш доступне програмне забезпечення Radio Mobile. Військовим зв'язківцям під час

планування мереж радіозв'язку доцільно використовувати програмне забезпечення Radio Mobile.

4. Для планування застосування радіорелейних та тропосферних засобів зв'язку у Збройних силах України та інших військових формуваннях у процесі побудови транспортних мереж та мереж доступу при плануванні організації зв'язку рекомендоване використовувати програмне забезпечення розрахунку радіорелейних та тропосферних ліній зв'язку "Ракурс".

**Алгоритм розрахунків електромагнітної сумісності для присвоєння
радіочастот радіоелектронним засобам рухомої служби
(на підставі матеріалів наказу Мінцифри [38] та інших джерел)**

Розрахунок ЕМС РО рухомої служби радіозв'язку

1. Розрахунок ЕМС РЕЗ рухомої служби радіозв'язку складається із шести послідовних етапів, а саме:

- 1) попереднє оцінювання ЕМО у районі планування нового частотного присвоєння;
- 2) попереднє оцінювання належної якості функціонування окремого РО або сукупності РО у визначеному ЕМО;
- 3) визначення сценаріїв створення взаємних завад РО у районі планування нового частотного присвоєння;
- 4) визначення характеристик РО для проведення розрахунків ЕМС РО;
- 5) розрахунок ЕМС РО відповідно до визначених сценаріїв створення взаємних завад;
- 6) оцінка забезпечення ЕМС РО за наслідками проведених розрахунків.

2. ЕМО у районі планування нового частотного присвоєння попередньо оцінюється шляхом ***територіального і частотного відбору потенційно несумісного РО***.

Територіальний відбір потенційно несумісного РО здійснюється на підставі визначення параметрів (форми, діаметру або радіусу) і побудови контуру розрахункової зони відбору. Параметри розрахункової зони визначаються залежно від типу та сценарію розгортання заявленого РО.

Усі заявлені, заплановані, задіяні РО, які потрапили у простір, обмежений контуром розрахункової зони, вважаються потенційними джерелами завад і обираються для подальшого аналізу ЕМС.

Частотний відбір конфліктуючого РО виконується шляхом ідентифікації і селекції діючих (або планованих) частотних присвоєнь РО, які потрапили у розрахункову зону. У частотному відборі конфліктуючого РО враховуються усі можливі види завад, канали проникнення завад і інші форми спотворення сигналу (інтермодуляція, блокування тощо), які можуть призвести до погіршення якості функціонування діючого і нового РО.

За наслідками попереднього оцінювання виявлених завад формується впорядкована вибірка потенційно небезпечних джерел завад, які підлягають подальшому дослідженню.

3. ***Критерієм попереднього оцінювання якості функціонування РО є припустиме відношення потужності сигналу до рівня потужності шумів***

на вході приймача РО, при якому забезпечується належне та безперебійне функціонування РО і передавання повідомлень із заданою імовірністю безпомилкового прийому.

4. *Сценарій взаємодії* для нового планованого РО і РО яке заявлене, заплановане, задіяне, що потрапило у розрахункову зону, визначають за наслідками попередньої оцінки виявлених радіозавад у районі планування частотного присвоєння.

Сценарії створення взаємних завад РО рухомої служби і РО інших радіослужб поділяють *на парні і групові*. У парних сценаріях досліджується вплив однієї ненавмисної завади (одного РО) на один рецептор (іншого РО). У групових сценаріях досліджують вплив сукупності джерел завад (певного РО) на один рецептор.

При цьому враховуються умови розгортання, характеристики спрямованості антен, територіальне рознесення і просторова орієнтація планованого і діючих РЕЗ.

Під час визначення типу сценарію створення взаємних завад РО, для якого буде досліджуватися ЕМО, використовуються такі сценарії:

1) *дуельні сценарії* (де розглядається взаємодія між двома конкретними одиницями РО) *досліджують у таких випадках:*

якщо оцінюють вплив нового присвоєння на раніше заявлене, заплановані та задіяні;

за високої просторової вибіркості РО (з використанням вузькоспрямованих антен);

у разі високої частотної вибіркості приймача, за рахунок якої знижується вплив радіозавад на прийом корисного сигналу в неосновних каналах;

у разі високої захищеності приймача щодо блокування і інтермодуляції (використання високоякісних фільтрів і новітньої елементної бази);

2) *групові сценарії досліджуються у таких випадках:*

оцінки впливу сукупності раніше заявлених, запланованих та задіяних присвоєнь на нове заявлене;

низька просторова вибірквість РО (при використанні всеспрямованих антен);

наявність зони обслуговування РО, параметри якої можуть погіршуватися внаслідок впливу завад від декількох джерел одночасно;

низька частотна вибірквість приймача.

5. У розрахунках ЕМС РО враховуються тип сценарію створення взаємних завад РО (дуельний або груповий) для того РО, яке вважається потенційно конфліктуючим, види радіозавад, канали можливого проникнення радіозавад (основний і неосновні) і інші форми спотворення сигналу, які визначають у частотному відборі конфліктуючого РО.

6. Забезпечення ЕМС РО оцінюється перевіркою виконання узагальненого енергетичного критерію ЕМС РО (див вираз 5.1).

Під час перевірки виконання визначеного критерію ЕМС РО враховуються такі параметри:

відсоток часу, протягом якого спостерігається погіршення зв'язку внаслідок впливу завад і невиконання умов ЕМС РО (p %);

відсоток місць, у яких не виконуються умови ЕМС РО;

припустима напруженість поля сигналу завади на межі зони обслуговування (у разі потреби);

напруженість поля корисного сигналу, яка забезпечує належну якість функціонування абонентського кінцевого обладнання у зоні обслуговування базової станції (у разі потреби).

Розрахунки ЕМС РЕЗ рухомої служби

7. Показники, за якими перевіряються виконання умов ЕМС, розраховуються окремо для кожного з визначених сценаріїв створення взаємних завад РО.

8. У розрахунках ЕМС РО рухомої служби визначаються такі **показники ЕМС**:

рівень корисного сигналу на вході приймача;

рівні сигналів на вході приймача-рецептора завади від усіх потенційних джерел завад, які вважаються потенційно небезпечними для нового частотного присвоєння, відповідно до визначеного сценарію створення взаємних завад;

рівень сигналу передавача РО, для якого виконується присвоєння радіочастот у сценаріях, де заявлене РО вважають потенційним джерелом радіозавад іншому раніше заявленому, запланованому, задіяному РО;

сумарний рівень завад від декількох джерел радіозавад на вході досліджуваного приймача (у разі аналізування групових сценаріїв).

У розрахунках показників ЕМС РО враховуються значення відсотка часу, протягом якого повинні виконуватися прогнозовані значення наведених показників ЕМС.

Втрати поширення радіохвиль на трасах, а також рівні корисного та завадових сигналів, як правило розраховуються з використанням відповідного програмного забезпечення згідно обираного методу розрахунку з використанням цифрової карти місцевості, або використовують моделі ПРХ, які наведені у додатку 3 до Методиці.

9. Під час аналізування сценаріїв, в яких досліджуване заявлене РО рухомого радіозв'язку, запланований до введення в експлуатацію (задіяне), є базовою або рухомою станцією мережі радіозв'язку, **будується контур зони обслуговування базової станції**. У сценаріях, де досліджується вплив на приймач рухомої станції, зазначена базова станція повинна бути для неї обслуговуючою.

Контур зони обслуговування базової станції будується на підставі розрахунку 36 значень потужності випромінювання по напрямках з

дискретним кроком 10° відносно точки встановлення базової станції, при цьому враховується таке:

рівень корисного сигналу повинен забезпечувати належну якість функціонування рухомих станцій протягом щонайменше 50 % часу в усій зоні обслуговування, яка покриває щонайменше 50 % місць;

потенційні джерела завад, які потрапили у розрахункову зону можуть створювати неприпустимі завади на вході приймача рухомої станції, що може призвести до звуження контуру зони обслуговування базової станції і невиконання мінімальних вимог до покриття.

Радіус координаційної зони для відбору потенційно несумісного РО як правило не менш ніж у 2 рази перевищує радіус зони покриття БС системи, що планується [43].

10. Рівень корисного сигналу на вході приймача розраховується за формулами (6.2) та (6.4).

У разі відсутності даних щодо характеристик передавача корисного сигналу рівень корисного сигналу на вході приймача обирається рівним граничній чутливості приймача.

У разі потреби рівень корисного сигналу на вході приймача може бути розраховано за алгоритмом і експериментальними графіками прогнозування напруженості поля, наведеними у Рекомендації МСЕ–Р Р.1546.

11. Рівень завади на вході приймача від одного джерела завади розраховується за формулами (6.5) та (6.6).

12. У розрахунках рівнів завад на вході приймача від одного або декількох джерел враховуються наслідки частотного відбору потенційно небезпечних (щодо створення завад) РО, Рекомендація МСЕ–Р Р.1546, визначені канали можливого проникнення завад і інші форми спотворення сигналу, які можуть мати місце у тому або іншому сценарії створення взаємних завад РО.

Радіозавади в основних і неосновних каналах прийому розраховуються відповідно до частотних критеріїв. Розрахунок потужності завад на вході приймача проводиться тільки для тих передавачів, які потенційно можуть створити завади, тобто тих завад, які визначені за частотною ознакою.

13. Сумарний рівень завад від декількох джерел на вході приймача рецептора завади (іноді – їх нелінійне поєднання) розраховується за формулою (6.13).

При визначенні зони обслуговування також враховується рівень завад, які можуть зменшити її розмір у напрямку дії завади. Для компенсації шкідливого впливу одного або декількох джерел завад на обслуговуваний приймач рухомої станції та забезпечення виконання мінімальних вимог щодо покриття і якості прийому у приймачі рухомої станції, у розрахунках використовується додатковий показник *UFS* [38].

Розрахунок енергетичних втрат передавання в лінії радіозв'язку наведено раніше у розділі 3.

Алгоритм визначення ЕМС для рішення задач частотного планування під час здійснення нових частотних присвоєнь РЕЗ

Схему проведення розрахунків ЕМС під час здійснення нових частотних присвоєнь РЕЗ рухомої служби наведено на рис.Г.1.

Підбір вільної радіочастоти для РЕЗ, здійснюється в автоматизованому або напіваавтоматизованому режимі шляхом перебору і аналізування кожного номіналу радіочастоти, визначеного сіткою частот розглядуваної смуги.

Для здійснення підбору вільної частоти використовуються спрощені критерії, які дозволяють імітувати найгірший сценарій створення взаємних завад РЕЗ у районі планування.

Для підбраного номіналу радіочастоти (радіочастотного каналу) проводяться послідовні розрахунки для оцінювання впливу нового РЕЗ на діючі і впливу діючих РЕЗ на новий РЕЗ залежно від обраного сценарію.

Якщо зазначений критерій ЕМС РЕЗ не виконується, визначається можливість зміни технічних характеристик РЕЗ або підбирається інша частота для нового планованого РЕЗ.

Під час виконання зазначеного критерію ЕМС РЕЗ в сценаріях дослідження впливу нового присвоєння на діючі виконуються аналогічні розрахунки для дослідження впливу діючих присвоєнь на плановане.

Якщо технічні характеристики РЕЗ змінити неможливо, підбирається інша вільна частота для планованого РЕЗ.

Розрахунок ЕМС проводиться в два етапи (рис. Г.1):

- аналіз ЕМС в районі планування;
- аналіз ЕМС локального угруповання РЕЗ (об'єктова ЕМС).

Розрахунок ЕМС РЕЗ в районі планування

Розрахунок ЕМС РЕЗ в ***районі планування*** виконується в наступному порядку:

а) вибір РЕЗ за *територіальними ознаками*, які розміщені в межах обмеженої зони дослідження;

б) відбір з РЕЗ, обраних за територіальними ознаками, що потенційно можуть заважати новому частотному присвоєнню РЕЗ за *частотною ознакою*:

- визначення можливих джерел завад за основним каналом;
- визначення можливих джерел завад за першим сусіднім каналом;
- визначення можливих джерел завад інтермодуляції 3-го порядку;

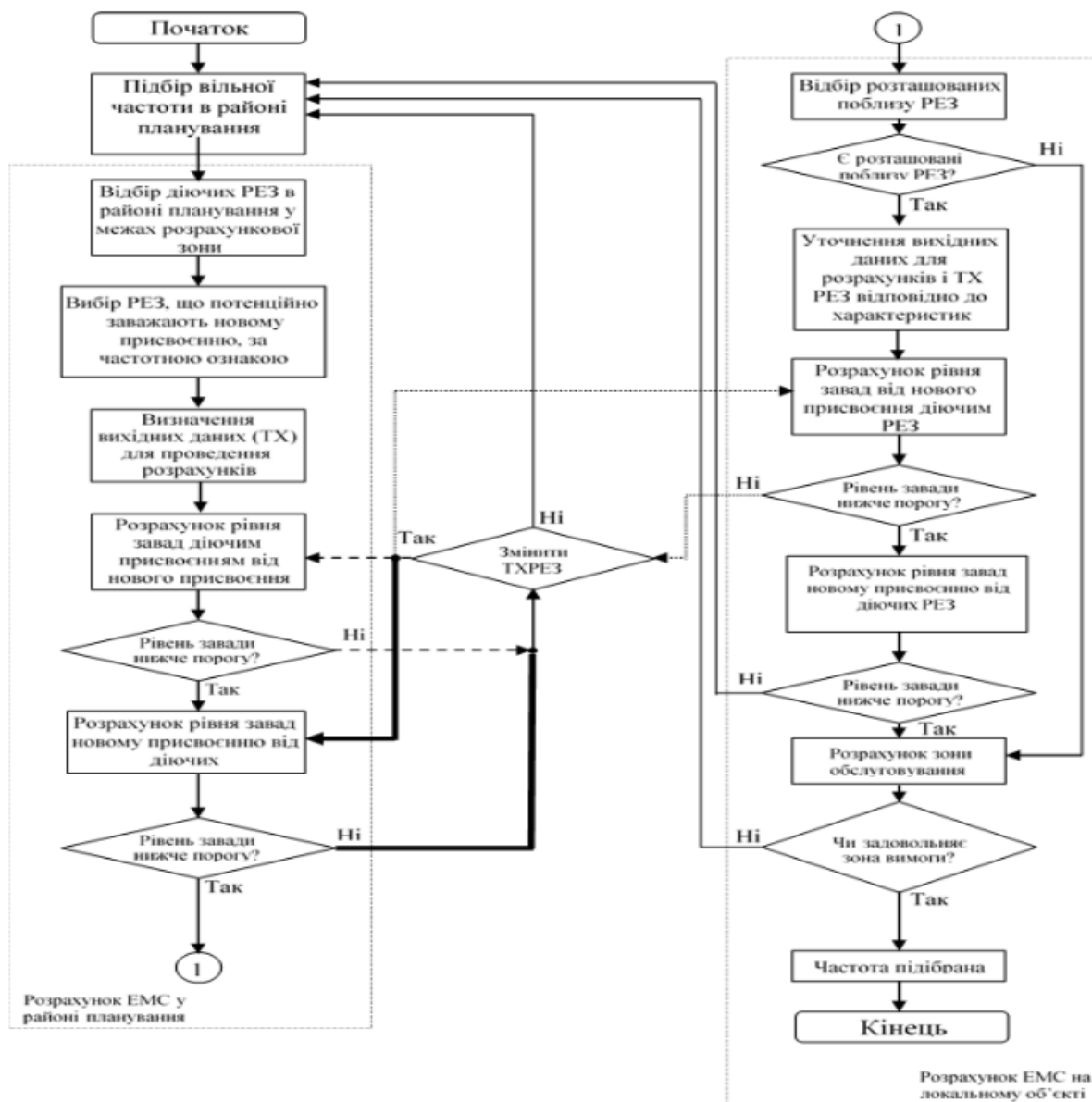


Рисунок Г.1. Схема проведення розрахунків EMC під час здійснення нових частотних присвоєнь РЕЗ рухомої служби

в) розрахунок рівня завад на вході приймача:

- за основним каналом;
- за першим сусіднім каналом;
- інтермодуляції 3-го порядку;

г) аналіз отриманих результатів і прийняття рішення за результатами розрахунків про забезпеченість EMC з урахуванням впливу множинної завади або необхідності вибору іншої частоти.

У випадку позитивного рішення за результатами розрахунку EMC необхідно перевірити наявність інших РЕЗ на спільному майданчику та при їх наявності провести розрахунок EMC локального угруповання РЕЗ (об'єктова EMC).

Розрахунок ЕМС локального угруповання РЕЗ

Розрахунок ЕМС *локального угруповання* РЕЗ виконується в наступному порядку:

а) серед РЕЗ, відібраних відповідно з попереднім пунктом (в районі планування) вибираються РЕЗ, які розташовані в *межах спільного майданчика* та в колі радіусом до 1 км ($d \leq 100\lambda$) від РЕЗ, що досліджується.

Величина радіусу 1 км обумовлена наступним припущенням – втрати при розповсюдженні радіохвиль для цієї відстані складають 60÷100 дБ (модель розповсюдження у вільному просторі) у залежності від частотного діапазону, що зводить до мінімуму імовірність впливу на приймач інших видів завад на великих відстанях від передавача. Всі станції, що потрапили в зону, обмежену цим колом, вибираються для проведення подальшого аналізу;

б) РЕЗ, які потенційно можуть створювати завади приймачу, що досліджується, чи підпадають під дію її завади, відбираються за *частотною ознакою* серед РЕЗ, обраних за територіальною ознакою. Для кожного з відібраних передавачів (чи групи передавачів) перевіряється частотна умова можливості створення завади приймачу, що досліджується, або для кожного з відібраних приймачів по групі відібраних передавачів перевіряється частотна умова можливості постановки завад від досліджуваного передавача за наступними видами завад:

- по сусідніх каналах;
- по інтермодуляції 3-го – 13-го порядків;
- по дзеркальному каналу;
- по першій ПЧ;
- на гармоніках (субгармоніках);
- по блокуванню;

в) розраховуються рівні для кожного виду завади;

г) проводиться аналіз отриманих результатів розрахунків про можливість частотного присвоєння з урахуванням впливу множинної завади або необхідності вибору іншої частоти.

Відбір з РЕЗ, обраних за територіальними ознаками, що потенційно можуть заважати новому частотному присвоєнню РЕЗ за частотною ознакою.

Умови виникнення завад в основному і неосновних каналах прийому у приймачі, які погіршують якість функціонування РЕЗ.

1. Основний канал прийому призначено для проходження корисного сигналу на вихід радіоприймача і лежить в межах смуги пропускання приймача.

Смуга частот основного каналу прийому визначається на рівні від мінус 30 дБ до мінус 40 дБ відносно АЧХ на частоті налаштування приймача.

Для визначення можливості створення завади по основному каналу для кожного з відібраних передавачів і приймачів визначається частотне рознесення між робочими (несучими) частотами передавачів і приймачів, які відібрані для аналізу ЕМС РЕЗ за територіальною ознакою:

$$\Delta f = |f_{Tx} - f_{Rx}|.$$

де: f_{Rx} – частота налаштування приймача-рецептора завади;

f_{Tx} – несуча частота передавача-джерела завади;

Завади по основному каналу прийому можливі, якщо виконується умова:

$$\Delta f \leq (B_{Tx(-30дБ)} + B_{Rx(-30дБ)})/2, \quad (Г.1)$$

де: $B_{Rx(-30дБ)}$ – ширина робочої смуги частот приймача за рівнем ослаблення – 30 дБ;

$B_{Tx(-30дБ)}$ – ширина робочої смуги частот передавача за рівнем ослаблення – 30 дБ.

Усі передавачі, які потрапили у розрахункову зону відносно досліджуваного приймача, для робочих частот в яких виконується наведена умова, вважаються потенційно небезпечними щодо створення завад в основному каналі прийому.

Під час оцінювання завад у неосновних каналах прийому їх поділяють на позасмугові і побічні.

До позасмугових каналів прийому належать канали, виникнення яких обумовлено нелінійністю вольт-амперних характеристик електронних елементів окремих пристроїв приймача, які утворюють тракт підсилення високочастотних (ВЧ) сигналів і перетворення частоти. До позасмугових каналів прийому належать також сусідні канали.

До побічних каналів прийому належать канали на проміжній, дзеркальній та комбінаційній частотах. Номінальні частоти побічних каналів прийому приймача з фіксованим налаштуванням мають постійне значення.

2. Завада по сусідніх каналах можлива, якщо виконується умова:

$$(B_{Tx(-30дБ)} + B_{Rx(-30дБ)})/2 \leq \Delta f \leq 2\Delta f_{ch} + B_{Rx(-30дБ)}/2, \quad (Г.2)$$

де: Δf_{ch} ($\Delta f_{C.K}$) – частотне рознесення між каналами прийому для відповідного стандарту радіозв'язку, а сусідній канал визначається як смуга частот, яка прилягає до нижньої або верхньої межі основного каналу прийому і знаходиться в межах смуги пропускання підсилювача високочастотного тракту приймача (наприклад для сигналів 16K0F3E згідно з Планом розподілу та користування радіочастотним спектром України $\Delta f_{ch} = 25\text{кГц}$).

Усі передавачі, які потрапили у розрахункову зону відносно досліджуваного приймача, для робочих частот в яких виконується наведена умова, вважаються потенційно небезпечними щодо створення завад по сусідньому каналу прийому і вибираються для подальшого розрахунку ЕМС.

3. Визначення можливих джерел завад по дзеркальному каналу.

Дзеркальний канал прийому – канал, який розташований симетрично частоті основного каналу відносно частоти гетеродина.

Для кожного з відібраних приймачів визначається дзеркальна частота:
– для приймача з верхньою настройкою гетеродина:

$$f_{\text{ДЗК}} = f_{\text{Rx}(-30\text{дБ})} + 2 \cdot f_{\text{ПЧ1}}$$

– для приймача з нижньою настройкою гетеродина:

$$f_{\text{ДЗК}} = f_{\text{Rx}(-30\text{дБ})} - 2 \cdot f_{\text{ПЧ1}}$$

Завада можлива, якщо виконується умова:

$$|f_{\text{Tx}} - f_{\text{ДЗК}}| \leq (B_{\text{Rx}(-30\text{дБ})} / 2 + B_{\text{Tx}(-30\text{дБ})} / 2). \quad (\text{Г.3})$$

Усі передавачі, які перебувають у межах розрахункової зони відносно досліджуваного приймача, для робочих частот в яких виконується вищезазначена умова, вважаються потенційно небезпечними щодо створення завад по дзеркальному каналу прийому.

4. Інтермодуляція виникає, як у передавачі, так і в приймачі. Інтермодуляційні випромінювання в передавачі виникають при роботі декількох передавачів на одну антену, або при розташуванні антен у безпосередній близькості. **Інтермодуляція в приймачі** з'являється при дії на вхід приймача двох і більш сигналів, частоти яких не збігаються з частотами основного і побічного каналів прийому.

Частотний критерій небезпеки інтермодуляційної завади порядку $N=|n|+|m|$ визначається за формулою:

$$||mf_1 \pm nf_2| - f_{\text{прм}}| \leq (B_{\text{ППЧ}(-60\text{ дБ})} + B_1 + B_2)/2, \quad (\text{Г.4})$$

де: f_1, f_2 – несучі частоти передавачів завад;

n, m – цілі числа (додатні або від'ємні);

$f_{\text{прм}}$ – основна частота налаштування приймача-рецептора завади;

$B_{\text{ППЧ}(-60\text{ дБ})}$ – ширина смуги пропускання підсилювача проміжної частоти приймача на рівні мінус 60 дБ;

B_1, B_2 – ширина смуги випромінювання сигналу завади на частотах f_1 та f_2 відповідно.

У розрахунках ЕМС РЕЗ з просторовим рознесенням в межах розрахункової зони на відстань, більшу за розміри типового локального

об'єкта ($d \geq 100 \lambda$), враховуються інтермодуляційні завади до третього порядку, для яких повинна виконуватися умова:

$$f_2 - f_1 \approx f_{\text{ПРМ}} \text{ і } 2 \cdot f_1 - f_2 \approx f_{\text{ПРМ}}$$

де: f_1 - несуча частота першого сигналу завади, яка розташована найближче до несучої частоти (частоти налаштування) приймача корисного сигналу;

f_2 - несуча частота іншого сигналу завади, яка найбільш віддалена від несучої частоти приймача корисного сигналу.

Для більш високих індексів модуляції (до 13) розрахунок виконується тільки у випадку розташування передавачів і приймачів на одній площадці.

5. Визначення можливих джерел завад по першій ПЧ

Постановка завади по першій ПЧ можлива, якщо для кожного з відібраних передавачів і приймачів виконується умова:

$$|f_{\text{Tx}} - f_{\text{ПЧ1}}| \leq (B_{\text{Rx}(-30\text{дБ})} / 2 + B_{\text{Tx}(-30\text{дБ})} / 2). \quad (\text{Г.5})$$

6. Визначення можливих джерел завад на гармоніках

Випромінювання на гармоніках (субгармоніках) – побічне радіовипромінювання на частотах, які у ціле число раз більші (менші) частот основного радіовипромінювання.

Для кожного з відібраних передавачів визначаються частоти гармонік (субгармонік):

$$\text{– для гармонік: } f_{n \text{ Tx}} = n \cdot f_{\text{Tx}}; \quad (\text{Г.6})$$

$$\text{– для субгармонік: } f_{m \text{ Tx}} = f_{\text{Tx}} / m;$$

де n (m) = 2, 3, 4, ... – номер гармоніки (субгармоніки).

Завада можлива, якщо для кожного з відібраних передавачів і приймачів виконується умова:

$$\text{– для гармонік } |f_{n \text{ Tx}} - f_{\text{Rx}}| \leq (B_{\text{Rx}(-30\text{дБ})} / 2 + n B_{\text{Tx}(-30\text{дБ})} / 2); \quad (\text{Г.7})$$

$$\text{– для субгармонік } |f_{m \text{ Tx}} - f_{\text{Rx}}| \leq (B_{\text{Rx}(-30\text{дБ})} / 2 + B_{\text{Tx}(-30\text{дБ})} / (2 m)); \quad (\text{Г.8})$$

Для кожного з відібраних передавачів визначаються частоти гармонік (для $n=2$ и 3).

7. Визначення можливих завад з блокування приймача

Блокування приймача виникає при наявності сигналу великого рівня поза каналом прийому. Блокуванням називається зміна рівня відношення

сигнал/шум на виході приймача при дії завади, частота якої не збігається з частотами основного і побічного каналів прийому радіоприймача.

Можливими джерелами завад з блокування приймача вважаються усі передавачі, які працюють у смузі частот від верхньої межі нижнього сусіднього каналу (нижньої межі верхнього сусіднього каналу) до частот, для яких рівень послаблення сигналу вхідними високочастотними контурами приймача становить 80 дБ по обидві сторони від робочої частоти приймача. Граничне значення завади на вході приймача, при якому виникає блокування, складає 80-130 дБмкВ.

Розрахунок рівня завад на вході приймача

Розрахунок рівня завади на вході приймача розраховується по формулі (6.6), а коефіцієнт частотної вибірконості FDR по формулі 6.8 або графічним методом FDR (додаток Є).

Випромінювання на гармоніках (субгармоніках). На підставі статистичних досліджень була розроблена методика визначення середнього рівня гармонійних складових. Усереднена потужність випромінювання на n -й гармоніці (субгармоніці) визначається за наступним співвідношенням [38]:

$$P_{з.прд.ср(n)} = P_{з.прд} + A \cdot \lg n + B, \quad (\text{дБм}), \quad (\text{Г.9})$$

де: $P_{з.прд.ср(n)}$ – усереднена потужність випромінювання на n -й гармоніці (субгармоніці)

$P_{з.прд}$ – потужність передавача завади (дБм);

A – коефіцієнт, що характеризує швидкість зменшення усередненої потужності гармонік при збільшенні їхнього номера (дБ/дек);

n – номер гармоніки (субгармоніки);

B – коефіцієнт, що характеризує відношення потужності першої гармоніки до потужності основного випромінювання (дБ).

Коефіцієнти A і B , а також середньоквадратичне відхилення (σ) усередненої потужності випромінювання на n -й гармоніці отримані експериментально для передавачів різних типів і призначень, в залежності від частотного діапазону приведені нижче.

Таблиця Г.1

Коефіцієнти A і B , середньоквадратичне відхилення (σ) усередненої потужності випромінювання на n -й гармоніці

Частотний діапазон, МГц	30 ÷ 300	300 ÷ 3000
A , дБ/декада	-80	-60
B , дБ	-30	-40
σ , дБ	15	20

Потужність сигналів завад на частотах f_1 і f_2 , перевищення яких призводить до появи в приймачі **інтермодуляційних завад третього порядку**, розраховуються за формулою [46]:

$$P_{\text{ІМ}} = 2(P_{\text{з.прд1}} - \beta_1(\Delta f_1)) + (P_{\text{з.прд2}} - \beta_2(\Delta f_2)) - K_{2,1}, \quad (\text{Г.10})$$

де: $P_{\text{з.прд1}}$ – потужність сигналу завади передавача, що працює на частоті f_1 , розташованій найближче до частоти налаштування “приймача–рецептора” завади, дБВт;

$P_{\text{з.прд2}}$ – потужність сигналу завади передавача, що працює на частоті f_2 , яка найбільш віддалена від частоти налаштування приймача, дБВт;
 $\Delta f_1, \Delta f_2$ – відповідно рознесення частот f_1 і f_2 відносно робочої частоти приймача, МГц;

$\beta_1(\Delta f)$ і $\beta_2(\Delta f)$ – послаблення сигналів завад з частотами f_1 і f_2 у високо-частотних вхідних ланцюгах приймача (*преселекторі*), (дБ); $\beta_1(\Delta f)$ і $\beta_2(\Delta f)$ відповідають OFR і визначаються по наступному співвідношенню:

$$\beta(\Delta f) = 60 \cdot \lg \left[1 + \left(\frac{2 \cdot \Delta f}{B_{\text{ПРМ.ВЧ}}} \right)^2 \right], \quad (\text{Г.11})$$

де: Δf – різниця між частотою сигналу, що заважає, і центральною частотою настройки приймача (МГц);

$B_{\text{ПРМ.ВЧ}}$ – ширина смуги пропускання преселектору (МГц).

$K_{2,1}$ – інтермодуляційний коефіцієнт, який характеризує послаблення потужності сигналів завад у разі утворення продуктів інтермодуляції, дБ.

Інтермодуляційний коефіцієнт $K_{2,1}$ розраховується за формулою:

$$K_{2,1} = 3 \cdot P_{\text{ПРМ.ІМ}} - 2 \cdot \beta_1(\Delta f) - \beta_2(\Delta f) - P_{\text{чут}} + A,$$

де: $P_{\text{ПРМ.ІМ}}$ – інтермодуляційна чутливість приймача, дБмВт, яка визначена на відповідне обладнання;

$P_{\text{чут}}$ – чутливість приймача, дБмВт;

A – захисне відношення приймача по частоті, дБ.

$K_{2,1}$ – визначається досвідним шляхом при умові, що сигнали, які заважають, мають частоти перших сусідніх каналів. У цьому випадку $\beta_1 = \beta_2 = 0$.

Форма ЗВМ-КРО

Додаток
до Положення про реєстр
радіообладнання
та випромінювальних пристроїв
(підпункт 2 пункту 6 розділу III)

КАРТКА

тактико-технічних даних радіообладнання

до заяви (форма ЗВМ) від ____ / ____ / 20__ року № _____

1. Технічні параметри

1.1. Служба радіозв'язку		
1.2. Радіотехнологія		
1.3. Тип системи		
1.4. Тип застосування		
1.5. Діапазон робочих частот	на прийом:	
	на передачу:	
1.6. Метод організації радіозв'язку:	☐ точка-точка ☐ точка-багатоточка ☐ точка-зона	
1.7. Метод дуплексу	☐ симплекс ☐ напівдуплекс ☐ повний дуплекс ☐ FDD ☐ TDD	
1.8. Дуплексне рознесення:		
1.9. Крок сітки частот, або формула утворення сітки центральних частот:		
1.10. Максимальна потужність на виході передавача (загальна кількість одночасно використовуваних передавачів)		
1.11. Регулювання потужності (крок регулювання):		
1.12. Максимальна еквівалентна ізотропна випромінювана потужність:		
1.13. Модуляція:		
1.14. Клас(и) випромінювання:		
1.15. Ширина смуги випромінювання:	на рівні 99 % OBW	на рівні мінус ____ дБ
1.16. Рівень позасмугових випромінювань передавача:		

1.17. Рівень побічних випромінювань передавача:		
1.18. Чутливість приймача:		
1.19. Рівень сприйнятливості приймача по неосновних каналах прийому:		
1.20 Рівень блокування приймача		
1.21. Тип антени:	☐ Інтегрована ☐ Конструктивна ☐ Стороння: ☐ входить до складу РЕЗ ☐ не входить до складу РЕЗ ☐ МІМО ☐ Смарт-антенний модуль	
1.22. Коефіцієнт підсилення антени:		
1.23. Способи завадового впливу:	☐ Робочий цикл: _____ ☐ Динамічний вибір частоти ☐ Автоматичний контроль потужності випромінювання: діапазон регулювання _____ дБ ☐ Попереднє прослуховування каналу (LBT)	
1.24. Метод багатостанційного доступу:	☐ TDMA ☐ FDMA ☐ OFDMA ☐ CDMA ☐ Інше.....	
1.25. Район використання:	☐ Вся територія України ☐ Регіон.....	
1.24. Додаткова інформація:		

2. Нормативні документи¹

2.1. Національні стандарти України:	
2.2. Технічні умови України:	
2.3. Європейські стандарти:	
2.4. Міжнародні стандарти:	
2.5. Інші нормативні документи:	

Підписано _____ від _____ імені _____ та за дорученням _____

20__ р.

(місце, дата видачі)

(Власне ім'я ПРІЗВИЩЕ, посада)

(підпис особи, яка діє від імені заявника)

{Додаток 3 із змінами, внесеними згідно з Постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах електронних комунікацій, радіочастотного спектра та надання послуг поштового зв'язку № 120 від 17.07.2022}

РТ-1

ПЕРЕЛІК

полів замовлення для виконання та надання Розрахунку електромагнітної сумісності (ЕМС) радіообладнання (РО)

1.	Найменування суб'єкта господарювання (для фізичної особи - прізвище, власне ім'я, по батькові (за наявності))
2.	Код за ЄДРПОУ (для юридичної особи)
3.	Реєстраційний номер облікової картки платника податків або серія (за наявності) та номер паспорта ¹ (для фізичної особи)
4.	Місцезнаходження (для юридичної особи) або місце проживання (для фізичної особи)
5.	Радіотехнологія:
6.	Ліцензія на користування радіочастотним спектром її номер та дата видачі (за наявності)
7.	Регіон використання радіообладнання
8.	Стандарт (за наявності)
9.	Назва/тип радіообладнання
10.	Діапазон робочих частот, МГц
11.	Дуплексне рознесення радіочастот, МГц (у разі наявності)
12.	Крок сітки частот (формула каналотворення)
13.	Повний клас випромінювання
14.	Номер запису в Реєстрі радіообладнання та випромінювальних пристроїв
15.	Клас радіообладнання (базова, стаціонарна абонентська, повторювач (ретранслятор, репітер), берегова, морська радіонавігаційна сухопутна, радіолокаційна сухопутна)
16.	Адреса місця експлуатації радіообладнання, особливості встановлення антени (вишка, башта, щогла, опора, стовп)
17.	Географічні координати, широта (градуси, мінути, секунди, у форматі: ггНммсс) - відповідно до формату WGS-84.
18.	Географічні координати, довгота (градуси, мінути, секунди, у форматі: ггЕммсс) - відповідно до формату WGS-84.
19.	Потужність передавача, Вт
20.	Назва/тип антени
21.	Коефіцієнт підсилення антени, дБі
22.	Висота антени над рівнем землі, м
23.	Азимут максимального випромінювання, градуси
24.	Затухання у фідерному тракті, дБ
25.	Номінали частот приймання, МГц
26.	Номінали частот передавання, МГц
27.	Ідентифікатор мережі / позивний (за наявності)
28.	Інші суттєві вимоги чи пояснення (за потреби)
29.	(у випадках модифікації технічних параметрів та умов розрахунк ЕМС) Номер розрахунку ЕМС або Номер присвоєння радіочастоти (номер запису в реєстрі присвоєння радіочастот загальних користувачів)

Розрахунок коефіцієнта частотної вибіркості приймача графічним методом

Метод графічного розрахунку коефіцієнта частотної вибіркості приймача (далі – FDR) використовується лише в тому випадку, коли відомі характеристики стандартизованих спектральної маски випромінювань передавача-джерела радіозавади і АЧХ вхідного фільтра приймача-рецептора радіозавади [38].

В окремих випадках, а саме за відсутності АЧХ вхідного фільтра досліджуваного приймача, в розрахунках використовується спектральна маска випромінювань передавача, яка для цього приймача є джерелом корисного сигналу.

Відповідно до зазначеного методу значення коефіцієнта частотної вибіркості приймача визначається шляхом розрахунку площі перекриття спектральної маски випромінювань передавача-джерела радіозавади і АЧХ вхідного фільтра приймача-рецептора цієї радіозавади та заданого частотного рознесення несучих частот сигналу радіозавади і корисного сигналу.

Результуюче значення коефіцієнта FDR розраховується за формулою:

$$FDR = 10 \lg \left(\frac{S_{co-channel}}{S_{\Delta f}} \right), \quad (\text{Є.1})$$

де: $S_{co-channel}$ – площа області перекриття спектральної маски випромінювань передавача-джерела радіозавади і АЧХ вхідного фільтра приймача-рецептора цієї радіозавади в разі суміщення несучих частот їхніх робочих каналів ($\Delta f=0$);

$S_{\Delta f}$ – площа області перекриття спектральної маски випромінювань передавача-джерела радіозавади і АЧХ вхідного фільтра приймача-рецептора цієї радіозавади із заданим частотним розстроєнням несучих частот їхніх робочих каналів ($\Delta f>0$).

Під час визначення області перекриття спектральної маски випромінювань передавача-джерела радіозавади і АЧХ вхідного фільтра приймача-рецептора радіозавади для $\Delta f=0$ і $\Delta f >0$ використовуються пояснення, наведені на рис. Є.1.

Для визначення площі області перекриття її необхідно розділити на елементи, які відповідають прямокутним ділянкам (F) області перекриття і ділянкам з нахилом (S).

Для розрахунку площі області перекриття на спектральній масці випромінювань передавача і АЧХ вхідного фільтра приймача визначається

щонайменше шість точок, кожна з яких характеризується відповідним ослабленням і частотним розстроєнням.

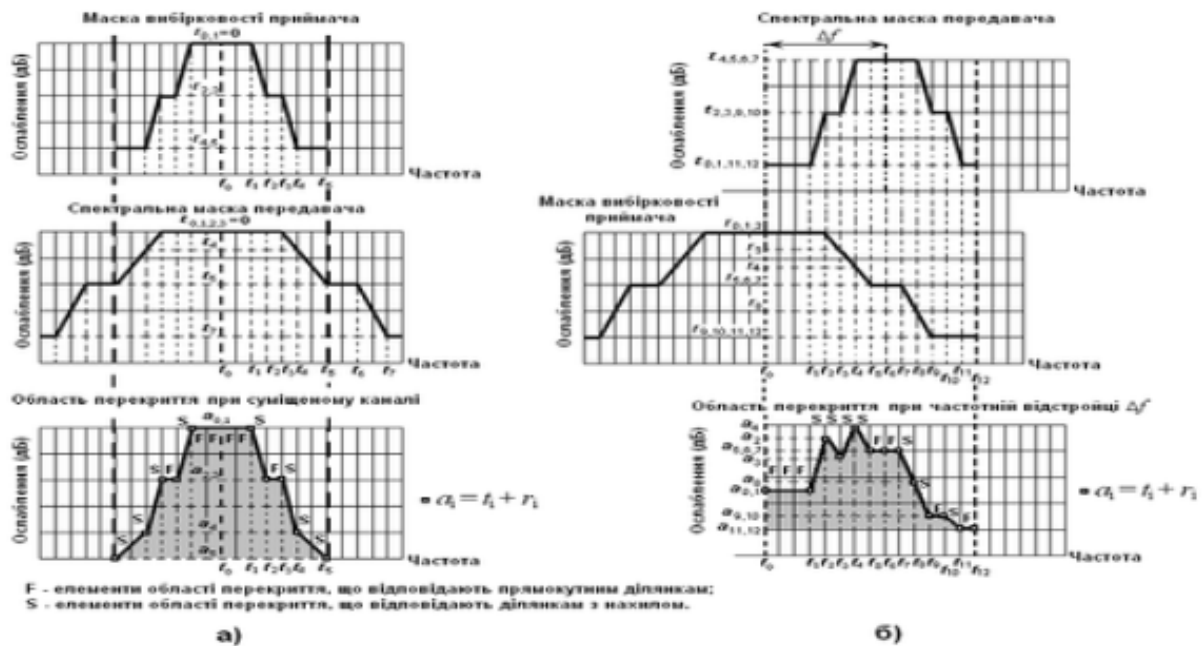


Рисунок 6.1. Для визначення області перекриття спектральної маски випромінювань передавача-джерела радіозавади та АЧХ вхідного фільтра приймача-рецептора радіозавади:
а) у суміщеному каналі; б) у разі частотного рознесення несучих

Перша точка визначається для частотного розстроєння $\Delta f = 0$ кГц (МГц) та ослаблення 0 дБ, а остання точка – для значення ослаблення мінус 40 дБ.

Площа елемента F_i , який відповідає прямокутній ділянці області перекриття, розраховується за формулою:

$$S_{F_i} = \left(f_F \cdot 10^{\frac{-b}{10}} \right), \quad (6.2)$$

де: f_F – смуга, яку займає елемент F_i , $f_F = f_{i+1} - f_i$, де $f_{i+1} > f_i$;

b – сума значень ослаблення потужності за спектральною маскою передавача радіозавади (t_i) і маскою вибірконості приймача (r_i) на початку і наприкінці елемента F_i , $b = t_i + r_i = t_{i+1} + r_{i+1}$;

f_{i+1} – значення частоти наприкінці елемента, МГц;

f_i – значення частоти на початку елемента, МГц;

t_i – значення ослаблення на початку елемента для спектральної маски передавача радіозавади;

t_{i+1} – значення ослаблення наприкінці елемента для спектральної маски передавача радіозавади;

r_i – значення ослаблення на початку елемента для маски вибірконості приймача;

r_{i+1} – значення ослаблення наприкінці елемента для маски вибіркості приймача.

Площа елемента S_i , який відповідає ділянці з нахилом, розраховується за формулою:

$$S_{S_i} = \frac{10^{\frac{-b}{a \cdot \ln(10)}}}{10} \left(1 - 10^{\frac{-a}{10} f_s} \right), \quad (\text{Є.3})$$

де: f_s – смуга, яку займає елемент S_i , $f_s = f_{i+1} - f_i$ де $f_{i+1} > f_i$;
 $b = t_{i+1} + r_{i+1}$; $a = \frac{(t_i + r_i - b)}{f_s}$.

Значення параметрів $S_{co-channel}$ та $S_{\Delta f}$, які визначені у виразу (Є.1), розраховуються за формулами:

$$S_{co-channel} = \sum_1^i S_{F_i} + \sum_1^i S_{S_i}, \text{ якщо } \Delta f = 0, \quad (\text{Є.4})$$

$$S_{\Delta f} = \sum_1^i F_i + \sum_1^i S_{S_i}, \text{ якщо } \Delta f \neq 0. \quad (\text{Є.5})$$

Розрахунок коефіцієнта частотної вибіркості приймача спрощеним методом

Метод спрощеного розрахунку коефіцієнта частотної вибіркості приймача використовується у тих випадках, коли невідомі характеристики спектральної маски випромінювань передавача-джерела радіозавади і АЧХ вхідного фільтра приймача-рецептора радіозавади, а відомі лише характеристики смуги частот випромінювань передавача і смуги пропускання приймача.

Тому зазвичай розрахунок FDR виконується у разі наявності джерел завад основним каналом прийому від основного випромінювання передавача, тобто розраховується коефіцієнт співканальної вибіркості на проміжній частоті.

Завада основним каналом прийому можлива, якщо виконується умова

$$\Delta f \leq (B_{\text{ПРД}} + B_{\text{ПРМ}})/2, \quad (\text{Є.6})$$

де $B_{\text{ПРД}}$ і $B_{\text{ПРМ}}$ – відповідно ширина займаної смуги випромінювання передавача (або ширина смуги на рівні – 40 дБ) і смуги пропускання приймача

У зв'язку з нестачею вихідних даних, стосовно спектральних масок випромінювання передавача та АЧХ фільтра ПЧ приймача та враховуючи те, що вихідними даними, відносно спектра передавача, у більшості випадків є лише ширина необхідної смуги випромінювання $B_{\text{н.ПРД}}$ (*necessary*

bandwidth) та ширина займаної смуги – $B_{\text{ПРД}}$ (*occupied bandwidth – OCW*) спектральну маску передавача та АЧХ приймача для розрахунку співканальної частотної вибіркової представляють у вигляді трапеції (рис. Є.2) [38]. У такому випадку розрахунок площі перекриття та FDR спрощується. За відсутності АЧХ фільтра приймача, що досліджується, в розрахунках може використовуватися спектральна маска випромінювань передавача, яка для цього приймача є джерелом корисного сигналу.

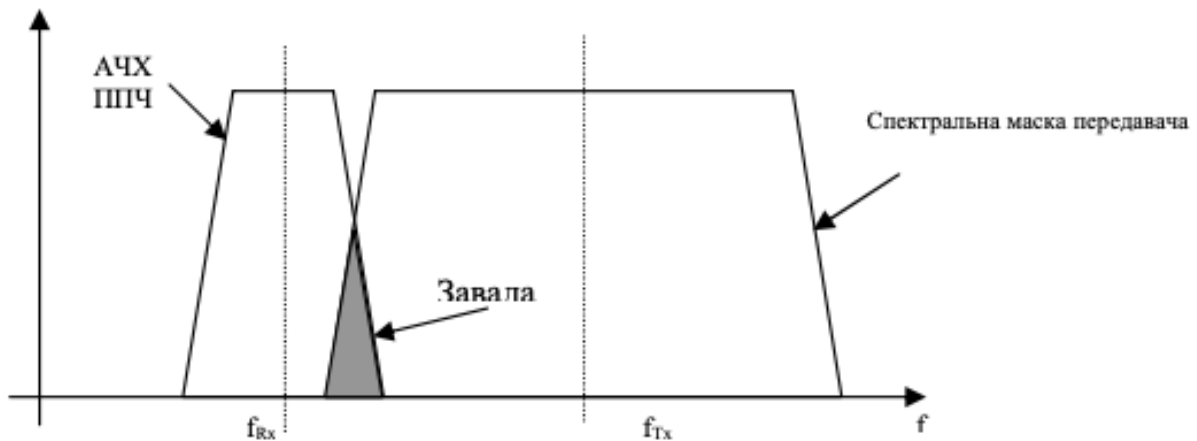


Рис. Є.2. До визначення області перекриття спектральної маски випромінювань передавача-джерела завади та АЧХ фільтра ПЧ приймача-рецептора завади

Як відомо, площа трапеції S визначається за формулою:

$$S = \frac{1}{2} (a + b)h,$$

де a, b – довжини відрізків (основ) трапеції;
 h – висота трапеції.

Для сигналів усіх класів випромінювання, окрім спеціально обумовлених, ширина займаної смуги $B_{\text{ПРД}}$ не повинна перевищувати ширину необхідної смуги $B_{\text{Н.ПРД}}$ більш ніж на 20 % ($B_{\text{ПРД}} \leq 1,2 \times B_{\text{Н.ПРД}}$). Враховуючи, що висота трапеції нормована ($h = 1$), а займана смуга частот пов'язана у більшості випадків з необхідною смугою частот коефіцієнтом 1,2, площі спектра сигналу завади та АЧХ приймача становлять:

$$\begin{aligned} S_{\text{ПРД}} &= 1,1 \times B_{\text{Н.ПРД}}, \\ S_{\text{ПРМ}} &= 1,1 \times B_{\text{Н.ПРМ}}. \end{aligned}$$

В Рекомендації МСЕ-Р [43] та Методиці [38] наведено приклад розрахунку FDR для окремого випадку.

Якщо ширина смуги частот випромінювань передавача, що створює завади, більша за ширину смуги частот приймача, що відчуває вплив цієї завади, а частина спектра випромінювань передавача потрапляє у смугу

частот приймача, коефіцієнт частотної вибірконості розраховується за спрощеною формулою:

$$FDR = 10 \cdot \lg \left(\frac{B_{н.прд}}{B_{н.прм}} \right), \text{ якщо } B_{прд} > B_{прм} \text{ і } \Delta f \leq \frac{B_{прд}}{2} - \frac{B_{прм}}{2}, \quad (\text{Є.7})$$

де: $B_{н.прд}$ та $B_{н.прм}$ – ширина смуги частот передавача і приймача на рівні послаблення 0 дБ (0 дБ – на моделі вигляді трапеції або ширина необхідної смуги частот);

$B_{прд}$ та $B_{прм}$ – ширина смуги частот передавача і приймача на рівні послаблення мінус 40 дБ (або ширина займаної смуги частот).

Пояснення формули наведені на рис Є.3.

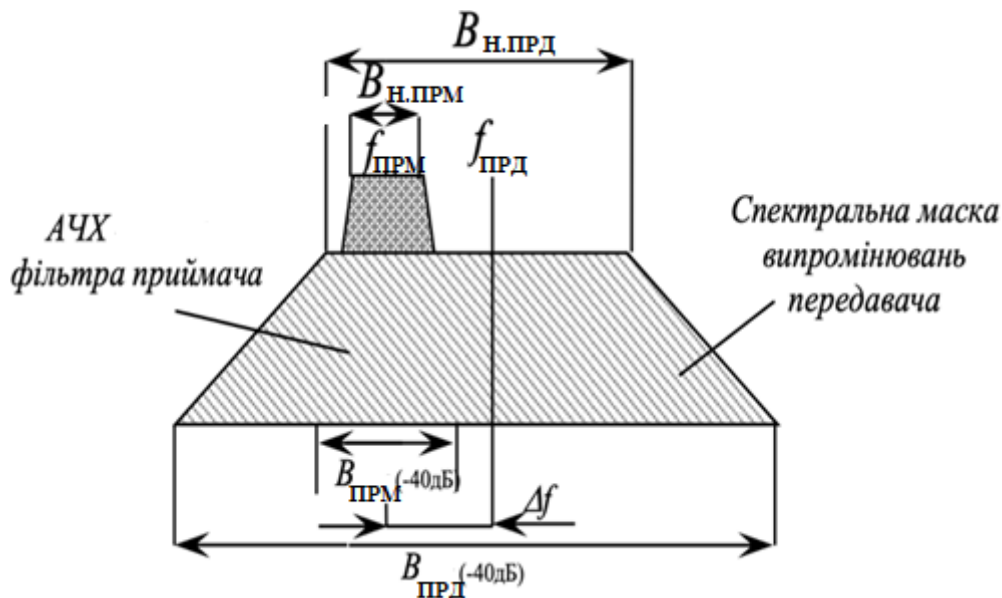


Рисунок Є.3. До визначення коефіцієнта частотної вибірконості приймача при $B_{прм} < B_{прд}$

Якщо спектри завади та АЧХ приймача перекриваються частково (не все випромінювання передавача знаходиться у межах смуги припускання приймача, а лише його частина), потрібно розрахувати площу їх перекриття з допомогою простих геометричних міркувань [42,43].

Спектральні маски можуть перекриватися тільки на рівні займаних смуг частот (як це показано на рис. Є.2). У такому випадку площа перекриття має вигляд трикутника.

Якщо спектральні маски перекриваються так як показано на рис. Є.4, площа перекриття має вигляд нерівнобедреної трапеції та складається з прямокутника (перекриття на рівні необхідних смуг частот) та двох прямокутних трикутників для ПРД та ПРМ.

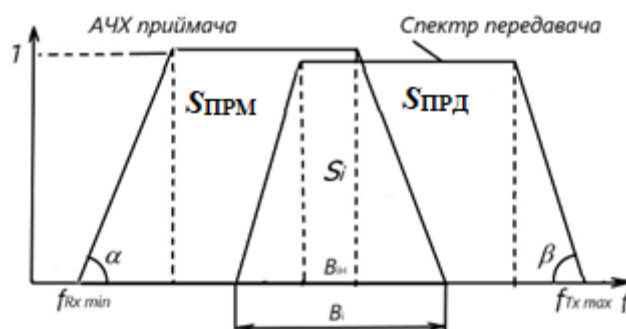


Рис. Є.4. До визначення області перекриття спектральної маски

У такому випадку умовою прийому завади основним каналом прийому приймача від основного випромінювання передавача завади для необхідної смуги частот буде нерівність:

$$\Delta f \leq (B_{\text{н.ПРД}} + B_{\text{н.ПРМ}})/2. \quad (\text{Є.8})$$

Якщо умова (Є.8) виконується площа перекриття розраховується за формулою:

$$S_i = S_{\text{ПР.ВН}} + S_{\text{ТР.ПРМ}} + S_{\text{ТР.ПРД}}, \quad (\text{Є.9})$$

де $S_{\text{ПР.ВН}}$ – площа прямокутника (ПР) на рівні перекриття необхідних смуг частот),

$S_{\text{ТР.ПРМ}}$ та $S_{\text{ТР.ПРД}}$ – площі прямокутних трикутників у спектральних масках сигналів ПРМ та ПРД.

$$\begin{aligned} S_{\text{ПР.ВН}} &= f_{\text{н.ПРМ.хmax}} - f_{\text{н.ПРД.мін}} = (f_{\text{ПРМ}} + B_{\text{н.ПРМ}}/2) - (f_{\text{ПРД}} - B_{\text{н.ПРД}}/2) = \\ &= (B_{\text{н.ПРМ}} + B_{\text{н.ПРД}})/2 - |\Delta f|, \end{aligned} \quad (\text{Є.10})$$

$$S_{\text{ТР.ПРМ}} = (B_{\text{ПРМ}} - B_{\text{н.ПРМ}})/4,$$

$$S_{\text{ТР.ПРД}} = (B_{\text{ПРД}} - B_{\text{н.ПРД}})/4.$$

Якщо виконується умова (Є.6), але не виконуються ні одна з умов (Є.7) та (Є.8), тобто площа перекриття спектральних масок має від нерівностороннього трикутника, як показано на рис. Є.2 та рис. Є.5, умовою прийому завади основним каналом прийому приймача від основного випромінювання передавача завади для займаної смуги частот буде нерівність:

$$\Delta f > (B_{\text{н.ПРД}} + B_{\text{н.ПРМ}})/2. \quad (\text{Є.11})$$

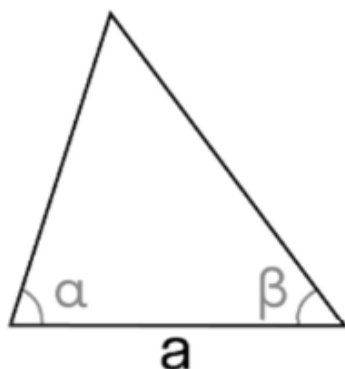


Рисунок Є.5. Для пояснення розрахунку площі трикутника

Для визначення площі трикутника зручно скористатися виразом для розрахунку його площі по відомому боці та двох прилеглих кутах:

$$S_i = \frac{a^2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta}{2 \cdot \sin(180 - (\alpha + \beta))}, \quad (\text{Є.12})$$

де $a = (f_{\text{ПРМ.МАКС}} - f_{\text{ПРД.МІН}}) = (f_{\text{ПРМ}} + B_{\text{ПРМ}}/2) - (f_{\text{ПРД}} - B_{\text{ПРД}}/2) = (B_{\text{ПРМ}} + B_{\text{ПРД}})/2 - |\Delta f|$,

$$\alpha_{\text{ПРМ}} = \arctan(2/(B_{\text{ПРМ}} - B_{\text{Н.ПРМ}})),$$

з урахуванням $B_{\text{ПРМ}} = 1,2 \times B_{\text{Н.ПРМ}}$, $\alpha_{\text{ПРМ}} = \arctan(10/B_{\text{Н.ПРМ}})$,

$$\beta_{\text{ПРД}} = \arctan(2/(B_{\text{ПРД}} - B_{\text{Н.ПРД}})),$$

з урахуванням $B_{\text{ПРД}} = 1,2 \times B_{\text{Н.ПРД}}$, $\beta_{\text{ПРД}} = \arctan(10/B_{\text{Н.ПРД}})$.

Спрощена інженерна методика розрахунку площі перекриття застосовується у разі подання спектра та АЧХ у вигляді трапеції та значно спрощує розрахунок FDR [42], вона розроблена для уникнення додаткових складностей при виконанні курсової роботи [43].

Таким чином для спрощення розрахунку FDR при поданні спектрів у вигляді трапецій замість операції множення спектрів та їх інтегрування можлива оцінка в дБ загального (співканального) FDR у вигляді:

$$FDR = 10 \times \lg(S_{\text{ПРД}}/S_i) + 10 \times \lg(S_{\text{ПРМ}}/S_i), \text{ дБ}, \quad (\text{Є.13})$$

де S_i – площа спектра випромінювання передавача завади, яка потрапляє у смугу пропускання приймача (область перекриття спектральної маски випромінювань передавача-джерела завади та АЧХ фільтра ПЧ приймача-рецептора завади, індекс “i” – *interference*);

$S_{\text{ПРД}}$ – площа спектра випромінювання передавача завади;

$S_{\text{ПРМ}}$ – площа АЧХ фільтра ПЧ приймача.

Урахування характеристик антен при розрахунках ЕМС РЕЗ

А. Врахування розв'язки антен

В методиці [38] наведені експериментальні графіки залежності додаткового послаблення радіохвиль між антенами, розміщеними на локальному об'єкті і рознесені у просторі (рис. Ж.1 і рис. Ж.2) .

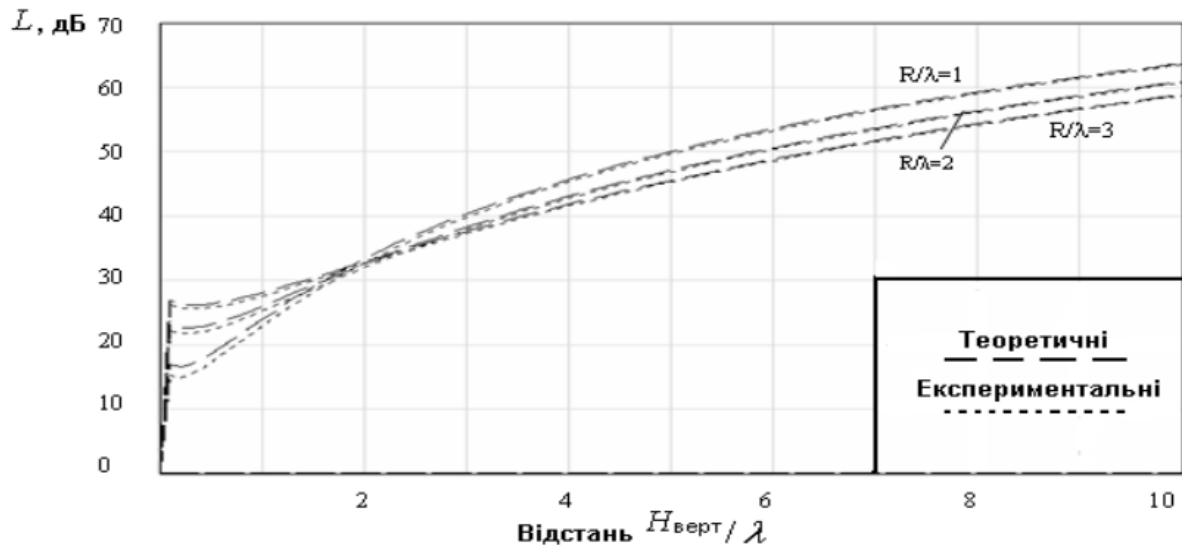


Рисунок Ж.1. Графік залежності розв'язки між антенами, рознесеними у вертикальній площині з фіксованим горизонтальним рознесенням.

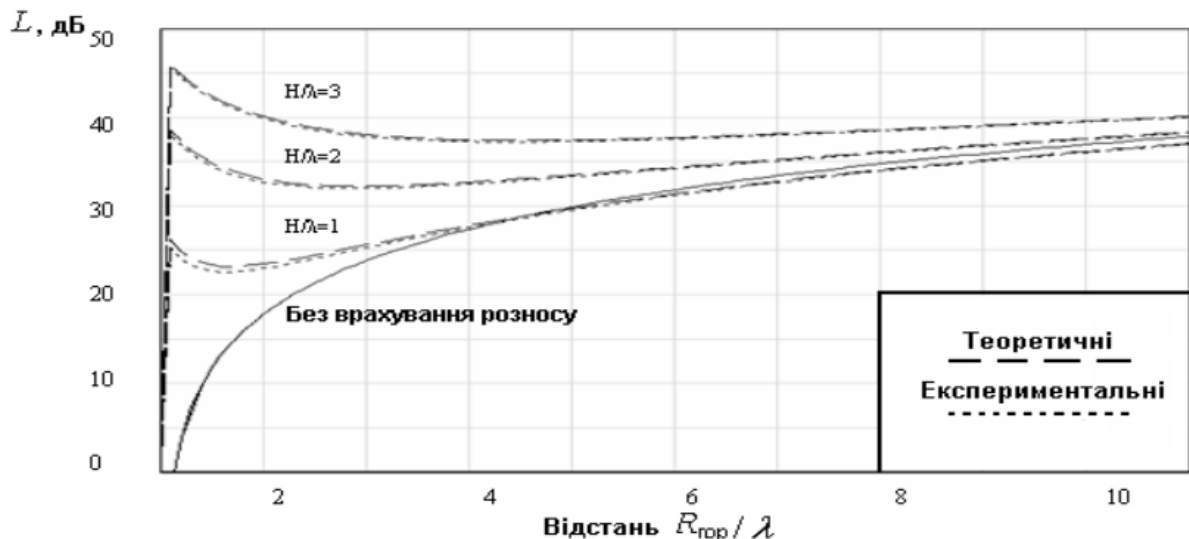


Рисунок Ж.2. Графік залежності розв'язки між антенами, рознесеними у горизонтальній площині з фіксованим вертикальним рознесенням.

Висновок з наведених формул та графіків – найбільша розв'язка забезпечується при вертикальному рознесенні антен різних РЕЗ, які розташовані на одному об'єкті. Те саме стосується розміщення антен

передавача та приймача одного РЕЗ (ретранслятора, базової станції), який працює у дуплексному режимі.

Б. Врахування властивостей спрямованості антен

Б.1. Врахування змін коефіцієнта підсилення антен у ближній зоні

Коефіцієнти підсилення антен передавача завади визначаються на частотах каналів прийому РЕЗ, для якого оцінюється ЕМС.

Також суттєвим є визначення коефіцієнтів підсилення антени у взаємному напрямку та зміна коефіцієнта підсилення у.

Стосовно антен зі слабкою спрямованістю та невисоким коефіцієнтом підсилення (штиркові, рамкові антени, диполі) зміною підсилення у ближній зоні нехтують. Тому вважають що коефіцієнт підсилення таких антен у ближній зоні дорівнює коефіцієнту підсилення у дальній зоні.

Стосовно апертурних антен для близької зони КП можна оцінити за формулою [6]

$$G_{A, \text{МАКС}} = 10 \cdot \lg(4 \cdot \pi \cdot R^2 / S_A). \quad (\text{Ж.1})$$

У випадку параболічної антени із круглою формою дзеркала

$$G_{A, \text{МАКС}} = 10 \cdot \lg(16 \cdot R^2 / d_A). \quad (\text{Ж.2})$$

У близькій зоні КП залежить від відстані до точки спостереження (чого немає в далекій зоні), а саме значення КП істотно менше, ніж у далекій зоні.

У методиці [38] рекомендують користатися експериментальними графіками.

Якщо антена має прямокутну апертуру, для розрахунку коефіцієнта підсилення антени у ближній зоні використовуються експериментальні графіки (рис. Ж.3 та рис. Ж.4) [38]. За наведеними графіками визначають поправку $\Delta G_{\text{БЗ}}$ до коефіцієнта підсилення антени у напрямку максимального випромінювання G_0 для ближньої зони.

З урахуванням поправки $\Delta G_{\text{БЗ}}$ коефіцієнт підсилення антени у ближній зоні $G_{\text{БЗ}}$ розраховується за формулою:

$$G_{\text{БЗ}} = G_0 - \Delta G_{\text{БЗ}}, \quad (\text{Ж.3})$$

де G_0 – коефіцієнт підсилення антени у напрямку головного випромінювання.

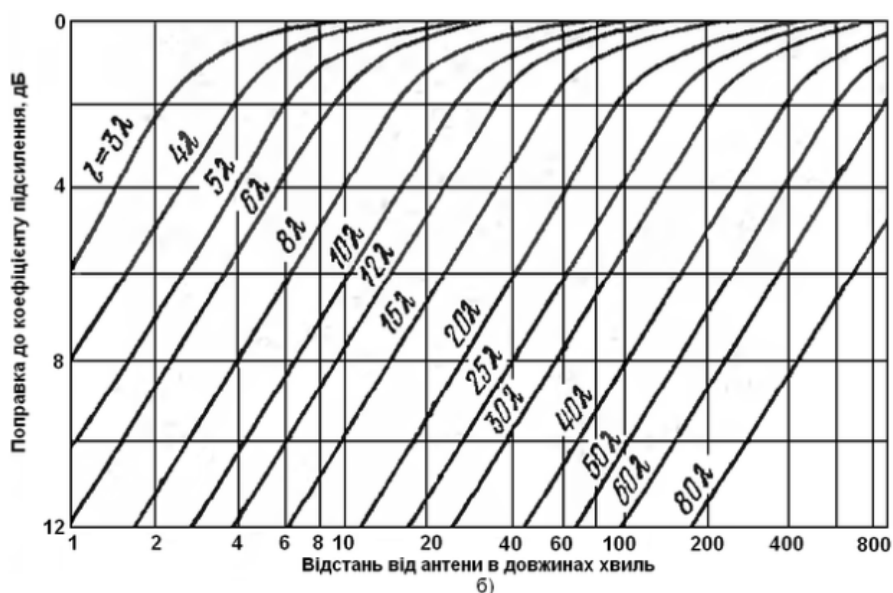
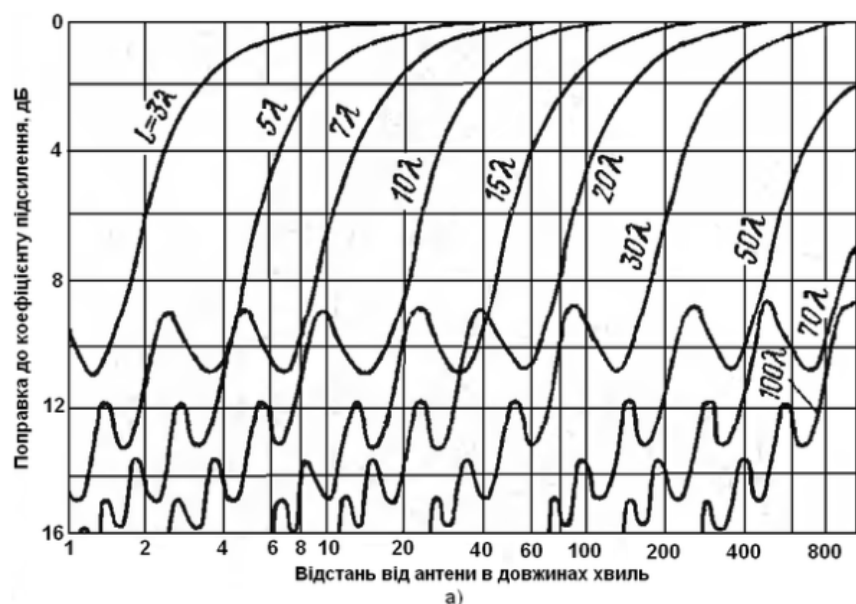


Рисунок Ж.3. Поправка до коефіцієнта підсилення антени в ближній зоні для антен з прямокутною апертурою і рівномірним (а) та косинусоїдним (б) розподіленням поля

У розрахунках коефіцієнта підсилення антени в ближній зоні для антен з прямокутною апертурою і косинус-квадратним або косинус-кубічним розподілом поля враховується поправка $\Delta G_{БЗ}$, яка визначається за графіками, наведеними на рис. Ж.4.

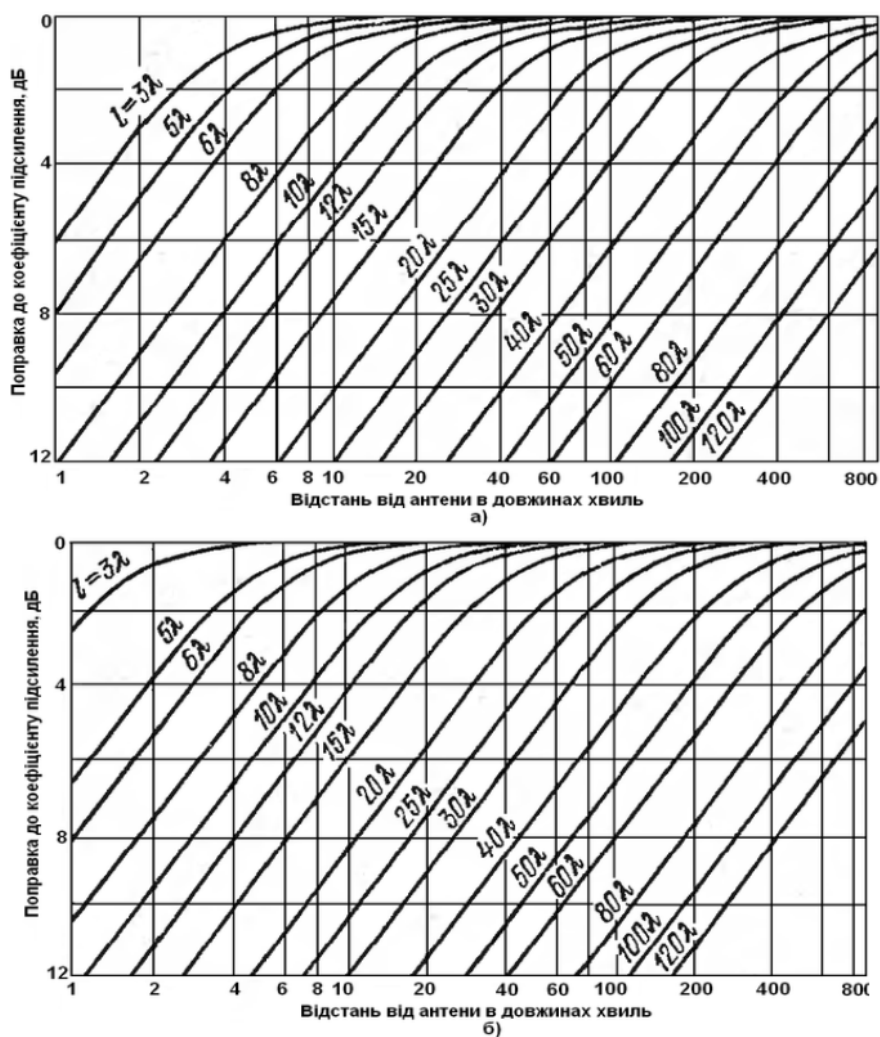


Рисунок Ж.4. Поправка до коефіцієнта підсилення антени в ближній зоні для антен з прямокутною апертурою і косинус-квадратним (а) та косинус-кубічним (б) розподіленням поля.

Б.2. Врахування позасмугових характеристик антен

Визначення необхідних для аналізу ЕМС РЕЗ характеристик розміщених на об'єкті передавальних та приймальних антен на робочих частотах зазвичай не викликає труднощів. Коефіцієнт посилення, або коефіцієнт спрямованої дії (КНД), рівні бічних та задніх пелюсток, характеристики спрямованості, поляризаційної розв'язки та узгодження, а також ряд інших параметрів для робочої смуги частот наводяться в технічній документації на антену.

На жаль, цього не можна сказати про характеристики антен на частотах, номінали яких мають суттєву відмінність від робочих частот. Позасмугові характеристики антен нині не нормуються, не контролюються за її виробництві чи сертифікації і не наводяться в експлуатаційній та іншій технічній документації. У той же час, розрахунок потужності радіозавади на вході рецептора передбачає, як було показано вище (розділ 6.3), знання

коефіцієнта посилення антени ПРМ – рецептора завад у напрямку антени ПРД — джерела завади на частоті завади. Частота завади може дуже істотно відрізнятися від робочої частоти антени рецептора, а при цьому, як відомо [2], просторові та енергетичні характеристики антени можуть не лише кількісно, а й якісно відрізнятиметься від паспортних.

Найбільш поширеними типами антен базових станцій рухомого радіозв'язку в залежності від конфігурації зони обслуговування використовують всеспрямовані антени (вібраторні випромінювачі, лінійні решітки на їх основі, колінеарні антени) або спрямовані антени (антени Уда-Ягі, логоперіодичні антени та ін.).

Навіть для відокремленого симетричного напівхвильового вібратора на частотах, близьких до потрійної, упятереної і т.п. робочої частоті, мають місце резонанси, причому вхідний імпеданс вібратора при цьому не дуже відрізняється від імпедансу на робочій частоті [2], тобто на відповідних частотах антена випромінює (приймає) електромагнітні хвилі приблизно так само добре, як на робочій частоті. (Резонанси мають місце і поблизу парних гармонік робочої частоти, але при цьому вхідний опір вібратора значно вищий.).

Квазіперіодичний характер мають і частотні характеристики фідерних трактів у складі антенних систем, реалізованих на довгих лініях: симетруючих та узгоджувальних пристроях, дільників потужності, розподільчих ліній, шлейфів, чвертьхвильових склянок і т.п. При об'єднанні активних вібраторів, пасивних провідників-перевипромінювачів та вузлів фідерного тракту у складну антенну систему завдяки взаємодії елементів характер частотної залежності енергетичних характеристик суттєво ускладнюється, з'являються додаткові резонанси, у тому числі на частотах, не кратних робочій.

Характеристика спрямованості антени на частотах, що значно відрізняються від робочої, нерідко стає істотно відмінною від паспортної. У міру зростання частоти ДСА деформується, а починаючи з якогось моменту – «розвалюється» (головна пелюстка ДСА розщеплюється на кілька вузьких пелюсток, між якими є глибокі провали; з'являються або різко збільшуються бічні пелюстки тощо). Все вищесказане призводить до того, що на частотах, що істотно відрізняються від робочої частоти антени, можливий дуже ефективний прийом завад, причому з самих різних напрямів, які не збігаються з напрямом головного випромінювання (прийому) на робочій частоті [2].

У якості характеристики позасмугового підсилення повинен використовуватися коефіцієнт підсилення антени як функція кутових координат на частотах, що відповідають суттєвим рівням можливого позасмугового прийому (контрольовані частоти).

До контрольованих частот повинні бути включені [2]:

- частоти, що відповідають максимумам інтенсивності прийому в паразитних смугах прийому антени;

- робочі частоти антен, розташованих поблизу потужних джерел радіозавад.

Частоти, що відповідають максимумам інтенсивності прийому, визначаються за результатами розрахунку (вимірювання) вхідних параметрів антени у широкій смузі частот. Дійсно, якщо знехтувати активними втратами потужності у провідниках та ККД фідера η_f , випромінювана антеною потужність $P_{\text{ВИПР}}$ визначиться виразом

$$P_{\text{ВИПР}} = P_A \cdot (1 - |\Gamma|^2) = P_A \cdot \left[1 - \left(\frac{K_{\text{СХ}} - 1}{K_{\text{СХ}} + 1} \right)^2 \right] = P_A \cdot \left[1 - \left(\frac{1 - K_{\text{БХ}}}{1 + K_{\text{БХ}}} \right)^2 \right], \quad (\text{Ж.4})$$

де $P_A = P_{\text{ПРД}} \cdot \eta_f$ – потужність на вході антени; Γ , $K_{\text{СХ}}$, $K_{\text{БХ}}$ – відповідно коефіцієнт відбиття, коефіцієнт стоячої хвилі напруги і коефіцієнт хвилі (КБВ), що біжить на вході антени.

З виразу Ж.4 випливає, що частоти, які відповідають максимумам потужності випромінювання (а в силу принципу взаємності та прийнятої) антени визначаються мінімумами коефіцієнту відбиття (мінімумами $K_{\text{СХН}}$, максимумами $K_{\text{БХ}}$).

Загальний алгоритм аналізу включає такі основні етапи [2]:

- попередній розрахунок частотної характеристики вхідного імпедансу антени в широкій смузі частот;
- визначення частот для контролю;
- розрахунок характеристик спрямованості та коефіцієнта посилення антени для частот, що контролюються.

Характеристики позасмугового коефіцієнта посилення для конкретного типу антени можуть за необхідності розраховуватися заздалегідь і фіксуватися (у формі графіків, таблиць і т.п.).

Як приклад розглянемо результати розрахунку позасмугових характеристик антен вертикальної поляризації для базових станцій транкінгового рухомого радіозв'язку [2].

Перша з аналізованих антен являє собою лінійну решітку вібраторних випромінювачів. Випромінювач – симетричний напівхвильовий вібратор з симетруючим пристроєм на відрізку трипровідної лінії [2]. На рис. Ж.5. наведено результати розрахунку $K_{\text{БХ}}$ на вході вібратора (пунктирна крива) та випромінювача в цілому (суцільна крива). $K_{\text{БВ}}$ на вході вібратора визначався щодо опору, рівного резонансному опору вібратора на робочій частоті, а на вході випромінювача – відносно хвильового опору тракту (у разі 50 Ом). Бачимо, що в околицях частот $3 \cdot f_0$ і $5 \cdot f_0$ дійсно є смуги інтенсивного прийому як у вібратора, так і у випромінювача загалом. До контрольованих повинні бути включені, як мінімум, частоти $3,2 \cdot f_0$ та $4,5 \cdot f_0$.

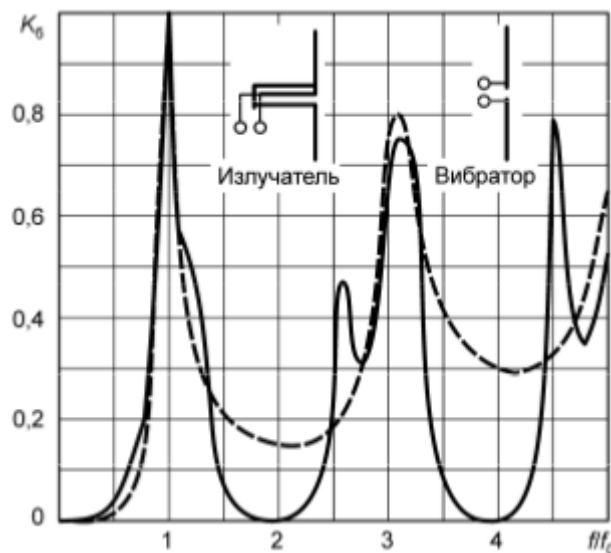


Рисунок Ж.5. Частотні характеристики вхідного КБХ симетричного вібратора та випромінювача на його основі

На рис. Ж.6 б як приклад наведені розрахункові характеристики позасмугового коефіцієнта посилення чотириповерхової лінійної решітки, побудованої з вищеприказаного них вібраторних випромінювачів (загальний вигляд решітки – на рис. Ж.6, а) з використанням розподільника потужності 1:4 на основі чвертьхвильового трансформатора, на частотах $3,2 \cdot f_0$ та $4,5 \cdot f_0$, що відповідають максимумам КБХ (рис. Ж.5). Бачимо, що позасмуговий коефіцієнт підсилення решітки G в окремих напрямках дуже високий (близький до коефіцієнта підсилення G_0 робочої частоті f_0).

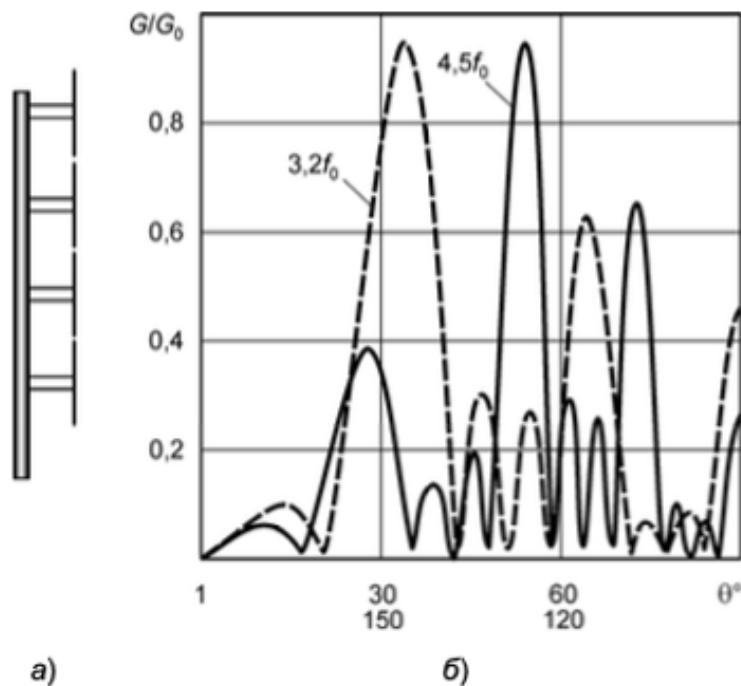


Рисунок Ж.6. Чотириповерхова лінійна решітка з вібраторних випромінювачів (а) та її характеристика позасмугового коефіцієнта посилення на частотах $3,2 \cdot f_0$ та $4,5 \cdot f_0$ (б)

На рис. Ж.7 б наведені розрахункові характеристики позасмугового коефіцієнта підсилення п'ятисекційної колінеарної антени на чвертьхвильових склянках на частотах $3,1 \cdot f_0$ та $4,9 \cdot f_0$ (відповідають максимумам КБХ). Антена (конструкцію пояснює ескіз на рис. Ж.7 а) являє собою решітку напівхвильових вібраторів, що збуджуються хвилею, що біжить в коаксіальній лінії, через щілини в екрані, причому плече вібратора являє собою зовнішній провідник резонансної чвертьхвильової «склянки» (внутрішній провідник - екран коаксіальної лінії). В зоні третьої гармоніки робочої частоти коефіцієнт підсилення в горизонтальному напрямку ($\theta=90^\circ$) такий самий, як на робочій частоті, а в напрямках $\theta=(90\pm40)^\circ$ навіть перевершує його. Достатньо інтенсивні позасмугові резонанси є й поблизу п'ятої гармоніки.

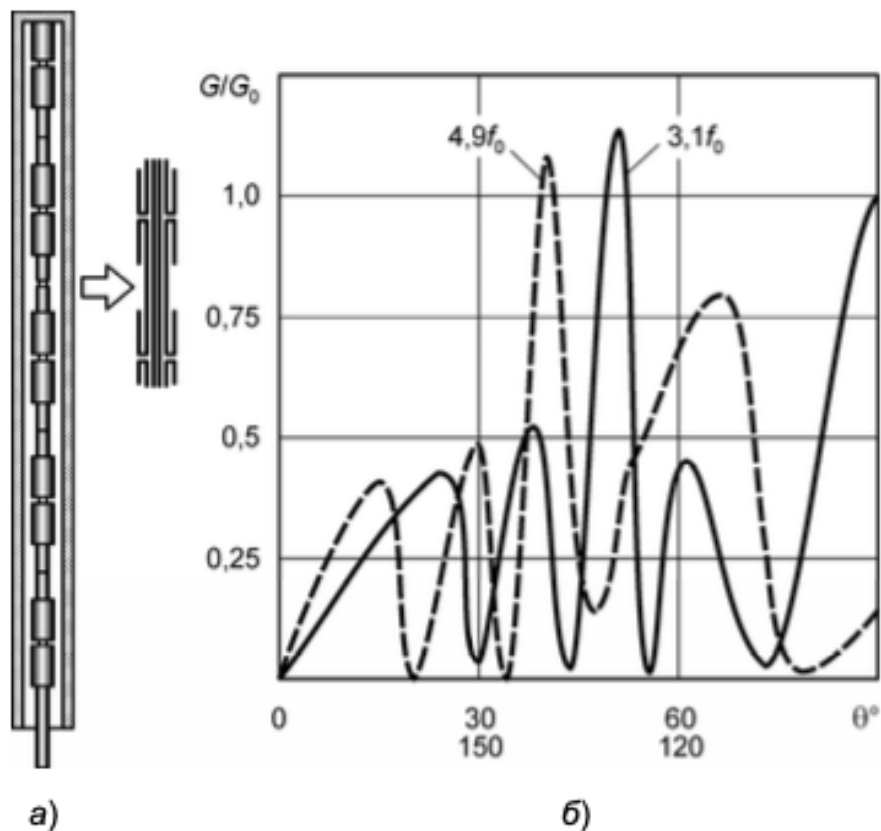


Рисунок Ж.7. П'ятисекційна колінеарна антена на чвертьхвильових склянках (а) та її характеристика позасмугового коефіцієнта посилення на частотах $3,1 \cdot f_0$ та $4,9 \cdot f_0$ (б)

На рис. Ж.8 б наведені розрахункові характеристики позасмугового коефіцієнта посилення чотирисекційної колінеарної антени Франкліна-Марконі (варіант виконання протифазної ділянки у вигляді шлейфу) [2]. Антена (рис. Ж.8 а) містить випромінюючі на робочій частоті (прямолінійні) і слабо випромінюючі (у вигляді шлейфів) ділянки провідника. Характеристики коефіцієнта посилення, як і попередньому випадку,

наведені для частот, відповідних максимумам КБХ. Однак, незважаючи на зовнішню схожість антен рис. Ж.7, а і Ж.8, а їх позасмугові характеристики помітно відрізняються. По-перше, через геометричну асиметрію антени Франкліна-Марконі щодо вертикальної осі на частотах, відмінних від робочих, порушується азимутальна ізотропія діаграми спрямованості. (Для зручності на рис. Ж.8 б характеристики, відповідні площині $\phi = 0$, умовно наведені для діапазону полярних кутів $\theta \in [0, 360^\circ]$, що, строго кажучи, не відповідає загальноприйнятому визначенню сферичних координат.) По-друге, у антени Франкліна-Марконі з'являються помітні максимуми КБХ на частоті, меншій, ніж робоча, а також поблизу парних гармонік робочої частоти.

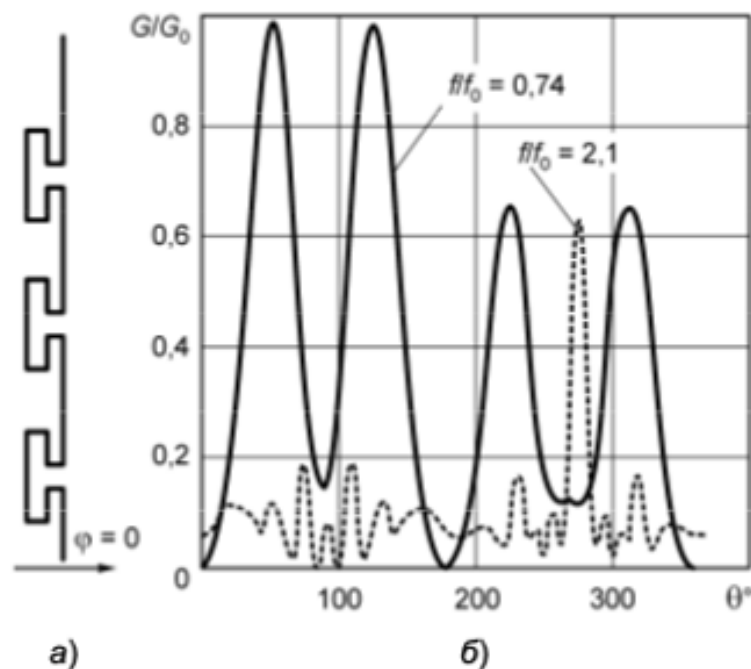


Рисунок. Ж.8. Чотирисекційна антена Франкліна-Марконі (а) та її характеристика позасмугового коефіцієнта посилення на частотах $0,74 \cdot f_0$ та $2,1 \cdot f_0$ (б)

На рис. Ж.9 наведено результати розрахунку характеристик позасмугового коефіцієнта підсилення чотириелементної антени Уда-Ягі («хвильовий канал») [2], що містить активний петлевий вібратор, лінійний рефлектор і два лінійні директори. на частотах, які сильно відрізняються від робочої, у тому числі поблизу 3-ї та 5-ї гармонік, де спостерігаються максимуми КБХ, спрямовані властивості антени якісно змінюються. Замість відносно вузького пелюстки, орієнтованого вздовж осі антени ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 0$), що мав місце на робочій частоті, на гармоніках виникають інтенсивні пелюстки діаграми спрямованості в бічних напрямках, причому позасмуговий коефіцієнт посилення, як видно із рис. Ж.9 7-8, у деяких випадках у два і більше разів перевищує коефіцієнт підсилення на робочій частоті.

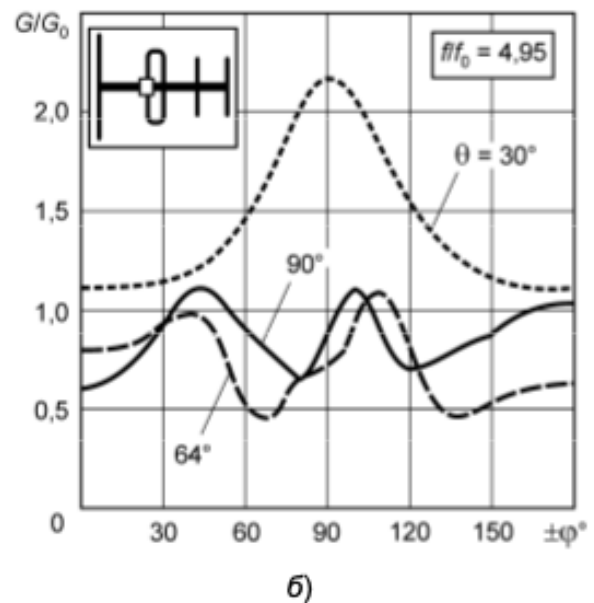
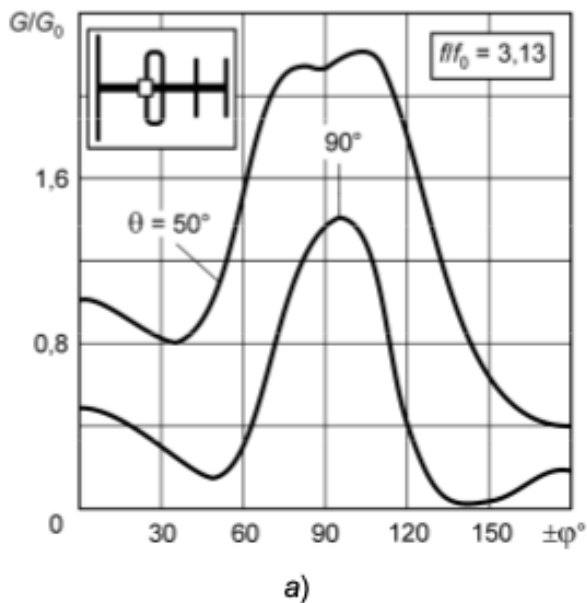


Рисунок Ж.9. Азимутальна характеристика позасмугового коефіцієнта підсилення чотириелементної антени Уда-Яги на частотах $3,13 \cdot f_0$ (а) та $4,95 \cdot f_0$ (б)

Побудовані заздалегідь за наслідками розрахунків графіки, аналогічні наведеним на рис. Ж5–Ж.9, для різних типів антен можуть використовуватися при розрахунках ЕМС у тих випадках, коли проектувальник не має у своєму розпорядженні необхідних програмних засобів для проведення розрахунків безпосередньо в процесі проектування.

Для вирішення практичних задач забезпечення ЕМС подібні характеристики повинні бути розраховані для значно більшої, ніж у наведених прикладах, кількості частот, що контролюються [2].

Методика визначення частотно-територіального рознесення для радіосистем

Рівень завади у приймачі є функцією посилень та послаблень, яким піддається сигнал завади на шляху від джерела завади до приймача, і може бути представлений формулою (5.2).

В рекомендації MCE-P SM.337-6 наведено приклад застосування методики до систем сухопутної рухомої служби.

У системах з частотним розподілом каналів ці норми мають такий вигляд: передавач, що працює в тому же частотному каналі, повинен перебувати на відстані не менше d_0 (км); передавач, що працює у сусідньому каналі повинен перебувати на відстані не менше d_1 (км); передавач, що працює через один канал повинен знаходитися на відстані не менше d_2 (км) і т. д. від приймача, який може відчувати вплив завади від них.

Розробка норм ЧТР потребує розрахунку рівня завади на вході приймача, що зазнає заваду, і навіть визначення критеріїв прийнятності завад.

Розрахунок завад

Цей розрахунок залежить від двох чинників: спектрального та просторового.

Спектральний фактор залежить від спектральних характеристик передавача, що заважає, і частотних характеристик приймача, на який діє завада.

Спектральний фактор представляється як коефіцієнт придушення сигналів поза смугою каналу $OCR(\Delta f)$, який визначається наступною формулою:

$$OCR(\Delta f) = -10 \times \lg \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |P(f)H(f+\Delta f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} P(f) df}. \quad (3.1)$$

де: $P(f)$ – спектральна щільність сигналу, що заважає (Вт/Гц);

$H(f)$ – еквівалентна частотна характеристика приймача, що відчуває заваду, по ПЧ;

Δf – рознесення частот між передавачем, що заважає, і приймачем, що відчуває заваду.

Слід зазначити, що формула (3.1) не відрізняється від формули (6.8), незважаючи на те, що нижні межі інтегрування різні.

З формули (3.1) очевидно, що $OCR(\Delta f)$ залежить від ступеня перекриття між смугою пропускання приймача і спектром потужності сигналу, що заважає. У міру збільшення Δf ступінь такого перекриття зменшується, що призводить до зменшення потужності завади або, відповідно, до вищих величин $OCR(\Delta f)$.

Просторовий фактор даної методики пов'язаний з розрахунком згасання сигналу і залежить від відстані; це тісно пов'язано з використовуваною моделлю поширення радіохвиль та зі статистичним розподілом сигналу, що заважає, на вході приймача, що відчуває заваду. Слід користуватись відповідною моделлю ПРХ, рекомендованою МСЕ-R. Модель поширення, що використовується при даній процедурі, залежить, природно, від побудови системи, а також від діапазону частот, що використовується, від географічних умов у межах зони обслуговування та ширини смуги системи.

Критерії завад

Зазвичай це є простим співвідношенням, на підставі якого можна судити, є ця завада шкідливою або допустимою. У даній методиці обрано найбільш загальний критерій завад, що базується на понятті захисного відношення A (дБ). Вважається, що завада має допустимий рівень, якщо вона задовольняє таку умову:

$$P_c - P_z \geq A \quad (3.2)$$

Процедура

Процедура визначення правил ЧТР тепер може бути узагальнена таким чином:

Крок 1: Визначення рівня корисного сигналу P_c (дБВт) на вході приймача, на який впливає завада.

Крок 2: Розрахунок результуючого рівня завади на вході приймача P_z , по формулі:

$$P_z = P_{z, \text{ПЕР}} + G_{A, \text{З.ПЕР}} + G_{A, \text{ПРМ}} - L_{\text{ПРХ}} - \text{OCR}(\Delta f) \quad (3.3)$$

де: $P(f)$ – спектральна щільність сигналу, що заважає (Вт/Гц);

$H(f)$ – еквівалентна частотна характеристика приймача, що відчуває заваду, по ПЧ;

Δf – рознесення частот між передавачем, що заважає, і приймачем, що відчуває заваду.

$\text{OCR}(\Delta f)$ – коефіцієнт придушення сигналів поза смугою пропускання приймача при рознесення частот Δf , відповідно до формули (6.4).

Крок 3: Використання величини P_c і P_z , які отримані згідно з кроками 1 і 2, у формулі (3.2) для визначення або обчислення взаємозв'язку між Δf та відстанню рознесення d , при яких завада вважається припустимою.

Врахування завмирань сигналу

В реальних умовах сигнал, що приймається в приймачі, який підтверджений завади, відчуває завмирання, яке представлене

логарифмічно нормальним розподілом. Щоб компенсувати цей ефект завмирання, необхідно забезпечити запас рівня сигналу, що приймається,

Альтернативна процедура визначення необхідного рознесення між схильним до завади приймачем і джерелом завад, що відображає ефект завмирань, представлена наступним чином:

Крок 1: Для розрахунку необхідного запасу рівня сигналу відносно джерела завади з врахуванням потрібного запасу рівня сигналу на завмирання, необхідно скористатися наступної формулою:

$$L_3 = P_{3.ПЕР} + G_{3.ПЕР} + G_{А.ПРМ} - (P_{С.МІН} - A) - OCR(\Delta f) - 10 \cdot \lg(10^{N/10} - 1), \quad (3.4)$$

де: L_3 – необхідна розв’язка (втрати) між джерелом завади і приймачем корисного сигналі, за якої забезпечується допустима потужність завади на вході приймача;

$P_{С.МІН}$ – реальна чутливість приймача;

A – захисне відношення (дБ);

N – логарифмічно нормальний запас завмирання (дБ).

Крок 2: Застосування належної моделі поширення радіохвиль МСЕ-Р до рівняння (3.4) дає необхідне рознесення по частотне Δf та територіальне рознесення d , при якому завада може бути допустимою.

Для демонстрації описаної вище методики як приклад у Рекомендіції розглянута система сухопутної рухомої служби (СРС). Подальші розрахунки базуватимуться на формах випромінюваного спектру та на певних вимогах щодо вибіркості приймача, при цьому отримані результати виявляються не залежать від будь-якого конкретного методу модуляції (аналогової чи цифрової). У цьому прикладі передбачається, що частотна характеристика приймача має такий самий характер, як і форма спектра випромінювання. Це припущення, мабуть, має бути справедливим для цифрових систем.

Можливі характеристики обох системи представлені в табл. 3.1:

Таблиця 3.1

Параметри, які використані у прикладі

Мінімальний рівень корисного сигналу, $P_{с\ min}$	–145 дБВт
Необхідне захисне відношення, A	18 дБ
Висота антени базової станції (БС), $h_{БС}$	75 м
Робоча частота, f	450 МГц
ЕІВП базової станції	20 дБВт
Коефіцієнт підсилення антени приймача БС	0 дБі
Еквівалентна відносна діелектрична проникність, ϵ	30
Еквівалентна провідність, σ	10^{-2} С/м

У системах СРС можливі чотири випадки радіозавад: базова – базова, базова – рухова, рухова – базова та рухова – рухова станції. У симплексних

системах, в яких базові та рухомі станції передають на одній і тій же частоті, мають місце всі чотири випадки радіозавад. З іншого боку, у дуплексних системах рухомі та базові станції передають на різних частотах, і отже, необхідно розглядати лише випадки радіозавад базова – рухома станції та рухома–базова станції. При визначенні необхідної відстані рознесення слід розглядати лише найгірший випадок, тобто випадок радіозавад, який вимагає найбільшої відстані рознесення між системами. Найчастіше можна припускати, що базові станції працюють практично 100% часу та випадок радіозавад базова–базова станції є визначальним, що вимагає найбільшої відстані рознесення. З цієї причини у Рекомендації [43] розглянуто випадок радіозавад між базовими станціями та вибрано дифракційну модель поширення радіохвиль (Рекомендація МСЕ–Р Р.526 [19]). Наведемо одразу результати розрахунків по дифракційної формулі.

Формула (6.4) використовується для розрахунку придушення сигналів завади поза смугою пропускання приймача $OCR(\Delta f)$ залежно від Δf . У цьому прикладі розглядаються два випадки:

Випадок 1: Система з рознесенням каналів 25 кГц створює заваду системі з рознесенням каналів 12,5 кГц.

Випадок 2: Система з рознесенням каналів 12,5 кГц створює заваду системі з рознесенням каналів 25 кГц.

Очікувані чисельні значення цих двох випадків представлені у таблиці 3.2, у якій $OCR(\Delta f)$ представлена як функція частотного рознесення Δf (кГц).

Таблиця 3.2

Результати розрахунку OCR (дБ) для завад для двох різних систем

Δf (кГц)	Випадок 1: $OCR(\Delta f)$, дБ	Випадок 2: $OCR(\Delta f)$, дБ
0	$\cong 0$	$\cong 0$
12,5	26,4	29
25	57,7	58,8
37,5	57,7	59

Використовуючи параметри, представлені в таблицях 3.1 і 3.2, та припускаючи логарифмічно нормальне розподіл потужності корисного сигналу, що приймається, а також задавшись величиною в 17 дБ для обліку мінливих умов залежно від конкретного розташування, за умови 90% покриття для сухопутної рухомої системи зв'язку, отримано радіус зони обслуговування, що дорівнює 32 км.

Відповідний рівень корисного сигналу, що приймається P_C , при цьому складе:

$$P_C = P_{C.\min} + L_o = -128 \text{ дБВт.}$$

де L_o – втрати на трасі поширення за умов вільного простору (дБ);

$P_{C.\min}$ – реальна чутливість приймача;

Отже, прийнятий рівень завади складе: $P_C - A = -146 \text{ дБВт.}$

На основі процедури, представленої в даному документі, для двох, що розглядаються в даному документі прикладі випадків, було розраховано необхідну відстань рознесення, D між двома базовими станціями. Результати розрахунку представлені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Необхідна відстань розносу, D (км),
залежно від частотного розносу, Δf (кГц)

Δf (кГц)	Випадок 1 і Випадок 2: D (км)
0	107,5
12,5	72,5
25	33
37,5	33

З урахуванням необхідного запасу на завмирання та використовуючи параметри, наведені у таблицях 3.1 та 3.2, а також формулу (3.4), отримуємо необхідне рознесення L_3 у вигляді логарифмічно нормального запасу на завмирання, яке наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Необхідний рознос, L_3 (дБ), що залежить від логарифмічно нормального запасу на завмирання, N (дБ)

Δf (кГц)	Випадок 1		Випадок 2	
	$N=3$	$N=10$	$N=3$	$N=10$
0	183,02	173,46	183,02	173,46
12,5	156,62	147,06	154,02	144,46
25	125,32	115,76	124,22	114,66
37,5	125,32	115,76	124,02	114,46

Слід пам'ятати, що чим більше значення N , тим менше потрібно рознесення.

Правила врахування інтермодуляційних завад для ЧТР

На додаток до завад у тому ж каналі та від сусідніх каналів, системи сухопутного рухомого зв'язку відчують також завади за рахунок інтермодуляції через виникнення різних продуктів інтермодуляції. У разі виникнення у приймачі продуктів інтермодуляції третього порядку за рахунок взаємодії двох сигналів, оскільки в створенні продуктів інтермодуляції беруть участь дві передавальні базові станції, мінімальні прийнятні відстані від приймача, відчуває перешкоду, взаємозалежні.

Припускаючи, що посилення приймальної антени дорівнює сумарним втратам у приймачі, що середня величина рівня мінімального корисного сигналу, що приймається, для отримання відношення сигнал/завада в 12 дБ з урахуванням шумів та спотворень (SINAD) за наявності шумів складає -145 дБВт, що використовується величина втрат при поширенні у вільному просторі та що всі передавачі мають однакову величину е.і.і.м., рівну 20 дБВт, можуть бути встановлені формули для прогнозування рівнів завад у

приймачі, що заважає, для смуги частот 410-470 МГц. Для моделі, що розглядається:

$$P = 2 P_N + P_F - 0,57 - 60 \lg(\delta f),$$

де: P – результуючий рівень завади в приймач- рецепторі завади (дБВт);

P_N – потужність сигналу завади на вході приймача (дБВт), частота якої найближча до частоти корисного сигналу;

P_F – потужність сигналу завади на вході приймача (дБВт), частота якої найбільш віддалена від частоти корисного сигналу;

δf – різниця між частотами найближчого та найвіддаленішого за частотою передавачів завад (МГц).

Якщо несуща частота дорівнює 460 МГц, то продукти інтермодуляції третього порядку при взаємодії двох сигналів з'являться за умови:

$$d \cdot \delta f \leq 0,17,$$

де d – відстань від існуючої станції до планованої станції. Передбачається, що захисний запас між рівнем потужності завади та мінімальним рівнем потужності корисного сигналу становить 6 дБ. Корисна інформація є у Рекомендації МСЕ-R SM.1134. Оскільки приймач запланованої станції може опинитися в ролі рецептора завад за рахунок інтермодуляційних продуктів від ближнього або віддаленого за частотою передавача завади, то при визначенні ЧТР необхідно користуватися кривою В разом із кривою А, зображеними на рис. 3.1. Область вище кривий відповідає умовам прийнятності завади, а область нижче кривої відповідає умовам можливого виникнення завади.

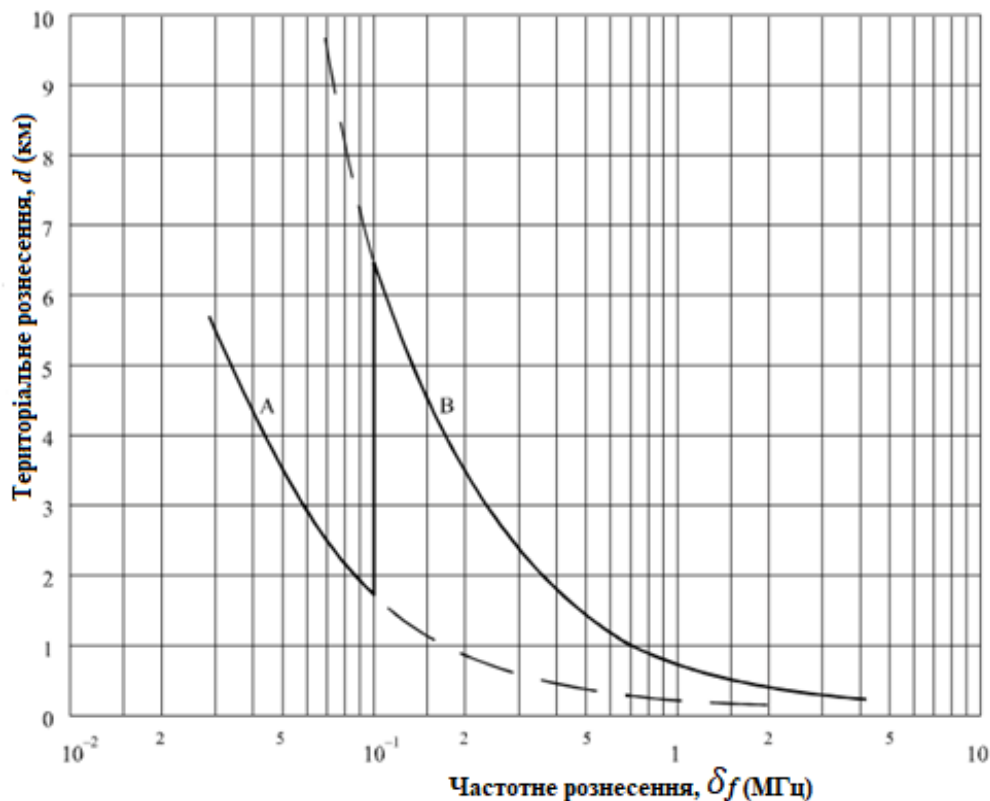


Рисунок 3.1. Криві для аналізу ЧТР в умовах інтермодуляційних завад третього порядку, що виникають при взаємодії у приймачі двох сигналів

Висновки

Для того щоб присвоїти будь-яку частоту планованої нової станції, насамперед необхідно оцінити *завади в тому ж і від сусідніх каналів*, використовуючи відповідну методику ЧТР. Якщо відповідні умови ЧТР задовольняються, необхідно зробити *аналіз впливу інтермодуляційних завад*, які можуть виникнути між існуючою та планованою станціями. Якщо виявиться, що результати цього аналізу свідчать про недотримання умов ЧТР, необхідно зробити більш докладний аналіз.

Приклади реалізації завадозахищених антен

Для захисту від завад використовуються як активні методи (адаптивні антенні решітки – ААР та антикомпенсатори завад – АКЗ) так й пасивні методи – зменшення рівня бокових пелюсток ДСА (корекція діаграм спрямованості антен з допомогою додаткових елементів, бленди, захисні екрани та ін.). Вибір методу залежить від характеру завади (навмисна або не навмисна), кількості завад, динаміки зміни завадової обстановки, типу антен, які використовуються та від інших причин.

1. Адаптивний компенсатор завади для кільцевої антенної решітки з неспрямованої діаграмою

До антенних систем мобільних об'єктів зазвичай пред'являються вимога всеспрямованості випромінювання. Такі антенні системи особливо вразливі до спрямованих завад. Одним із основних шляхів вирішення цієї проблеми є використання всеспрямованої антени, яка має один або більше напрямків нульового прийому (або мінімумів), та які можуть електрично керуватися для мінімізації завад. Далі описана експериментальна УКХ антена з одним керованим нулем ДСА, яка працює у смузі частот 30% при центральній частоті 153 МГц [46].

Загальний від антени зображений на рис. I.1. Антена є 4-х елементна кільцева антенна решітка (КАР) радіусом $0,16\lambda$, яка підключена до дуже простої фазуючої схеми (діаграмо-утворюючої схеми – ДУС).

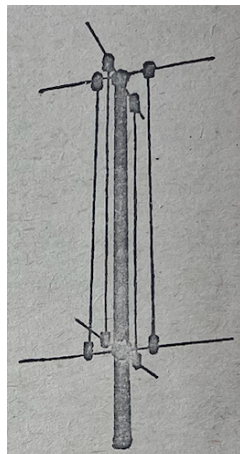


Рис. I.1. Загальний від 4-х елементна кільцевої решітки

Для синфазного (мода нульового порядку) та квадратурного (мода першого порядку) збудження випромінюючих елементів діаграмо-утворююча схема (ДУС) може бути реалізована на квадратурних тридецибельних відгалужувачах (квадратурні мости).

На рис. I.2 представлено варіант КАР з діаграмо-утворюючою схемою, яка побудована з використанням квадратурних мостів М1, М2, М3, М4:

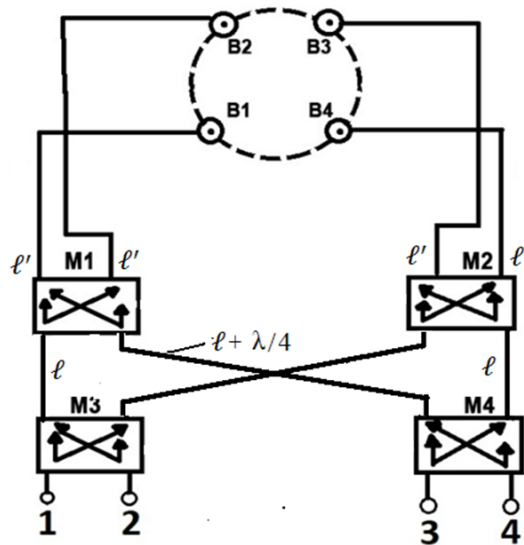


Рисунок I.2. ДУС на квадратурних мостах

Випромінюючі елементи антенної решітки В1, В2, В3 і В4 мають вигляд рівномірно розташованих в просторі по колу вертикальних симетричних вібраторів, які підключені до мостів М1, М2, М3 і М4. Відмінною особливістю даної ДУС є те, що виходи мостів з'єднуються між собою відрізками коаксіальних фідерів або іншими фідерними лініями (лініями передач) з довжиною l та $l + \lambda/4$, а з випромінювачами – відрізками l' . При такому компонуванні ДУС реалізується фазове збудження випромінювачів згідно з табл. I.1.

Таблиця I.1

№ входу	Фази струмів, град.			
	В1	В2	В3	В4
1	0	90	180	270
2	90	180	90	180
3	180	90	180	90
4	270	180	90	0

Такий амплітудно-фазовий розподіл струмів у випромінюючих елементах КАР дозволяє формувати у азимутальній площині чотири незалежні діаграми направленості (ДН) з ненаправленим випромінюванням поля у просторі.

На рис. I.3 показана схема 4-х елементної антени з керованим нулем ДН.

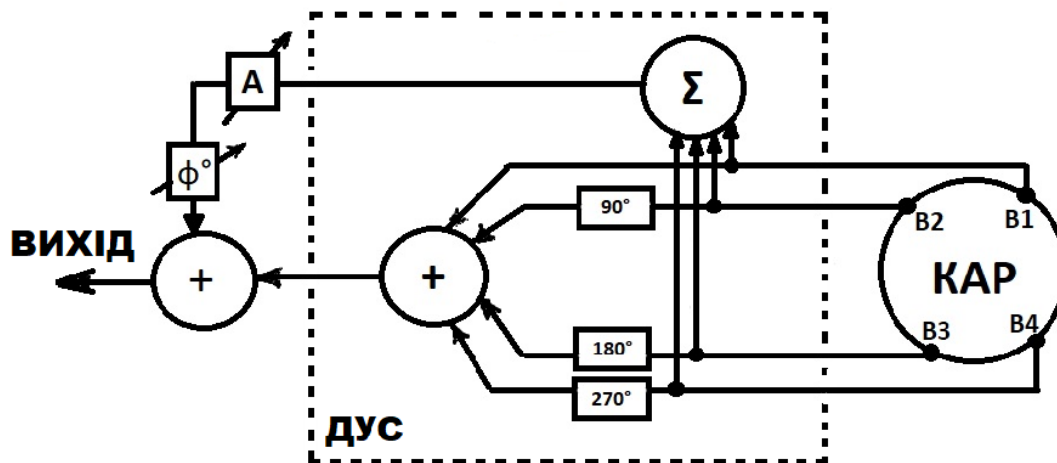


Рисунок І.3. Схема 4-х елементної антени з керованим нулем ДН

Антенa збуджується двома ортогональними фазовими модами.

Мода нульового порядку забезпечує синфазне збудження елементів антени, в результаті у дальній зоні формується всеспрямована діаграма.

Фазова мода першого порядку відповідає збудженню елементів із циклічно змінною фазою (тобто $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$) і ДСА в дальній зоні постійна по амплітуді, але циклом зміни фази в межах азимутальних кутів $0^\circ - 360^\circ$.

Комбінація цих двох мод із рівними амплітудами дає діаграму кардіоїдної форми, в якій напрямок нуля може змінюватись змінюючи фазовий зсув діаграми будь-якої моди.

Атенюатор на рис. 5.20 вирівнює амплітуди полів у дальній зоні від двох фазових мод. Зміна фази фазообертача на ϕ призводить до азимутального кутового обертання нуля ДСА на кут ϕ . Зміна кутового положення нуля ДСА забезпечується не зміною амплітуд та фаз сигналів для всіх 4-х елементів решітки, а зміною тільки одного фазового зсуву.

Експериментальні ДС 4-х елементних кільцевих решіток з керованим нулем ДСА радіусом $0,04\lambda$ д на частоті 153 МГц показана на рис. І.4.

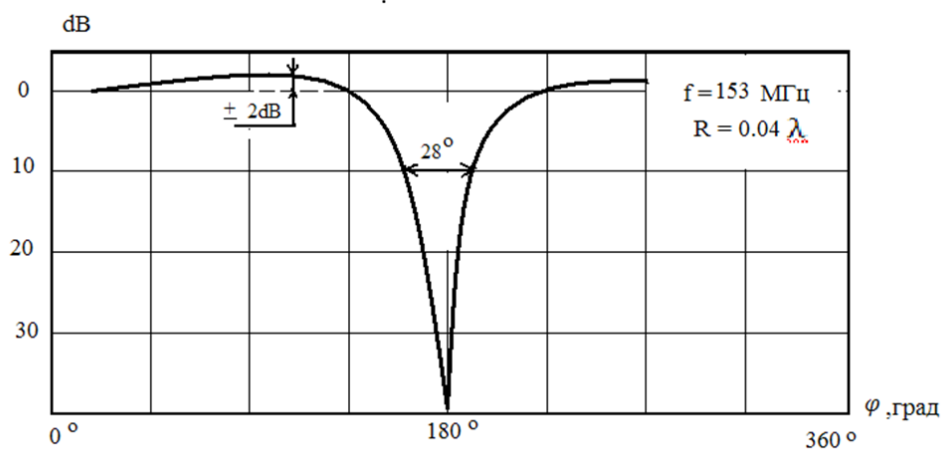


Рисунок І.4. Експериментальна ДС 4-х елементної кільцевої решітки з керованим нулем ДСА

Глибина нуля змінюється із зміною азимутального кута установки нуля.

Глибина нуля прагнути до нескінченності (тобто більше ніж на 50 дБ в кутах, які відповідають розташуванню елементів решітки). Якщо нуль спрямований у вуглі між елементами решітки, коли існує незначне відхилення від всеспрямованості складових мод, глибина нуля зменшується приблизно до рівня – 27 дБ.

На рис. I.5 наведені розрахункові ДСА у полярних координатах для випадків формування нуля у напрямленнях 0° , 90° , 180° і 270° .

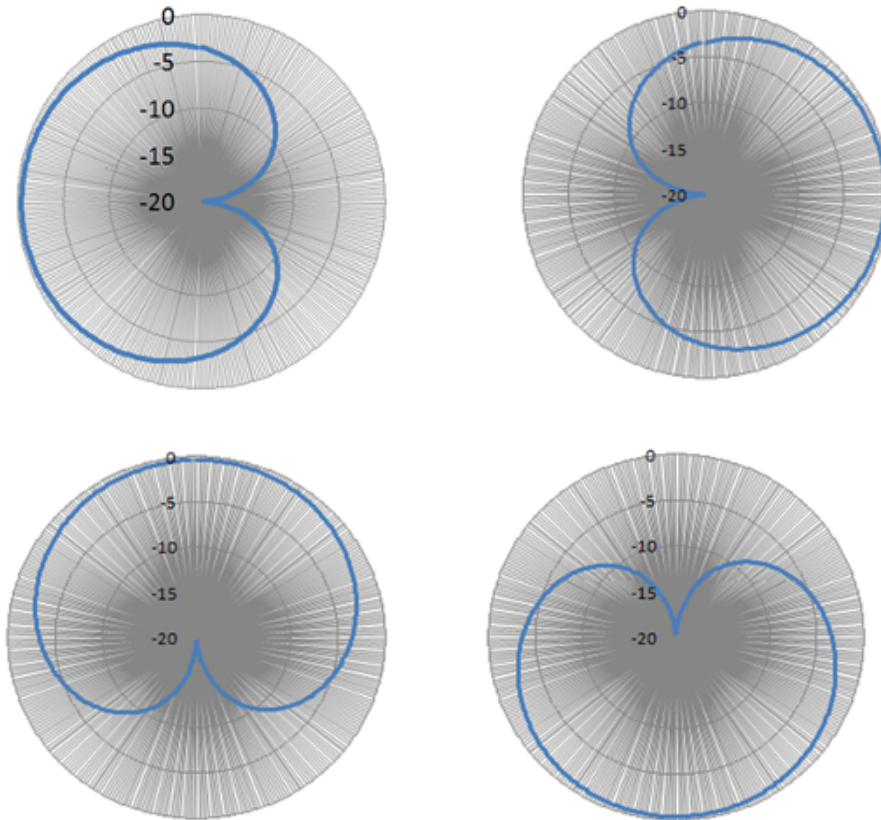


Рисунок I.5. Варіанти ДСА у полярних координатах

Хоча решітка призначена для ручного придушення завади, її виходи можна використовувати з автоматичними ланцюгами, які керують нулем ДСА [46].

2. Адаптивна антенна решітка - CRPA антена

Розвиток технологій, особливо технологій аналого-цифрових перетворювачів та SDR-радіо, дозволив замість аналогових атенюаторів та фазообертачів для створення потрібної діаграми спрямованості використовувати цифрову обробку сигналів. На рис. I.6 показана 4-х елементна адаптивна антенна решітка ($N=4$), у якій формування амплітудно-фазового розподілу здійснюються у цифровому вигляді.

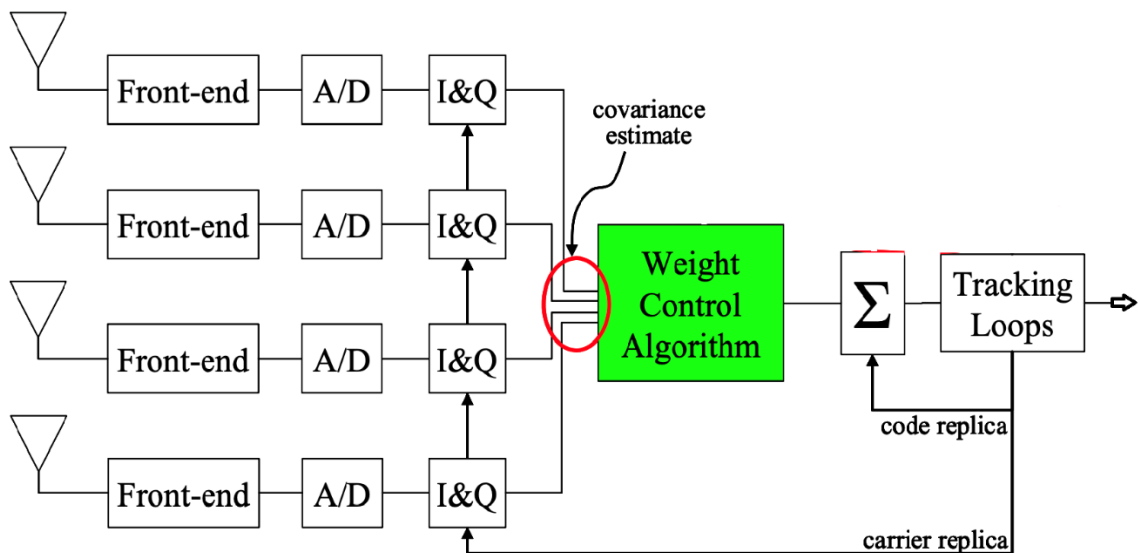


Рисунок І.26. Адаптивна антенна решітка з цифровою обробкою сигналу та цифровим формуванням діаграми спрямованості

На рисунку позначено:

- Front-end – RF/IF converter (перетворювач частоти, радіотракт),
- A/D – аналогове – цифровий перетворювач,
- I&Q – комплексний ваговий коефіцієнт W (уявна та реальна частини),
- Tracking loop – петля зворотного зв'язку.

В адаптивних антенах, які призначені для прийому сигналів супутникової навігації в умовах можливого впливу завад забезпечується управління положенням нуля діаграми направленості антени (null-steering). Управління положенням нулів ДН антени базується на тому, що рівень GPS сигналу на прийомній стороні нижчий рівня теплових шумів, а отже, будь-який сигнал, потужність якого перевищує потужність теплового шуму, є сигналом завади. Антени в решітці зважуються таким чином, що будь-який конкретний сигнал, потужність якого перевищує рівень власних шумів приймача, може бути придушений. Метод null-steering постійно розраховує вагові коефіцієнти, щоб мінімізувати рівень завад на прийомі. Недоліком описаного підходу є той факт, що разом з послабленням сигналу завади потенційно знижується і рівень корисного сигналу. Даний метод не потребує інформації про корисний сигнал [53].

За таким принципом створені адаптивні антенні решітки для прийому сигналів супутникової навігації, які придушують навмисні завади (*Controlled reception pattern antenna CRPA* – це активна приймальна антена, розроблена для захисту від радіопридушення і спуфінгу сигналу).

Максимальна кількість радіозавад, від яких може захистити адаптивна антенна решітка дорівнює $N-1$, тобто 4-х елементна ААР може теоретично захистити від 3-х радіозавад.

У якості прикладу такої ААР наведемо виріб “Комета”, який використовується у зброї, у тому числі баражуючи боєприпасах типу “Шахед”.

На рис. І.7 наведено фото Російської цифрової антенної решітки «Комета-М» 2022 року виробу зі збитого над Україною безпілотною «Орлан-10».

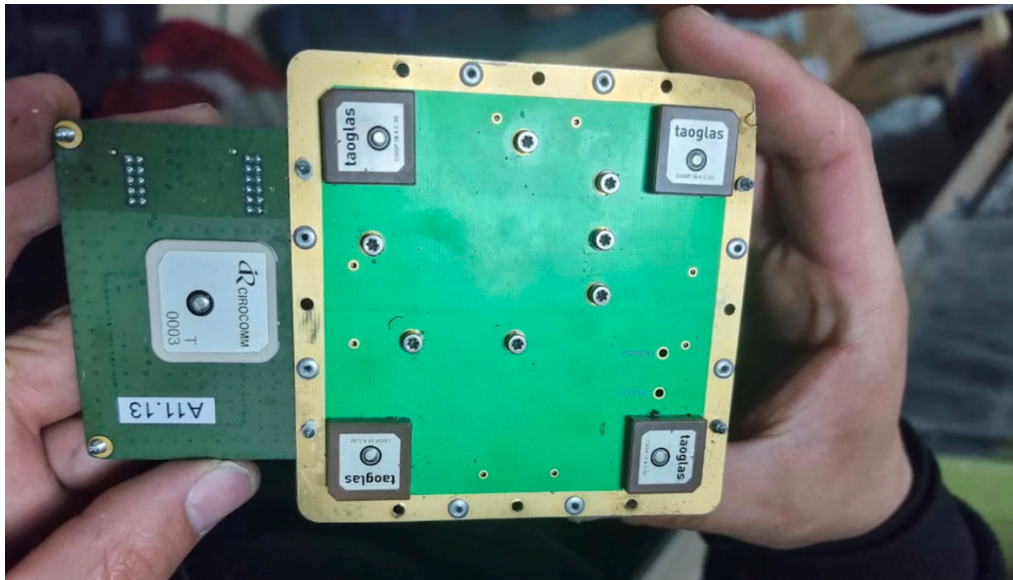


Рисунок І.7. ААР “Комета-М”

У цій “Кометі” використані компоненти американських компаній “Altera/Intel”, канадської “Taoglas” та тайванської Cirocomm. Нова “Комета-М” має розмір 100*100*30 та важить 150 грамів.

Чотириелементні малогабаритні адаптивні антенні решітки забезпечують захист навігаційних сигналів GNSS діапазону L1 (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, SBAS) з відкритим доступом (Open Service).

На рис. І.8 наведена діаграма спрямованості антени у разі придушення однієї завади.

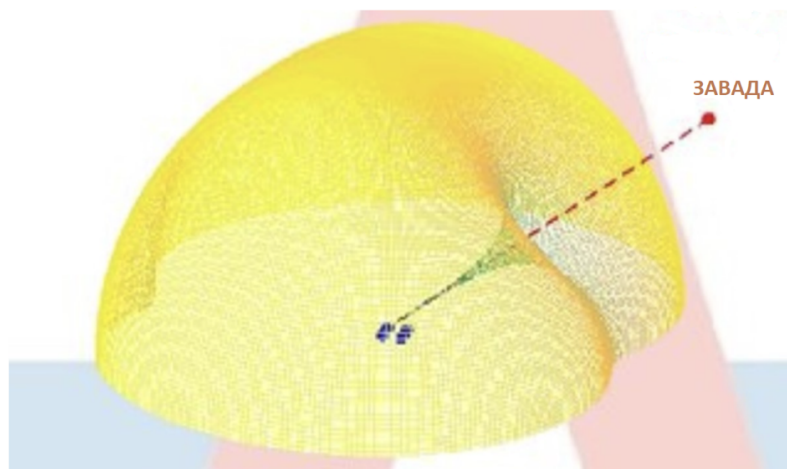


Рисунок І.8. Адаптивне формування “нуля” – провалу діаграми спрямованості у напрямку приходу завади

Анени цієї серії підвищують стійкість до завад на 40-50 дБ, що рівнозначно зменшенню радіуса придушення засобами РЕБ в 100-300 разів.

Основні результати випробувань показали, що «Комета» забезпечує підвищення завадостійкості на 32...56 дБ, забезпечуючи рівень завадостійкості $J/S=92...108$ дБ при впливі трьох широко-смугових/вузькосмугових завад ($N-1$).

На рис. I.9 наведена діаграма спрямованості антени у разі придушення декількох завад.

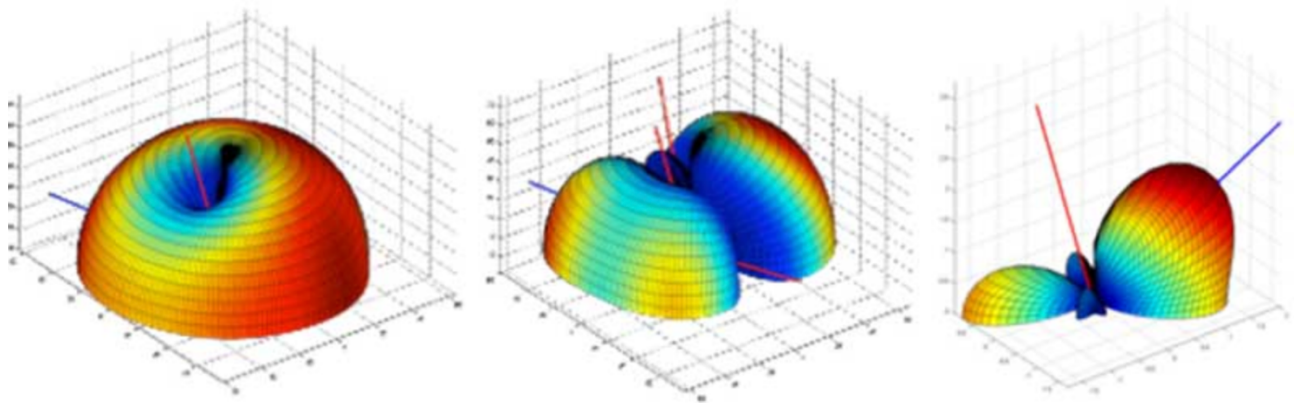


Рисунок I.9. Діаграми спрямованості у напрямку приходу декількох завад.

На рис. I.10 наведена CRPA антена «Комета Р8» (дві антени по 4 елементи), яка встановлена у ракеті «Іскандер» (антени встановлені замість відстрілюваних хибних цілей для РЛС).



Рисунок I.10. CRPA антени «Комета Р8», які встановлений у ракеті «Іскандер»

На рис. I.11 наведена ударний БПЛА типу «Shahed-136»/«Герань-2» з 4-елементной антенной «Комета».



Рисунок І.11. Ударний БПЛА типу “Shahed-136”/“Герань-2”
з 4-елементной антенной “Комета”

Для порушення роботи CRPA антен застосовують радіопридушення з допомогою одного або декількох радіопередавачів завад.

На рис. І.12 наведено графіки завадостійкості (залежність відстані, на якій забезпечується радіопридушення) систем навігації GPS і Глонас в залежності від потужності передавача завад. Дві верхні криві відносяться для звичайних навігаційних приймачів (без застосування технології CRPA). Дві нижні криві – це приймачі країн НАТО з антенами CRPA. Крім антенами CRPA для покращення завадостійкості використовують спеціальний кодований сигнал з М-кодом з окремими пелюстками у антен, які встановлені на супутниках. Цей код недоступний стороннім користувачам систем навігації. “Комета” по завадозахищеності знаходиться приблизно між двома нижніми кривими.

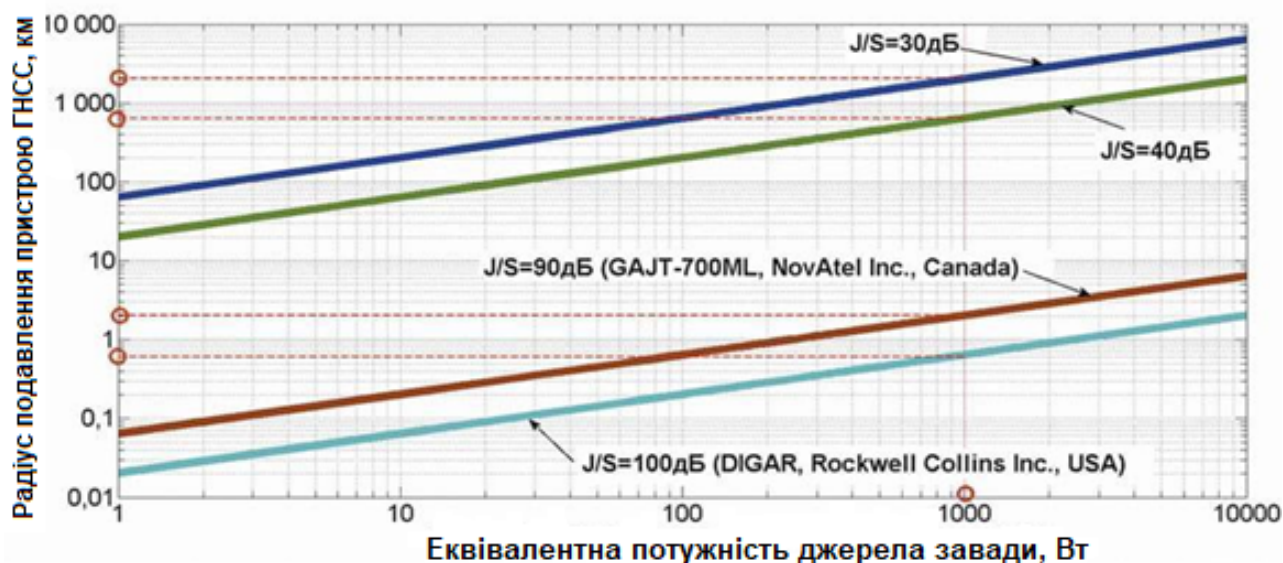


Рисунок І.12. Завадозахищеність приймачів супутникових навігаційних систем.

Для покращення характеристик СРРА антен збільшують кількість їх елементів та змінюють геометрію антен. Вже існують антени з 8, 12 та 16 елементами, зовнішній вигляд двох образків наведений на рис. І.13.

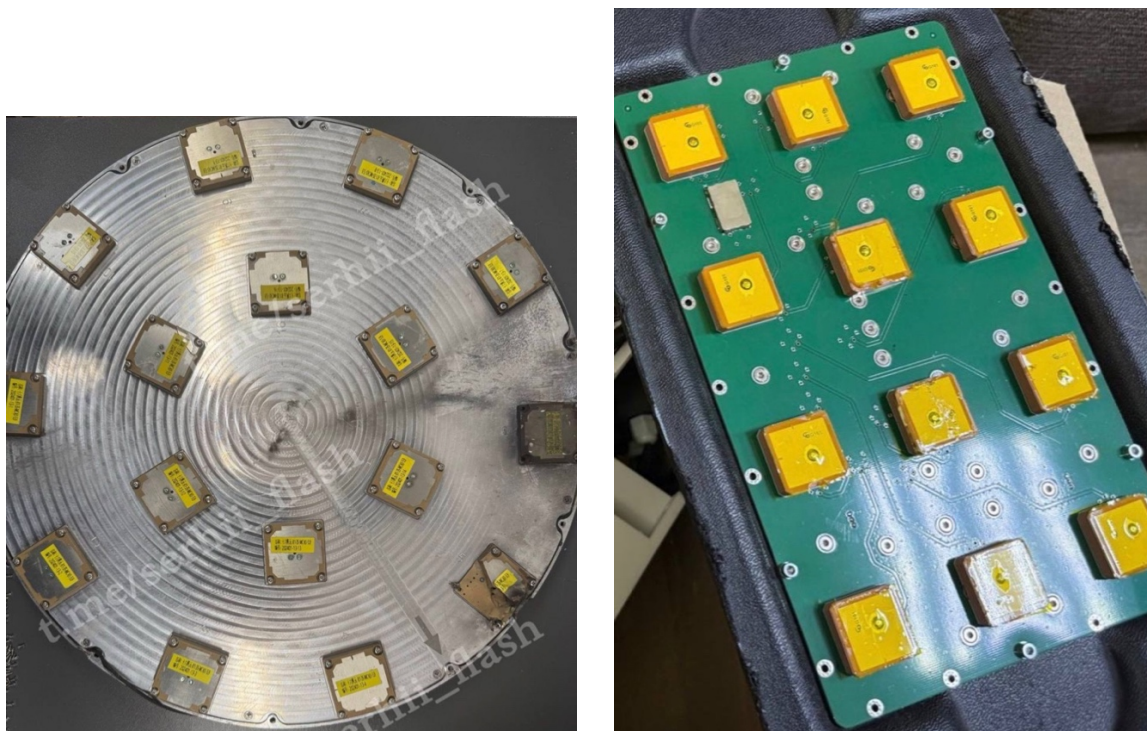


Рисунок І.13. Зовнішній вигляд ААР на 12 та 16 елементів

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Брагін А.С., Нестеренко І.К. “Основи управління використанням радіочастотного ресурсу”: навч. посіб. – Київ: Інститут телекомунікаційних систем НТУУ Київський політехнічний інститут, 2003, 374 с.
2. “Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем”. Учебн. пособие / Под ред. д.т.н., проф. М.А. Быховского. М.: Эко-Трендз, 2006. — 376 с.: илл.
3. Слободянюк П.В., Наритник Т.М., Благодарний В.Г., Сайко В.Г., Булгач В.Л. “Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу”: Навчальний посібник. К.: ДУІКТ, 2012. 596.
4. Іванов В.О., Габрусенко Є.І., Ільницький Л.Я., Щербина О.А. “Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури”: Навчальний посібник. К.: Національний авіаційний університет, 2014, 308 с.
5. Макарчук О.М. “Радіочастотний менеджмент”. Навчальний посібник /О.М. Макарчук, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов–К.: ВІТІ, 2018. 100 с.
6. Ільченко М. Ю, Наритник Т.М., Капштик С.В., Авдеєнко Г.Л., Корсун В.І., Присяжний В.І. “Планування та електромагнітна сумісність в безпроводових інфокомунікаціях”, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Електронне мережне навчальне видання, м. Київ, 2023, 275 с.
7. Лазебний В.С., Пілінський В.В., Швайченко В.Б. “Електромагнітна сумісність електронних засобів” [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ : КПП ім. І. Сікорського, 2023. 343 с.
8. Головін Ю.О., Шолохов С.М., Самборський І.І. “Електромагнітна сумісність спеціальних радіозасобів електронних комунікацій” [Електронний ресурс]: навчальний посібник. Київ : КПП ім. І. Сікорського, 2024. 324 с.
9. Закон України від 16.12.2020 № 1089-IX “Про електронні комунікації”.
10. Регламент радіозв’язку МСЕ.
11. Постанова Кабінету Міністрів України від 24.05.2017 № 355 “Про затвердження Технічного регламенту радіообладнання”.
12. Постанова Кабінету Міністрів України від 16.12.2015 № 1077 “Про затвердження Технічного регламенту з електромагнітної сумісності обладнання”.
13. Рекомендація МСЕ-Р Р.310-9. Визначення термінів, що стосуються поширення радіохвиль у неіонізованому середовищі.
14. Рекомендація МСЕ-Р Р.311-15. Збір, подання та аналіз даних при дослідженні тропосферного поширення.
15. Рекомендація МСЕ-Р Р.341-15. Концепція втрат передачі для радіоліній.
16. Рекомендація МСЕ-Р Р.368-9. Криві поширення земної хвилі у смузі частот між 10 кГц та 30 МГц.

17. Рекомендація МСЕ-Р Р.372-12. Радіошум.
18. Рекомендація МСЕ-Р Р. 525-5 Розрахунок загасання у вільному просторі.
19. Рекомендація МСЕ-Р Р.526-15. Поширення шляхом дифракції.
20. Рекомендація МСЕ-Р Р.527-6. Електричні характеристики поверхні Землі.
21. Рекомендація МСЕ-Р Р.530-18. Дані про поширення та методи прогнозування, необхідні для проектування наземних систем прямої видимості.
22. Рекомендація МСЕ-Р Р.452-15.Процедура прогнозування оцінки радіозавад між станціями на поверхні Землі при частоти вище приблизно 0,1 ГГц.
23. Рекомендація МСЕ-Р Р.832. Всесвітній атлас провідності землі.
24. Рекомендація МСЕ-Р Р.833-8. Ослаблення сигналів рослинністю.
25. Рекомендація МСЕ-Р Р.836-5. Водяні пари: щільність у поверхні Землі та загальний об'ємний вміст.
26. Рекомендація МСЕ-Р Р.1144-12. Посібник з використання методів прогнозування поширення радіохвиль, розроблених 3-ю Дослідницькою комісією з радіозв'язку.
26. Рекомендація МСЕ-Р Р.1546-6. Метод прогнозування для трас зв'язку пункту із зоною для наземних служб у діапазоні частот від 30 МГц до 4000 МГц.
27. М. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. VT- 29, No. 3, August 1980.
28. Hata/Davidson "A Report on Technology Independent Methodology for the Modeling, Simulation and Empirical Verification of Wireless Communications System Performance in Noise and Interference Limited Systems Operating on Frequencies between 30 and 1500MHz", TIA TR8 Working Group, IEEE Vehicular Technology Society Propagation Committee, May 1997.
29. ETSI TR 138 901 V16.1.0 (2020-11). 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16).
30. М.М. Горобец, О.О. Елизаренко, Особливості розрахунку енергетичних характеристик каналів рухового радіозв'язку. Радіотехніка, 2017, вип. 188, с.116-125.
31. P.L. Rice, A.G. Longley, K.A. Norton, and A.P. Barsis, "Transmission loss predictions for tropospheric communications circuits", Technical Note 101, revised 1/1/1967, U.S. Dept. of Commerce NTIA-ITS.
32. LONGLEY, A. G. and RICE, P. L. [1968] Prediction of tropospheric radio transmission loss over irregular terrain – A computer method. ESSA Tech. Report ERL 79-ITS 67.
33. Головін Ю., Нестеренко І., Василенко С. Методика розрахунку зон покриття цифрового телевізійного мовлення. Інформаційно-комунікаційні системи та технології (ICTEE). 2024; Вип. 3, Номер 2: с. 1-11.

34. Stylianos Kasampalis, Pavlos I. Lazaridis, Zaharias D. Zaharis, Aristotelis Bizopoulos, Spyridon Zettas, and John Cosmas, Senior Member IEEE /Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction. IEEE BMSB 2014 , pp. 1- 4.

35. NASA, “Shuttle Radar Topography Mission data”. Available on line at <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>.

36. ITU-R. HANDBOOK. TERRESTRIAL LAND MOBILE RADIOWAVE PROPAGATION IN THE VHF/UHF BANDS, 2009.

37. Roger Coudé, Webpage of Radio Mobile, site for downloads and How to <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>, freeware by VE2DBE.

38. Наказ Міністерства цифрової трансформації України від 17 березня 2025 року № 54 “Про затвердження Методики здійснення розрахунків електромагнітної сумісності”, зареєстрованим Міністерством юстиції 2 травня 2025 року за № 511/43917.

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0511-25> - Text

39. Рекомендація МСЕ-Р SM.337-6. Частотне і просторове рознесення.

40. Рекомендація МСЕ-Р Р.1812-6. Специфічний метод прогнозування поширення радіохвиль для наземних служб типу "точка-зона" в діапазоні частот від 30 МГц до 6000 МГц.

41. Рекомендація МСЕ-Р SM.328-11. Спектри и ширина смуги випромінювань.

42. Нестеренко І.К. Спрощений метод розрахунку коефіцієнта частотної вибіркової приймача// Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. Збірник наукових праць ВІТІ.2025, №7, 9 с.

43. Нестеренко І. К. Методичні рекомендації для виконання курсової роботи “Розрахунок електромагнітної сумісності локального угруповання радіоелектронних засобів”, К.:ВІТІ, 2025, 72 с.

44. Рекомендація МСЕ-Р SM.1134-1. Розрахунок інтермодуляційних завад у наземній рухомій службі.

45. Рекомендація МСЕ-Р SM.1138. Визначення необхідної ширини смуги частот з прикладами її розрахунку та відповідними прикладами позначення випромінювань.

46. Ільїнов М. Д., Нестеренко І. К., Янковський О. Г. Спосіб побудови компенсатора завад на основі використання багатовходових антенних систем// Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки. Збірник наукових праць ВІТІ. 2023, № 3, с. 14-20.

47. Ільїнов М.Д., Гурський Т.Г., Борисов І.В., Гриценко К.М. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої. Навчальний посібник /– К.: ВІТІ, 2018. – 250 с.

48. Ломан В.И., Нестеренко И.К. Поляризаационный компенсатор помех. Изв. Вузов. Радиоэлектроника, 1985, том 28 № 3, с. 59-61.

49. EMC ElectroMagnetic Compatibility, NATO Communication and Information (NCI) Agency. Матеріали навчального курсу “Spectrum management – PE 2013”.

50. Настанова “Короткохвильовий радіозв’язок”, ВКДП 6-143(03).01, 84 с., затверджена Наказом Командування Військ зв’язку та кібербезпеки Збройних сил України 24 грудня 2020 № 368/нагп.

51. Коваленко І.Г., Масесов М.О., Драглюк О.В. Ткаченко А.Л. Методика побудови радіорелейних (тропосферних) ліній на основі використання геопросторової інформації// Системи і технології зв’язку, інформатизації та кібербезпеки. Збірник наукових праць ВІТІ. 2023, № 3, с. 31-40.

52. Програмний комплекс “Розрахунку радіорелейних та тропосферних ліній "Ракурс”, Керівництво оператора, ВІТІ. 2023.

53. Якорнов Є. А., Авдеєнко Г. Л., Кулик О. В. Модель цифрової системи часового та просторового придушення завад для GPS приймачів. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми телекомунікацій – 2017”, Київ : КПП ім. І. Сікорського, 2017.