

Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і
робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Підвищення точності визначення інформативних
параметрів сигналів та пропускну здатності засобів радіозв'язку»

Виконав: студент 2 курсу, групи 601 ТТ
спеціальності 172 «Телекомунікації та
радіотехніка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Мерцалов Д. В.

(прізвище та ініціали)


Керівник Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Фомін О.С.

(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Освітній рівень магістр
Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій
 д.т.н., проф. О.В. Шефер
"02" _____ "09" _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Мерцалову Денису Володимировичу

1. Тема проекту (роботи) **«Підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів та пропускної спроможності засобів радіозв'язку»**
керівник проекту (роботи) **Шефер Олександр Віталійович, д.т.н., професор**
затверджена наказом вищого навчального закладу від 09.08.2024 року № 818-ф,а
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 19.12.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи). Вихідними даними є матеріали зібрані під час проходження переддипломної практики.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. Аналіз телекомунікаційних систем з використанням широкосмугових бездротових технологій. Особливості впливу надкороткого електромагнітного імпульсу на системи радіозв'язку. Оцінка потенційного впливу надкороткого електромагнітного імпульсу на системи радіозв'язку. Впровадження методу модуляції засобів широкополосного радіодоступу. Аналіз механізму впливу надкороткоімпульсного випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу. Розроблення критерію ефективності впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу. Розроблення методу ефективного впливу надкороткого випромінювання на засоби радіодоступу. Розроблення алгоритму автоматичного управління комплексом радіодоступу. Розрахункова оцінка дальності впливу випромінювання. Розроблення рекомендацій для підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів та пропускної спроможності засобів радіозв'язку. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
Об'єкт, предмет та мета роботи. Умовні спектри сигналів. Аналіз типової форми надкороткого електромагнітного імпульсу. Види перешкод та їх залежність від ширини спектру. Спектр OFDM сигналу. Двійкова та квадратурна фазові маніпуляції. Механізми впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу, що використовують BPSK та GMSK модуляції. Схема впливу послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів на прийом та демодуляцію

піднесучої частоти. Порівняльний аналіз впливу одиничних пакетів та пакетів імпульсів надкороткого випромінювання. Блок – схема алгоритму первинної обробки даних. Блок - схема алгоритму гілки визначення характеру випромінювання та формування пакетів. Блок - схема алгоритму гілки формування частоти випромінювання. Структурна схема діагностичної системи
6. Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор №	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Вступ. Аналіз телекомунікаційних систем з використанням широкополосних бездротових технологій.	07.10.24		15%	Пл. 1
2	Аналіз видів модуляції у бездротових мережах передачі даних. Дослідження та класифікація сигналів радіозв'язку.	16.10.24	I	25%	Пл. 2, 3
3	Оцінка потенційного впливу надкороткого електромагнітного імпульсу на системи радіозв'язку.	05.11.24		40%	Пл.4, 5
4	Аналіз механізму впливу надкороткоімпульсного випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу. Розроблення критерію ефективності впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу.	12.11.24		50%	Пл.6
5	Розроблення методу ефективного впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу. Розроблення алгоритму автоматичного управління комплексом широкополосного радіодоступу.	19.11.24	II	60%	Пл.7
6	Розрахункова оцінка дальності впливу надкороткого випромінювання при максимальних рівнях потужності імпульсів.	26.11.24		70 %	Пл. 8,9
7	Розроблення рекомендацій для підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів та пропускну здатності засобів радіозв'язку.	11.12.24		90 %	Пл. 10
8	Висновки. Формування додатків. Оформлення графічних матеріалів.	19.12.24	III	100%	Пл. 11, 12

Студент

Мерцалов
(підпис)

Мерцалов Д. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

О. В.
(підпис)

Шефер О. В.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	7
1.1 Аналіз телекомунікаційних систем з використанням широкосмугових бездротових технологій.....	7
1.2 Бездротові персональні мережі.....	7
1.3 Бездротові локальні мережі.....	9
1.4 Бездротові міські мережі.....	9
1.5 Види модуляції у бездротових мережах передачі даних.....	10
1.6 Висновки за розділом та постановка завдання дослідження.....	12
2. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА.....	13
2.1 Дослідження та класифікація сигналів радіозв'язку.....	13
2.2. Особливості впливу надкороткого електромагнітного імпульсу на системи радіозв'язку.....	17
2.3 Оцінка потенційного впливу надкороткого електромагнітного імпульсу на системи радіозв'язку.....	17
2.4 Огляд технічних засобів електромагнітного впливу.....	20
2.4.1 Засоби силового впливу.....	20
2.4.2 Засоби силового вузькосмугового впливу.....	20
2.4.3 Засоби силового широкосмугового впливу.....	21
2.4.3 Засоби інтелектуального електромагнітного впливу.....	23
2.5 Аналіз способів впливу на телекомунікаційні системи.....	24
2.6 Радіопридушення ліній радіозв'язку з підвищеною вразливістю.....	28
2.7 Висновок за розділом.....	30
3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	32
3.1 Впровадження методу модуляції засобів широкополосного радіодоступу...32	
3.2 Аналіз механізму впливу надкороткоімпульсного випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу.....	37

3.3 Розроблення критерію ефективності впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу	41
3.4 Визначення критеріальних параметрів надкороткого випромінювання...	44
3.5 Оцінка перекриття часових параметрів послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів та корисного сигналу.....	47
3.6 Розроблення методу ефективного впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу.....	51
3.7 Розвиток методу забезпечення ефективного впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу на основі вибору параметрів послідовності імпульсів.....	56
3.8 Розроблення алгоритму автоматичного управління комплексом широкополосного радіодоступу.....	59
3.9 Розрахункова оцінка дальності впливу надкороткого випромінювання при максимальних рівнях потужності імпульсів.....	68
3.10 Розроблення рекомендацій для підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів та пропускної спроможності засобів радіозв'язку.....	71
3.11 Висновки за розділом.....	72
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
ДОДАТКИ	79

ВСТУП

Сучасна тенденція збільшення обсягів переданої інформації, а також підвищення її захищеності вимагає високого ущільнення в каналах передачі різних середовищ, будь то оптичні, провідні та ефірні. Зростання сегмента ринку бездротового доступу до глобальної мережі інтернет дав великий імпульс для розвитку технології бездротової широкосмугової передачі даних, сформував гілка стандартів зв'язку IEEE 802.11, з високою щільністю каналів та високими швидкостями передачі інформації. З застосуванням цих стандартів будується великий спектр коштів бездротової передачі даних від засобів бездротового радіодоступу до мережі до засобів ретрансляції сигналу, які використовуються для формування мереж бездротової передачі даних різного масштабу від персональної до міської.

Важко переоцінити обсяг присутності засобів бездротового широкосмугового радіодоступу (ШРД) на сьогоднішній день, це і кошти організації «останніх миль» під час побудови телекомунікаційних каналів зв'язку, засоби організації елементів систем «розумний будинок», засоби побудови офісних бездротових систем зв'язку з доступом до корпоративної та глобальної мережі передачі даних, і звичайно засоби мобільного зв'язку. Висока частка використання таких коштів, а також величезні обсяги інформації, що передається, вимагають стійкого функціонування бездротових мереж передачі в умовах впливу різних деструктивних факторів.

Слід зазначити, що розвиток сучасних засобів ШРД йде шляхом використання сучасних методів цифрових модуляцій з розширенням смуги частот при високій щільності переданої інформації. Це веде і до зростання швидкості зміни станів модульованого сигналу. Сигнали, модульовані з розширенням спектру, як правило, мають більш низькі амплітудні показники, ніж вузькосмугові сигнали. Все це призводить до того, що тривалості імпульсів,

а також їх частота слідування можуть бути близькими до тривалостей символів та їх швидкості в модульованому сигналі і, як наслідок, будуть збільшувати ймовірність спотворення інформації, що приймається.

Водночас існуючі системи захисту бездротових каналів зв'язку в умовах впливу в основному полягають у зміні типу модуляції, зниження швидкості переданої інформації. Питання впливу зверх коротких імпульсів на корисний сигнал мало досліджено і немає достовірної інформації щодо механізму впливу на широкопasmові засоби радіозв'язку.

Широке використання широкопasmових систем бездротової передачі даних, як побутового, так і спеціального призначення ставить актуальним питання оцінки впливу на такі системи зв'язку.

На даний час відсутні дані щодо реакцій широкопasmових засобів бездротового радіозв'язку на вплив завад з амплітудами, що не призводять до наведення струмів у апаратній частині атакованих пристроїв, що вражають елементну основу. У зв'язку з цим особливо актуальним є досліджень впливу таких завад на широкопasmові засоби бездротового радіозв'язку для виявлення

можливості підвищення ефективності такого впливу без збільшення амплітудних характеристик поля, що впливає шляхом виявлення залежності зниження стійкого функціонування досліджуваних пристроїв від зміни часових параметрів.

Об'єктом дослідження є процеси передачі та обробки сигналів в системах радіозв'язку.

Предметом дослідження є методи, технології та алгоритми, які дозволяють оптимізувати пропускну спроможність каналів зв'язку.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є підвищення ефективності впливу надкоротких імпульсів на засоби радіозв'язку шляхом удосконалення методу оцінки завадостійкості засобів широкопasmового радіодоступу.

1. АНАЛИТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз телекомунікаційних систем з використанням широкосмугових бездротових технологій

На даний час мають велике розповсюдження широкосмугові засоби радіодоступу, що використовуються в багатьох сферах, спеціальних, побутових господарських та інших [1]. Можуть бути організовані різні топології зв'язку елементів, кожен елемент системи може виконувати різні функції від кінцевого пристрою до елемента, що генерує та/або обробляє дані, до пристроїв що забезпечують певні алгоритми маршрутизації.

Архітектура побудови телекомунікаційних систем з використанням бездротових технологій регламентується кількома стандартами IEEE 802 [2]. Вказані стандарти передбачають розподіл на персональні, локальні та мобільні бездротові мережі.

Особливо актуальним, в сучасних умовах розвитку телекомунікаційних систем, є використання бездротових технологій в широкосмугових засобах викликано широким застосуванням різних впливів для порушення стійкої їхньої роботи [3].

1.2 Бездротові персональні мережі

Бездротові персональні мережі WPAN (Wireless Personal Area) Network) регламентуються стандартом IEEE 802.15 і включають в себе відомі підстандарты Bluetooth, ZigBee, та інші. У Bluetooth застосовується модуляція з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти (англ. - Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS).

Модуляція FHSS проста у реалізації, забезпечує стійкість до ширококутових перешкод, а обладнання недороге. Згідно алгоритму FHSS, в Bluetooth несуча частота сигналу стрибкоподібно змінюється 1600 разів на секунду. Робочих частот кілька. Послідовність перемикання між цими частотами для кожного з'єднання псевдовипадкова і відома тільки приймачеві та передавачу, які синхронно перебудовуються кожні 625 мкс. Bluetooth забезпечує зв'язок на відстанях до 100 метрів при потужності передавача 100 мВт та швидкостях кілька Мбіт/с.

У мережі стандартів PAN також входять низькошвидкісні під стандарти зв'язку, найбільш відомим з яких є ZigBee. Тут максимальна дальність зв'язку обмежується відстанню 10 м і швидкістю близько 250 кбіт/с при дуже низькому споживанні енергії, що дає можливість використання таких засобів від автономних джерел живлення тривалий час (кілька років) без заміни елементів живлення.

У таких системах використовуються стандарти ширококутової модуляції з прямим розширенням спектру псевдовипадковою послідовністю, (Direct sequence spread spectrum - DSSS), або двійкова або квадратурна фазова маніпуляція (binary phase-shift keying - BPSK, quadrature phase shift keying - QPSK). Слід зазначити, що в зазначеній бездротовій мережі низькошвидкісної передачі даних, кожен бездротовий елемент може виконувати різні функції у мережі яка може мати різну топологію та може застосовуватися в побудові гібридних сильно масштабованих географічно рознесених мереж з мінімальною інфраструктурою та мільйонами кінцевих вузлів. Персональні бездротові мережі відрізняються порівняно низькими швидкостями передачі (за винятком нових розробок надширококутового радіозв'язку на високих несучих частотах), низьким енергоспоживанням, та малою відстанню дії, можуть використовуватися як засіб збору параметричних даних з датчиків, в системах

«Розумний дім», системах збору даних з датчиків в/на живому організмі, системах забезпечення бездротового міжблочного зв'язку різних пристроїв.

1.3 Бездротові локальні мережі

Бездротові локальні мережі даних (Wireless Local Area Network - WLAN) з відомою назвою Wi-Fi регламентуються набором стандартів IEEE 802.11 та використовуються для побудови комп'ютерних мереж аналогічно до побудови локальних мереж передачі даних (LAN) з використанням з використанням дротових технологій (кабель UTP – кручена пара).

Пристрої WLAN у порівнянні з WPAN мають інші межі масштабованості, вищі швидкості передачі інформації.

Збільшення швидкості вимагає застосування модуляцій із високим ущільненням. Найбільш поширеною модуляцією сигналу вказаному стандарті є мультиплексування з ортогональним частотним поділом каналів (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), основною особливістю якої є одночасна модуляція близько розташованих піднесучих і як слідство, зі швидкістю модуляції, що піднесуть назад пропорційною їх кількості. Також можуть застосовуватись модуляції DSSS та FHSS. Стандартом передбачено 11-14 каналів.

На кожному каналі смуга сигналу становить 22 МГц. Несуча частота близько 2.4 ГГц. Радіус дії таких систем при цьому може досягати близько 250 метрів.

1.4 Бездротові міські мережі

Бездротові міські мережі передачі даних (Wireless Metropolitan Area Network - WMAN) регламентуються стандартом IEEE 802.16 і широко відомі як WiMax мережі. Відстань між пристроями може бути близько кількох

кілометрів, адаптовані модуляції для обслуговування великої кількості користувачів зі спеціальними алгоритмами обслуговування мобільних користувачів. Потужність передавача порядку кількох ватів.

1.5 Види модуляцій у бездротових мережах передачі даних

Розглядаючи перелічені гілки стандартів IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16 можна виділити три основні типи використовуваних модуляцій FHSS, DSSS, OFDM, при цьому ці модуляції можна віднести до методу цифрової обробки сигналів перед модуляцією/демодуляцією на несучі частоти. Як відомо, при модуляції DSSS відбувається обробка псевдовипадкової послідовності, при якій один біт корисної інформації передається кількома бітами псевдовипадкової послідовності (чіпової послідовності). При модуляції OFDM відбувається мультиплексування потоку даних за кількома рядами розташованим несучим частотам, створюючи умови для модулювання кількох несучих з нижчими швидкостями зміни станів модульованої несучої частоти. При модуляції FHSS, за псевдо випадковим законом, відбувається зміна несучих частот. Перелічені методи модуляцій розширюють спектр сигналу, наприклад, при модуляції DSSS спектр розширюється в той же кількість разів, у яке збільшується кількість чіпових біт для передачі одного біта корисної інформації, причому приблизно в цю ж кількість разів буде знижена амплітуда модульованого сигналу. Перелічені методи дозволяють підвищити захищеність інформації, що передається, т.к. закони псевдовипадкового закону відомі лише взаємодіючим пристроям, і не впливають на пристрої з іншими псевдовипадковими законами. При модуляції OFDM розрахована на багато користувачів сумісність забезпечується за рахунок поділу по каналах, а також застосування методів адаптивної модуляції з гнучкою зміною параметрів

модуляції, у тому числі символної швидкості. На рис. 1.1 зображено умовний поділ типів модуляцій на нижній та верхній рівні.

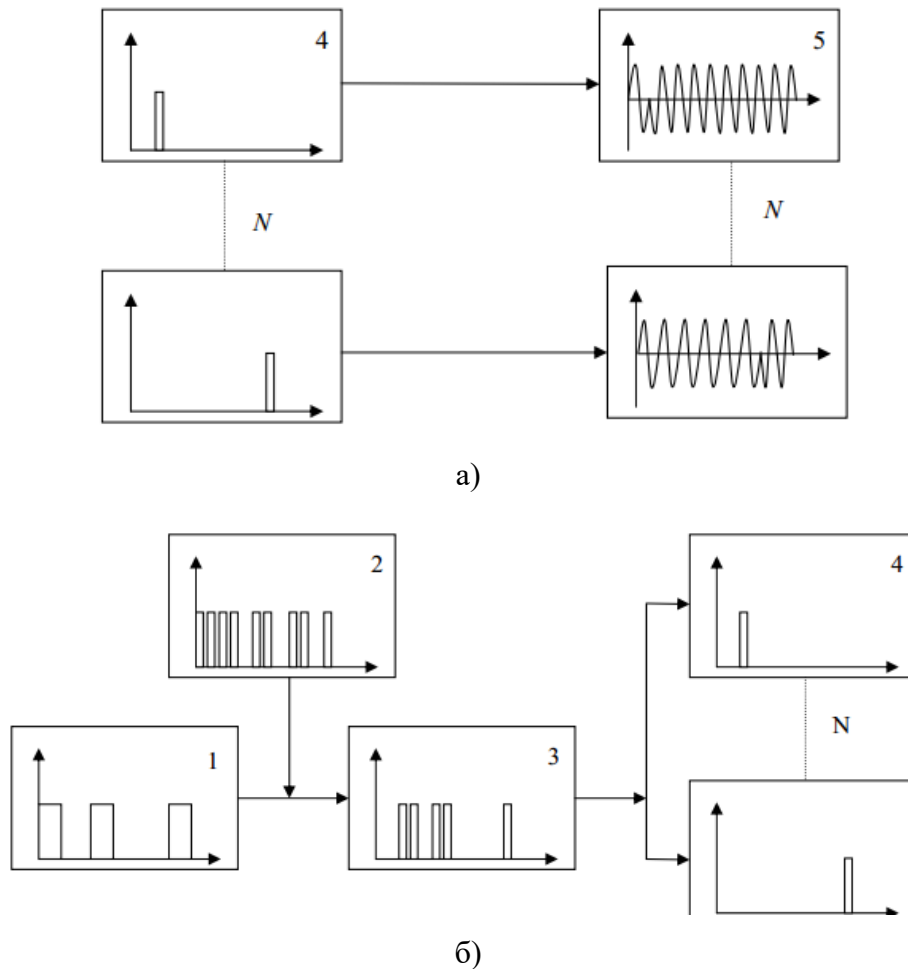


Рисунок 1.1 – а) нижній рівень модуляції; б) верхній рівень модуляції

1- вихідна інформаційна послідовність, 2- кодуєча послідовність, 3 – результуюча послідовність, 4 – N паралельних послідовностей зі зниженою швидкістю, 5 – N – модульованих несучих частот

Під модуляціями нижнього рівня розумітимемо методи накладання бітової цифрової послідовності на кожену несучу частоту, а модуляціями верхнього рівня методи обробки вихідного цифрового сигналу для формування бітових послідовностей для модуляції кожної з несучих частот як модуляції нижнього рівня в стандартах IEEE802.11, IEEE802.15, IEEE802.16 часто

застосовуються модуляції BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, верхній рівень DSSS, OFDM. Модуляція верхнього рівня полягає в оперуванні під несучими частотами та/або тимчасовими характеристиками сигналів, які будуть промодульовані на нижньому рівні, а також їх тимчасовими характеристиками.

1.6 Висновки за розділом та постановка завдання дослідження

Проведений аналіз сучасних телекомунікаційних систем з використанням широкосмугових бездротових технологій передачі даних показав їхню поширеність у різних сферах.

Відзначено схожість видів модуляції при побудові широкосмугових мереж радіодоступу різних масштабів, що говорить про те, що у випадку електромагнітної атаки, механізми, що відбуваються у різних широкосмугових засобах, будуть схожими.

Для досягнення поставленої у кваліфікаційній роботі магістра мети сформульовані такі завдання:

1. Провести аналіз стану проблеми забезпечення сталого функціонування засобів широкосмугового радіодоступу за умов впливу навмисних імпульсних електромагнітних випромінювань.

2. Провести аналіз основних видів джерел електромагнітних завад та параметрів генерованого випромінювання.

4. Визначення механізму впливу електромагнітних завад на засоби широкосмугового радіодоступу.

5. Розроблення алгоритму визначення інформативних параметрів сигналів та підвищення пропускнуєї спроможності засобів радіозв'язку.

Удосконалена телекомунікаційна система дозволить створити централізоване управління ресурсами систем контролю з метою підвищення ефективної її роботи.

2. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

2.1 Дослідження та класифікація сигналів радіозв'язку

Умовно сигнали радіозв'язку можна розділити на три групи: вузькосмугові, широкосмугові, надширокосмугові - відповідно займаній сигналом смузі спектра.

У різний час існували різні критерії спектральних меж для віднесення сигналу того чи іншого виду. Поділу на широкосмуговий та надширокосмуговий сигнал не було. У [4] введено визначення бази сигналу - це добуток активної ширини спектра F на тривалість T . Цей добуток називається базою сигналу B . Для вузькосмугового сигналу $B = FT \sim 1$, Для ШП сигналу $B = FT \gg 1$.

За іншими критеріями сигнал оцінювали як відношення ширини спектру сигналу до центральної частоти. Так до широкосмугових радіосигналам відносяться радіосигнали ширина спектру яких можна порівняти з центральною частотою. Іноді використовується коефіцієнт $1/10$, тобто. якщо ширина спектра становить близько $1/10$ від частоти, якою передається сигнал, сигнал вважається широкосмуговим.

Міністерством оборони США (DARPA) було визначено класифікацію відповідно до наступного розрахунку:

$$\Delta F = f_v - f_n / f_v + f_n,$$

де f_v і f_n — верхня та нижня межі смузі частот.

Системи або сигнали, що мають ΔF менше 0,01 (менше 1%), відносяться до вузькосмугових; (від 25% до 100%) відносяться до надширокосмугових.

Це визначення широко використовується на сьогоднішній день. Слід зазначити, що іноді в літературі застосовується визначення відносної смуги частот сигналу $\Delta f_0 = f_v/f_n$.

Федеральна комісія зв'язку США (FCC) прийняла нормативний документ, згідно з яким до надширокосмугових сигналів віднесені системи та сигнали, що мають хоча б одну з таких властивостей:

- ширина спектра випромінюваних сигналів $f_v - f_n$ (де f_v і f_n визначаються за рівнем 10 дБ щодо максимального значення спектру) не менше ніж 500 МГц;
- відношення ширини спектра $f_v - f_n$ (за рівнем -10 дБ) до середньої частоти спектра $(f_v + f_n) \div 2$ (відносна смуга частот) не менше ніж 0,2.

У стандарті міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) МЕК 61000-2-13 для класифікації сигналів вводиться процентна ширина спектру (percent bandwidth):

$$pbw = 2 (f_v - f_n)/f_v + f_n,$$

при цьому надширокосмуговий сигнал характеризується значенням ширини смуги частот у відсотках pbw від 163,4% до 200% або значенням відношення смуги частот понад десять.

До вузькосмугових систем радіозв'язку можна віднести поширені донедавна радіостанції з частотною, амплітудною модуляцією, як мовні, так і портативні засоби зв'язку. Пік енергії таких засобів, переважно, сконцентрований на частоті з крутими спадами на спектрі.

Підвищення бази у широкосмуговому сигналі досягається шляхом додаткової модуляції (або маніпуляції) за частотою чи фазою на часі тривалості сигналу. В результаті, спектр сигналу F (при збереженні його тривалості T) істотно розширюється.

У системах широкосмугового зв'язку ширина спектра випромінюваного сигналу F завжди набагато більше ширини спектра інформаційного повідомлення.

Широкасмугові сигнали отримали застосування в широкосмугових системах зв'язку, оскільки:

- дозволяють повною мірою реалізувати переваги оптимальних методів обробки сигналів;
- забезпечують високу завадостійкість зв'язку;
- дозволяють успішно боротися з багатопроменевим поширенням радіохвиль шляхом поділу променів;
- допускають одночасну роботу багатьох абонентів у загальній смузі частот;
- дозволяють створювати системи зв'язку з підвищеною прихованістю;
- забезпечують електромагнітну сумісність (ЕМС) сигналів зв'язку з вузькосмуговими системами радіозв'язку та радіомовлення, систем телевізійного мовлення;
- забезпечують краще використання спектра частот на обмеженій території порівняно з вузькосмуговими системами зв'язку.

На сьогоднішній день велике поширення набули різні засоби широкосмугового зв'язку (Wi-Fi, WiMax, CDMA, ZigBee та ін.), переважно працюють у діапазонах частот від 300 МГц до 3 ГГц. До основних переваг можна віднести високу пропускну здатність каналів зв'язку близько 100Мбіт/с, високу проникаючу здатність радіохвиль зазначеного діапазону. Дані стандарти зв'язку повсюдно використовують у мобільних та портативних пристроях доступу до мереж передачі даних у різного виду ретрансляторів, обладнання організації каналів зв'язку для порівняно невеликих відстаней близько 20 км.

Основною перевагою даного виду зв'язку є можливість організації каналів з більшою пропускну здатністю та високою завадостійкістю.

У звичайних вузькосмугових системах межі смуги визначаються частотами, на яких потужність сигналу стає удвічі (на 3 дБ) нижче, ніж у центрі спектру, де зазвичай розташовується несуча частота. Дане визначення зручне для систем, оскільки їх спектр зазвичай симетричний щодо несучої частоти та область спектру між точками, де потужність сигналу на 3 дБ нижче, ніж на частоті, що несе, містить не менше 90% всієї енергії сигналу.

Надширокосмуговий сигнал є коротким імпульсом без високочастотного заповнення або короткий відрізок періодичного коливання, що складається з одного - півтора - двох, максимум чотирьох періодів. Тому у надширокосмугових сигналах, зазвичай, відсутня поняття несучої частоти. Крім того, спектр надширокосмугових сигналів зазвичай не є симетричним. Фактично, у багатьох випадках більша частина енергії знаходиться нижче за частоту, яку можна було б назвати центральною.

Надширокосмуговий зв'язок - бездротова технологія зв'язку, яка фундаментально відрізняється від усіх інших радіочастотних комунікаційних систем. Унікальність у тому, що вона забезпечує бездротові комунікації без використання радіочастотної несучої. Натомість вона використовує модульовані імпульси енергії тривалістю менше однієї наносекунди. Крім специфічної природи, потужність сигналу практично на рівні шуму, що забезпечує захист переданої інформації - сигнали практично неможливо приймати нецільовою системою, особливо, на деякій відстані від функціонуючого пристрою. Цей факт робить надширокосмуговий зв'язок, можливо, найбільш безпечним з усіх бездротових систем зв'язку з точки зору захисту від несанкціонованого доступу до інформації.

NTIA продемонструвала потенційний вплив певних класів надширокосмугового сигналу та споживчого обладнання зв'язку, що випромінює радіочастотний сигнал відповідно до FCC Part 15, зі значним

зниженням характеристик більшості урядових та військових систем зв'язку та радіолокаційного обладнання (працюючих на частотах нижче 3,1 ГГц).

2.2 Особливості впливу надкороткого електромагнітного імпульсу на системи радіозв'язку

Основною особливістю впливу надкороткого електромагнітного імпульсу є те, що сформований імпульсом спектр перекриває спектр широкосмугового сигналу та порівнюємо зі спектром сигналу.

У стандарті МЕК 61000-2-13 розглядаються потужні електромагнітні дії (НРЕМ – High power electromagnetic). До НРЕМ відносяться електромагнітні випромінювання штучного походження з піковим електричним полем з напруженістю 100 В/м у частотному діапазоні від сотень мегагерц до кількох ГГц. Вибір такого частотного діапазону пов'язаний з тим, що досить інтенсивні сигнали в діапазоні від 200 МГц до 5 ГГц викликають ушкодження у багатьох системах [5]. Даний стандарт розглядає електромагнітний імпульс як частину НРМ, куди входять також інші види впливів у тому ж частотному діапазоні, наприклад, вузькосмугові випромінювання (НРМ – High power microwave).

Таким чином, згідно зі стандартом МЕК 61000-2-13 під електромагнітним імпульсом розуміються імпульсні електромагнітні поля штучного неядерного походження з параметрами: $pbw > 25\%$; амплітуда електричного поля – 100 В/м та більше; частотний діапазон від сотень МГц до кількох ГГц.

2.3 Оцінка потенційного впливу надкороткого електромагнітного імпульсу на системи радіозв'язку

Виходячи зі специфіки надкороткого електромагнітного імпульсу, для оцінки потенційного впливу необхідний підхід, аналізуючий перекриття

областей спектра, що впливає імпульсу та спектру сигналу в точці прийому. Потенційний вплив може бути надано при перекритті більшої площі спектру корисний сигнал. На рис. 2.1 умовно зображені спектр надширокосмугового, широкосмугового, вузькосмугового сигналів зв'язку та надкороткого електромагнітного імпульсу.

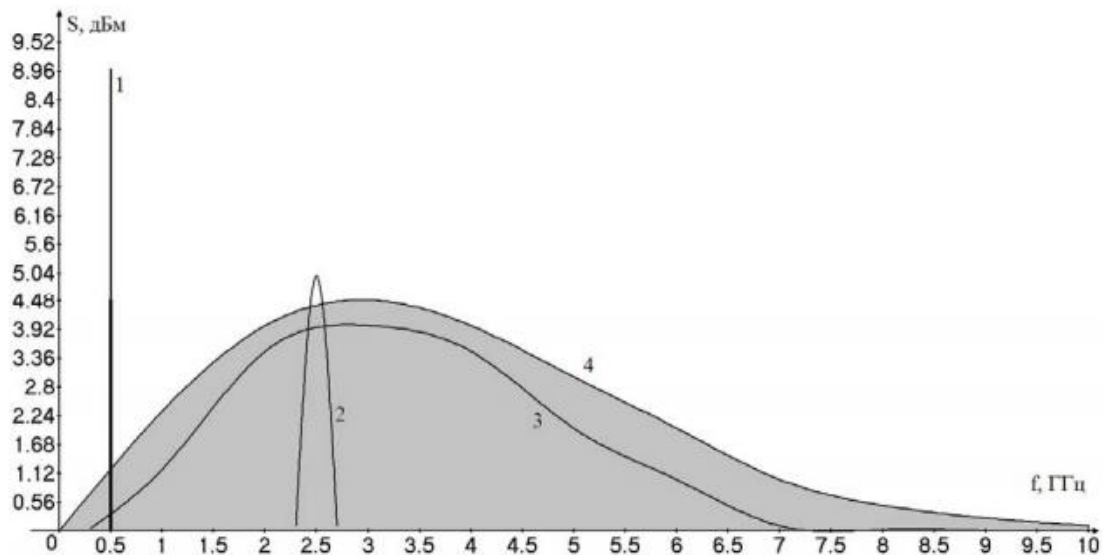


Рисунок 2.1 – Умовні спектри сигналів: 1 – вузькосмуговий зв'язок, 2 – широкосмуговий зв'язок, 3 – надширокосмуговий зв'язок, 4 – надкороткий електромагнітний імпульс

Надкороткий електромагнітний імпульс через свою широкосмуговість та відносно постійну спектральну щільність потужності, має різний вплив на різні системи зв'язку при тих самих енергетичних характеристиках. З урахуванням зіставлення спектрів можна дійти невтішного висновку про наступних ступенях впливу надкороткого електромагнітного імпульсу на засоби зв'язку, у порядку зменшення:

1. Надширокосмугові засоби зв'язку.
2. Широкополосні засоби зв'язку.
3. Вузькосмугові засоби зв'язку.

Зважаючи на дискретний характер послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів, потенційний ступінь впливу на цифрові засоби зв'язку вище ніж аналогові, й необхідно враховувати крім ступеня спектрального перекриття, перекриття у часовому інтервалі.

За умов частоти проходження імпульсів широкосмугової перешкоди нижче, ніж символна послідовність модульованого сигналу, буде нижче, ніж за сумірної або вищої частоти проходження імпульсів широкосмугової перешкоди. Це обумовлено інтегрованими можливостями більшості засобів зв'язку зберігати канал передачі інформації з можливістю повторного відправлення пошкоджених пакетів інформації, при проходженні мінімального відсотка неушкоджених пакетів.

Що стосується впливу на апаратну частину аналізованих засобів радіозв'язку, то тут необхідно керуватися загальновідомими правилами оцінок якості екранування, заземлення. Розрахунок рівнів наведень не залежить від типу системи радіозв'язку. Різниця у впливі може залежати лише від якості екранування та внутрішніх тактових частот систем обробки інформації.

Шляхом оцінки ступеня перекриття спектрів та часових інтервалів проходження корисного сигналу і завади, можна зробити приблизну оцінку впливу. Необхідно враховувати, що важливу роль може відіграти спосіб модуляції та обробки інформації при її передачі каналом радіозв'язку, який може виключити повну втрату зв'язку під час спотворення та знищення частини пакетів, що передаються. Слід також відзначити високий потенціал стійкості надширокосмугових каналів зв'язку до впливу надкороткого електромагнітного імпульсу при правильно організованому способі модуляції та обробки переданої інформації.

2.4 Огляд технічних засобів електромагнітного впливу

2.4.1 Засоби силового впливу

Засоби електромагнітного впливу використовуються для навмисного погіршення радіоелектронних характеристик пристроїв, аж до повного їх виходу з ладу шляхом впливу на елементи цих пристроїв електромагнітним полем. Засоби електромагнітного впливу можна умовно поділити на силові (Електромагнітні впливи великої потужності) та інтелектуальні.

Загалом, у разі коли рівень електромагнітних впливів великої потужності перевищує рівень електромагнітних перешкод, що діють на системи за звичайних умов експлуатації (наприклад, перевищують

100 В/м або 100 В), то при такому впливові основним ефектом стають значні наведення в ланцюгах пристроїв, що призводять до їх фізичного виходу з ладу, внаслідок ураження елементної основи. В окремих випадках напруження електромагнітного поля може не вистачити для ураження елементної бази, але атакований пристрій у період дії може значно погіршити свої робочі характеристики аж до блокування роботи, але після зняття поля повністю відновити роботу, можливо лише за допомогою оператора [4, 5].

Силові засоби електромагнітного впливу можна поділити на засоби вузькосмугового впливу та засоби широкосмугового (надширокосмугового) впливу.

2.4.2 Засоби силового вузькосмугового впливу

Засоби вузькосмугового впливу генерують і випромінюють у простір електромагнітні коливання певної частоти з високою напругою

електромагнітного поля. Використання тонкої лінії робить вплив більш енергоефективним.

Підбір частоти впливу відбувається з оцінки екранування об'єктів впливу, їхньої топології, розмірів внутрішніх провідникових ліній (сигнальних, приймальних трактів та ін.) з метою формування на них максимальних наведених струмів та напруг. Такий вплив призводить до перевищення регламентованих струмів і напруг у радіоелектронних пристроях, що може призвести до збоїв, спотворення інформації, що передається та обробляється, а також при більш високі напруженнях може призвести до фізичного виходу з ладу радіоелектронних пристроїв через ураження їх елементної бази [6].

2.4.3 Засоби силового ширококутового впливу

Засоби ширококутового (надширококутового) впливу генерують поодинокі чи послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів, що породжують просторі надширококутові перешкоди зі спектром від сотень МГц до одиниць ГГц. Породження такого спектру відбувається на основі надширококутового перехідного процесу, яким є надкороткий електромагнітний імпульс із тривалістю фронту близько сотень пікосекунд [7].

Енергія такого випромінювання не сконцентрована на одній частоті, а розподілена по всьому спектру. Енергоефективність такого випромінювання виходячи з поняття спектральної щільності енергії нижче, ніж у вузькокутового випромінювання, але враховуючи одночасну генерацію у широкій смузі спектра можна говорити про високу ефективність впливу за рахунок можливості проникнення перешкоди і, отже, наведення напруги та струмів, через уразливості у фільтрах, екрануванні. На рис. 2.2 зображено форму надкороткого електромагнітного імпульсу.

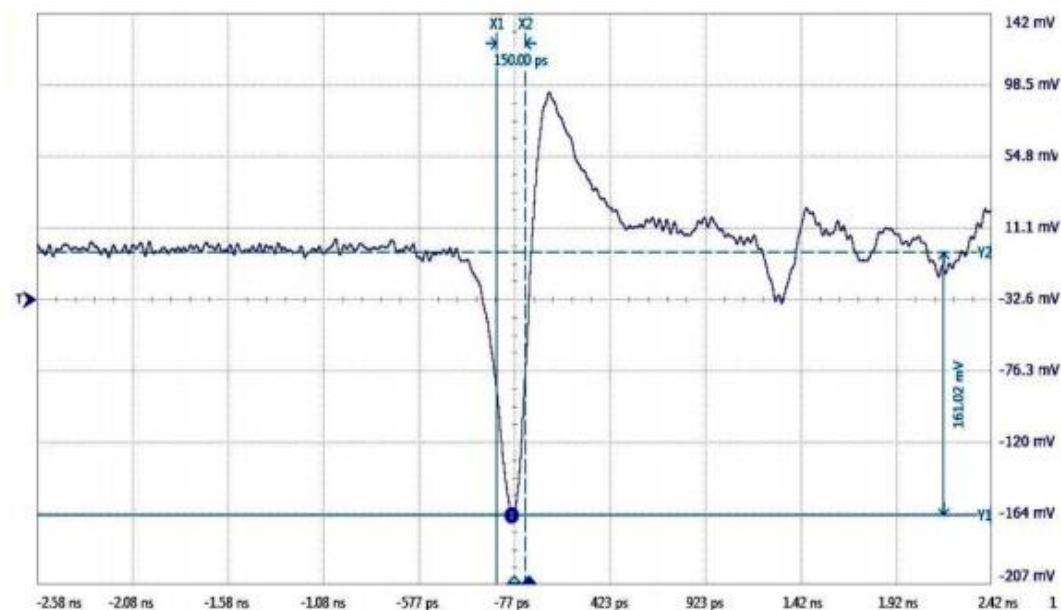


Рисунок 2.2 - Типова форма надкороткого електромагнітного імпульсу

Від крутості фронту (перехідного процесу) залежить ширина генерованого спектру, що коротше тривалість фронту, тим ширше спектр. Так при надкороткому імпульсі з тривалістю фронту 150 пс ширина спектру буде від одиниць МГц до одиниць ГГц. Слід зазначити, що як при дії вузькосмугового сигналу так і послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів можливо формувати сигнали різної тривалості та повторюваності.

В даний час у різних країнах створена велика кількість випромінювачів, амплітудно-часові характеристики яких варіюються у широкому діапазоні.

При вирішенні ряду завдань щодо оцінки стійкості технічних засобів до їх впливу виявилось зручним використовувати типову форму, показану на рис. 2.2

При вузькосмуговому, широкосмуговому (надширокосмуговому) силовому впливі, також слід відзначити характер виникнення збоїв у радіоелектронній апаратурі та апаратурі обробки даних

За порівняно малих напруженнях поля, якого не вистачає для ураження елементної бази, але достатньої для наведення струмів та напруг у ланцюгах

управління та обробки інформації, порівнянних з регламентними рівнями пристроїв, можуть виникати помилкові спрацьовування, помилкові біти під час обробки інформації.

Для такого впливу без ураження апаратної частини, частоту впливу вузькосмугового електромагнітного поля слід вибирати виходячи з аналізу швидкості обробки інформації атакованих пристроїв (швидкості опитування станів сполучених блоків). При сумірній частоті впливу поля та частоті обробки інформації атакованого пристрою ймовірність збоїв збільшується.

2.4.4 Засоби інтелектуального електромагнітного впливу

Системи інтелектуального електромагнітного впливу за мету ставлять вплив на антенно-фідерні системи, без особливого акценту на силовий вплив апаратної частини цих пристроїв. Засіб впливу генерує сигнали з несучою частотою, модуляцією, кодуванням, які аналогічні корисному сигналу. При цьому згенерований сигнал може бути, як імітація корисного, але з іншим змістом, таким, що суттєво знижує пропускну здатність каналу радіозв'язку аж до його блокування. Важливою частиною таких засобів є пристрій перехоплення та аналізу корисного сигналу. Слід зазначити, що такі засоби ефективні тільки при відомих аналізатору кодуваннях та алгоритмах модуляції. Однак, широке поширення на сьогодні нових захищених алгоритмів кодування сигналу імітація певної інформації буде вкрай складна.

Напівпровідникові генератори перешкод в даний час швидко прогресують. Імпульсна потужність генератора на основі одного напівпровідникового ключа наближається до значення 0,2 ГВт, а фронт при використанні напівпровідникового загострювача складає 0,2 нс. Друге надзвичайно важливе досягнення – на рівні вихідної напруги 10 – 15 кВ вдалося

синхронізувати між собою 81 незалежний генератор з розкидом 30 пс в інтервалі частот 0 -10 кГц.

Генератор на 100 МВт з робочою напругою 60 -70 кВ та частотою 1 кГц має вагу 1 кг при габаритах 40 * 200 * 100 мм [8].

Наведені дані свідчать про можливість створення випромінювачів гігаватного рівня на основі рупорів з електронним поворотом максимуму випромінювання.

Перевагами такої випромінюючої системи є:

- високий ККД порівняно з параболічним відбивачем;
- безперервність роботи та висока ресурсомісткість через рівномірність розподілу загальної вихідної потужності по кількості напівпровідникових ключів, що дорівнює кількості рупорів у ґратах;
- гнучкість управління напруженістю створюваного надкородкового випромінювання;
- можливість формування високої частоти повторення імпульсів, з можливістю пакетування імпульсів;
- можливість високоточної синхронізації імпульсів для формування сумарної потужності випромінювання від усіх рупорів у заданій точці простору.

2.5 Аналіз способів електромагнітного впливу на телекомунікаційні системи

Радіоелектронне придушення (РЕП) входить до складу заходів радіоелектронної боротьби (РЕБ) – і є радіоелектронне придушення або ураження радіоелектронних об'єктів. При дії засобами зв'язку розрізняють функціональне ураження та радіоелектронне придушення.

Функціональна ураження полягає у руйнуванні (ушкодженні) елементів та вузлів радіоелектронних засобів та порушення цілісності інформації.

Радіоелектронне придушення полягає у зниженні ефективності (якості) функціонування радіоелектронних об'єктів шляхом впливу на їх приймальні пристрої активними та пасивними радіоелектронними перешкодами.

Загалом, радіоелектронні перешкоди – це електромагнітні випромінювання, які погіршують якість функціонування радіоелектронних засобів (РЕМ), перешкоди імітують або спотворюють інформаційні сигнали та ускладнюють або виключають виділення корисної інформації, знижують дальність дії та точність роботи автоматичних систем керування. Під дією перешкод РЕМ та телекомунікаційні системи можуть перестати бути джерелами інформації незважаючи на їх повну справність та працездатність.

Так як придушити різноманітні РЕМ перешкодами одного виду неможливо, то застосовують спеціальні види, що відповідають тим або іншим засобам атаки.

З урахуванням тематики магістерської кваліфікаційної роботи розглядатимуться в якості об'єкту впливу засоби широкосмугового радіозв'язку, та відповідні їм методи впливу РЕБ.

За ефектом впливу на РЕМ розрізняють маскуючі та імітуючі перешкоди. Маскуючі перешкоди погіршують характеристики приймального пристрою РЕМ, що збільшує кількість прийнятих символів та знижують інформативність повідомлення, створюють основу, на якій повністю виключається виявлення, розпізнавання, виділення корисних сигналів чи позначок цілей. При збільшенні потужності перешкод їхня маскуюча дія зростає.

Імітуючі (дезінформуючі) перешкоди – це сигнали, випромінювані станцією перешкод для внесення неправдивої інформації на атаковані засоби. За структурою вони близькі до корисних сигналів, тому створюють в кінцевому пристрої РЕМ сигнали хибних змістів, подібні до реальних, знижують пропускну здатність системи, призводять до помилкових реакцій атакованої системи.

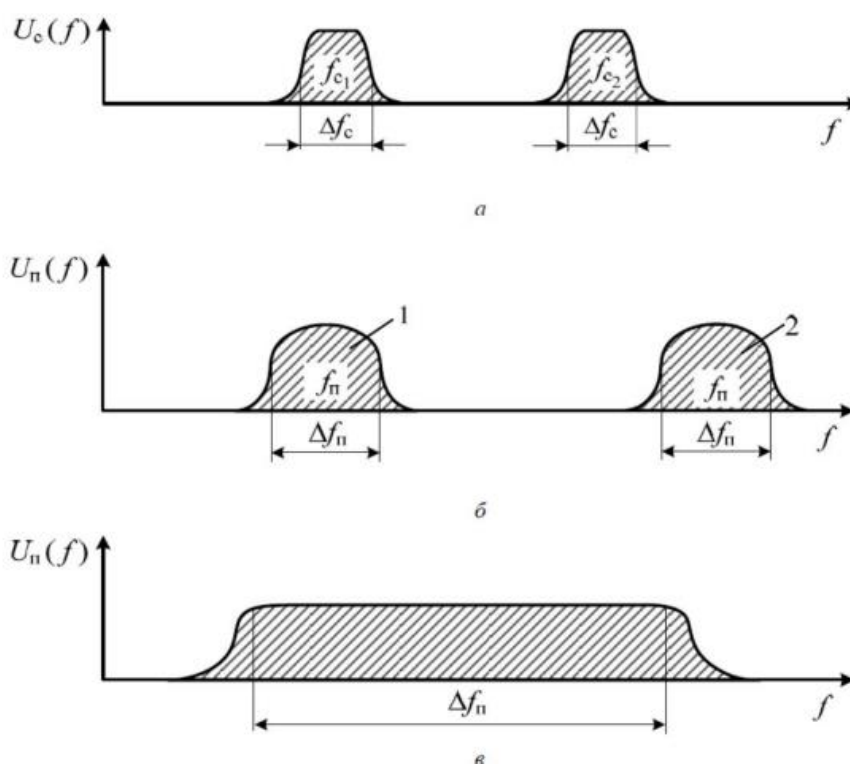


Рисунок 2.3 - Види перешкод залежать від ширини спектра. а – корисний сигнал, б - прицільні перешкоди, в- загороджувальна перешкода

За умови впливу імітуючих перешкод характеристики приймального пристрою не погіршуються. Одним випадком імітуючої перешкоди є ретрансляційна перешкода, що повністю повторює корисний сигнал. Ефект впливу перешкод погіршує якість оброблюваної інформації внаслідок її руйнування чи спотворення, що збільшує ступінь невизначеності після прийняття рішень.

Залежно від способу наведення перешкод, співвідношення ширини спектрів перешкод та корисних сигналів зображені на рис. 2.3, де: а) маскуючі перешкоди, що поділяють на загороджувальні (рис. 2.3, в) та прицільні (рис. 2.3, б; 1 – перешкода збігається по частоті з сигналом; 2 – перешкода не збігається по частоті з сигналом РЕМ).

Загороджувальні перешкоди мають ширину спектру частот, що значно перевищує смугу, яка займається корисним сигналом, що дозволяє пригнічувати одночасно кілька РЕМ без точного наведення передавача перешкод (ПП) за частотою. Їх можна створювати, не маючи повних даних про параметри сигналів РЕМ, що пригнічуються.

Особливістю загороджувальних перешкод є те, що при незмінній потужності ПП їх спектральна щільність потужності G_n (Вт/МГц) зменшується з розширенням спектру випромінювання. При рівномірному спектрі вона є відношенням енергетичного потенціалу передавача перешкод $P_{nn} * G_{nn}$ до ширини спектра частот перешкоди f_n .

Для суцільної загороджувальної перешкоди маємо:

$$G_n = P_{nn} G_{nn} / \Delta f_n. \quad (2.1)$$

Наприклад, якщо ПП, що має еквівалентну потужність 5000 Вт створює загороджувальні перешкоди в діапазоні частот від $f_1 = 9\,500$ МГц до $f_2 = 10\,000$ МГц ($\Delta f_n = 500$ МГц), то $G_n = 5000/500 = 10$ Вт/МГц.

Прицільні перешкоди мають ширину спектру, рівну або в 1,5-2 рази вище ширини спектру сигналу, пригнічуваного РЕМ. Ефективність їх впливу залежить від точності суміщення частотою з корисним сигналом. Прицільні перешкоди характеризуються високою спектральною щільністю потужності. Оскільки вони випромінюються у вузькій смузі частот, то можуть бути реалізовані малопотужними ПП.,

Наприклад, передавач радіоперешкод має потужність випромінювання лише 150 Вт і коефіцієнт підсилення антени $G_{nn} = 100$, здатний створити у смузі 5 МГц щільність потужності, що дорівнює 3000 Вт/МГц, а в смузі 0,5 МГц – 30 кВт/МГц.

Одним із способів формування загороджувальних перешкод є застосування ковзних за частотою перешкод, що утворюються при швидкій перебудові передавача вузькосмугових перешкод у широкій смузі частот. Завдяки цьому у смузі частот кожного каналу багатоканального РЕМ або кількох станцій послідовно зосереджується досить висока щільність потужності, необхідна для їх придушення. Однак за наявності схем захисту ефективність цих перешкод може виявитися нижчою, ніж загороджувальних, створених передавачем, що не має перебудови за частотою. Недоліком прицільних перешкод є те, що вони одночасно можуть придушувати лише одне РЕМ, що працює у цьому діапазоні хвиль.

За часовою структурою випромінювання, радіоелектронні перешкоди поділяють на безперервні та імпульсні. Безперервні перешкоди являють собою безперервні електромагнітні випромінювання, модульовані за амплітудою, частотою або фазою. Імпульсні перешкоди мають вигляд немодульованих чи модульованих радіоімпульсів.

Несинхронні хаотичні імпульсні перешкоди (ХІП) являють собою послідовності радіоімпульсів, параметри яких (тривалість, амплітуда, часові інтервали між імпульсами) змінюються випадковим чином. У системах радіозв'язку ці перешкоди маскують повідомлення, що передаються. Об'єктом впливу перешкод, створених радіоліній радіозв'язку, є приймальний пристрій.

2.6 Радіопридушення ліній радіозв'язку з підвищеною вразливістю

Підвищення перешкодозахищеності, як правило, відбувається шляхом штучного розширення спектру шляхом додаткових модуляцій вихідного сигналу, при цьому спектр результуючого сигналу збільшується, переводячи

його в клас ширококутових сигналів. Існує кілька видів штучного розширення спектра.

Радіотехнічні системи з псевдовипадковою перебудовою робочої частоти (ППРЧ) (FHSS) ефективні в умовах потужних зосереджених перешкод, у боротьбі із завмираннями при багатопроменевому поширенні радіохвиль. У таких системах використовуються частотно-часовий сигнал, що є послідовністю наступних один за одним радіоімпульсів. Ці імпульси передаються на різних частотах, причому смуга частот кожного імпульсу становить ΔF_c і можлива одночасна передача кількох імпульсів різних частотах. Їх зазвичай зображують за допомогою частотно-часової матриці, що визначає закон кодування імпульсів за частотою та часом. Ці системи застосовують також для селекції сигналів (за формою) під час роботи великої кількості багатоадресних систем зв'язку у загальній смузі частот.

Для придушення систем ППРЧ необхідно мати або певну кількість прицільних за частотою передавачів перешкод, або створювати потужну загороджувальну перешкоду, що має ширину спектру, яка перебиває діапазон перебудови частоти пригнічуваного приймача. Можливе застосування ковзної по частоті перешкоди, що утворюється при швидкій перебудові передавача вузькосмугових перешкод у широкій смузі частот. Однак за наявності схем захисту ефективність ковзаючих за частотою перешкод може виявитися нижче, ніж загороджувальних.

Ширококутові (ШПС) фазоманіпульовані сигнали (QPSK, BPSK), є складними сигналами з великою величиною основи, у яких добуток ширини спектра на тривалість набагато більше одиниці. Такі сигнали часто називають шумоподібними. Часто в системах ширококутового радіозв'язку можна зустріти використання зворотного зв'язку, для корекції способів кодування та модуляції у разі виявлення перешкоди.

Системи радіозв'язку зі зворотним зв'язком відрізняються тим, що відбувається перевірка якості переданих повідомлень з корекцією на передавальному рівні. Наявність каналів зворотного зв'язку дозволяє підвищити уразливість за рахунок збільшення часу передачі. Якоюсь мірою це еквівалентно введенню коригувальних кодів (надмірності).

Для придушення систем радіозв'язку зі зворотним зв'язком необхідно ставити потужну загороджувальну перешкоду. Звідси випливає висновок: для придушення таких систем потрібно ставити загороджувальні за кодом перешкоди, або хаотично-імпульсні перешкоди (ХІП), або ретрансляційні перешкоди.

Отже, надширокоімпульсне випромінювання має великий потенціал як завадоутворюючих засобів. Їх можна розглядати як засіб постановки перешкод, що відносяться до загороджувальних, маскувальних та імпульсних, при впливові на широкосмугові засоби зв'язку, а при впливові на надширокосмугові засоби зв'язку перешкоди потенційно можна віднести до прицільних, або імітуючих перешкод.

2.7. Висновки за розділом

1. Проведений порівняльний аналіз уразливостей різних систем радіозв'язку при впливові надширокоімпульсного випромінювання виявив високий рівень вразливості систем широкосмугового та надширокосмугового радіозв'язку такому впливу, ніж вузькосмугових систем зв'язку. Порівняльний аналіз технічних засобів впливу виявив відмінні особливості, як силового (вражаючого) впливу, так і перешкодоутворюючого впливу.

2. Огляд методів впливу РЕБ дозволив класифікувати такі випромінювання, як засіб постановки перешкод, які можна віднести, при

впливові на широкосмугові засоби зв'язку до загороджувальних, маскуючих та імпульсних.

3. З проведеного аналізу випливає необхідність дослідження механізмів впливу зазначених випромінювань на стійкість функціонування телекомунікаційних систем та виявленням залежності зміни характеристик досліджуваних пристроїв від часових параметрів прямування імпульсів.

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Впровадження методу модуляції в засоби широкополосного радіодоступу

Розглянемо найчастіше зустрічаються види модуляцій, застосовувані у системах бездротової передачі. Як було зазначено у розділі 1, існують кілька видів модуляцій вищого рівня, що оперують вихідною бітовою послідовністю для додаткового її кодування, шифрування, поділу на кілька паралельних потоків інформації для наступного накладання на кілька несучих частот.

Наявність кількох потоків передачі інформації, модуляція псевдовипадковою послідовністю та застосування фазової маніпуляції розширюють спектр, дозволяють упаковувати велике кількість незалежних потоків інформації, маючи розрахований на багато користувачів доступ.

Слід зазначити причини високої популярності використання у сучасних засобах бездротової передачі даних цифрову модуляцію (модуляцію вищого рівня) з ортогональним поділом каналів (OFDM). Відзначається висока ефективність використання радіочастотного спектру, що пояснюється майже прямокутною формою огинаючої спектра при великому кількості піднесених частот, простою апаратною реалізацією, де базові операції реалізуються методами цифрової обробки, гарне протистояння міжсимвольним перешкод та інтерференції між піднесучими і, як наслідок, некритичністю до багатопроменевого поширення, можливість застосування різних схем модуляції для кожної піднесучої, що дозволяє адаптивно варіювати перешкодостійкість та швидкість передачі інформації. До мінусів такої модуляції слід віднести, необхідність високої синхронізації частоти та часу, чутливість до ефекту Доплера, що обмежує застосування OFDM в мобільних системах, захисний інтервал, що використовується в OFDM для боротьби з багатопроменевим

поширенням, знижує спектральну ефективність сигналу. На рис.2.1 зображено спектр OFDM сигналу [84].

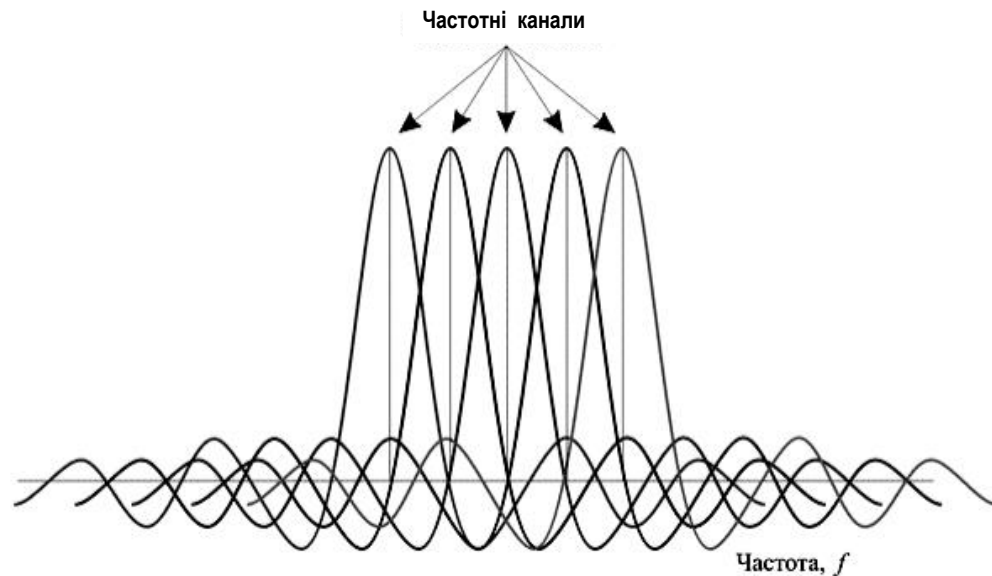


Рисунок 3.1 – Спектр OFDM сигналу

Для безпосереднього накладання на несучі частоти часто використовуються модуляції за типом фазової маніпуляції, фазово-амплітудної маніпуляції, частотної модуляції.

Двійкова фазова маніпуляція (англ. Binary Phase Shift Keying) – BPSK) являє собою метод стрибкоподібної зміни фази несучого сигналу, яка може приймати два значення віддалених один від одного на 180° . На рис. 2.2 зображено сигнальне сузір'я (а) та форму модульованого сигналу (б).

Квадратурна фазова маніпуляція (англ. Quadrature Phase Shift Keying - QPSK) являє собою метод стрибкоподібної зміни фази несучого сигналу, яка може приймати 4 - значення віддалених один від одного на 90° .

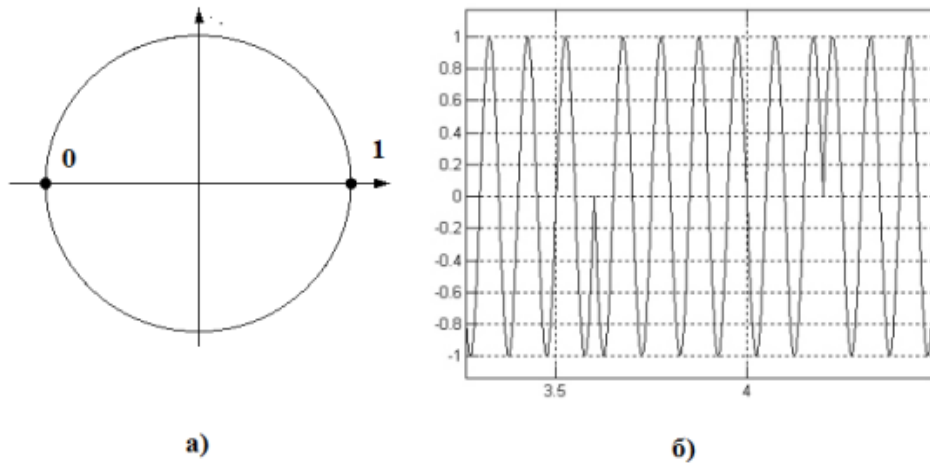


Рисунок 3.2 – Двійкова фазова маніпуляція, а - сигнальне сузір'я, б - форма модульованого сигналу

На рис. 3.3 зображені сигнальне сузір'я (а) та форма модульованого сигналу (б).

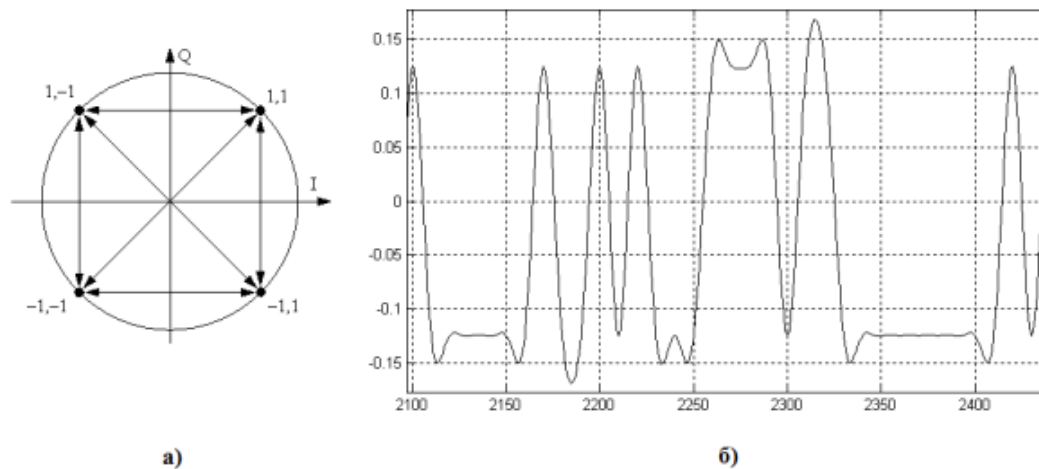


Рисунок 3.3 – Квадратурна фазова маніпуляція, а - сигнальне сузір'я, б - форма модульованого сигналу

Квадратурна амплітудна маніпуляція, яку часто називають квадратурною модуляцією (англ. Quadrature Amplitude Modulation - QAM), буває 16, 64 і позиційніша.

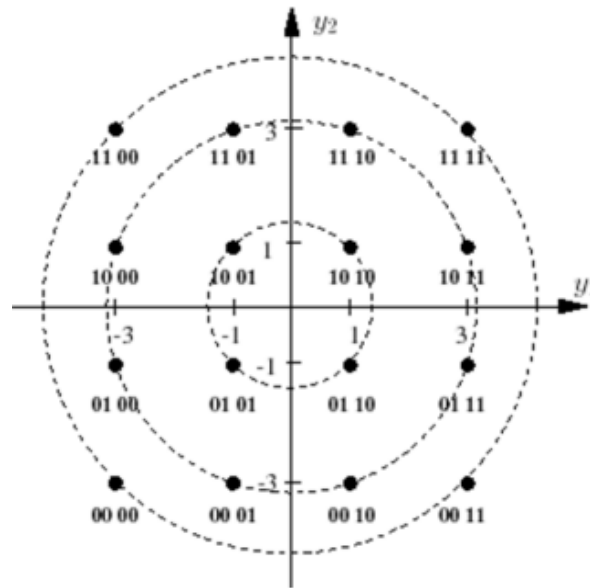


Рисунок 3.4 – Квадратурна амплітудна модуляція

У процесі аналізу цифрових каналів зв'язку необхідно розрізнити два поняття: бітова та символна швидкість. Сигнал може приймати не тільки кілька значень фази та амплітуди. Іншими словами це той же сигнал QPSK з але більшою кількістю фаз та амплітуд. На рис. 3.4. зображено сигнальну зірку 16-QAM. Слід зазначити, що перешкодостійкість залежить від відстані між сусідніми точками сигнальної зірки. Чим ця відстань менша, тим нижча завадостійкість. Виходячи з цього, розташування точок стану сигналу, як правило, вибирають на максимальній відстані від сусідніх.

Бітова швидкість, тобто швидкість передачі інформації, що виражається в бітах за секунду (біт/с), іноді називається ваговою швидкістю. Це фактично передана інформація.

Символьна швидкість вимірюється у бодах за секунду (Bd/c). Кожен символ може представляти або передавати один або кілька біт даних [8]. У передавальному пристрої існує фіксована кількість символів на каналі при фіксованій та відомій символній швидкості, а на приймальному пристрої

відбувається виявлення цієї послідовності символів із метою відновлення даних, що передаються. Тут може бути пряма відповідність між символом та набором даних (наприклад, кожен символ може кодувати один або кілька двійкових розрядів або "біт"), або символи можуть означати зміну біта на протилежний, або цілі багатобітові послідовності, як, наприклад, 16-QAM модуляції, де один символ містить 4 біта інформації. Тривалість символу може бути вимірною як проміжок часу між переходами. Тривалість часу символу T_c може бути розрахована як:

$$T_c = 1/f_c, \quad (3.1)$$

де f_c є символною швидкістю.

Тут ми можемо визначити зв'язок символної швидкості з валовим бітрейтом. Символьна швидкість на прикладі 16-QAM у 4 рази менше ніж валова швидкість передачі. Якщо передається N бітів на символ, а валовий бітрейт R , включаючи витрати каналного кодування, символна швидкість може бути розрахована як:

$$f_c = R/N. \quad (3.2)$$

При розподілі поточкових даних за деякою кількістю K несучих частот символна швидкість на кожній несучій частоті визначатиметься виразом

$$f_c = R/N * K. \quad (3.3)$$

Саме з такою швидкістю сигнал буде змінювати свій стан (амплітуду, фазу).

Слід зазначити, що діапазоном, який найчастіше користуються для організації бездротових мереж передачі даних є діапазон у районі 2,4 ГГц, через

відсутність потреби у ліцензуванні. Зустрічаються інші робочі частоти 3,6, 5, 60 ГГц та ін.

Як правило, при збільшенні пропускної спроможності радіоканалу, збільшується кількість символів на біт, скорочуються амплітудно-часові відстані між станами сигналу, що знижує перешкодозахищеність.

Модуляція з поділом вихідного потоку даних на кілька піднесучих частотах дозволяє розглядати сигнал як безліч повільно модульованих вузькосмугових сигналів (у підстандарті IEEE802.11a таких каналів 52), замість одного швидко модульованого широкосмугового сигналу. При цьому модуляція добре справляється зі складними умовами у середовищі передачі, наприклад з вузькосмуговими перешкодами, частотним згасанням [9].

3.2 Аналіз механізму впливу надкороткоімпульсного випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу

Механізм впливу надкороткоімпульсного випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу можна охарактеризувати двома основними шляхами:

- Вплив на апаратну частину пристроїв;
- Вплив на приймальні тракти пристроїв.

Вплив на апаратну частину, як правило, відбувається з напруженістю поля вище 70 В/м, за наявності вразливостей екранування конструкції цих засобів. За таких рівнів можуть спостерігатиметься погіршення показників функціонування пристроїв до блокування роботи. Це пояснюється тим, що зазначені випромінювання викликають кондуктивні перешкоди в ланцюгах пристроїв, які можуть бути прийняті за хибні біти, команди. За високих рівнів напруженості поля можливі незворотні зміни в пристроях за рахунок ураження елементної бази (здебільшого напівпровідникові елементи).

Очевидно, що для погіршення показників функціонування цих пристроїв може знадобитися нижчі напруженості поля, але при певних обставин. Для визначення таких обставин необхідно проаналізувати механізм такого впливу. Модульований сигнал змінює свій стан із певною символічною швидкістю, причому, це може відбуватися на кількох несучих частотах. При надкороткого випромінювання за рахунок ширини спектра відбувається вплив на приймальний тракт на робочих частотах, вони можуть безперешкодно пройти минаючи загороджувальні фільтри, при цьому може статися так що деякі символи корисного сигналу можуть бути не прийняті через загороджувальні перешкоди, а деякі можуть спотворитися і набути помилкового значення.

Як правило, сучасні телекомунікаційні засоби при втраті пакетів інформації, що приймаються, через відсутність частини символів здатні повторно відправляти та обробляти пошкоджені пакети. У деяких системах передбачено зміну модуляції сигналу на більш завадостійкий, тобто. з нижчою символічною швидкістю та застосуванням малопозиційної модуляції нижчого рівня.

Механізм впливу на BPSK сигнал виглядає наступним чином: імпульс надкороткого випромінювання породжує у приймальному модулі сигнал, який може заблокувати прийом корисного сигналу через порівняно високу амплітуду, або при більш низькому рівні, на несучій частоті може зімітувати для демодулятора зміну фази корисного сигналу Графічно це зображено на рис. 3.5.

При сумірній частоті прямування імпульсів надкороткого випромінювання з символічною швидкістю на несучій частоті таких помилково прийнятих фаз може бути більше.

Інші модуляції типу PSK будуть менш стійкі до надкороткого випромінювання за рахунок більшої кількості станів модульованого сигналу та додаткового застосування амплітудної модуляції, як, наприклад, у QAM-16.

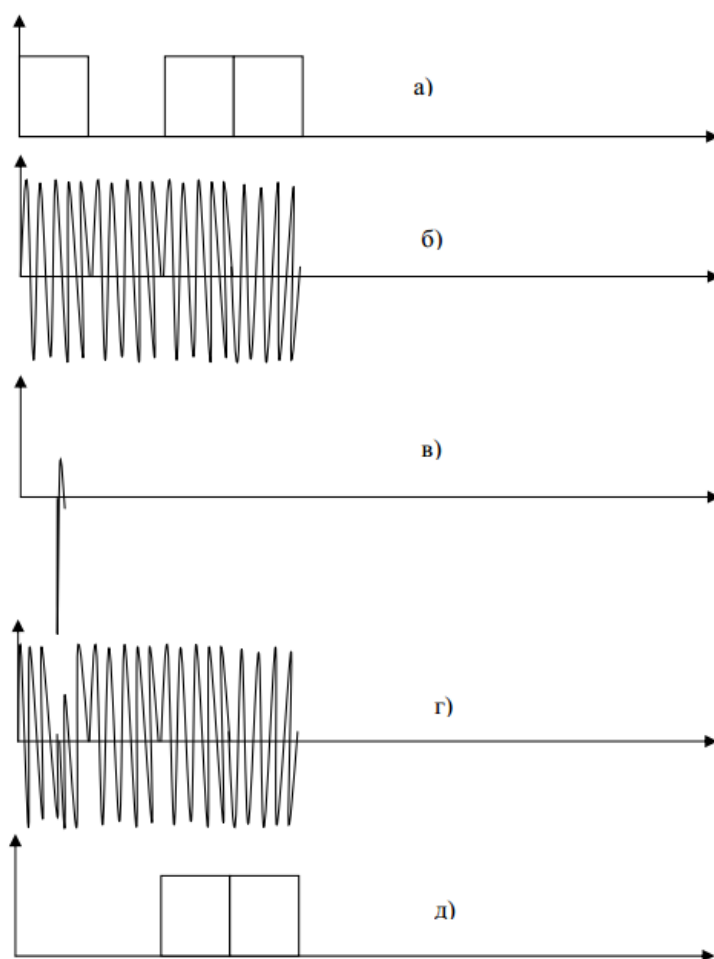


Рисунок 3.5 – Механізм впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу, що використовують BPSK модуляцію: а – імпульс надкороткого випромінювання, б – корисний сигнал, в – модульований корисний сигнал, г – результуючий сигнал, д – сигнал на виході демодулятора

Вплив надкороткого випромінювання на пристрої, що приймають сигнали модульовані FHSS, які використовує технологію FSK (frequency shift keying) частотне маніпулювання також може заблокувати прийом деяких біт інформації під час проходження надкороткого випромінювання за рахунок блокування в приймальному тракті високою амплітудою, а при дії кількох імпульсів, низьких, порівняно низькою амплітудою протягом одного біта (одного частотного імпульсу) може викликати помилкову ідентифікацію, тим самим викликавши визначення помилкового сигналу в демодулятор.

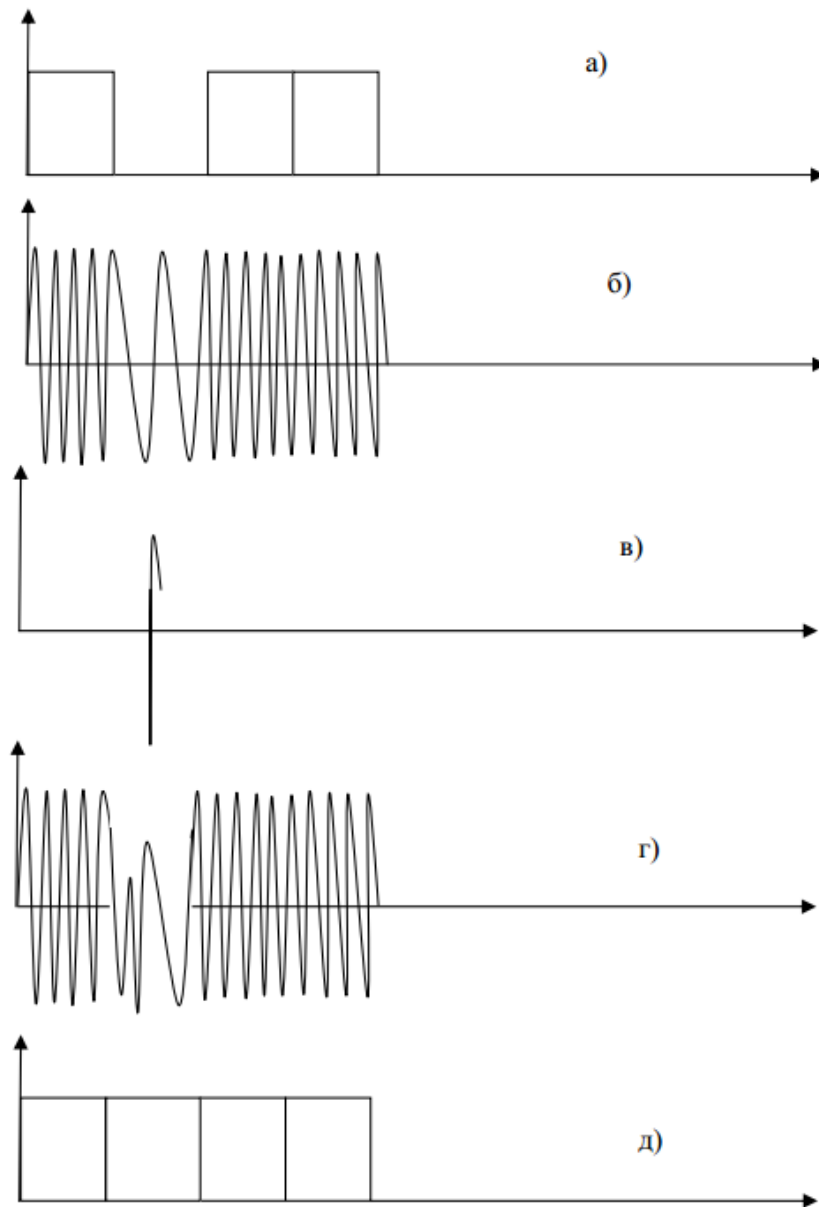


Рисунок 3.6 – Механізм впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу, що використовує модуляцію GMSK: а – імпульс надкороткого випромінювання, б – корисний сигнал, в – модульований корисний сигнал, г – результуючий сигнал, д – сигнал на виході демодулятора

На рис. 3.6 зображено механізм впливу кількох імпульсів на засоби широкополосного радіодоступу приймача сигналу із FSK модуляцією.

Визначено, що вплив генерація надкороткого випромінювання в просторі широкої смуги частот може заблокувати приймальні тракти пристроїв при енергетичних характеристиках на робочих частотах, що перевищують порогові рівні прийому корисного сигналу, або при порівняно низьких рівнях викликати імітацію хибних станів сигналу під час демодуляції.

3.3 Розроблення критерію ефективності впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу

Прямим методом оцінки ефективності впливу є оцінка енергетичних витрат для досягнення результатів дії. Результатами впливу ставиться зниження швидкості передачі інформації, що виражається у відсотках по відношенню до номінальною. Зниження швидкості інформації, що передається є прямим наслідком кількості втрачених пакетів інформації. Підвищенням ефективності буде покращення результатів за збереження енергетичних характеристик. Одним з способів підвищення ефективності впливу може бути спосіб формування певної послідовності імпульсів, що перекриває за тимчасовими моментами найбільшу кількість переданих символів, а також деяка кількість імпульсів у період проходження символу. При цьому беручи до уваги особливість рівномірності спектра надкороткого випромінювання, можемо зробити висновок про можливість одночасного впливу імпульсу на близькі модульовані частоти, наприклад як при OFDM модуляції.

Критерієм ефективності впливу вважатимемо кількість втрачених пакетів приймальним пристроєм широкополосного радіодоступу під час впливу надкороткого випромінювання порівняно з кількістю втрачених пакетів за той же проміжок часу і за тих же умов, але при відсутність впливу.

Чисельну оцінку ефективності можна виразити в відсотковому відношенні, як різниця відсотка втрачених пакетів засоби радіозв'язку при дії

зміненої послідовністю імпульсів і відсотка втрачених пакетів при дії простою послідовністю (базовою) із заданою частотою. Методика вимірювань має припускати незмінні положення випромінювачів щодо досліджуваного пристрою та напруженість поля, що утворюється імпульсом. При цьому оцінку ефективності можна проводити як залежно від частоти прямування імпульсів, так і в залежності від пакетування імпульсів. Оцінюючи ефективність при формуванні пакетів, розрахунок слід проводити щодо базової частоти прямування імпульсів, з яких формуються пакети. У загальному вигляді формула оцінки підвищення ефективності набуває наступного вигляду:

$$E_{відн} = N_{зм} - N_{баз}, \quad (3.4)$$

де $N_{баз}$ – відсоток втрачених пакетів при дії базової послідовності;

$N_{зм}$ – відсоток втрачених пакетів від впливу зміненої послідовності імпульсів;

$E_{відн}$ – може набувати значення від 0 до 100.

З метою визначення максимальної ефективності слід знаходити такі граничні умови (напруженість поля в точці та ін.) при яких спостерігається мінімальний або нульовий відсоток втрачених пакетів при дії базової послідовністю.

Широко поширені в сучасних радіорелейних лініях (РРЛ) зв'язку цифрові методи модуляції QAM-16, 32,64,128 мають слабку захищеність від інтерференційної перешкоди. QAM-16 при відношенні сигнал/інтерференційна перешкода 10dB повністю втрачає працездатність.

Більш захищена QPSK, але вона вимагає значного додаткового збільшення необхідного відношення сигнал/шум (5-6 dB) для забезпечення тієї ж ймовірності, що і без впливу інтерференційної перешкоди.

Зовсім інша річ відбувається при використанні шумоподібного широкосмугового сигналу (ШШС). Антиінтерференційний поріг систем зв'язку з ШШС приблизно дорівнює базі сигналів (виграшу при обробці), що значно перевищує антиінтерференційний поріг наведених вище сигналів (на 20 dB і більше). За умови впливу широкосмугової перешкоди потрібно значне перевищення її потужності над потужністю сигналу, щоб вона могла пригнічувати сигнал. ШШС забезпечують працездатність при перевищенні потужності перешкоди. ШШС на базі розгортання спектру за допомогою прямої послідовності (DSSS) як правило використовуються з немодульованим пілот-сигналом. Це дозволяє системам із ШШС працювати в умовах великої нестабільності частоти, наприклад, за умов дії ефекту Доплера. З вказаних причин зв'язок з використанням ШШС є добре відомою технологією, що застосовується у військових системах десятиліттями. У період конверсії вона почала застосовуватись у комерційних системах. Цьому сприяла також виявлена нововідома властивість ШШС ефективно використовувати спектр частот в умовах його сильної завантаженості, при анархії та некерованості роботою абонентів, а також в умовах завмирання сигналу через багатопрореневість.

За умови дії широкосмугової перешкоди потрібно значне перевищення її потужності над потужністю ШШС сигналу, щоб вона могла пригнічувати сигнал. Широкосмугові системи зв'язку забезпечують працездатність при перевищенні потужності перешкоди у n -разів потужності сигналу, де n - база корисного сигналу рівна добутку ширини спектра на його тривалість

3.4 Визначення критеріальних параметрів надкороткого випромінювання

Беручи до уваги особливості видів модуляції, залежність завадостійкості від розміру бази корисного сигналу, можна констатувати, що для підвищення ефективності впливу надкороткого випромінювання, необхідно щоб ця база була зрівняна або більше бази корисного сигналу. Збільшення бази у даному випадку можливо за рахунок формування послідовності кількох імпульсів надкороткого випромінювання із загальною тривалістю порівнянною з тривалістю корисного сигналу.

Форма надкоротких імпульсів описується моноциклом Гауса, тобто першою похідною від відомої кривої розподілу Гауса:

$$A(t) = A_0 \frac{\sqrt{2e}}{\tau} \exp\left(-\frac{t^2}{\tau^2}\right) \quad (3.5)$$

де τ - тривалість імпульсу, A_0 - його амплітуда. Ширина ΔF спектра потужності імпульсу обернено пропорційна тривалості імпульсу τ . Форма спектра потужності рис. 3.7 такого імпульсу описується співвідношенням:

$$S(f) = A_0 \sqrt{2\pi e} f \tau^2 \exp\left(-\frac{f^2 \tau^2}{2}\right) \quad (3.6)$$

База надкороткого імпульсу $B = \tau \Delta F \approx 1$. При використанні імпульсів тривалістю від 2,0 нс до 0,1 нс ширина смуги спектра потужності складає відповідно від 500 МГц до 10 ГГц.

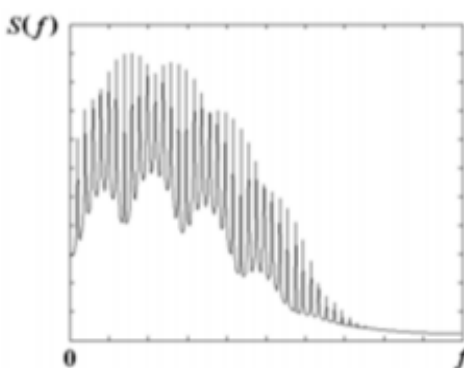


Рисунок 3.7 – Спектр надкороткого імпульсу

Спектр сигналу займає смугу частот від 0 до $F \approx 1/\tau$.

Властивістю як одиночних надкоротких імпульсів, так і пачок таких імпульсів є те, що спектр цих сигналів починається практично від нульової частоти. Ця ускладнює виконання умов спектральної маски для не ліцензованого використання сигналів.

У літературі [10] також можна зустріти наступні характеристики імпульсу, що впливають на ступінь впливу співвідношенням між характеристиками першого та другого напівперіодів E_1/E_2 , T_1/T_2 , де E_1, E_2 , T_1, T_2 амплітуди та тривалості першого та другого напівперіодів імпульсу відповідно. Враховуючи, що це вже амплітудні характеристики імпульсу, а ми оперуємо лише часовими характеристиками, вони не розглядатимуться.

Виходячи з вище викладеного можемо виділити такі критеріальні параметри, що впливають на ефективність:

- 1) період проходження імпульсів (пакетів імпульсів), T ;
- 2) кількість імпульсів у пакеті, N ;
- 3) інтервал між імпульсами в пакеті, Δt ;
- 4) тривалість надкороткого імпульсу.

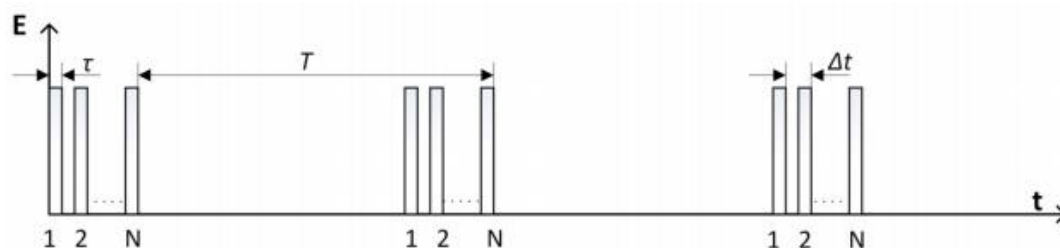


Рисунок 3.8 – Послідовність пакетів, що складаються з N надкоротких електромагнітних імпульсів з періодом прямування пакетів T і тривалістю надкороткого електромагнітного імпульсу τ , із затримкою між імпульсами в пакеті Δt

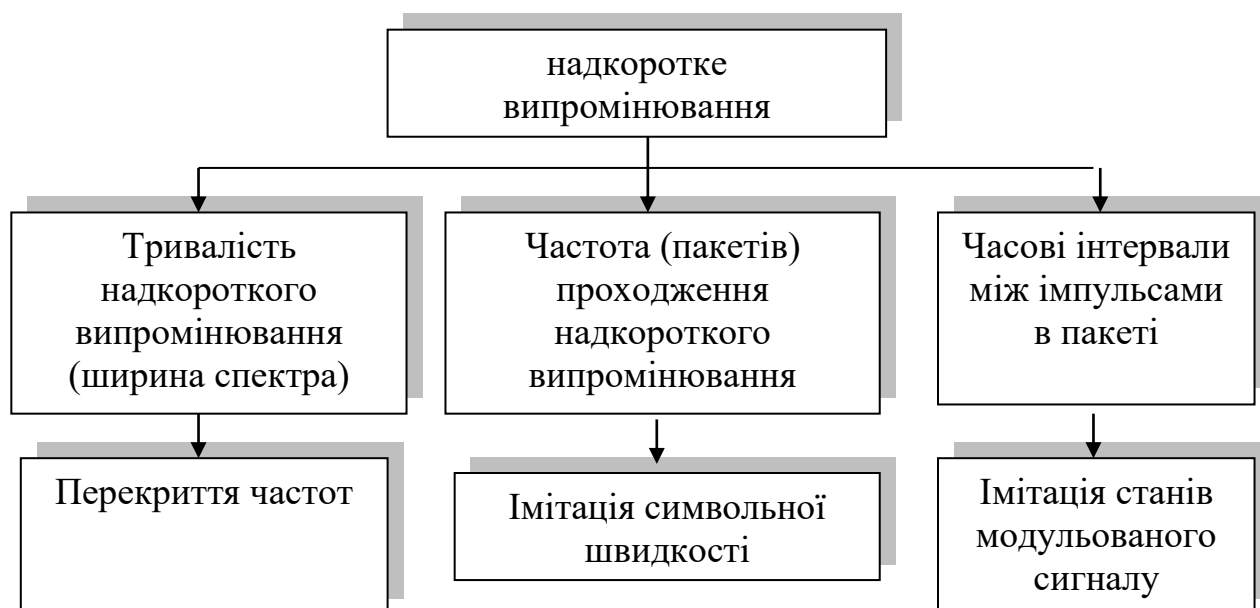


Рисунок 3.9 – Схема впливу послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів на прийом та демодуляцію піднесучої частоти

Схема впливу (рис. 3.9) послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів на широкосмугові сигнали радіозв'язку пояснює, що тривалість надкороткого електромагнітного імпульсу τ впливає на ширину спектра перешкоди, що призводить до перекриття несучих (піднесучих) частот корисного сигналу, частота проходження пакетів надкоротких електромагнітних

імпульсів $1/T$ імітує символну швидкість передачі інформації корисного сигналу $f_{симв}$, а часові інтервали Δt між імпульсами в пакеті впливають на стан модульованого сигналу, точніше стан несучої частоти в момент проходження символу (фаза, амплітуда ...), важливим параметром для наступного аналізу тут буде число періодів частоти, на символ nT .

3.5 Оцінка перекриття часових параметрів послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів та корисного сигналу

Врахування усередненої часової заповненості в оцінці ступеня впливу надкоротких електромагнітних імпульсів на засоби широкополосного радіодоступу більш правильно дозволяє оцінити цю величину, ніж за співвідношенням тільки потужних характеристик, але не враховує співвідношення часових моментів подій, таких як зміна символу корисного сигналу та випромінювання імпульсу надкороткого випромінювання.

Усі сучасні засоби бездротової передачі даних поєднує одна основна особливість, що відноситься до більшості цифрових модуляцій – це синхронізація за часом.

Цей підхід уможливорює обробку величезного масиву модульованих сигналів. Бездротові пристрої даних засинхронізовані на один і той же час використовуючи для обробки однакові проміжки часу без складнощів визначають фази, частоти, сегменти пакетів та інших параметрів сигналу.

Ми, насамперед, оперуємо параметрами нижчого рівня, такими як символна швидкість модуляції на несучій частоті $f_{симв}$ і введемо поняття кількості періодів несучої частоти передачі одного символу $f_{нес}/f_{симв}$.

Вже зазначалося, що збіг моменту випромінювання імпульсу надкороткого випромінювання щоразу з моментом проходження модульованого символу на несучій частоті збільшує ймовірність спотворення, блокування

інформації, що передається, при збільшенні частоти прямування, наприклад в 2 рази, на один модульований символ на несучій частоті буде доводиться вже 2 імпульси надкороткого випромінювання.

Якщо кількість періодів одного символу велика, а частота, що несе низька, то збільшення кількості імпульсів надкороткого випромінювання в 2 рази не матиме суттєвий ефект у передачі символу. Справа в тому, що тривалість надкороткого випромінювання буде порівняно мала з періодом несучої частоти, до того ж тривалість символу не дозволить демодулятору прийняти ці дві короткі перешкоди за основу для некоректної демодуляції сигналу.

В даному випадку для підвищення ефективності слід розташувати другий імпульс надкороткого випромінювання на відстані від першого порівнянно з періодом несучої частоти сигналу, при цьому ймовірність спотворення буде вищою, оскільки вибивається цілий період, замість двох сплесків на символ.

Отже, можемо ввести ще два оціночні параметра. Ступінь збігу швидкості прямування імпульсів (пакетів імпульсів) надкороткого випромінювання з символною швидкістю та ступінь збіги імпульсів у пакетах імпульсів надкороткого випромінювання з періодами несучої частоти. Дані параметри також покращують традиційну оцінку щодо співвідношення потужних характеристик корисного сигналу та завади, за рахунок обліку ступеня адресності розподілу потужності.

Сформуємо приблизну оцінку через залежність параметрів. Маємо вхідні дані:

- символна швидкість корисного сигналу: $f_{симв}$
- частота проходження імпульсів (пакетів імпульсів) надкороткого випромінювання: $f_{нв}$
- центральна (середня) несуча частота сигналу: $f_{нес}$
- число імпульсів у пакеті надкороткого випромінювання: $N_{нв}$.

Якщо розглядати співвідношення символної швидкості та частоти проходження імпульсів надкороткого випромінювання то при їх збігові буде вплив на кожен символ. Якщо частота проходження надкороткого випромінювання в 2 рази менше, ніж символна швидкість, то будуть перекрито в 2 рази менше символів, отже виявлено у 2 рази менше впливу.

$$K_{\text{симв}} = f_{\text{нв}}/f_{\text{симв}}, \quad (3.7)$$

Якщо розглядати вплив пакетів імпульсів надкороткого випромінювання на несучій частоті, слід враховувати кількість імпульсів N , що припадає на один символ по відношенню до кількості періодів несучої частоти та на один символ $f_{\text{нес}}/f_{\text{симв}}$, отже отримуємо:

$$K_{\text{пакет}} = N * f_{\text{симв}} / f_{\text{нес}}, \quad (3.8)$$

де $N = N_{\text{нв}} + f_{\text{нв}} / f_{\text{симв}}$,

тоді вираз для оцінки перекриття кількості періодів несучої частоти на символ набуває вигляду:

$$K_{\text{пакет}} = N_{\text{нв}} * f_{\text{симв}} + f_{\text{нв}} / f_{\text{нес}}, \quad (3.9)$$

відповідно, чим вище це значення, тим ефективніше використовується випромінювана енергія під час розгляду впливу імпульсів на несучу частоту символу, що передається.

Отже, узагальнюючи та резюмуючи всі наведені вище викладки наведемо умовну формулу для врахування ступеня впливу:

$$K_{\text{заг}} = K_{\text{симв}} * K_{\text{пакет}} * K_{\text{енсп}}, \quad (3.10)$$

де $K_{симв}$ – коефіцієнт адресності впливу за символічною швидкістю;
 $K_{пакет}$ – коефіцієнт адресності впливу пакету,
 $K_{енсп}$ – коефіцієнт впливу за енергетичними характеристиками з урахуванням спектру.

Коефіцієнти адресності $K_{симв}$, $K_{пакет}$ умовні, необхідні для загального розуміння механізму впливу та не будуть використовуватись у подальших розрахунках.

Встановлено, що приймальний пристрій може відсікти одиночний імпульс, сприйнявши, лише шматок його спектральної складової, яка потрапляє у смугу робочих частот.

При формуванні пакета імпульсів надкороткого випромінювання з міжімпульсним інтервалом Δt порівняним з періодом несучої частоти відбувається дещо інший механізм сприйняття імпульсів такого випромінювання, річ у тому, що приймальний пристрій може сприйняти такий пакет, як фрагмент несучої частоти, причому амплітуда збурення в приймальному тракті буде більшою, ніж у випадку при одиночному імпульсі, де сприймається його спектральна складова.

Приблизну оцінку за величиною комплексу FOM надкороткого випромінювання, необхідну для впливу на засіб широкополосного радіодоступу шляхом впливу послідовністю надкороткого випромінювання з $\Delta t \approx 1/f_{нес}$, слід оцінювати виходячи із співвідношення щільностей потоку потужностей джерела сигналу та джерела надкороткого випромінювання, але без урахування відношення до спектру.

3.6 Розроблення методу ефективного впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу

В якості об'єкту дослідження обрано широкосмугову систему бездротового доступу стандарту IEEE 802.16. Зовнішній вигляд системи зображено на рис. 3.10. До складу системи можуть входити базові та абонентські станції, які комплектуються антенами різної діаграми спрямованості. У разі використання антени з вузькою діаграмою спрямованості система дозволяє організувати бездротовий канал зв'язку на відстані близько 20 км. У цій системі використовується поширена цифрова модуляція OFDM із застосуванням часового поділу прямого та зворотного каналу та кількох додаткових рішень, що забезпечують мобільність зв'язку. Можливе гнучке управління та налаштування типів модуляції.



Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд базової та абонентської станції (засоби широкосмугового радіодоступу)

Розглянемо механізми впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу з різною швидкістю модуляції несучої частоти.

Швидкість модуляції, іншими словами, символна швидкість може бути штучно знижена у засобах бездротової передачі даних шляхом застосування багатопозиційної модуляції, наприклад QAM-16, де при передачі одного символу передається 4 біти даних, або шляхом формування кількох паралельних потоків даних, які модулюються на кілька несучих частот. Символьна швидкість при цьому знижується в ту ж кількість разів, у скільки було сформовано потоки, або з одночасним застосуванням цих методів.

Сигнали модульовані низькою символною швидкістю мають більш високу завадостійкість. Низька символна швидкість уможливорює використання захисного інтервалу між символами, що дозволяє справлятися з часовим розсіянням та усувати міжсимвольну інтерференцію.

Існують засоби бездротової передачі даних, які мають зворотний зв'язок, з гнучким саморегулюванням швидкості передачі даних, зміною типу модуляції у разі погіршення умов прийому.

Як правило, при погіршенні умов прийому автоматично змінюється тип модуляції, наприклад, відбувається перехід від 16-QAM до QPSK, знижується швидкість потоку інформації, що передається. Цей захід оберігає такі системи бездротового зв'язку від повної втрати зв'язку, при цьому зберігається канал передачі даних, але зі зниженою пропускну здатність.

Модульовані сигнали із високою символною швидкістю модуляції мають високу щільність завантаження несучої частоти у часі, тим самим кожен символ, що передається промодульований на несучу частоту в такий спосіб, щоб на кожен символ припадало лише кілька цілих періодів несучої частоти. Отже, при впливові одиничними імпульсами надкороткого випромінювання зрівняними з частотою, порівнянною з символною швидкістю модуляції ефект буде тим вищим, чим менше буде проходити повних періодів несучої частоти на один символ корисного сигналу.

Модульовані сигнали із низькою символною швидкістю модуляції мають низьку щільність завантаження несучої частоти в часі, тим самим кожен переданий символ може бути промодульований на несучу частоту таким чином, щоб на кожен символ припадало кілька порядків цілих періодів несучої частоти. При цьому для наближеної оцінки ступеня впливу за часовою ознакою буде ключовою формула (3.9). Тут ступінь впливу можна ефективно підвищити формуванням пакетів імпульсів надкороткого випромінювання, причому, чим більше кількість таких імпульсів буде сформована на відстані зрівняною з періодом несучої частоти, тим більший ступінь впливу спостерігатиметься на засіб широкополосного радіодоступу.

Отже, під час аналізу ступеня впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу слід враховувати насамперед яке відношення символної швидкості засобу до несучої частоти переданого сигналу. При сумісності швидкості проходження пакетів надкороткого випромінювання із символною швидкістю модуляції несучої частоти, наявності пакетів імпульсів надкороткого випромінювання з кількістю, необхідною для перекриття частини послідовних періодів несучої частоти корисного сигналу при розташуванні цих символів на відстані зрівняній з періодом несучої частоти, а ступінь впливу буде максимальним.

При несучій частоті $f_{нес} \ll 1/\tau$, де тривалість імпульсу τ надкороткого випромінювання, слід зазначити можливий низький ефект впливу одиночних імпульсів навіть за високої символної швидкості і для підвищення ступеня впливу так само слід формувати пакети імпульсів на відстані зрівняній із періодом несучої частоти.

Слід також зконцентрувати увагу на можливому блокуванні корисного сигналу при перевищенні рівня перешкоди необхідних у приймальному тракті значень. Це проявляється у зменшенні його коефіцієнта підсилення у вхідному

тракті приймача або зміні відношення сигнал-шум при дії сигналу завади, частота якого знаходиться поза основним каналом прийому.

Щоб характеризувати властивість приймача корисного сигналу в присутності сильного сигналу завади порога блокування, користуються поняттям «динамічний діапазон з блокування» (у децибелах):

$$D = 20 \lg U_{\text{завади}} / U_{\text{min}}, \quad (3.11)$$

де $U_{\text{завади}}$ - максимально допустима напруга сигналу завади, що відповідає порогу блокування; U_{min} - мінімальна напруга корисного сигналу, що відповідає чутливості приймача.

Блокування корисного сигналу, у тому числі імпульсного, найбільш відчутні у разі взаємодії із безперервним сигналом завади. Ступінь блокування корисного сигналу інтенсивним імпульсним сигналом залежить від потужності цього сигналу, а також від часу його дії, що підтверджує необхідність формування пакетів імпульсів.

Схематично вплив послідовності пакетів імпульсів надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу з різною символною швидкістю модуляції та різною частотою, зображено на рис.3.11.

Отже, формування пакетів імпульсів надкороткого випромінювання робить значно більший вплив на засоби широкополосного радіодоступу.

При тих же енергетичних витратах на формування, наприклад частоти проходження імпульсів надкороткого випромінювання в 2 рази більшої, ми можемо сформувати пакет з 2 імпульсів без збільшення загальної частоти проходження, ступінь впливу при цьому буде вище.



Рисунок 3.11 – Порівняльний аналіз впливу одиничних пакетів та пакетів імпульсів надкороткого випромінювання

При тих же енергетичних витратах на формування вдвічі більшої частоти проходження імпульсів надкороткого випромінювання ми можемо сформувати пакет з двох імпульсів без збільшення загальної частоти проходження, ступінь впливу при цьому буде вищим.

3.7 Розвиток методу забезпечення ефективного впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу на основі вибору параметрів послідовності імпульсів

Розглянутий засіб надкороткого випромінювання має характеристику $FOM = 100$ кВ/м і максимальну частоту повторення імпульсів близько 10 МГц.

Багатоканальність цього засобу дозволяє генерувати пакети імпульсів, які можуть йти з тією ж частотою. Часовий проміжок між імпульсами може бути виставлений довільно. Особливість надкороткого випромінювання така, що при роботі в пакетному режимі напруженість поля в точці буде менше в ту ж кількість разів, що і кількість імпульсів, яка генерується на один пакет.

Розглянемо такі вхідні характеристики:

несуча частота – 2.4 ГГц;

R – швидкість передачі даних – 54Мбіт/с;

n – кількість біт на символ (64-QAM) – 6;

P – вихідна потужність – 21дБм (0,13 Вт);

G - посилення антени - 15 дБі;

Δf - ширина спектру – 20 МГц;

$N_{нес}$ - кількість несучих частот (відповідно до стандарту WirelessMAN) – 128;

r_b - відстань від комплексу надкороткого випромінювання до широкополосного радіодоступу - 1 км;

$r_{шрд}$ - відстань від засобу широкополосного радіодоступу до базової станції - 5 км;

$f_{скі}$ - частота проходження надкороткого випромінювання - 1 МГц.

Символьна швидкість модуляції несучої частоти визначається за наведеною формулою:

$$f_c = R/n * N_{нес}, \quad (3.12)$$

де R - валовий бітрейт, $N_{нес}$ - кількість несучих частот, n - кількість біт символ.

$$f_c = 54 * 10^6 / 6 * 128 = 70312 \text{ Гц.}$$

З такою символною швидкістю одночасно модулюється масив із 128 несучих частот.

Враховуючи низьку символну швидкість, що відрізняється на 6 порядків, необхідно приділяти увагу формуванню пакетів імпульсів.

У нашому випадку з періодом несучої частоти порівнянно з періодом коливання імпульсів надкороткого випромінювання мінімальну кількість імпульсів можна визначити кількістю 2, і далі при аналізі розрахунку та експериментальному дослідженні визначити динаміку зміни ступеня впливу зі збільшенням їх кількості.

Для очікуваного ефекту впливу приймемо $K_3 = 1$, використовуючи формулу, що враховує спектральні щільності енергій досліджуваних пристроїв, маємо:

$$K_3 = \frac{(FOM \cdot r_{нв} \tau)^2 N_{нв} f_{нв} \Delta f_i}{30 P G r_{вн}^2}. \quad (3.13)$$

Тоді отримуємо:

$$FOM1 = \frac{r_{нв} \sqrt{30 P G B}}{r_{внп} \tau \sqrt{N_{нв} f_{нв} \Delta f_{нв}}}, \quad (3.14)$$

$$FOM1 = \frac{1000}{5000 * 150 * 10^{-12}} \sqrt{\frac{30 * 0,13 * 100}{2 * 10^6 * 20 * 10^6}} \approx 4,7 \text{ кВ}$$

При збільшенні кількості символів надкороткого випромінювання необхідна величина FOM зменшуватиметься пропорційно квадратному кореню кількості символів цього випромінювання.

При формуванні пакета імпульсів надкороткого випромінювання з міжімпульсним інтервалом порівнянним з періодом несучої частоти $\Delta t \approx 1/f_{нес}$ для розрахунку необхідної величини FOM, необхідно врахувати обмеження потужності коефіцієнтом $B = 128$. Таким чином, отримуємо наближену оцінку FOM, при тих самих вихідних даних, але при дії пакетів імпульсів надкороткого випромінювання з $\Delta t \approx 1/f_{нес}$:

$$FOM2 = \frac{r_{нв} \sqrt{30PGB}}{r_{випр} \sqrt{\tau N_{нв} f_{нв}}}, \quad (3.15)$$

$$FOM2 = \frac{1000 \sqrt{30 * 0,13 * 100 * 128}}{5000 * \sqrt{150 * 10^{-12} * 2 * 1000000}} \approx 2,6кВ$$

Слід врахувати, що FOM1 та FOM2 відображають величину без обліку коефіцієнта поляризації інших коефіцієнтів ослаблень та не враховують залежність від адресності.

Формули (3.14 та 3.15) застосовні як поправочний коефіцієнт для розрахунку як FOM1, і FOM2, з урахуванням даних даних та приймаючи $N_{нв} = 2$, $K_{пакет} = 4,75 * 10^{-3}$.

Для максимальної ефективності FOM має бути збільшено у $\sqrt{1/K_{пакет}}$, у нашому випадку, приблизно у 14 разів.

Слід відзначити, що поправка щодо тимчасової адресності, умовна і вона лише враховує співвідношення кількості імпульсів у пакеті та кількості періодів несучої частоти із співвідношенням тривалостей часових проміжків між

символами та тривалістю одного періоду несучої частоти. Приймальна апаратура не ідеальна і вона може погіршити свої характеристики без 100% перекриття несучих частот за часом, або через не симетричність першого та другого напівперіоду імпульсу надкороткого випромінювання не сприймаючи імпульси від установки з розрахунковим FOM.

Алгоритм формування послідовності імпульсів надкороткого випромінювання, що забезпечує ефективний вплив, містить 64 канали випромінювання з FOM = 1600В/м кожен.

В цьому випадку відбувається додавання напруженостей поля від кожного елемента таким чином, що сумарна величина FOM всього комплексу складала близько 100кВ/м.

Алгоритм відбиває принцип управління аналізованим комплексом надкороткого випромінювання з метою генерації послідовності імпульсів для ефективного впливу на засоби широкополосного радіодоступу. Визначено механізм гнучкого використання багатоканального ресурсу комплексу починаючи від пріоритету з високою заповненістю імпульсів надкороткого випромінювання у часовій області до пріоритету високої імпульсної потужності.

3.8 Розроблення алгоритму автоматичного управління комплексом широкополосного радіодоступу

Оцінки напруженості поля на відстані від комплексу надкороткого випромінювання може застосовуватись оператором для виставлення параметрів роботи комплексу вручну, а також для перспективної розробки алгоритму автоматичного управління комплексом.

Алгоритм передбачає обробку первинних даних включаючи характеристики широкополосного радіодоступу, відстані між засобами радіодоступу та комплексом випромінювання (рис 3.12).

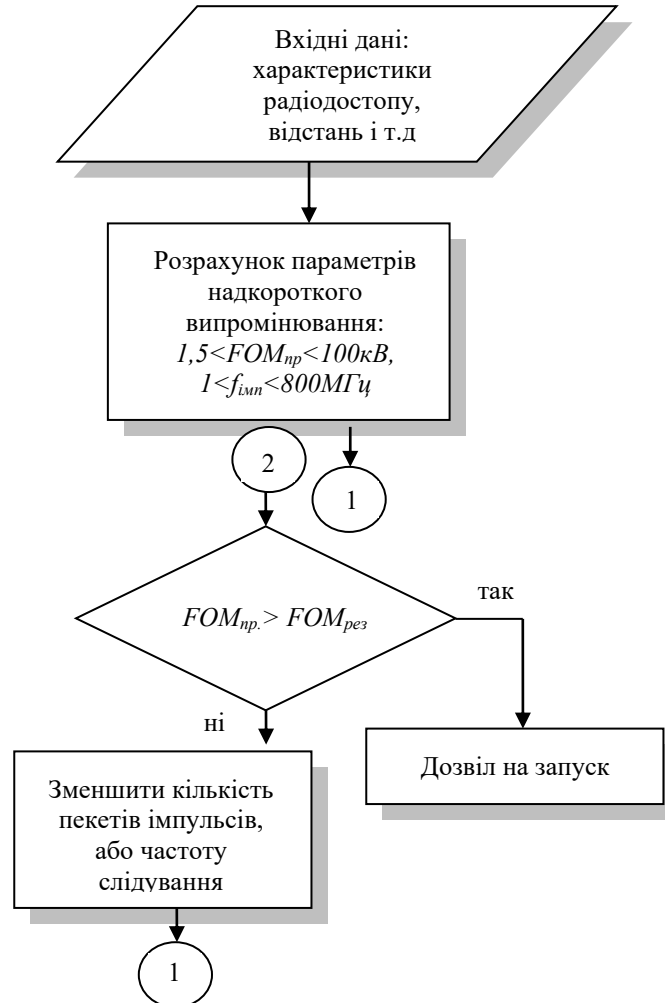


Рисунок 3.12 – Блок – схема алгоритму первинної обробки даних

Обробкою первинних даних формуються необхідні параметри поля надкороткого випромінювання. Вони обробляються алгоритмом формування параметрів, що задають для комплексу (рис. 3.13, рис. 3.14).

Необхідні параметри поля надкороткого випромінювання:

$f_{слід}$ – результуюча частота проходження імпульсів (пакетів);

$N_{пв}$ – число імпульсів у пакеті;

$FOM_{необх}$ – необхідний енергопотенціал станції;

Параметри налаштування комплексу:

$f_{ген}$ – частота генератора завдання комплексу;

Δt – затримка між групами каналів (імпульсами у пакеті);

n – число синхронізованих груп ($64/n$ – число модулів у групі).

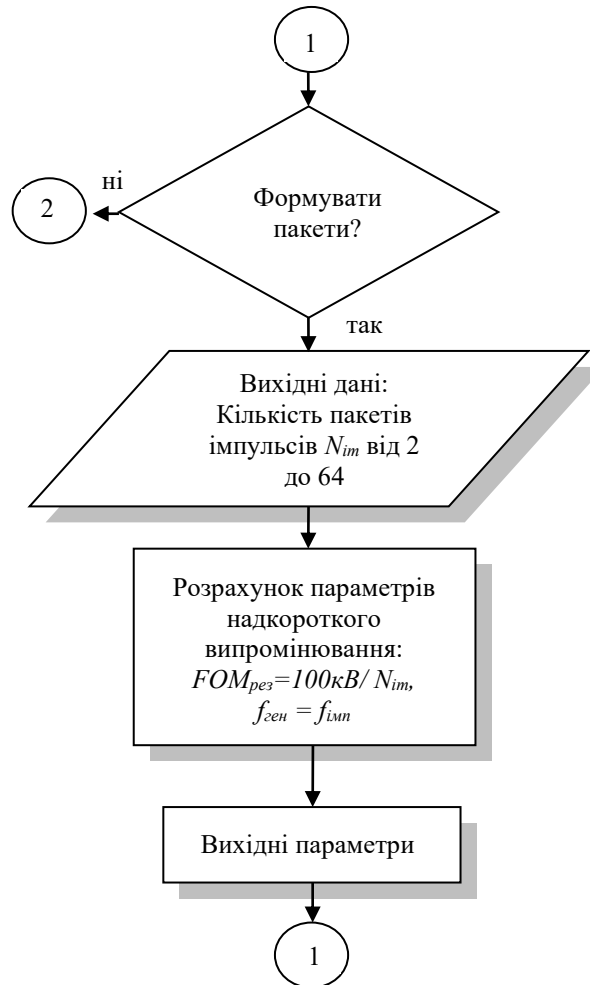


Рисунок 3.13 – Блок - схема алгоритму гілки визначення характеру випромінювання та формування пакетів

Збільшення числа імпульсів у пакеті більш ефективно при порівнянному кратному збільшенні частоти в тому випадку, якщо символна швидкість буде більше ніж частота проходження імпульсів надкороткого випромінювання.

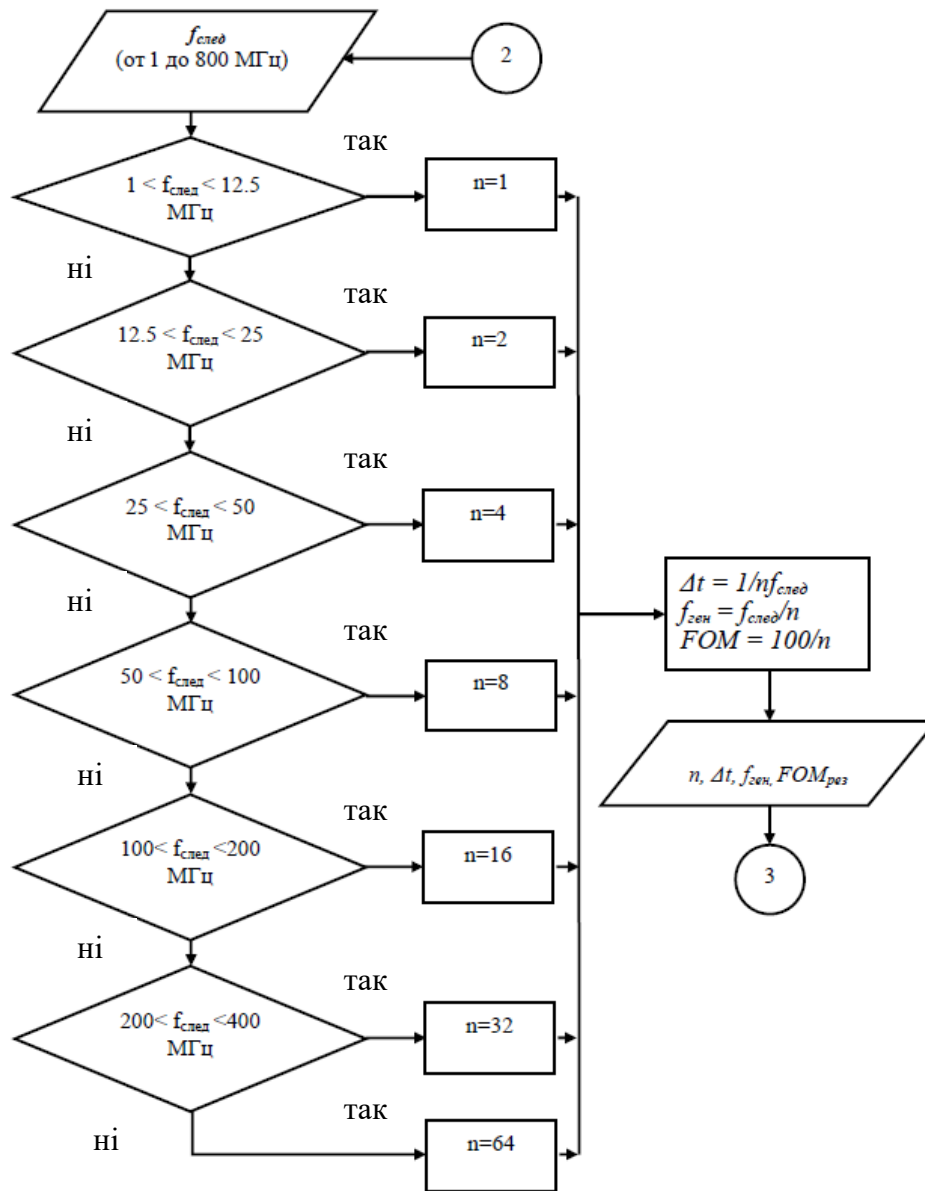


Рисунок 3.14 – Блок - схема алгоритму гілки формування частоти випромінювання

Навпаки, при символній швидкості буде меншою, ніж частота проходження імпульсів надкороткого випромінювання, краще кратно збільшувати частоту проходження пакетів.

При формуванні пакетів з імпульсами, віддаленими один від одного на відстані зрівняній з несучою частотою, виграв у ступені впливу становить величину пропорційну відношенню ширини спектра надкороткого випромінювання до ширини спектра корисного сигналу.

При проведенні оцінки впливу поля надкороткого випромінювання, на забезпечення оперативної та гнучкої зміни параметрів впливає поле, яке визначається аналітично за допомогою ЕОМ зі спеціальним програмним забезпеченням.

Структурна схема діагностичної системи представлена на рис. 3.15

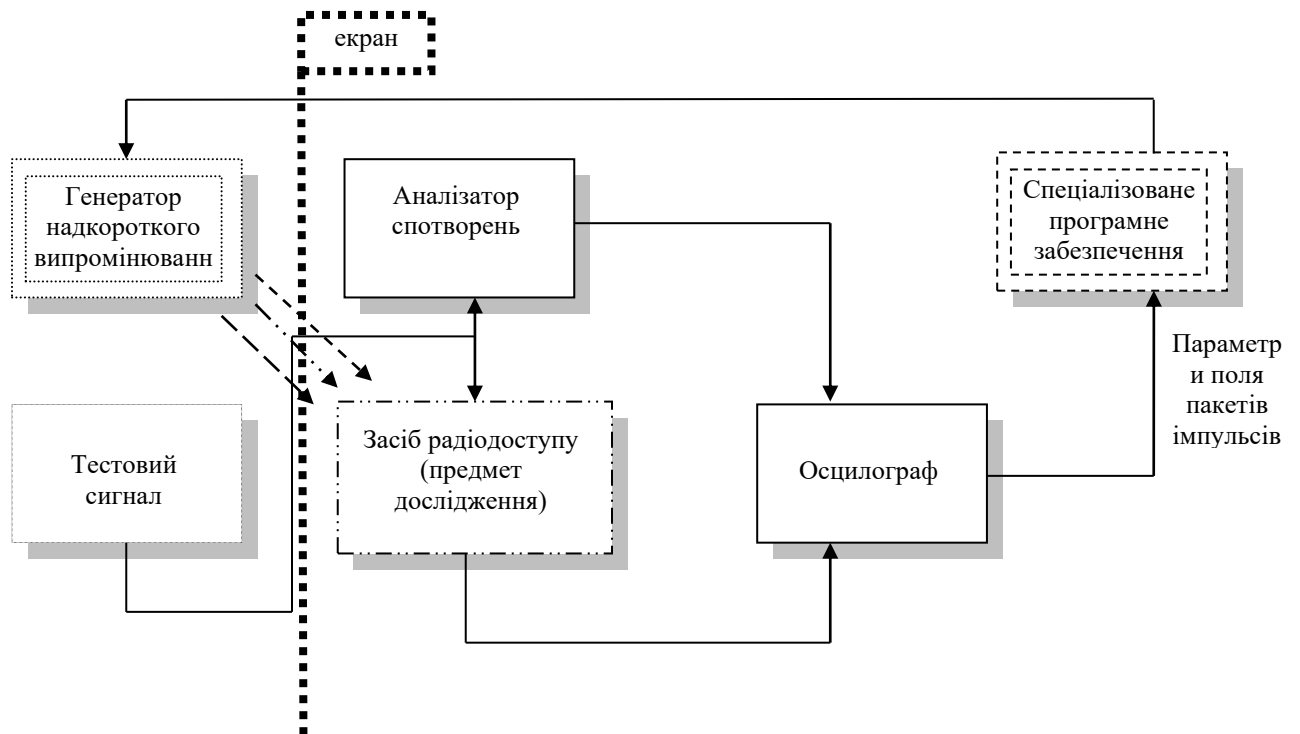


Рисунок 3.15 – Структурна схема діагностичної системи

Для проведення досліджень використовуються:

- багатоканальний комплекс випромінювання та контрольно-вимірювальна апаратура амплітудно-часових параметрів комплексу;
- засоби радіозв'язку, робочі частоти яких лежать у межах діапазону частот від 0,03 до 3 ГГц;
- спеціальний програмний засіб вимірювання швидкості.

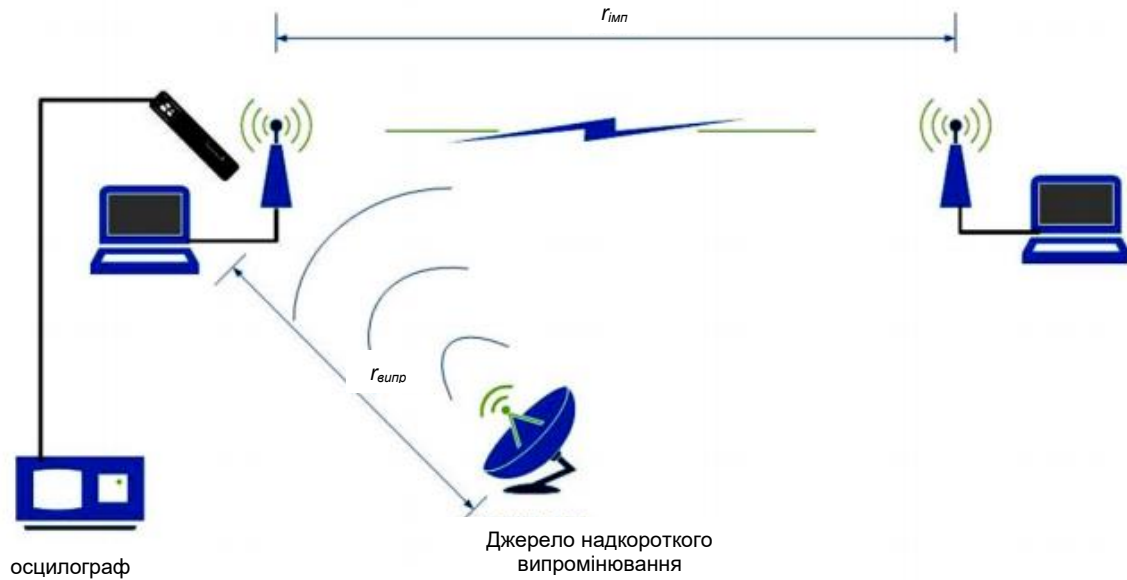


Рисунок 3.16 – Схема проведення досліджень впливу надкороткого випромінювання на засоби радіозв'язку

Для контролю величини енергетичного потенціалу FOM оцінюється величина напруженості електричного поля надкороткого випромінювання, що випромінюється комплексом. Знаючи відстань від точки вимірювання до комплексу та виміряну напруженість, FOM розраховується напруженість електричного поля та визначається за зареєстрованими осцилограмами амплітуди імпульсів напруги на вході перетворювача напруженості імпульсного електричного поля за формулою:

$$E = U_{зз} / K_{пер}, \quad (3.16)$$

де E – напруженість імпульсного електричного поля;

$U_{зз}$ – амплітуда імпульсу напруги на вході осцилографа.

Максимальна тривалість для фіксування результату становить 15 с. Мінімальна допустима відстань між площиною комплексу випромінювання та

РЕМ становить 1 м. Ця відстань характеризує початок дальньої хвильової зони для випромінювача надкоротких радіохвиль.

Комплекс розташовується на відстані r_0 щодо радіостанції прийому інформації, РЕМ розташовуються відносно один одного на дистанції зв'язку r_i , при якій забезпечується впевнений сигнал у точці прийому. В цьому випадку r_i вибирається виходячи з можливостей комплексу та енергопотенціалу FOM.

Спочатку на виході випромінювача встановлюється проста послідовність надкоротних імпульсів з частотою f_{ei} більшої або рівної символічній швидкості модуляції $f_{симв}$. Включаючи комплекс надкороткого випромінювання в режим генерації з необхідною величиною FOM, фіксують зміну кількості втрачених пакетів та швидкість передачі в бездротовому каналі зв'язку.

У разі блокування каналу зв'язку при дії надкоротних імпульсів із необхідною величиною FOM необхідно зменшити FOM до граничного значення, при якому спостерігається мінімальна кількість втрачених пакетів.

Зберігаючи всі параметри випробуваних пристроїв і величину FOM збільшують частоту проходження імпульсів до 2, фіксують значення відсотка втрачених пакетів, і швидкості передачі даних. Зберігаючи всі параметри випробуваних пристроїв і величину FOM при частоті проходження імпульсів, формують пакет з двох імпульсів надкороткого випромінювання, з відстанню між імпульсами $\Delta t \approx 1/f_{нес}$, де $f_{нес}$ приймаємо, як і вище FOM = 1500 В, частота проходження імпульсів 1 МГц і 2 МГц, відстань між засобами зв'язку $r = 30$ м. Розрахункова оцінка в процесі дії простою послідовністю імпульсів із урахуванням перекриття спектральних частин:

- цифровий бездротовий телефон стандарту DECT.

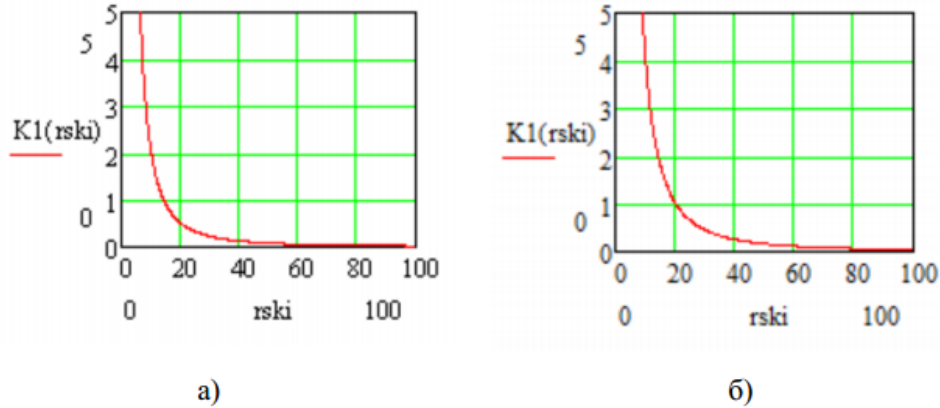


Рисунок 3.17 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу з урахуванням перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на цифровий бездротовий телефон, а – 1 МГц, б – 2МГц

- дводіпазонна (UNF+VHF) портативна радіостанція Kenwood ТК-UVF10 на частоті 433МГц.

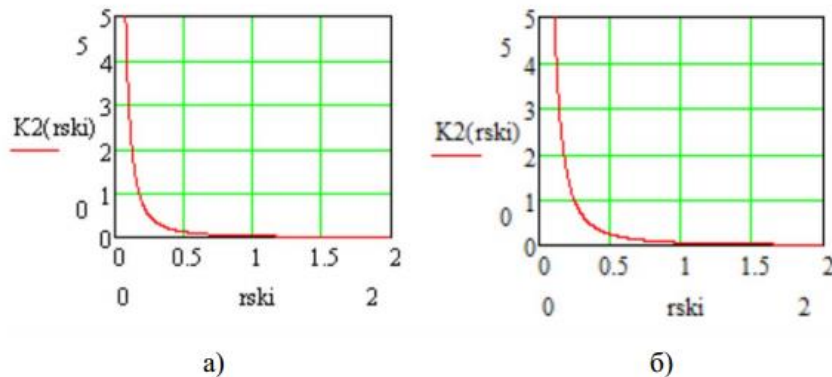


Рисунок 3.18 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу з урахуванням перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на дводіпазонну портативну радіостанцію, а – 1 МГц, б – 2МГц.

- направлена антена широкополосного радіодоступу. Режим 36 Мбіт/с, 2,4ГГц.

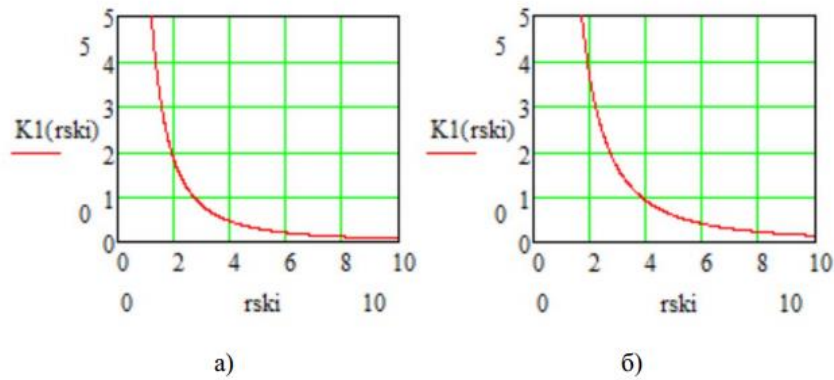


Рисунок 3.19 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу з урахуванням перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на засіб широкополосного радіодоступу, а – 1 МГц, б – 2МГц

Розрахункова оцінка в процесі впливу послідовності пакетів $N_{nb}=2$, $\Delta t \approx 1/f_{nes}$ без урахування перекриття спектральних частин:

- цифровий бездротовий телефон стандарту DECT.

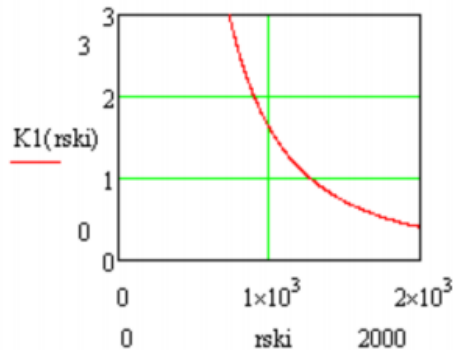


Рисунок 3.20 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу без урахування перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на цифровий бездротовий телефон стандарту DECT

- дводіапазонна (UNF+VHF) портативна радіостанція Kenwood TK-UVF10 на частоті 433МГц.

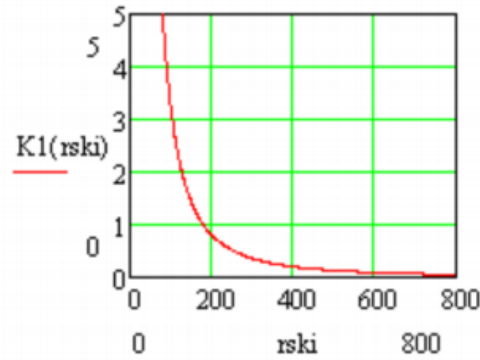


Рисунок 3.21 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу без урахування перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на двохдіапазонну портативну радіостанцію. Режим 54 Мбит/с, QAM 64 2,4ГГц, направлена антена

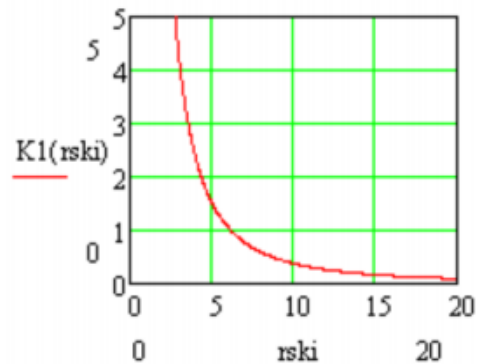


Рисунок 3.22 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу без урахування перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на засіб широкополосного радіодоступу

3.9 Розрахункова оцінка дальності впливу надкороткого випромінювання при максимальних рівнях потужності імпульсів

r_{ski} - відстань до засобів широкополосного радіодоступу в метрах $r_{іст} = 30$ м,
 $f_{скі} = 12.5$ МГц.

Максимальна дальність при $FOM = 50\ 000$, $N=2$, при впливі на засіб широкополосного радіодоступу, $\Delta t > 1/f_{нес}$.

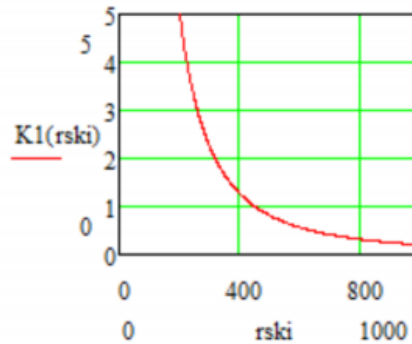


Рисунок 3.23 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу з урахуванням перекриття спектральних частин від відстані r_{ski} (м) джерела випромінювання на засіб широкополосного радіодоступу

Максимальна дальність при $FOM = 50\ 000$, $N=2$, $\Delta t \approx 1/f_{нес}$ при впливі на засіб широкополосного радіодоступу.

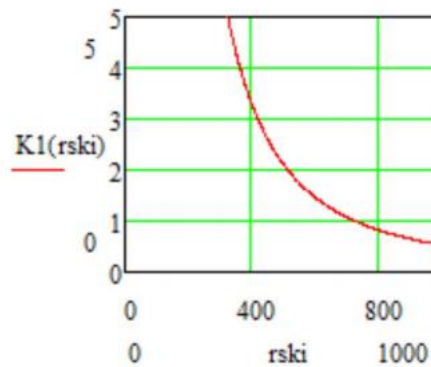


Рисунок 3.24 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу без урахування перекриття спектральних частин від відстані r_{ski} (м) джерела випромінювання на засіб широкополосного радіодоступу

Оцінка зі збільшенням відстані гист = 1000 м. Максимальна дальність при $FOM = 50\ 000$, $N=2$, при $\Delta t > 1/f_{нес}$ при впливі на засіб широкосмугового радіодоступу.

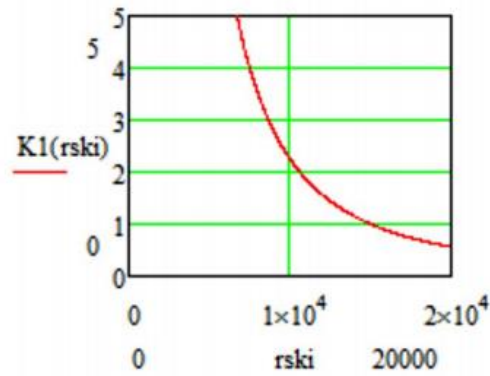


Рисунок 3.25 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу з урахуванням перекриття спектральних частин від відстані $r_{ski}(m)$ джерела випромінювання на засіб широкополосного радіодоступу

Максимальна дальність при $FOM = 50\ 000$, $N=2$, при $\Delta t \approx 1/f_{нес}$ при впливові на засіб широкопосмугового радіодоступу.

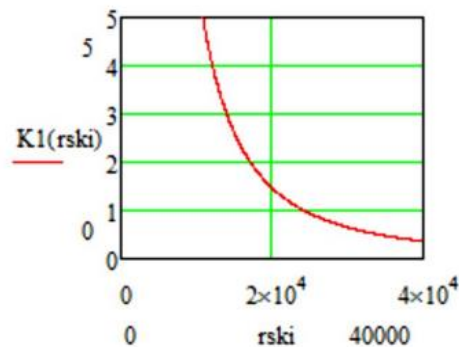


Рисунок 3.26 – Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу без урахування перекриття спектральних частин від відстані $r_{ski}(m)$ джерела випромінювання на засіб широкополосного радіодоступу

Аналіз отриманих розрахункових результатів показує, що формування послідовності надкоротких імпульсів доцільно при ширині спектра корисного сигналу $\Delta f_{ст}$ набагато меншому спектру завади $\Delta f_{скі}$, при цьому для найбільшого ефекту, інтервал Δt між імпульсами в пакеті повинен бути

співставним із періодом $1/f_{нес}$. Дальність дії при формуванні таких пакетів збільшується пропорційно $\sqrt{(N_{скі}\Delta f_{скі}/\Delta f_{іст})}$ при збереженні частоти проходження $f_{скі}$ та FOM, без урахування виграшу при обробці сигналу.

3.10 Розроблення рекомендацій для підвищення точності визначення інформативних параметрів сигналів та пропускної спроможності засобів радіозв'язку

Для підвищення ефективності впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу необхідно формувати пакети імпульсів з величиною затримки між імпульсами наближено рівними з періодом центральної несучої частоти. Це забезпечить проходження створюваних наводок в антені приймальних трактів пристроїв, що може призвести до блокування динамічного діапазону.

Частота проходження пакетів впливатиме на ступінь перекриття у часі. Число імпульсів у пакеті визначатиме ступінь імітації несучої частоти.

Враховуючи величезний спектр засобів широкополосного радіодоступу і явно невідомі їх параметри, для забезпечення універсальності ефективного впливу знадобляться алгоритми для формування параметрів послідовності надкоротких імпульсів, що хаотично змінюються.

Випадковим чином змінюючи затримку по часу між імпульсами в пакеті, можна впливати наведеними струмами в приймальних трактах засобів широкополосного радіодоступу під час збігу інтервалу проходження імпульсів з періодом частот діапазону, що приймається.

При формуванні пакетів імпульсів з відстанями між імпульсами більшими, ніж період центральної частоти, відчутної різниці між впливом пакетами і просто послідовністю імпульсів не буде. В даному випадку ефективність буде знижена за рахунок того, що активною складовою впливу

буде прохідна в приймальні тракти пристроїв частина спектру створюваного надкоротким імпульсом, а не прямі струми, що наводяться.

При такому режимі впливу при тих же енергетичних характеристиках ймовірність блокування динамічного діапазону буде нижче, але при цьому велика ймовірність спотворень за рахунок перекриття спектрів. Кількість втрат буде приблизно пропорційно кількості спотворених періодів несучої частоти на один символ, що передається.

У загальному вигляді виграш у формуванні пакетів надкороткого випромінювання можна приблизно оцінити без урахування різноманітних втрат як відношення ширини спектра надкороткого імпульсу до ширини спектра корисного сигналу.

3.11 Висновки за розділом

1. Аналіз різних типів модуляцій виявив взаємозв'язок часових параметрів послідовності надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу та ступінь його впливу. Високий рівень впливу спостерігатиметься при максимальному перекритті періодів на несучій частоті, що припадають на один символ.

2. Тривалість імпульсу надкороткого випромінювання впливає на ширину, а, отже, на спектральну щільність потужності імпульсу. Частота проходження надкороткого випромінювання та тривалість між імпульсами в пакеті повинні враховуватися як параметри для оцінки адресності спрямованої енергії надкороткого випромінювання.

3. Критерієм оцінки ступеня впливу взято динаміку зміни кількості втрачених пакетів засобів широкополосного радіодоступу.

4. Визначено механізм впливу послідовності пакетів імпульсів надкороткого випромінювання при сумірній затримці між імпульсами в пакеті

та періодом несучої частоти корисного сигналу. Аналіз оцінки ступеня впливу за таких параметрів, показав вищі показники.

5. Аналіз цифрових видів модуляцій показав перевагу за певних умов такого виду впливу з точки зору ефективності.

6. Розроблений метод визначення параметрів надкороткого випромінювання дозволяє розрахувати необхідну характеристику FOM комплексу випромінювання та часові характеристики послідовності імпульсів для ефективного впливу на потрібній відстані.

7. Розроблений алгоритм формування послідовності імпульсів дозволяє розширити характеристики надкороткого випромінювання за частотою проходження імпульсів до 800 МГц, а також формувати послідовності імпульсів до 64 в пакеті.

8. Сформовано низку оціночних виразів, що дозволить визначати ступінь впливу послідовності надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи магістра, вкнано:

1. Проведений аналіз сучасних телекомунікаційних систем з використанням широкосмугових бездротових технологій передачі даних показав їхню поширеність у різних сферах.

2. Відзначено схожість видів модуляції при побудові широкосмугових мереж радіодоступу різних масштабів, що говорить про те, що у випадку електромагнітної атаки, механізми, що відбуваються у різних широкосмугових засобах, будуть схожими.

3. Проведено порівняльний аналіз уразливостей різних систем радіозв'язку при впливі надширокоімпульсного випромінювання виявив високий рівень вразливості систем широкосмугового та надширокосмугового радіозв'язку такому впливу, ніж вузькосмугових систем зв'язку.

4. Проведено огляд методів впливу РЕБ, що дозволив класифікувати такі випромінювання, як засіб постановки перешкод, які можна віднести до загороджувальних, маскуючих та імпульсних.

5. З проведеного аналізу впливає необхідність дослідження механізмів впливу зазначених випромінювань на стійкість функціонування телекомунікаційних систем та виявленням залежності зміни характеристик досліджуваних пристроїв від часових параметрів прямування імпульсів.

6. Виконано аналіз різних типів модуляцій виявив взаємозв'язок часових параметрів послідовності надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу та ступінь його впливу. Високий рівень впливу спостерігатиметься при максимальному перекритті періодів на несучій частоті, що припадають на один символ.

7. Встановлено, що тривалість імпульсу надкороткого випромінювання впливає на ширину, а, отже, на спектральну щільність потужності імпульсу.

Частота проходження надкороткого випромінювання та тривалість між імпульсами в пакеті повинні враховуватися як параметри для оцінки адресності спрямованої енергії надкороткого випромінювання.

8. Визначено критерії оцінки ступеня впливу на динаміку зміни кількості втрачених пакетів засобів широкополосного радіодоступу.

9. Визначено механізм впливу послідовності пакетів імпульсів надкороткого випромінювання при сумірній затримці між імпульсами в пакеті та періодом несучої частоти корисного сигналу. Аналіз оцінки ступеня впливу за таких параметрів, показав вищі показники.

10. Проведено аналіз цифрових видів модуляцій показав перевагу за певних умов такого виду впливу з точки зору ефективності. Розроблений метод визначення параметрів надкороткого випромінювання дозволяє розрахувати необхідну характеристику FOM комплексу випромінювання та часові характеристики послідовності імпульсів для ефективного впливу на потрібній відстані.

11. Розроблений алгоритм формування послідовності імпульсів дозволяє розширити характеристики надкороткого випромінювання за частотою проходження імпульсів до 800 МГц, а також формувати послідовності імпульсів до 64 в пакеті.

12. Сформовано низку оціночних виразів, що дозволить визначати ступінь впливу послідовності надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Конахович Г.Ф. Системи радіозв'язку. Навчальний посібник. – К.: НАУ, 2004 – 311с.
2. Електронний ресурс. Режим доступу: https://gsmhub.com.ua/glossary/80211#google_vignette
3. IEEE Std 802.11a-1999(R2003). Part 11:Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band / IEEE-SA Standards Board.-2003.- 83p.
4. Основи побудови засобів та систем телекомунікацій: навчальний посібник / [Кичак В. М., Барась С. Т., Кравцов Ю. І. та ін.] – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 188 с.
5. Сайко В.Г., Амірханов Е.Д. Мережі цифрового радіозв'язку і радіодоступу нового покоління. – К.: ДУТ, 2015. – 77 с.
6. Analysis of High-Power RF Interference on Digital Circuits David Yang, R. Kollman Electromagnetics. – Vol. 26. – 2006. – № 1. – P. 87-102.
7. CISPR/TR 18-1, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment - Part 1: Description of phenomena, edition 2.0, 2010-06.
8. Імпульсна та цифрова електроніка: Навчальний посібник / А.О. Новацький – К: НТУУ „КПІ”, 2014 – 385с.
9. Brauer F. Susceptibility of IT network systems to interferences by НРЕМ, Electromagnetic Compatibility / F. Brauer, F.Sabath, J.Haseborg and at all. – EMC. – IEEE International Symposium. – 2009. – P. 237–242.
10. Теорія електромагнітного поля і основи техніки НВЧ: навч. посіб. / С.В. Соколов, Л.Д. Писаренко, В.О. Журба; за заг. ред. Г.С. Воробйова. – Суми: Сумський державний університет, 2011. – 393 с.

11. IEC/TR 61000-3-7(2008) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3–7: Limits — Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems. – 65 p.

12. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування: Навч.посібник / Уклад.: В.Б.Абрамов, В.О.Бржезицький, О.Р.Проценко, під ред. Бржезицького В.О. – К.:НТУУ «КПІ», 2015. – 235 с.

13. IEEE Std 802.11a-1999(R2003). Part 11:Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band / IEEE-SA Standards Board.-2003.- 83p.

14. Ultra-wideband transmitter research / Lehr J.M., Baum et. All. – IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 26. No. 3.

15. Kirichek R. Improvement of Russian regulatory system on protection against electromagnetic attacks / R.Kirichek, V.Chvanov // 9th International Symposium on EMC: proceedings. — Wroclaw (Poland), 2010. – P.567-571. 132

16. Messier M., Radasky W., Madrid M. Testing of personal computers to IEC standard waveforms / M. Messier // Metatech Corporation, Meta-R 174, 2000. — P. 22–28.

17. Parfenov Y.V., Zdoukhov L.N., Radasky W.A. and Ianoz M. Conducted IEMI Threats for Commercial Buildings / Y.V. Parfenov and at all // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. — 2004. — Vol.46. — № 3. — P. 404.

18. Radasky W.A. Protection of commercial installations from the high frequency electromagnetic threats of HEMP and IEMI using IEC standards / W.A. Radasky // Proceedings 2010 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). - 2010. - P.758-761.

ДОДАТКИ

1. ANALYTICAL PART

1.1 Analysis of telecommunication systems using broadband wireless technologies

Currently, broadband radio access devices are widely used in many areas, special, household, and others [1]. Different communication topologies of elements can be organized, each element of the system can perform different functions from the end device to the element that generates and/or processes data, to devices that provide certain routing algorithms.

The architecture of building telecommunication systems using wireless technologies is regulated by several IEEE 802 standards [2]. These standards provide for a division into personal, local and mobile wireless networks.

Particularly relevant, in modern conditions of development of telecommunication systems, is the use of wireless technologies in broadband devices due to the widespread use of various influences to disrupt their stable operation [3].

1.6 Wireless Personal Area Networks

Wireless Personal Area Networks (WPANs) are regulated by the IEEE 802.15 standard and include the well-known substandards Bluetooth, ZigBee, and others. Bluetooth uses frequency hopping spread spectrum (FHSS) modulation.

FHSS modulation is easy to implement, provides immunity to broadband interference, and the equipment is inexpensive. According to the FHSS algorithm, in Bluetooth the carrier frequency of the signal changes in a jump manner 1600 times per second. There are several operating frequencies. The sequence of switching between these frequencies for each connection is pseudo-random and known only to the receiver and transmitter, which are synchronously tuned every 625 μ s. Bluetooth

provides communication at distances of up to 100 meters with a transmitter power of 100 mW and speeds of several Mbps.

The PAN standards network also includes low-speed communication sub-standards, the most famous of which is ZigBee. Here, the maximum communication range is limited to a distance of 10 m and a speed of about 250 kbit/s with very low energy consumption, which makes it possible to use such devices from autonomous power sources for a long time (several years) without replacing the power supply.

Such systems use broadband modulation standards with direct pseudo-random sequence spread spectrum (Direct sequence spread spectrum - DSSS), or binary or quadrature phase shift keying (binary phase-shift keying - BPSK, quadrature phase shift keying - QPSK). It should be noted that in the specified wireless low-speed data transmission network, each wireless element can perform different functions in the network, which can have a different topology and can be used in building hybrid highly scalable geographically dispersed networks with minimal infrastructure and millions of end nodes. Personal wireless networks are characterized by relatively low transmission speeds (with the exception of new developments of ultra-wideband radio communication at high carrier frequencies), low power consumption, and short range. They can be used as a means of collecting parametric data from sensors, in "Smart Home" systems, data collection systems from sensors in/on a living organism, and systems for providing wireless inter-unit communication of various devices.

1.7 Wireless local area networks

Wireless local area networks (Wireless Local Area Network - WLAN), known as Wi-Fi, are regulated by a set of IEEE 802.11 standards and are used to build computer networks similarly to building local area networks (LAN) using wired technologies (UTP cable - twisted pair).

Compared to WPANs, WLAN devices have different scalability limits and higher information transfer speeds.

Increasing speed requires the use of modulations with high density. The most common signal modulation in this standard is Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), the main feature of which is the simultaneous modulation of closely spaced subcarriers and, as a consequence, with a modulation rate that is proportional to their number. DSSS and FHSS modulations can also be used. The standard provides for 11-14 channels.

The signal bandwidth on each channel is 22 MHz. The carrier frequency is about 2.4 GHz. The range of such systems can reach about 250 meters.

1.8 Wireless metropolitan networks

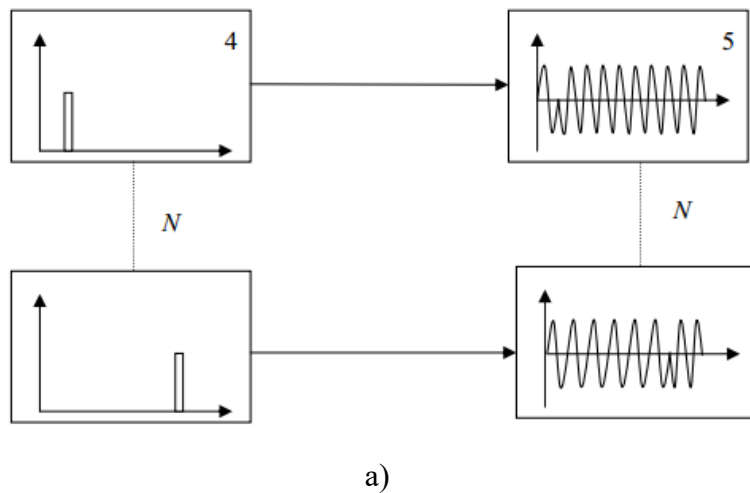
Wireless metropolitan data transmission networks (Wireless Metropolitan Area Network - WMAN) are regulated by the IEEE 802.16 standard and are widely known as WiMax networks. The distance between devices can be about several kilometers, and modulations are adapted to serve a large number of users with special algorithms for serving mobile users. The transmitter power is on the order of several watts.

1.9 Types of modulations in wireless data networks

Considering the listed branches of the standards IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.

16, three main types of modulations used can be distinguished: FHSS, DSSS, OFDM, and these modulations can be attributed to the method of digital signal processing before modulation/demodulation to carrier frequencies. As is known, during DSSS modulation, a pseudo-random sequence is processed, in which one bit of useful information is transmitted by several bits of a pseudo-random sequence (chip

sequence). During OFDM modulation, the data stream is multiplexed over several rows of carrier frequencies, creating conditions for modulating several carriers with lower rates of change of states of the modulated carrier frequency. During FHSS modulation, according to a pseudo-random law, the carrier frequencies change. The listed modulation methods expand the signal spectrum, for example, with DSSS modulation, the spectrum expands by the same number of times as the number of chip bits increases to transmit one bit of useful information, and the amplitude of the modulated signal will be reduced by approximately the same number of times. The listed methods allow to increase the security of the transmitted information, since the laws of the pseudo-random law are known only to interacting devices, and do not affect devices with other pseudo-random laws. With OFDM modulation, compatibility designed for multiple users is ensured by channel division, as well as the use of adaptive modulation methods with flexible changes in modulation parameters, including the symbol rate. Fig. 1.1 shows the conditional division of modulation types into lower and upper levels.



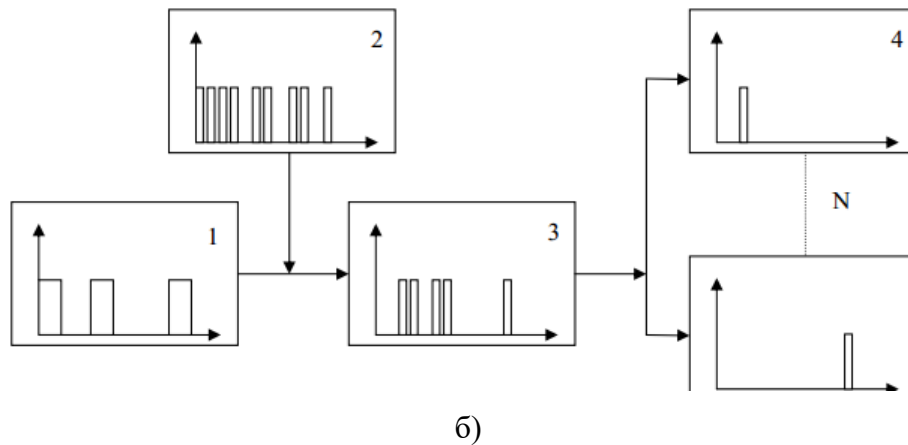


Figure 1.1 – a) lower modulation level; b) upper modulation level

1- output information sequence, 2- coding sequence, 3 – result sequence, 4 – N parallel sequences with reduced speed, 5 – N – modulated carrier frequencies

Lower level modulations are understood as methods of superimposing a bit digital sequence on each carrier frequency, and upper level modulations are methods of processing the output digital signal to form bit sequences for modulating each of the carrier frequencies. As lower level modulations in IEEE802.11, IEEE802.15, IEEE802.16 standards, BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM modulations, upper level DSSS, OFDM are often used. Upper-level modulation consists of operating under carrier frequencies and/or temporal characteristics of signals that will be modulated at the lower level, as well as their temporal characteristics.

1.6 Conclusions by section and statement of the research task

The analysis of modern telecommunication systems using broadband wireless data transmission technologies showed their prevalence in various areas.

The similarity of modulation types when building broadband radio access networks of various scales was noted, which suggests that in the case of an electromagnetic attack, the mechanisms occurring in different broadband means will be similar.

To achieve the goal set in the master's qualification work, the following tasks were formulated:

1. To analyze the state of the problem of ensuring the stable functioning of broadband radio access means under the influence of intentional pulsed electromagnetic radiation.

2. To analyze the main types of sources of electromagnetic interference and the parameters of the generated radiation.

4. Determination of the mechanism of influence of electromagnetic interference on broadband radio access means.

5. Development of an algorithm for determining informative parameters of signals and increasing the throughput of radio communication means.

An improved telecommunications system will allow for the creation of centralized management of control system resources in order to increase its effective operation.

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Підвищення точності визначення інформативних
параметрів сигналів та пропускної спроможності
засобів радіозв'язку**

Кваліфікаційна робота магістра

Виконав:

Д. В. Мерцалов

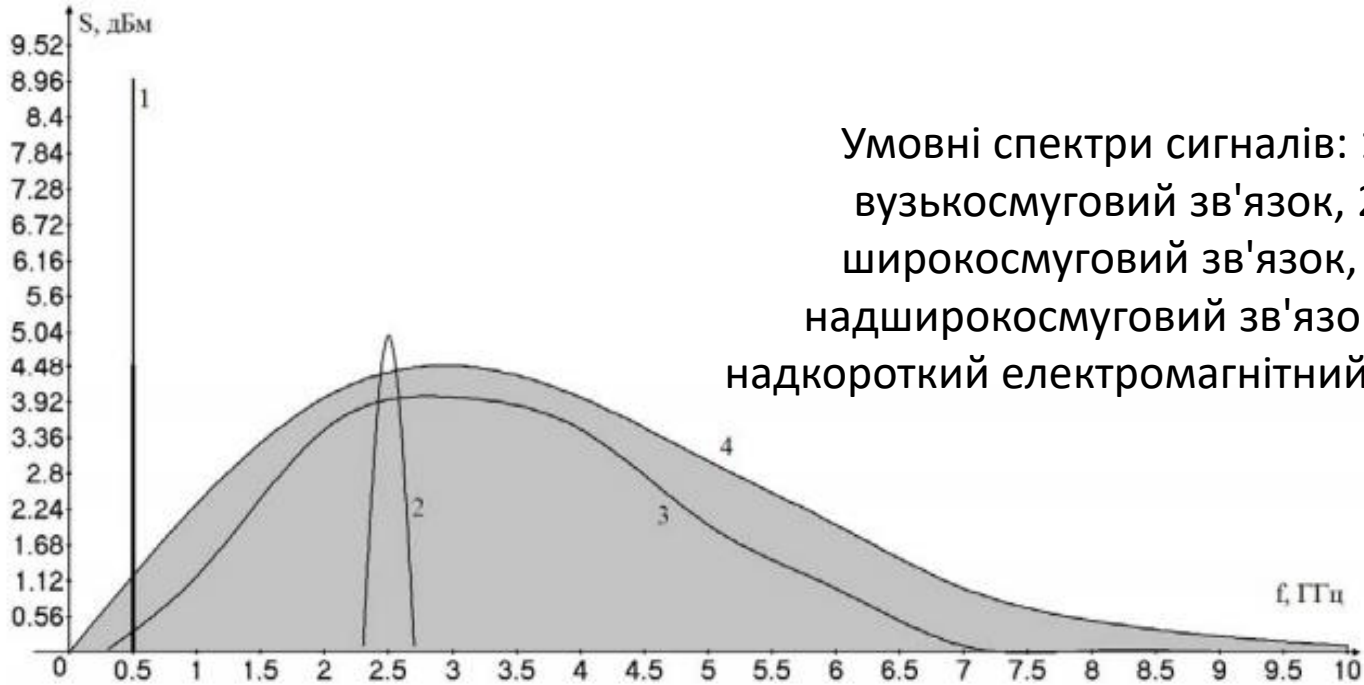
Керівник:

д.т.н., проф.

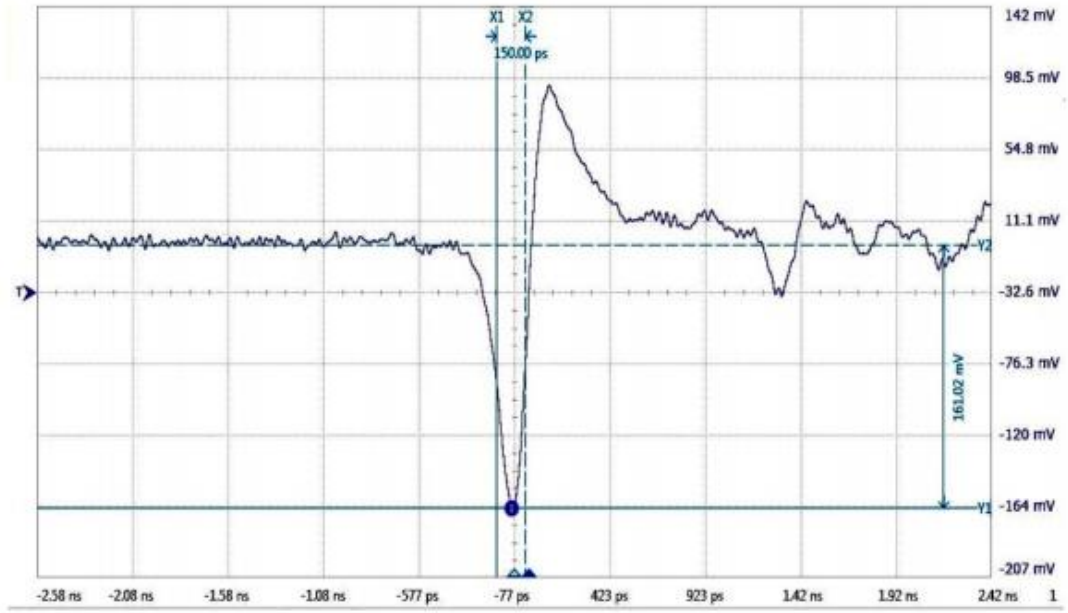
О.В. Шефер

Полтава 2025

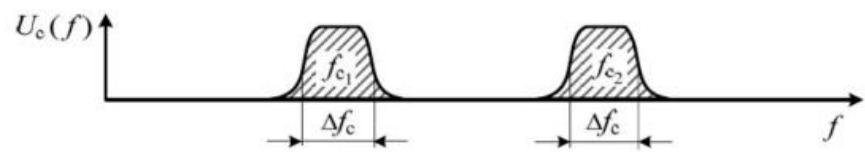
- ❖ **Об'єктом дослідження** є процеси передачі та обробки сигналів в системах радіозв'язку.
- ❖ **Предметом дослідження** є методи, технології та алгоритми, які дозволяють оптимізувати пропускну спроможність каналів зв'язку.
- ❖ **Метою кваліфікаційної роботи** є підвищення ефективності впливу надкоротких імпульсів на засоби радіозв'язку шляхом удосконалення методу оцінки завадостійкості засобів широкосмугового радіодоступу.



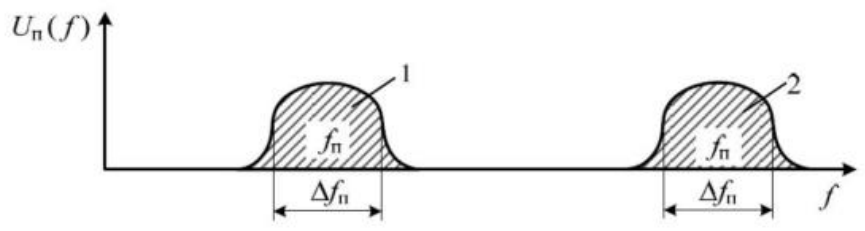
Умовні спектри сигналів: 1 – вузькосмуговий зв'язок, 2 - широкосмуговий зв'язок, 3 - надширокосмуговий зв'язок, 4 - надкороткий електромагнітний імпульс



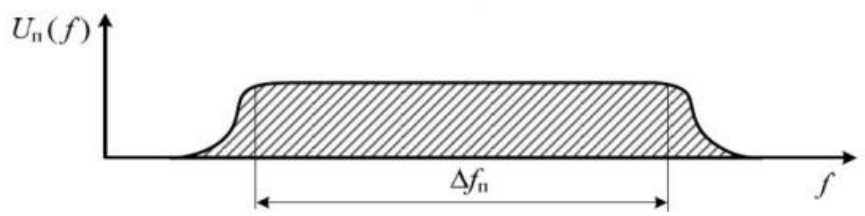
Типова форма надкороткого електромагнітного імпульсу



a



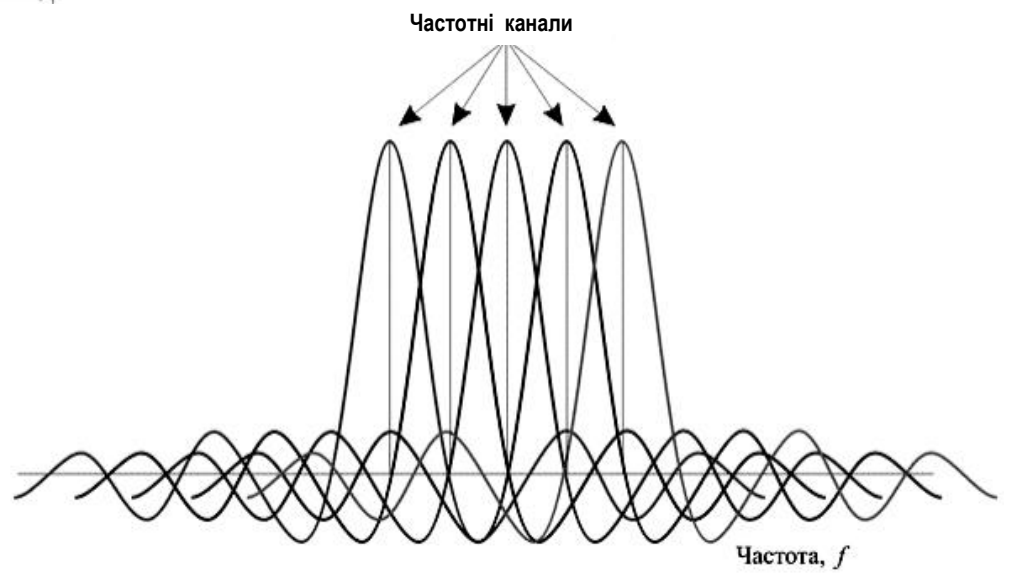
б

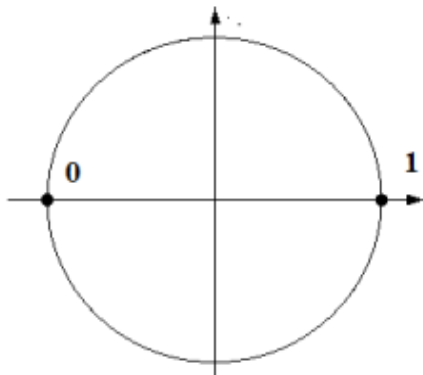


в

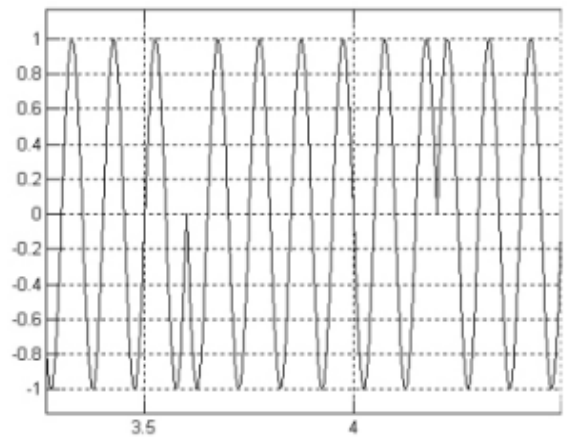
Види перешкод залежать від ширини спектра. а – корисний сигнал, б - прицільні перешкоди, в- загороджувальна перешкода

Спектр OFDM сигналу



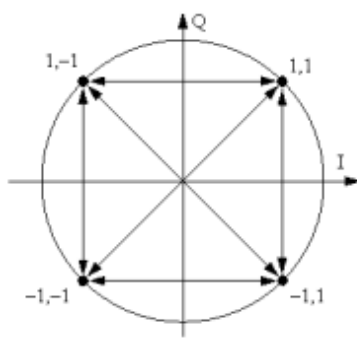


а)

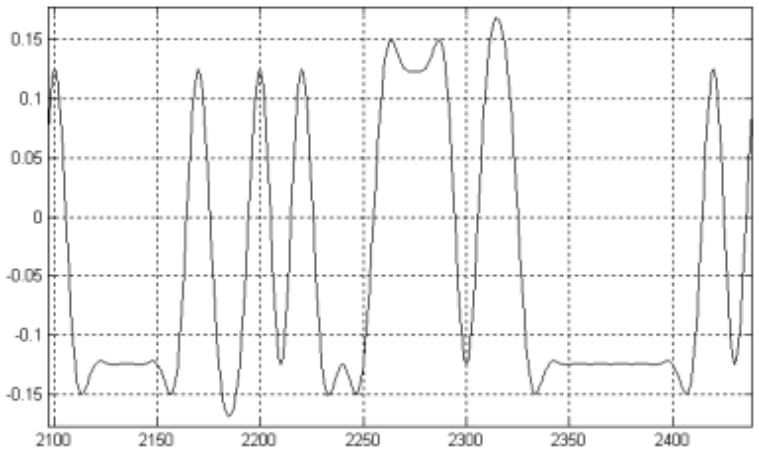


б)

Двійкова фазова маніпуляція, а - сигнальне сузір'я, б - форма модульованого сигналу

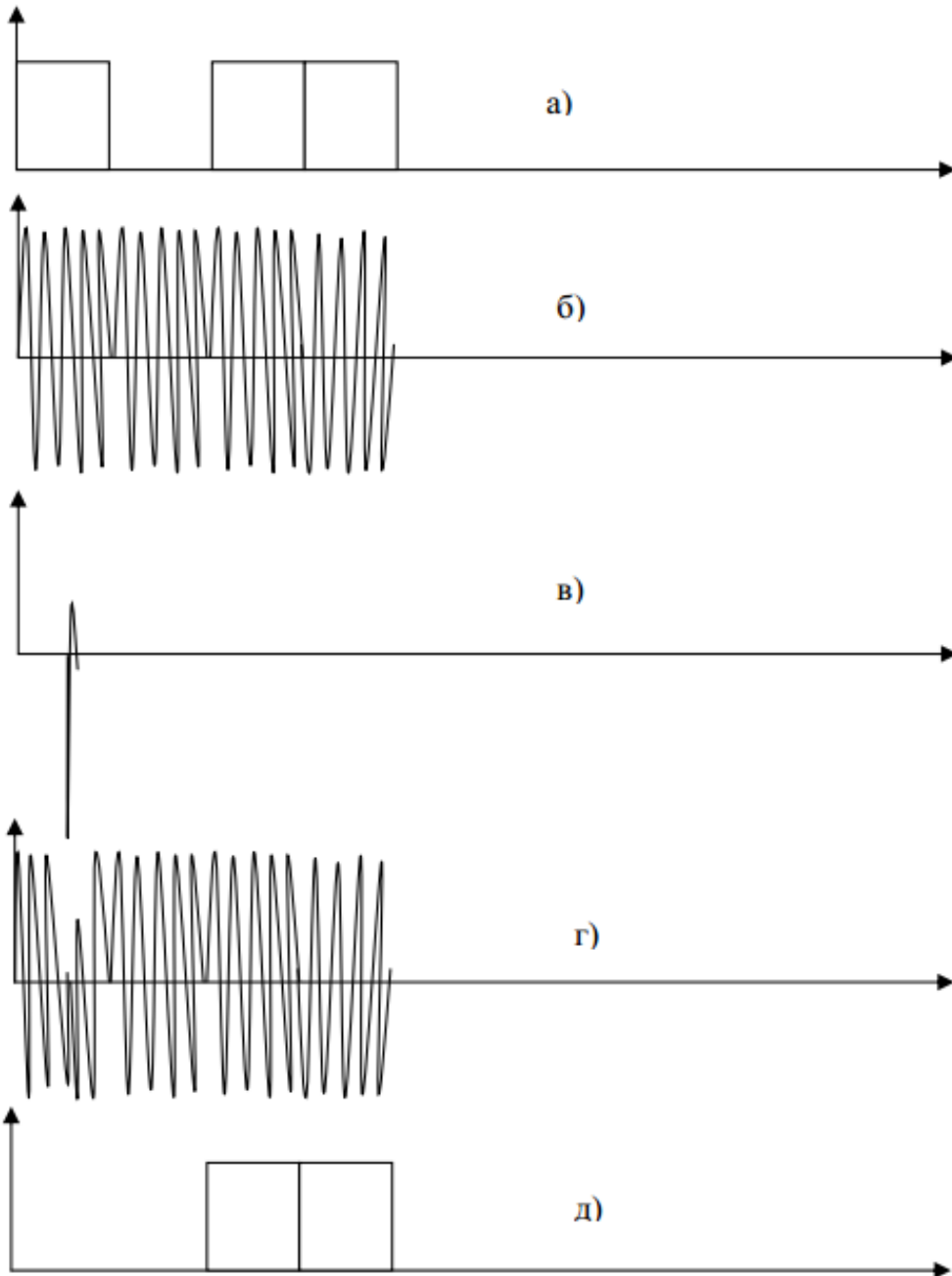


а)

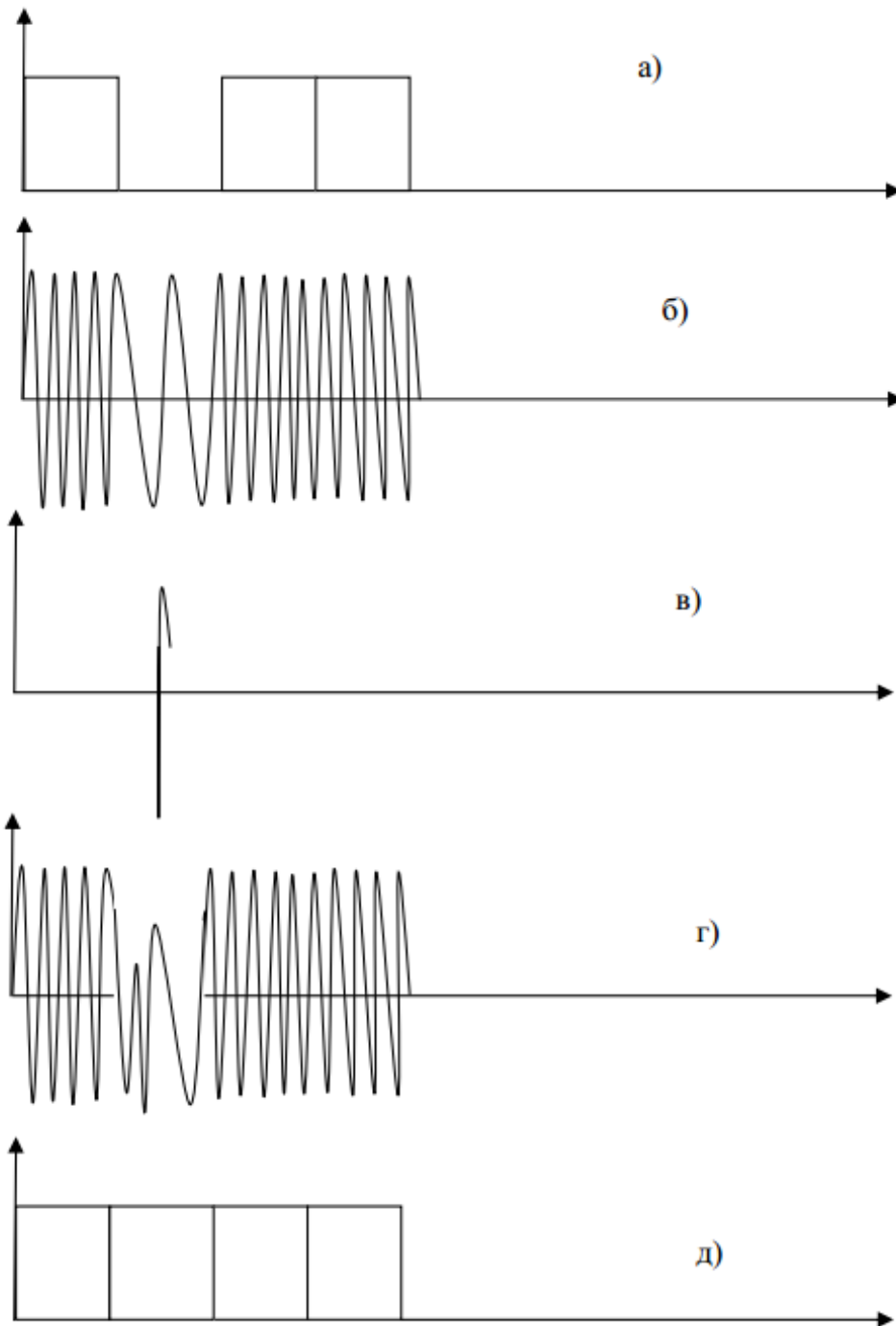


б)

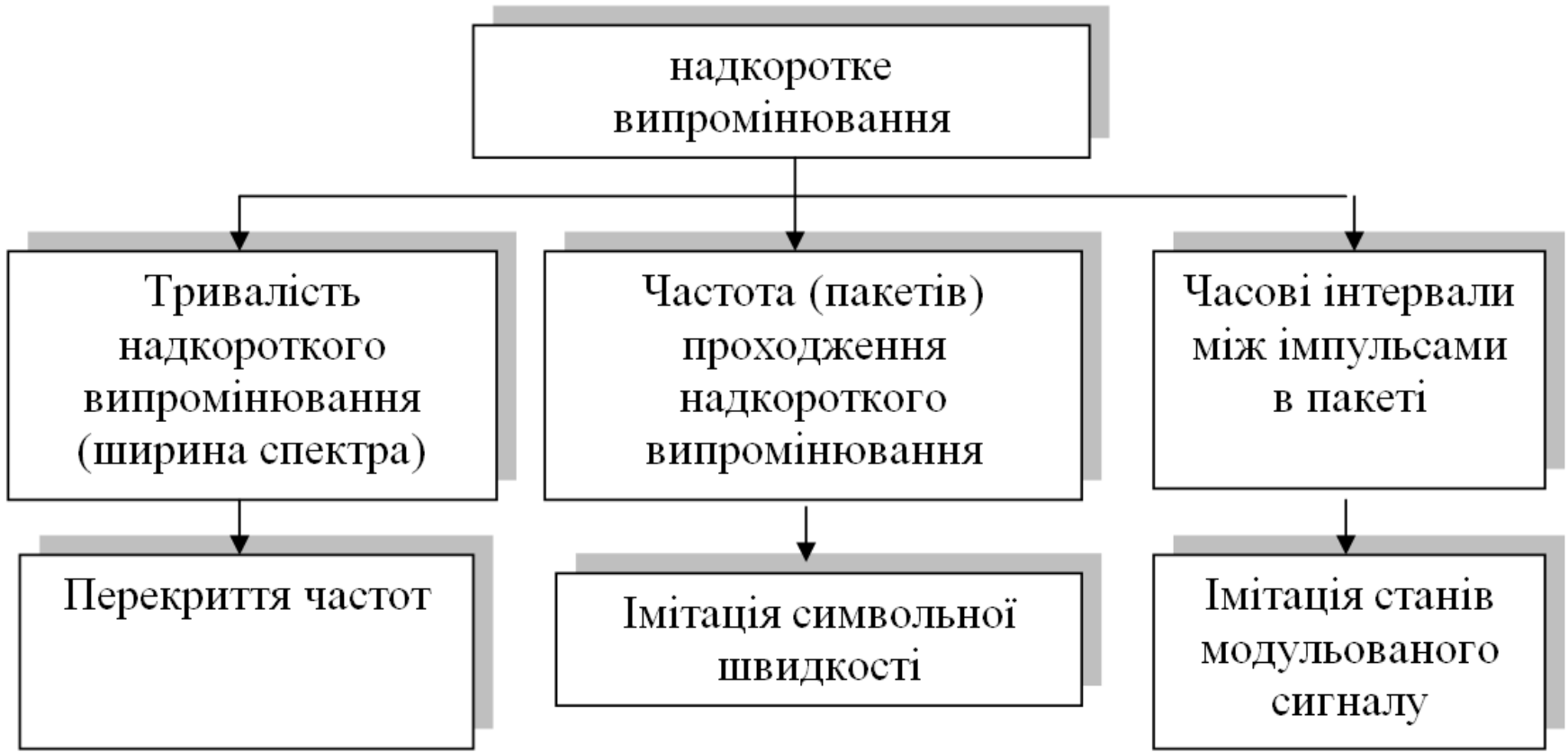
Квадратурна фазова маніпуляція, а - сигнальне сузір'я, б - форма модульованого сигналу



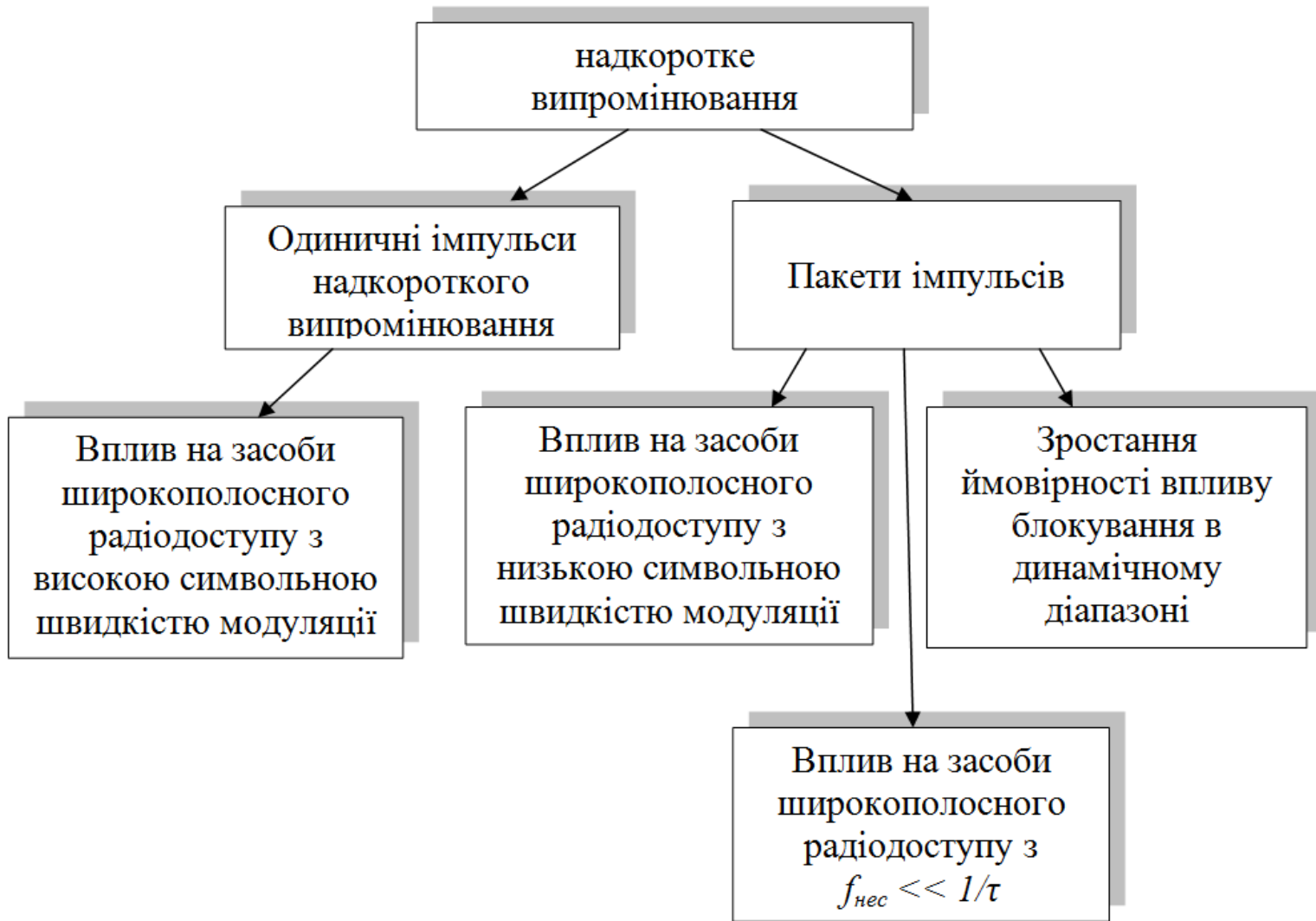
Механізм впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу, що використовують BPSK модуляцію: а – імпульс надкороткого випромінювання, б – корисний сигнал, в – модульований корисний сигнал, г – результуючий сигнал, д – сигнал на виході демодулятора



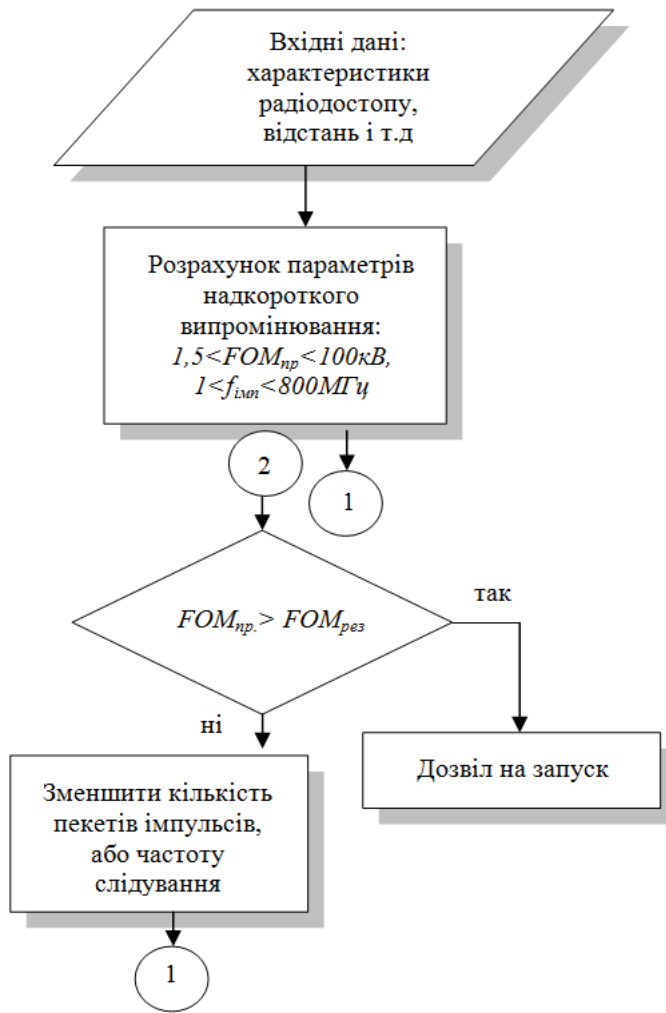
Механізм впливу надкороткого випромінювання на засоби широкополосного радіодоступу, що використовує модуляцію GMSK: а – імпульс надкороткого випромінювання, б – корисний сигнал, в – модульований корисний сигнал, г – результуючий сигнал, д – сигнал на виході демодулятора



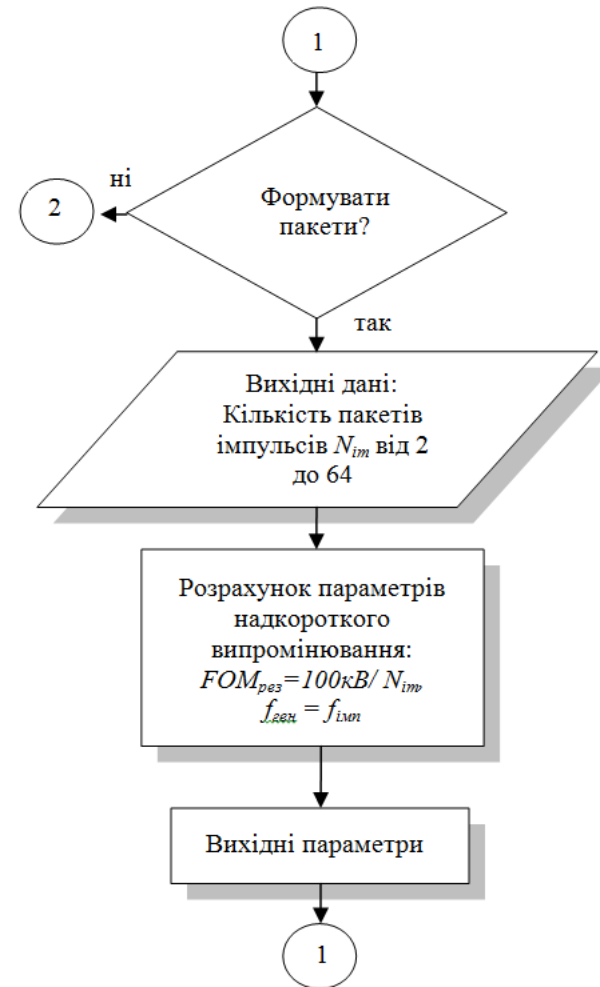
Алгоритм впливу послідовності надкоротких електромагнітних імпульсів на прийом та демодуляцію піднесучої частоти



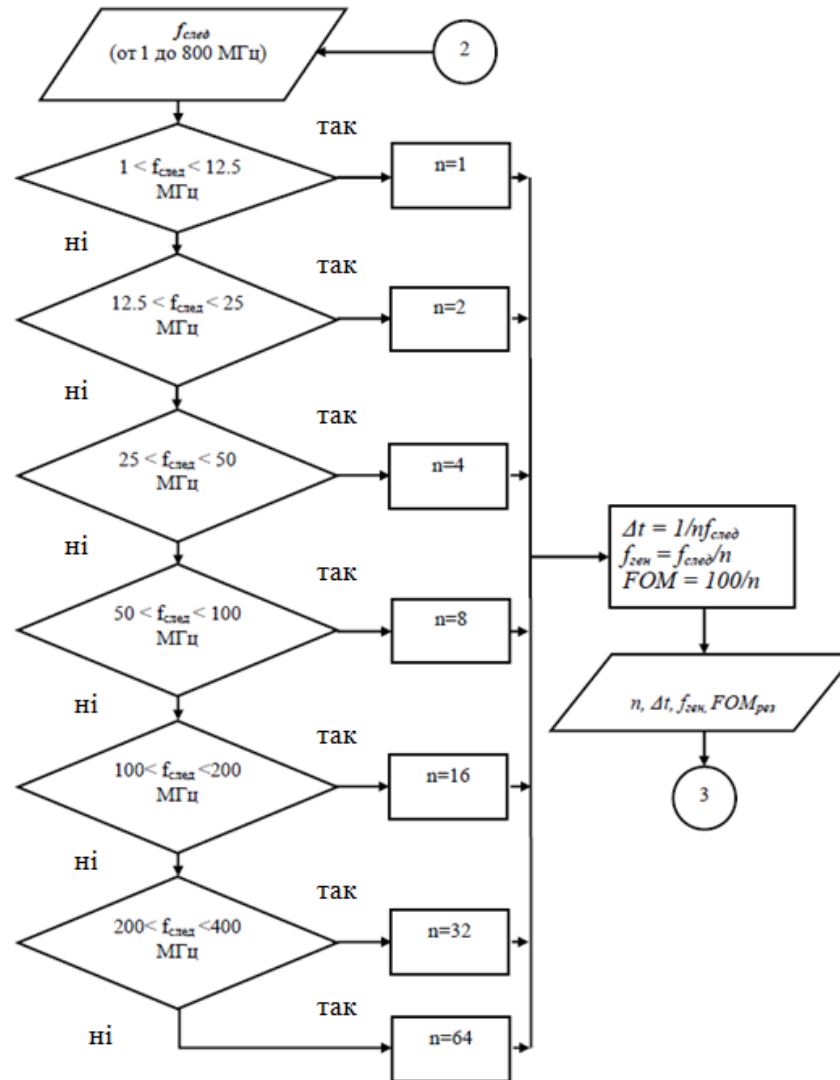
Порівняльний аналіз впливу одиничних пакетів та пакетів імпульсів надкороткого випромінюванняються, з прямим розширенням спектра з допомогою m -послідовностей



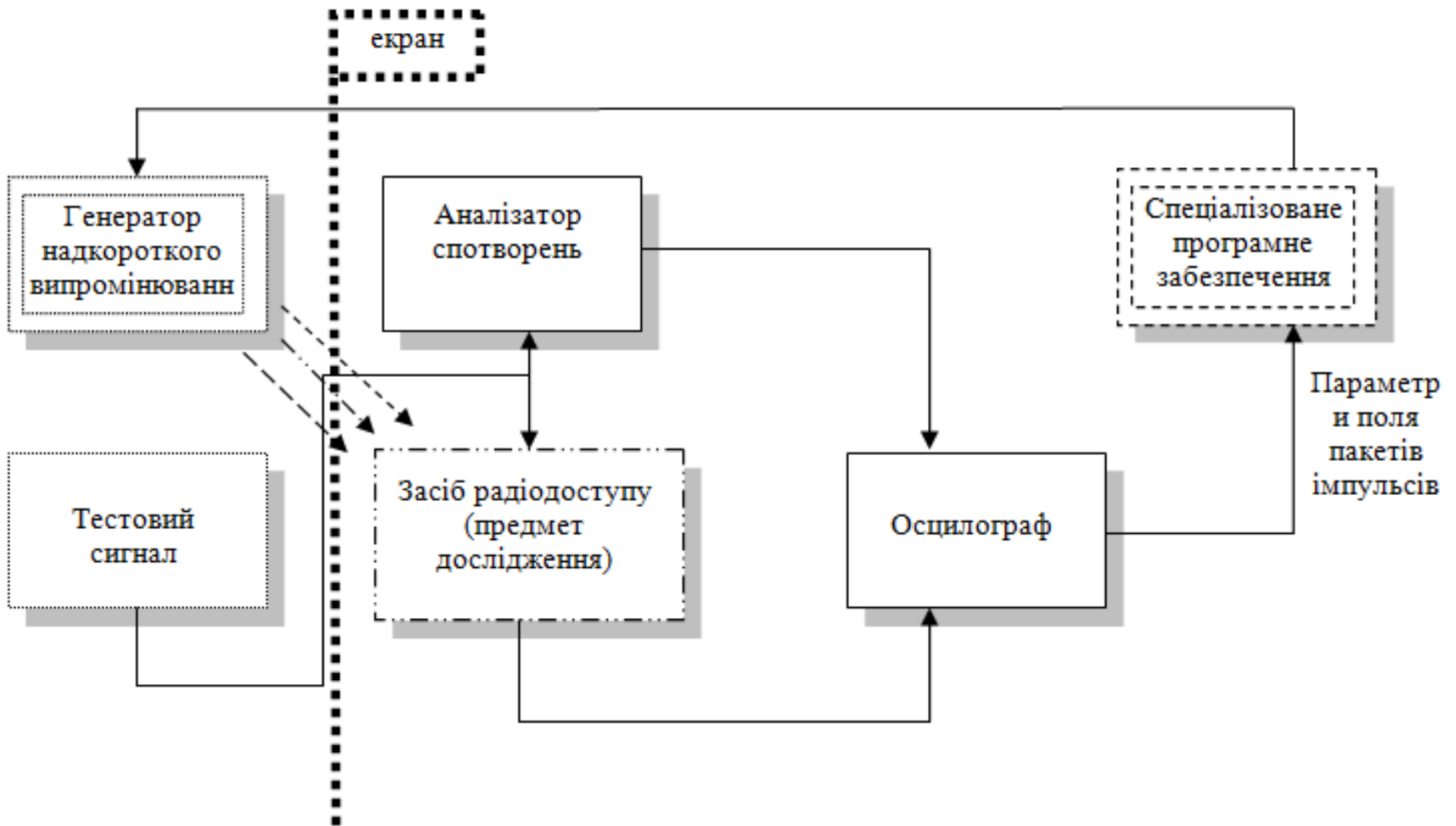
Блок – схема алгоритму
первинної обробки
даних



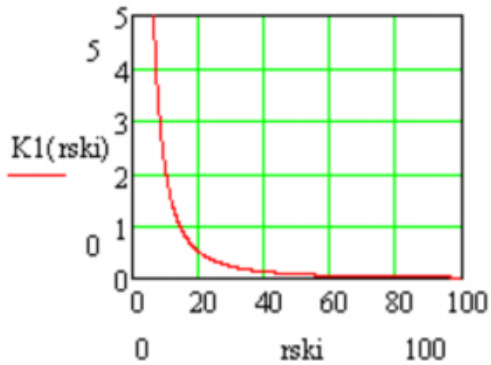
Блок - схема алгоритму гілки
визначення характеру
випромінювання та формування
пакетів



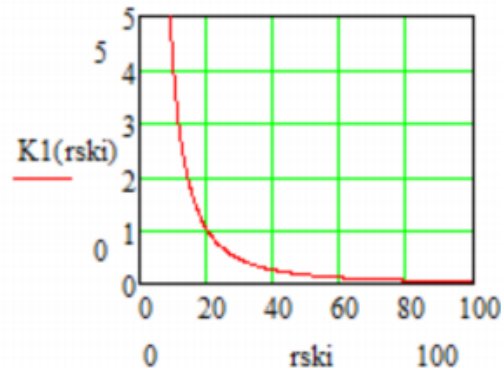
Блок - схема алгоритму гілки
формування частоти
випромінювання спектру сигналів



Структурна схема
діагностичної системи



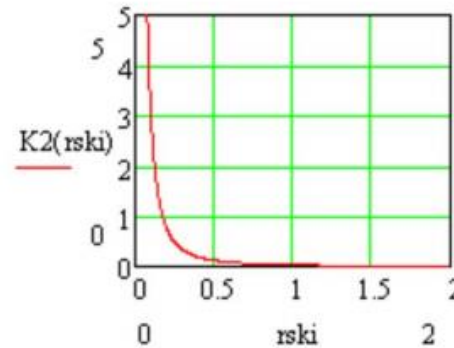
a)



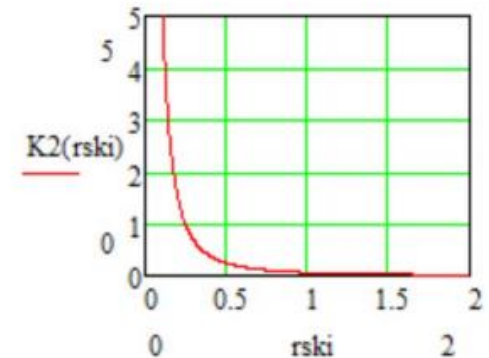
б)

Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу з урахуванням перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на мобільний телефон, а – 1 МГц, б – 2 МГц

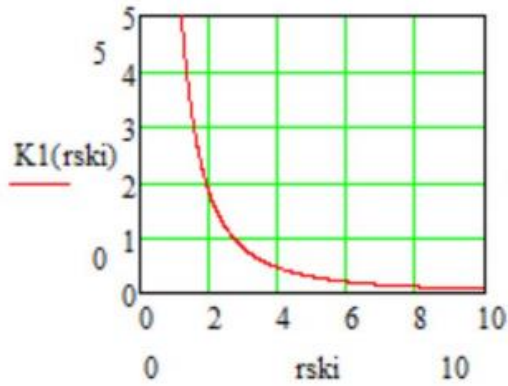
Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу з урахуванням перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на двохдіапазонну портативну радіостанцію, а – 1 МГц, б – 2 МГц.



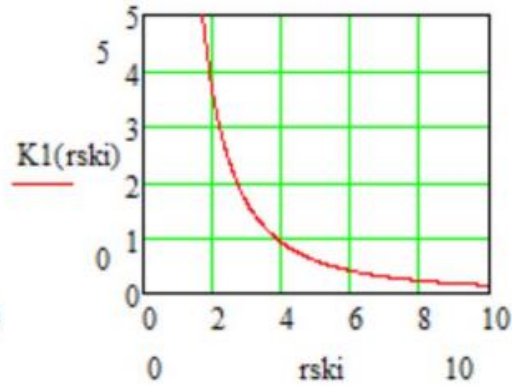
a)



б)

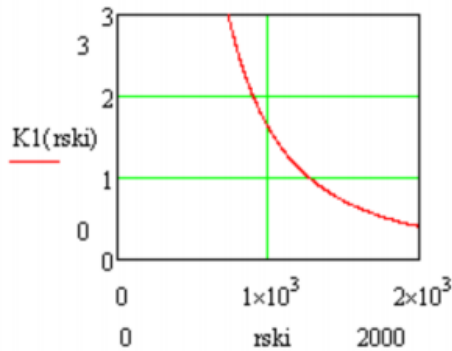


а)

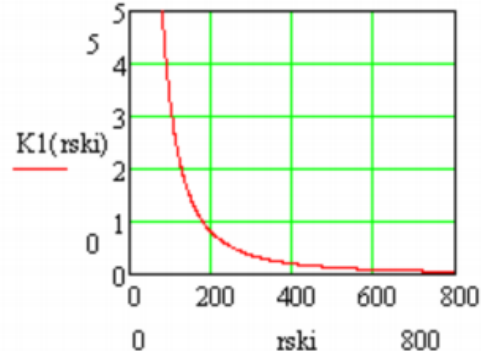


б)

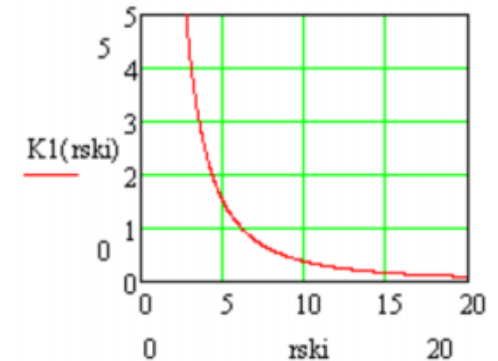
Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу з урахуванням перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на засіб широкополосного радіодоступу, а – 1 МГц, б – 2МГц



Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу без урахування перекриття спектральних частин від відстані r (м) джерела випромінювання на цифрову бездротову радіостанцію



Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу без урахування перекриття спектральних частин на двохдіапазонну портативну радіостанцію. Режим 54 Мбит/с, QAM 64 2,4ГГц, направлена антена



Залежність ступеня впливу надкороткого імпульсу без урахування перекриття спектральних частин на засіб широкополосного радіодоступу

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!