

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 004.45:004.491

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету
Інформаційних технологій

_____ / Болбот І. М. д.т.н, проф. /

підпис ПБ, вчене звання і ступінь

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
Комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки

_____ / Касаткін Д.Ю., к.п.н., доцент. /

підпис ПБ, вчене звання і ступінь

«__» _____ 2024 р.

«__» _____ 2024 р.

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

На тему: «Дослідження "глушилки" – як засобу електронної боротьби»

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітня програма: Комп'ютерні системи захисту інформації

Гарант освітньої програми

д.пед.н., професор _____ / Мамченко С.М./

науковий ступінь, вчене звання

підпис

ПБ

Керівник дипломного проекту: _____ / Сагун А.В. /

підпис

ПБ

Виконав: _____ / Дубравський А.В. /

підпис

ПБ

КИЇВ-2024

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри

комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки

/ Касаткін Д.Ю., к.п.н., доцент. /

підпис

ПІБ, вчене звання і ступінь

« » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Дубравському Андрію Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність (напрямок підготовки): 123 «Комп'ютерна інженерія».

Освітня програма: комп'ютерні системи захисту інформації

Тема магістерської роботи: «Дослідження "глушилки" – як засобу електронної боротьби»

затверджена наказом ректора НУБІП України від “01” листопада 2023 № 1999С

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____

Вихідні дані до магістерської роботи: принципи роботи, конструктивні особливості та методи оцінки ефективності пристроїв придушення сигналів у сучасних умовах застосування.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. аналіз методів та засобів радіоелектронної боротьби та глушіння сигналів об'єктів. Описано загальне призначення, класифікація та проведено порівняння ефективності роботи основних видів засобів РЕБ.
2. провести порівняння ефективності зони захисту, потужності при їх протидії реальним об'єктам.
3. проаналувати залежності вартостей РЕБ для глушіння на різних частотах, ефективності їх використання в реальних умовах та вплив на роботу сучасних типів засобів глушіння сигналів
4. здійснити реалізацію практичних РЕБ систем з використанням реальних компонентів.

Дата видачі завдання “26” листопада 2023 р.

Керівник магістерської роботи _____ / Сагун А.В. к.т.н., доцент /

(підпис)

(ПІБ, вчене звання і ступінь)

Завдання прийняв до виконання _____ / Дубравський А.В. /

(підпис)

(ПІБ)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Постановка задачі магістерської роботи	15.11.2023	Виконано
2	Аналіз предметної області	13.04.2024	Виконано
3	Проектування системи	20.05.2024	Виконано
4	Реалізація системи	27.06.2024	Виконано
5	Тестування розробленої системи	11.09.2024	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	18.10.2024	Виконано
7	Оформлення графічного матеріалу	26.10.2024	Виконано
8	Постерний передзахист	07.11.2024	Виконано

Студент _____ / Дубравський А.В. /

підпис

ПБ

Керівник проекту (роботи) _____ / Сагун А.В. /

підпис

ПБ

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 60 сторінок, 13 рисунків, 16 таблиць, 12 джерел.

РАДІОЕЛЕКТРОННА БОРОТЬБА, АНТЕННІ СИСТЕМИ, ГЛУШІННЯ СИГНАЛІВ

Мета – полягає у вивченні принципів роботи пристроїв придушення сигналів, їх технічних характеристик та методів оцінки ефективності в реальних умовах застосування.

Об'єкт – пристрої придушення сигналів, що застосовуються в системах радіоелектронної боротьби.

Предмет дослідження – принципи роботи, конструктивні особливості та методи оцінки ефективності пристроїв придушення сигналів у сучасних умовах застосування.

Проект складається з трьох розділів.

У першому розділі представлено аналіз методів та засобів радіоелектронної боротьби та глушіння сигналів об'єктів. Описано загальне призначення, класифікація та проведено порівняння ефективності роботи основних видів засобів РЕБ.

У другому розділі на основі проведених розрахунків основних елементів та вузлів засобів глушіння у вигляді купольної та прототипної РЕБ системи глушіння проведено порівняння ефективності зони захисту, потужності при їх протидії реальним об'єктам.

У третьому розділі здійснено реалізацію практичних РЕБ систем з використанням реальних компонентів. Проаналізовані залежності вартостей РЕБ для глушіння на різних частотах, ефективності їх використання в реальних умовах та вплив на роботу сучасних типів засобів глушіння сигналів.

Результатом роботи є дослідження певних видів систем РЕБ та їх компонентів, аналіз результатів їх використання в умовах сучасних війн, формування перспектив розвитку як самих систем глушіння, так і їх перспективних типів.

ЗМІСТ

	стор
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ	10
1.1 Загальне призначення засобів та пристроїв РЕБ	10
1.2 Активні та пасивні РЕБ-системи	12
1.3 Класифікація засобів РЕБ	18
РОЗДІЛ 2. ФУНКЦІОНАЛЬНА БУДОВА ТА ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМ РЕБ	21
2.1 Ключові елементи традиційних систем РЕБ	21
2.2 Аналіз РЕБ пристроїв-прототипів	22
2.3 Антени РЕБ та методики їх вибору і розрахунку	25
2.4 Алгоритм розрахунку купольного пристрою радіоелектронної боротьби (РЕБ)	38
2.5 Аналіз частот роботи радіоелектронних засобів для протидії	41
2.6 Розрахунок параметрів РЕБ для протидії реальним об'єктам	45
РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕБ-СИСТЕМ ТА ЇЇ ТЕХНІКО- ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ	49
3.1 Визначення технічних та економічних показників для створених систем РЕБ	49
3.2 Засоби протидії глушінню	56
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61
ЗМІСТ	7
10	7

21	7
49	7
49	7
56	7
59	7
61	7

В ЯКОСТІ ІНШИХ ПРИКЛАДІВ ДАНОГО ВИДУ АНТЕН МОЖНА НАВЕСТИ НАСТУПНІ МОДЕЛІ: 28

Орієнтуючись на дані, наведені у відкритих джерелах [7], можна назвати фактори, що впливають на зону ефективної протидії системи РЕБ: 37

- потужність передавача РЕБ діє за принципом - чим вища вихідна потужність антени, тим більша зона ефективної протидії. Потужність залежить від передавача і визначається в ватах (Вт) або дБм;..... 37

- частота сигналу задається у довжині хвилі (для прикладу $1 \lambda = 30$ см, а частота $f \approx 1$ ГГц) визначає розмір зони покриття даного РЕБ. У діапазоні 1 ГГц сигнал схильний до середнього рівню втрат через поглинання радіохвиль в атмосфері;..... 37

- коефіцієнт підсилення конюшинної антени відносно низький і складає 2-4 дБ, оскільки забезпечує діаграму направленості випромінювання у вигляді кола. Це дозволяє рівномірно покривати простір, але зменшує дальність в одному напрямку випромінювання;..... 37

- вплив навколишнього середовища пов'язаний з наявністю перешкод, особливостями рельєфу місцевості, будівлі та іншими фактори, які можуть впливати на зону дії сигналу;..... 37

- чутливість цільових пристроїв на відміну від зони протидії РЕБ буде меншою, якщо цільовий пристрій має низьку чутливість або працює на схожих частотах, що викликає інтерференцію. 37

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

EW – Електронна боротьба

C4 – командування, контроль, зв'язок та комп'ютери

KOC - комплекси оперативної служби

SIGINT - перехоплення сигналів

COTS – комерційно доступні компоненти

RCIED - радіокеровані вибухові пристрої

CEMA - Кібер-електромагнітні дії

QPSK - Четвертитонне фазове ключування

BER - Швидкість помилок бітів

DDoS - Розподілене заперечення сервісу

SDN - Програмно-визначена мережева структура

UAS - Безпілотні авіаційні системи

БПЛА - безпілотний літальний апарат

РЕБ – радіоелектронна боротьба

РЕЗ – радіоелектронний захист

РЕР – радіоелектронна розвідка

GNSS - Глобальна навігаційна супутникова система

EMS - Електромагнітний спектр

ВСТУП

Зараз відбувається стрімкий розвиток засобів телекомунікацій та систем зв'язку, що грають ключову роль у забезпеченні інформаційного обміну в різних сферах життя. Водночас, зростає важливість технологій, що дозволяють захищати інформацію та протидіяти несанкціонованому доступу чи перешкодам. У цьому контексті особливої актуальності набувають пристрої придушення сигналів, які є важливим елементом систем радіоелектронної боротьби (РЕБ).

Пристрої придушення сигналів використовуються для запобігання використанню противником радіозв'язку, навігаційних систем, бездротових мереж, а також для захисту власних комунікаційних засобів від зовнішнього впливу [1-3]. Такі технології мають широке застосування у військовій справі, але водночас можуть використовуватися й у цивільних сферах для забезпечення безпеки інформації [4].

Розвиток технологій радіоелектронної боротьби зумовлює необхідність детального дослідження принципів роботи пристроїв придушення сигналів, їх архітектури, характеристик та ефективності. Аналіз цих аспектів дозволить створювати нові ефективніші засоби РЕБ, адаптовані до сучасних умов.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що в сучасних умовах, коли радіоелектронні системи відіграють ключову роль у військовій і цивільній інфраструктурі, захист від зовнішніх перешкод і протидія несанкціонованому використанню радіочастотного спектра є надзвичайно важливими. Пристрої придушення сигналів стають невід'ємною частиною радіоелектронної боротьби, яка спрямована на забезпечення інформаційної безпеки, захисту комунікацій і управління. З розвитком технологій зв'язку і бездротових систем, включаючи 5G, GPS, Wi-Fi, а також зростанням кіберзагроз, зростає необхідність у створенні більш ефективних і технологічно просунутих засобів придушення сигналів. Це робить

дослідження принципів роботи, архітектури та ефективності пристроїв придушення сигналів актуальним і важливим завданням.

Об'єктом дослідження є пристрої придушення сигналів, що застосовуються в системах радіоелектронної боротьби.

Предмет дослідження є принципи роботи, конструктивні особливості та методи оцінки ефективності пристроїв придушення сигналів у сучасних умовах застосування.

Мета дослідження полягає у вивченні принципів роботи пристроїв придушення сигналів, їх технічних характеристик та методів оцінки ефективності в реальних умовах застосування.

Завдання дослідження полягають в тому, щоб:

- 1) Провести аналіз існуючих технологій придушення сигналів.
- 2) Дослідити конструктивні особливостей пристроїв РЕБ.
- 3) Змодельювати роботу системи придушення сигналів та оцінити її ефективність.
- 4) Розробити рекомендацій щодо вдосконалення пристроїв придушення сигналів.

Ця дипломна робота спрямована на розширення наукових знань у галузі радіоелектронної боротьби, що сприятиме створенню інноваційних рішень для забезпечення інформаційної безпеки та ефективного захисту зв'язку.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ БОРОТЬБИ

1.1 Загальне призначення засобів та пристроїв РЕБ

Радіоелектронна боротьба — різновид озброєної боротьби, в ході якої здійснюється вплив радіовипромінюваннями (радіоперешкодами) на радіоелектронні засоби систем управління, зв'язку та розвідки противника з метою зміни якості військової інформації, що циркулює в них, захист своїх систем від аналогічних впливів, а також зміна умов (властивостей середовища) поширення радіохвиль [1].

У сучасній війні, у якій значна роль відведена передачі інформації у вигляді поширення електромагнітних хвиль, кошти РЕБ грають найважливішу роль забезпечення високої бойової ефективності засобів збройної боротьби [1-5].

Об'єктами впливу в ході РЕБ є важливі радіоелектронні об'єкти, такі, як: елементи систем управління військами, силами та зброєю, що використовують радіозасоби. Порушення чи блокування їх роботи призведе до зниження або повного блокування ефективності застосування противником своїх озброєнь.

Цілями сформованих радіоперешкод є радіолінії зв'язку, управління, наведення, навігації. Перешкоди впливають головним чином на приймальну частину радіозасобів. Для створення радіоперешкод можна використовувати активні та пасивні радіоелектронні засоби. До активних відносяться засоби, які використовують принцип генерування (наприклад, передавачі, станції перешкод) для формування випромінювань. Пасивні засоби використовують принцип відображення (перевипромінювання) (наприклад, дипольні та кутові відбивачі та ін.). Для блокування роботи систем електронної навігації, яка працює з

використанням технологій інтернету використовують нетрадиційних підхід – мережевий спуфінг [6],[7]. Це порівняно новий і ефективний вид РЕБ.

В даний час системи РЕБ комплексом узгоджених заходів і дій, які проводяться для того, щоб досягти означених таких цілей:

- зниження ефективності управління військами та застосування зброї противника;
- забезпечення заданої ефективності управління військами;
- застосування власних засобів ураження.

Досягнення зазначених вище цілей може здійснюватися в рамках ураження систем управління військами, зброєю, зв'язку та розвідки противника шляхом зміни якості інформації, яка циркулює в таких системах та швидкості інформаційних процесів, параметрів та характеристик електронних засобів; захисту його систем управління, зв'язку та розвідки від поразки та охоронюваних відомостей про озброєння, військову техніку, військові об'єкти, дії військ від технічних засобів розвідки іноземних держав противника шляхом забезпечення заданих вимог до інформації та інформаційних процесів в автоматизованих системах управління, зв'язку та розвідки та властивостей електронних засобів.

Основні складові сучасних систем РЕБ можна умовно відобразити у вигляді схеми, наведеній на рис.1.1 [7].



Рисунок 1.1 – основні складові сучасних систем РЕБ

Технології глушіння сигналів військових об'єктів можуть впливати як позитивно, так і негативно на результати військових дій. Тому аналіз їх можливостей та особливостей є одним із основних напрямів досліджень у сфері електронної війни. Основні особливості систем РЕБ наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1
Аналіз технології глушіння в РЕБ-системах

Технології	Діапазон частот (МГц)	Ключові особливості	Додатків	Рік введення
Стільникове глушіння	700-2600	Порушує зв'язок із мобільними мережами	Військові операції, втручання у сферу безпеки	2005
Глушіння GPS	1575	Створює перешкоди для сигналів супутникової навігації	Військова навігація, заходи боротьби з дронами	2010
Глушіння Wi-Fi	2400-2500	Блокує бездротове підключення до Інтернету	Контроль натовпу, захист чутливих зон	2012
Радіолокаційне глушіння	3-30	Збиває з пантелику або вводить в оману радіолокаційні системи	Авіаційні та морські стелс-операції	1960
Глушіння цифрового зв'язку	0.1-100	Порушує цифрові комунікації, включаючи канали передачі даних	Кібервійна, перехоплення сигналу	2015

1.2 Активні та пасивні РЕБ-системи

На сьогодні існують активні та пасивні РЕБ-системи.

Активні та пасивні методи радіоелектронної боротьби (РЕБ) є основними підходами для протидії радіосигналам в умовах сучасних військових конфліктів.

Обидва методи мають свої особливості, переваги та недоліки, що визначає їх ефективність у різних ситуаціях [70].

1.2.1 Активні методи РЕБ

Активні методи РЕБ полягають у прямому впливі на ворожі радіосигнали шляхом створення перешкод, які блокують або спотворюють ці сигнали. Це здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв — глушників, які генерують радіочастотний шум або сигнали на тих самих або схожих частотах, що й ворожі системи зв'язку.

Основні характеристики активних методів РЕБ:

а) типи перешкод: створення постійних або тимчасових перешкод на ворожих частотах;

б) принцип роботи: глушники генерують радіочастотні перешкоди, що блокують або деформують сигнали противника, перешкоджаючи передачі інформації;

в) частоти: використовують частоти, що співпадають або наближені до частот ворожих систем зв'язку;

г) різновиди: широкосмугові та вузькосмугові методи глушіння, які можуть впливати на різні типи сигналів.

Переваги існуючих РЕБ-систем та засобів:

- швидкий ефект, який полягає у здатності миттєво блокувати ворожі сигнали, знижуючи ефективність супротивника;

- контрольована дія за рахунок можливості точно налаштовувати параметри впливу на цільові сигнали;

- можливість агресивного впливу, яке забезпечує активне глушіння, що дозволяє ініціювати непередбачувані дії, наприклад, запобігання передачі даних або спілкування противника.

В той же час РЕБ-системи мають і певні недоліки:

- виявлення джерела перешкод для активних РЕБ-систем пояснюється тим, що активне випромінювання може призвести до виявлення джерела перешкод, що дозволяє супротивнику вжити відповідні контрзаходи;
- необхідність постійної роботи для забезпечення ефективного впливу (необхідно здійснювати постійний вплив на потенційні об'єкти, що може збільшити споживання енергії).

1.2.2 Пасивні методи РЕБ

Пасивні методи РЕБ не передбачають наявності активного випромінювання або глушіння, проте, вони здійснюють зміну власних характеристик сигналів і використовують методи маскування, що робить пасивну РЕБ-систему менш помітною або ж зовсім унеможлиблює ефективне виявлення джерела пасивних завад [7-9].

Пасивні РЕБ-методи мають свої властивості:

- типи перешкод: маскування або зміна параметрів сигналу (зменшує ймовірність його виявлення або аналізу);
- принцип роботи пасивних РЕБ включають: методи шифрування, зміни частотних характеристик; зміни протоколів зв'язку, що робить систему менш уразливою до спостереження та виявлення;
- маскування сигналів дає пасивній РЕБ-системі можливість змінювати параметри своїх сигналів, наприклад, частоти або інтервали, що ускладнює їх виявлення або перехоплення.

Існуючі переваги пасивних РЕБ-систем вказують на те, що такі системи дуже перспективні і мають потенціал до вдосконалення, адже вони:

- мають менше ризиків виявлення, оскільки пасивне глушіння не передбачає активного випромінювання, тому відсутній прямий ризик бути виявленим;
- зберігається анонімність та непомітність при роботі, що важливо для тактичної переваги;

– вони ефективні при здійсненні довготривалих операцій, адже такі методи менш енергозатратні і можуть працювати безперервно протягом тривалого часу.

Поряд з перевагами існують і недоліки пасивних РЕБ-систем:

– менша ефективність у прямій боротьбі робить пасивне глушіння менш ефективним при необхідності забезпечити негайний вплив на супротивника, порівняно з активними методами;

– обмеження на зміну частоти або протоколів призводять до того, що деякі зміни в параметрах сигналу можуть бути помітні для противника, хоча і не так легко виявляються, як у випадку з традиційними активними РЕБ.

В таблиці 1.2 показано порівняння різних параметрів та властивостей активних і пасивних методів РЕБ.

Таблиця 1.2

Порівняння активних і пасивних методів РЕБ

Критерій	Активне глушіння	Пасивне глушіння
Принцип роботи	Пряме створення перешкод для сигналів противника	Маскування або зміна параметрів власного сигналу
Виявлення джерела	Легко виявляється за допомогою технічних засобів	Неможливо виявити, оскільки немає активного випромінювання
Швидкість ефекту	Миттєвий ефект, можливість швидкої реакції	Поступовий ефект, заснований на масуванні
Енерговитрати	Високі енерговитрати через постійну активність джерела	Менші енергетичні вимоги

Призначення	Швидке глушіння ворожих каналів зв'язку, активна дія	Тривалий захист, збереження анонімності та непомітності
-------------	--	---

Обидва методи мають своє застосування в залежності від тактичних завдань та умов бойових дій. Активні методи ефективні для негайного глушіння та блокування супротивника, тоді як пасивні методи надають перевагу збереженню конфіденційності та непомітності. Вибір між активним і пасивним глушінням залежить від конкретної ситуації на полі бою та поставлених завдань у системах РЕБ.

Ключовим аспектом вивчення електронної війни є розуміння відмінностей між активним і пасивним глушінням. Активне глушіння включає методи, які безпосередньо впливають на ворожі сигнали, передаючи перешкоди на тих самих або схожих частотах. Це досягається за допомогою глушників, які генерують шум або інші радіосигнали, що ускладнюють виявлення основного сигналу. Таке глушіння зазвичай є тимчасовим і вимагає постійної роботи джерела перешкод. З іншого боку, пасивне глушіння використовує власні сигнали системи, маскуючи їх шляхом змін у методах та протоколах зв'язку, що робить систему менш вразливою до виявлення та аналізу. Обидва підходи мають свої переваги та недоліки, які важливо розглянути з точки зору їх ефективності в умовах сучасних бойових дій. Практичні приклади та різноманітні технології показують, як ці методи впливають на результат військових операцій. Наприклад, активне глушіння може швидко знеструмити ворожі комунікаційні системи, забезпечуючи можливість несподіваних атак або підвищуючи безпеку власних військ, що було продемонстровано у ряді конфліктів. Пасивне ж глушіння, знижуючи ймовірність виявлення, стає критично важливим, коли для досягнення успіху необхідні анонімність і непомітність. Оцінка ефективності обох методів підтверджується дослідженнями, які демонструють, як вплив активного та пасивного глушіння

змінюється залежно від обставин та технологій супротивника в умовах сучасної електронної війни.

У результаті роботи РЕБ поразка забезпечується навмисно організованим впливом різними видами випромінювань, які направлені на електронні засоби або канали отримання та передачі даних, спеціальним програмно-технічним впливом на електронно-обчислювальні засоби супротивника. Слід розуміти, що такий вплив може потенційно бути направлений на власні системи управління, зв'язку та розвідки, які захищаються від аналогічних впливів противника, а також від ненавмисних впливів випромінюваннями, які виникають внаслідок спільного або синхронного застосування електронних засобів; захист різного роду відомостей, що здійснюється шляхом їх приховуванням або введенням противника в оману щодо їх реального змісту. Об'єктами РЕБ є носії інформації такі, як радіополя та хвилі різної природи або потоки заряджених частинок, середовище їх поширення та електронні засоби і системи.

Порівняльний аналіз пасивних та активних методів РЕБ, їх перевагам і недолікам, а також результатам, отриманим під час практичного використання в бойових умовах наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння ефективності, вартості та експлуатаційних характеристики пасивних та активних РЕБ-систем

метод	Відсоток ефективності	Вартість usd	Час розгортання, дні
Активне глушіння	85	15000	7
Пасивна РЕБ	60	8000	3
Активне глушіння	10	Високий	-
Пасивна РЕБ	5	Низький	-

Таким чином, системи активної та пасивної РЕБ є такою ж складовою та технічною основою інформаційної протидії в бойових умовах, які і інші подібні засоби.

1.3 Класифікація засобів РЕБ

Складовими частинами РЕБ є радіоелектронне придушення та радіоелектронний захист [4].

1.3.1 Радіоелектронним придушенням називають комплекс заходів та дій що спрямовані на порушення роботи або ж зниження ефективності бойового застосування противником різноманітних радіоелектронних систем та засобів шляхом здійснення впливу на їх приймальні пристрої певними радіоелектронними перешкодами. Такі системи РЕБ забезпечують створення активних та пасивних перешкод, застосовують хибні цілі, пастки та інші методи протидії.

1.3.2 Радіоелектронний захист - складова частина радіоелектронної боротьби, яка спрямована на забезпечення стійкої роботи радіоелектронних засобів в умовах впливу навмисних радіоперешкод противника, електромагнітних випромінювань зброї функціонального ураження, електромагнітних та іонізуючих випромінювань, що виникають в разі застосуванні ядерної зброї, а також в умовах впливу ненавмисних радіоперешкод.

Основу РЕЗ становлять такі компоненти:

- 1) підсистеми забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) РЕЗ;
- 2) комплекси організаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення стійкості перешкод РЕЗ в умовах впливу на них ненавмисних перешкод;
- 3) підсистеми захист РЕЗ від навмисних перешкод, комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на забезпечення перешкодозахисності РЕМ в умовах впливу на них навмисних перешкод;
- 4) механізми захисту РЕЗ від електромагнітних та іонізуючих випромінювань, комплекс організаційних та технічних заходів щодо забезпечення

надійності функціонування РЕЗ в умовах впливу на них певних видів випромінювань, що призводять до функціонального враження електронної елементної бази складових приладів;

5) механізми захисту засобів РЕЗ від впливу хибних сигналів;

б) комплекси організаційних та технічних заходів, спрямованих на заборону противнику можливості введення в системи та засоби інформації будь-яких повідомлень під час передачі ним хибних сигналів.

1.3.3 Радіоелектронна розвідка це комплекс засобів та систем, які використовуються в процесі збирання розвідувальної інформації на основі приймання та аналізу отриманих сигнатур електромагнітного випромінювання. РЕР може використовувати, як перехоплені сигнали з каналів зв'язку між певними абонентами та технічними засобами, так і сигнали від РЛС, станцій зв'язку, станцій постановки радіоперешкод та інших радіоелектронних засобів.

1.3.4 Комплексний технічний контроль це вид РЕБ, який здійснює контроль за станом функціонування власних радіоелектронних засобів та їх захистом від дії технічних засобів розвідки супротивника. Такий контроль реалізується на користь радіоелектронного захисту. Він включає певні види специфічного контролю: радіо, радіотехнічний, фотографічний, візуально-оптичний контроль, а також контроль ефективності захисту інформації від її можливих витоків технічними каналами під час експлуатації засобів передавання та оброблення.

1.3.5 Електромагнітний вплив в система РЕБ може здійснюватися у вигляді імпульсу, який виводить з ладу електронне, комунікаційне та силове обладнання противника. В даному випадку вражаючий ефект досягається за рахунок наведення індукційних струмів на об'єкт впливу РЕБ. Вперше руйнівна дія електромагнітного випромінювання високої інтенсивності на електронні об'єкти була зафіксована під час ядерних вибухів, здійснених в атмосфері Землі.

На даний час для створення вражаючого імпульсу використовуються магнетрони. Електромагнітні системи враження стоять на озброєнні у США, України та країнах НАТО [7-10].

Дослідження показують, що сучасні технології глушіння від своєї появи на початку ХХ століття чинять суттєвий вплив на традиційні засоби зв'язку та управління БПЛА, крилатих та балістичних ракетах, системи навігації, які широко використовують в умовах ведення бойових дій. Для ефективної протидії ним потрібно розробляти нові адаптивні систем, які мають бути ефективними в умовах нестабільної обстановки на полі бою. Також не слід нехтувати іншими системами захисту, які використовують техніки та технології, такі як дезінформація, спуфінг та повторне глушіння, що може суттєво зменшити ефективність дій ворога та позбавити його комунікацій між окремими підрозділами.

РОЗДІЛ 2

ФУНКЦІОНАЛЬНА БУДОВА ТА ЕЛЕМЕНТИ КОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМ РЕБ

2.1 Ключові елементи традиційних систем РЕБ

Склад блоків, які використовуються в системах радіоелектронної боротьби (РЕБ) може варіюватися залежно від призначення, але загалом вони включають практично ідентичні компоненти:

1. Антенна система РЕБ використовується для забезпечення приймання і передавання радіосигналів. Зазвичай РЕБ комплекси включають вузькосмугові та широкосмугові антени для різних частотних діапазонів.

2. Блок прийому сигналів виконує функцію приймання радіочастотних сигналів з антенного блоку. Блок приймання сигналів зазвичай включає підсилювачі сигналу та фільтри для відокремлення корисних частот.

3. Блок аналізу сигналів здійснює розпізнавання та ідентифікацію ворожих сигналів. При роботі даний блок використовує методи спектрального аналізу, ідентифікації модуляції, та аналізу фазового/амплітудного спектру.

4. Блок обробки даних визначає тип загрози на основі аналізу отриманих сигналів. Він включає високопродуктивні обчислювальні системи та алгоритми штучного інтелекту.

5. Генератор перешкод генерує сигнали для придушення роботи ворожих засобів зв'язку, навігації або радарів. Такий блок може працювати в широкому діапазоні частот.

6. Блок передачі сигналів перешкод передає перешкоджаючі сигнали через антену. Він забезпечує високу потужність та стійкість до умов роботи.

7. Система управління РЕБ-системою координує роботу всіх блоків системи. Система управління РЕБ включає інтерфейси для оператора та алгоритми автоматизації.

8. Блок живлення забезпечує стабільне енергопостачання для всіх компонентів системи. Він може мати в своєму складі акумулятори або зовнішні джерела енергії.

9. Система самодіагностики контролює працездатність всіх компонентів. Дана система автоматично повідомляє про збої в роботі або про необхідність обслуговування комплексу РЕБ.

10. Мобільна або стаціонарна платформа найбільш варіативний елемент системи РЕБ. Залежно від типу РЕБ, це може бути транспортний засіб, безпілотник, літак, плавуча платформа або стаціонарна установка.

Всі перераховані вище блоки працюють у тісній взаємодії, забезпечуючи ефективне придушення або спотворення роботи ворожих електронних систем.

Для прикладу розглянемо зразок одного з типових представників окопних купольних фронтowych пристроїв РЕБ.

2.2 Аналіз РЕБ пристроїв-прототипів

Окопний пристрій “Грець — 6М” — це засіб РЕБ для протидії БПЛА, які працюють в смузі частот 700-1050 МГц [11].

Має три окремі смуги перешкод: 700-820 МГц; 800-920 МГц; 900-1050 МГц. Також є можливість ставити заваду в усіх смугах одночасно та блокувати зв'язок для найбільш популярних FPV передавачів.

Пристрій може приглушити ударні FPV дрони на дистанцію від 70 м до 400 м (забиває ефір і не дозволяє пілоту продовжувати політ). РЕБ “Грець — 6М” є незамінним для захисту військових об'єктів, інфраструктури та людей.

В таблиці 2.1 наведені основні параметри РЕБ Грець — 6М”

Таблиця 2.1
Параметр РЕБ «Грець-6М»

	Значення
Діапазон частот	700-1050 мГц
Живлення	220 В
Кількість антен	3*2 шт. (розташовані на кронштейні під кутом 45 град)
Кронштейн для кріплення 6-х антен на авто чи стойку	1 шт.
З'єднувальні кабелі на кожний діапазон	6 шт. по 2 м.
Розмір корпусу	475x325x126 мм
Загальна довжина в зібраному стані	830/630 мм
Довжина антени	600/400 мм
Загальна потужність	(50x2+50x2+50x2) Вт
Енергоспоживання	(150x2+150x2+150x2) Вт
Дистанція ефективності дії	від 70 м до 400 м, в залежності від дистанції до ворожого пілота, частоти FPV дрона та ін. факторів
Вага РЕБу без батареї	10 кг

Принцип роботи даного РЕБ типовий. Колінеарні антени встановлені на рухомій платформі (рис. 2.1).

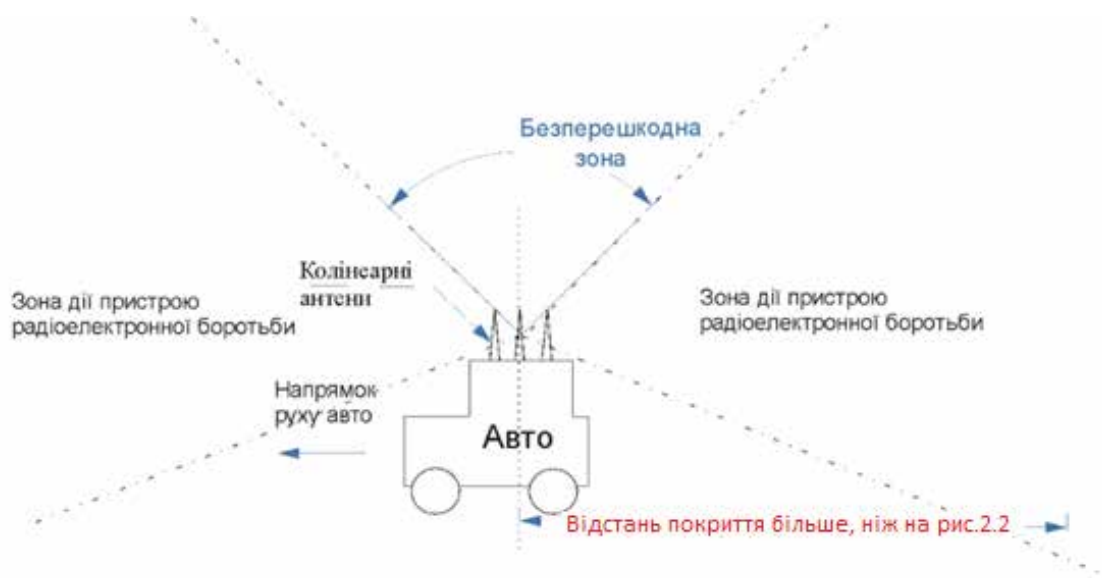


Рисунок 2.1 – Схема роботи купольного мобільного засобу РЕБ

В показаному на рис.2.1 випадку об'єкт боротьби (дрон) потрапляє до зони дії приладу РЕБ під час свого руху. Таким чином, радіоелектронна протидія не дає йому змоги залетіти зверху та вразити рухомий склад під куполом. Дана система забезпечує більшу відстань поширення радіоперешкоди.



Рисунок 2.2 – нерухома позиція для встановлення купольного РЕБ

Антени купольного типу встановлені на нерухомих позиціях (рисунок 2.2). Такі антени мають покриття, що розташовано над об'єктом захисту на більшій висоті, проте їхній радіус дії менший.

2.3 Антени РЕБ та методики їх вибору і розрахунку

Антени для систем РЕБ є важливими елементами, оскільки вони відповідають за захоплення та посилення радіосигналу на необхідних частотах перешкоджання, а також за спрямуванням сигналів для подальшого їх порушення або, навіть, блокування. Деякі типи антен, які часто використовуються для систем РЕБ, а також приклади моделей, які можуть бути застосовані в системах та комплексах РЕБ наведені нижче:

1. Широкопсмугові спрямовані антени здатні працювати на широкому діапазоні частот, що дозволяє ефективно перекривати великий діапазон радіочастот, які використовуються для передачі сигналів, таких як сигнали мобільного зв'язку або інші радіо-сигнали (керування дронами, передача відеозображення).

На рисунку 2.3 показано зовнішній вигляд широкопсмугової спрямованої антени на діапазон частот 730 МГц — 6.5 ГГц R101C (Вівальді).



Рисунок 2.3 - зовнішній вигляд широкопсмугової спрямованої антени на діапазон частот 730 МГц — 6.5 ГГц R101C (Вівальді)

В якості інших прикладів даного виду антен можна навести наступні моделі:

- Laird HG2400-1 (частотний діапазон: 2400-2500 МГц)

Використовується для спрямованого глушіння сигналів у діапазоні 2,4 ГГц. Це популярна антена для Wi-Fi, Bluetooth і інших бездротових технологій.

- Laird HG2400-2 (частотний діапазон: 2300-2500 МГц)

Антена для застосувань у високошвидкісних бездротових мережах і мобільних платформах.

- Comet CYA-1316 (частотний діапазон: 1300-1600 МГц)

Підходить для частот у середньому діапазоні, використовується в радіоелектронних системах для військових або силових структур.

2. Ягі-Антени (антени хвильового каналу) — спрямовані антени з високим коефіцієнтом посилення, що використовуються для точного спрямування сигналу на велику відстань. Вони можуть бути застосовані в системах РЕБ, які застосовуються для точного знищення сигналів на великих відстанях.

Зовнішній вигляд однієї з таких антен показаний на рис.2.4.

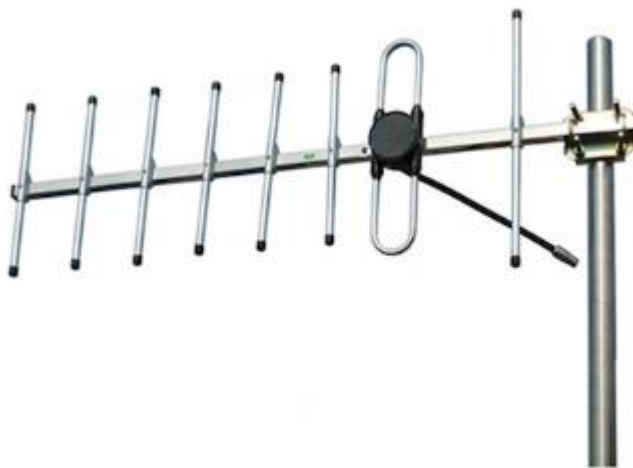


Рисунок 2.4 - Зовнішній вигляд ягі-антени

В якості інших прикладів виду ягі антен можна навести модель L-Com HG2400-12 (частотний діапазон: 2400 МГц).

Ця антена має високий коефіцієнт підсилення і призначена для використання в системах РЕБ, щоб фокусувати радіосигнал на конкретному напрямку.

3. Поворотні антени дозволяють націлювати сигнал в конкретному напрямку для точного глушіння або перехоплення сигналу.

На рис. 2.5 наведено зовнішній вид однієї з моделей поворотної антени РЕБ в комплекті з механізмом плавного керування.



Рисунок 2.5 – зовнішній вид однієї з моделей поворотної антени РЕБ в комплекті з механізмом плавного керування

В якості інших прикладів поворотних антен можна навести модель Datron 2480-2440 з частотним діапазоном від 2400 до 2500 МГц. Такі антени використовуються для визначення напрямку сигналів і спрямування електронної боротьби на визначену ціль.

4. Секторні антени використовуються для забезпечення покриття великої території або для визначення напрямку сигналів в обмеженому секторі.

На рис. 2.6 наведено зовнішній вид однієї з моделей секторних антен.



Рисунок 2.6 – зовнішній вид секторної антени моделі ICS-OPAS1727-15 (15дБ) зовнішня

В якості прикладу даного виду антен можна навести модель Comba SRA-2400 з частотним діапазоном від 2400 до 2500 МГц. Такі антени можуть використовуватись для створення зон глушіння, що охоплюють певний сектор на радіусі.

5. Панельні антени використовуються для покриття великих територій в певному діапазоні частот, зокрема для загального глушіння або моніторингу бездротових каналів.

На рис. 2.7 показано зовнішній вид однієї з моделей панельних антен.



Рисунок 2.7 – зовнішній вид панельної 4G антени моделі High Line Start MIMO 2x17 dBi (800/1800/2100/2600 МГц)

В якості прикладу панельної антени можна навести модель PCTEL LPDA-2400 (частотний діапазон: 2400-2500 МГц). Це високоефективна антени для покриття всього діапазону 2,4 ГГц, з хорошим коефіцієнтом посилення, яка добре підходить для приймання або глушіння сигналів.

6. Смугові антени використовуються для точного фільтрування або перехоплення сигналів у вузькому діапазоні частот. До вузькосмугових антен відносяться всі прості резонансні антени, а також спрямовані такі як "хвильовий канал" та інші. Зовні такі антени подібні до ягі-антен (антен хвильового каналу).

В якості інших прикладів смугових антени можна навести модель Mini-Circuits VPRF-C2400+ (частотний діапазон: 2400 МГц).

Ці антени можуть бути використані для створення ефективних систем РЕБ, спрямованих на глушіння або блокування сигналів у різних діапазонах частот.

2.3.1 Методика вибору антени для систем РЕБ

При виборі антени РЕБ слід враховувати такі характеристики:

- частотний діапазон, який залежить від необхідного діапазону частот для глушіння;
- коефіцієнт підсилення обирається за принципом: вищий коефіцієнт посилення дозволяє більш точно спрямовувати сигнал на ціль;
- форма антени грає велику роль в системі РЕБ. Так, наприклад, широкосмугові або спрямовані антени зазвичай використовуються в РЕБ для перехоплення широкого спектра сигналів;
- за призначенням системи: для мобільних чи стаціонарних застосувань вибір антени може змінюватися, залежно від необхідної портативності та потужності.

2.3.2 Антени конюшинні

Для прикладу розглянемо одну з популярних антен, яка широко застосовується в РЕБ-системах – конюшинну антену.

Конюшинна антена є популярним типом антени для радіоелектронної боротьби (РЕБ) завдяки її круговій поляризації, широкому діапазону частот і рівномірному покриттю [12].

Антена конюшинна – це високоспеціалізований пристрій, призначений для роботи в засобах радіоелектронної боротьби (РЕБ) у діапазоні частот 415-485 МГц. Її конструкція, що нагадує листок конюшини, забезпечує оптимальні характеристики спрямованості та поляризації для ефективного прийому та передачі радіосигналів. Зовнішній вигляд антени РЕБ конюшинної форми показаний на рис.2.8.

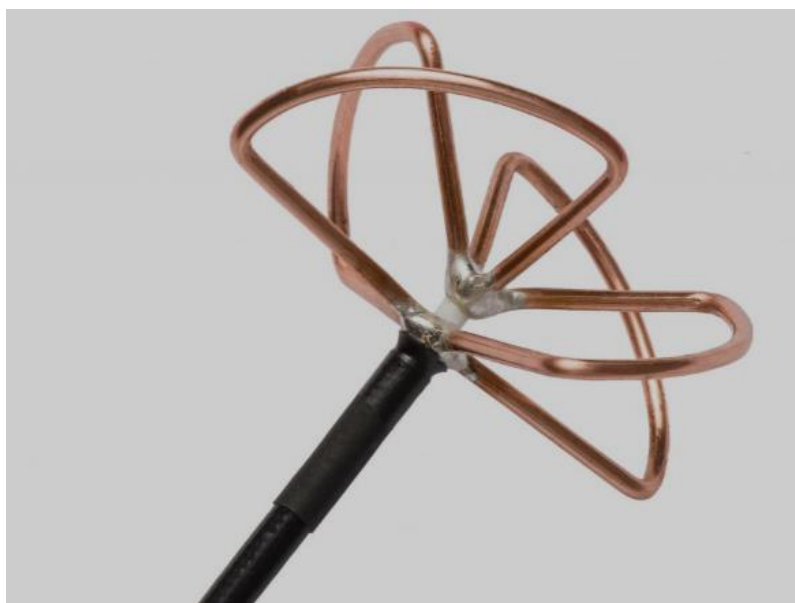


Рисунок 2.8 - Зовнішній вигляд антени РЕБ конюшинної форми

Основні характеристики:

- діапазон частот від 415-485 МГц є оптимальним для багатьох систем РЕБ;
- потужність 100 Вт дозволяє працювати з потужними передавачами;
- конструкція конюшинної антени забезпечує високу спрямованість і поляризацію сигналу;

- в якості матеріалу зазвичай використовують алюміній або інші легкі, але міцні матеріали;
- поляризація сигналу може бути лінійна або кругова (залежить від конкретної моделі);
- високий коефіцієнт корисної дії, що забезпечує ефективну передачу та прийом сигналу;
- тип роз'єму: NJ – стандартний роз'єм для підключення до радіоапаратури.

Алгоритм розрахунку конюшинної антени передбачає кілька етапів:

1. Визначення робочої частоти та діапазону

Робоча частота (f) визначає центральну частоту антени. Наприклад, для частоти 1 ГГц.

Діапазон частот визначає, на які частоти антена повинна бути налаштована.

Широкосмугові антени можуть охоплювати кілька октав.

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ і } c = 3 * 10^8 \text{ м/с,}$$

де λ — довжина хвилі, c — швидкість світла.

2. Вибір кількості пелюстків (елементів)

Типова конюшинна антена має 3 або 4 пелюстки, хоча ця кількість може бути і іншою.

Кількість елементів пелюстків антени визначає форму діаграми спрямованості антени.

3. Розрахунок геометричних параметрів

Радіус елементів антени (R): залежить від довжини хвилі λ . В більшості випадків радіус приймається як співвідношення $R \approx 0.25 \lambda$.

Приклад 1.

Для робочої частоти РЕБ, що складає 1 ГГц постановки завади значення довжини радіохвилі $\lambda = 30$ см, тоді параметр $R \approx 7.5$ см.

Кут між елементами (θ) в разі рівномірного розташування елементів визначається, як:

$$\theta = \frac{360^\circ}{N},$$

де N — кількість елементів (пелюстків) антени.

4. Розрахунок хвилевідних елементів антенти РЕБ.

Перш за все визначають довжину кожного пелюстка L , яка залежить від робочої частоти антени.

Відомо, що кожен елемент повинен мати довжину, близьку до чверті довжини хвилі, що можна записати, як: $L \approx 0.25 \lambda$.

5. Вибір типу подачі сигналів з генеруючого перешкоди пристрою на антену РЕБ важливий з огляду на те, що система РЕБ може бути автономною переносною, встановлюватися на важкій або легкій броньованій або неброньованій техніці.

Для подачі сигналу на антену РЕБ може використовуватися коаксіальний кабель або мікросмужкову лінію.

Для кругової поляризації живлення повинно подаватися зі зсувом фази між сусідніми елементами на 90° .

6. Розрахунок імпедансу (хвильового опору)

Імпеданс кожного елемента системи РЕБ повинен відповідати системі живлення (зазвичай це значення 50 Ом). Можливе також використання адаптаційних ланцюгів.

7. Моделювання діаграми спрямованості

За допомогою програмного забезпечення (наприклад, HFSS, CST Studio або EZNEC) перевіряється форма діаграми спрямованості антени та рівномірність наведеної кругової поляризації.

8. Оптимізація розташування (відстань між елементами антени, фази живлення) є важливим параметром антенної частини РЕБ, адже оптимізація цих налаштувань сприяє мінімізації втрат і спотворень сигналів.

9. Вибір матеріалів для антени системи РЕБ здійснюється виключно з матеріалів, які мають гарні властивості з провідності струму (мідь, алюміній, срібло тощо), а діелектрична основа антени повинна забезпечувати стабільну роботу в обраному діапазоні частот.

10. Тестування та вимірювання параметрів проводять на вже зібраних системах. Для них проводять вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ) та діаграми спрямованості антени.

За результатами вимірювань проводять корекцію конструкції і антени, і РЕБ-системи в цілому.

Практично всі купольні РЕБ забезпечуть кругову поляризацію для створення захисного поля. Такий вид поляризації електромагнітної хвилі утворює вектор електричного поля, що обертається навколо осі поширення сигналу, утворюючи спіральний рух.

В таких системах ослаблення сигналу «глушіння» РЕБ має відбуватися на діапазоні секторів $\pm 45^{\circ}$ відносно площини поляризації та не перевищувати значення 3 дБ.

Різниця між лінійною та круговою поляризацією в системах РЕБ показана в порівняльній таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Відмінності при роботі РЕБ на лінійній і круговій поляризації

Параметр	Лінійна поляризація	Кругова поляризація
Напрямок вектора поля	Фіксований (вертикальний/горизонтальний)	Обертається по колу
Стійкість до перешкод	Залежить від орієнтації антен	Стійка до змін орієнтації антен
Втрати сигналу	Можливі при зміні орієнтації	Знижується, якщо приймач і передавач узгоджені

Використавши методику, наведену в п.2.3.1 розрахуємо параметри антени системи РЕБ для «глушіння» сигналів дронів або інших бездротових систем, що працюють на частоті 1 ГГц.

В результаті розрахунку прикладу 1 отримаємо, що конюшинна антена матиме наступні параметри:

- 1) довжина хвилі: $\lambda=30$ см;
- 2) радіус пелюстків: $R\approx 7.5$ см;
- 3) кут між пелюстками: $\theta = 120^0$;
- 4) довжина кожного пелюстка: $L\approx 7.5$ см.

Розробивши антену за цими параметрами, ми отримаємо ефективний пристрій для РЕБ з пристроями, що мають приймально-передавальний бездротовий радіомодуль, функціонуючий на частоті 1 ГГц.

Розрахована конюшинна антена системи РЕБ із зазначеними параметрами має унікальну конструкцію. Така антена оптимізована для широкосмугових і всенаправлених випромінювань, що є критичним для ефективного «глушіння» сигналів.

2.3.3 Характеристики роботи антени

Широкосмуговість: Конюшинна антена має гарну здатність працювати у широкому діапазоні частот, що важливо для РЕБ.

Всенаправленість: Завдяки симетричній геометрії антена забезпечує кругову діаграму направленості, ідеальну для забезпечення покриття у всіх напрямках.

Компактність: Невеликі розміри (радіус пелюстків і довжина хвилі) дозволяють використовувати таку антену в мобільних або стаціонарних пристроях РЕБ.

Ця конструкція є однією з ефективних для систем РЕБ, що потребують універсальності й ефективності на частотах близько 1 ГГц.

Зона ефективної протидії антени залежить від кількох параметрів, пов'язаних із характеристиками самої антени, потужності передавача, умов навколишнього

середовища та характеристик цільового сигналу. Таким чином, одна й та сама антена може використовуватися для постановки ефективних радіоперешкод для різних периметрів захисту.

Орієнтуючись на дані, наведені у відкритих джерелах [7], можна назвати фактори, що впливають на зону ефективної протидії системи РЕБ:

- потужність передавача РЕБ діє за принципом - чим вища вихідна потужність антени, тим більша зона ефективної протидії. Потужність залежить від передавача і визначається в ватах (Вт) або дБм;

- частота сигналу задається у довжині хвилі (для прикладу $1 \lambda = 30$ см, а частота $f \approx 1$ ГГц) визначає розмір зони покриття даного РЕБ. У діапазоні 1 ГГц сигнал схильний до середнього рівню втрат через поглинання радіохвиль в атмосфері;

- коефіцієнт підсилення конюшинної антени відносно низький і складає 2-4 дБ, оскільки забезпечує діаграму направленості випромінювання у вигляді кола. Це дозволяє рівномірно покривати простір, але зменшує дальність в одному напрямку випромінювання;

- вплив навколишнього середовища пов'язаний з наявністю перешкод, особливостями рельєфу місцевості, будівлі та іншими фактори, які можуть впливати на зону дії сигналу;

- чутливість цільових пристроїв на відміну від зони протидії РЕБ буде меншою, якщо цільовий пристрій має низьку чутливість або працює на схожих частотах, що викликає інтерференцію.

2.3.3 Розрахунок зони ефективної протидії РЕБ

Формула для оцінки дальності дії за допомогою рівняння вільного поширення хвиль випромінювача здійснюється відповідно до виразу:

$$R = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{min}}}$$

де:

R — зона дії (в метрах),

P_t — потужність передавача (Вт),

G_t — коефіцієнт підсилення антени передавача,

G_r — коефіцієнт підсилення антени приймача (зазвичай 1 для всенаправлених антен),

λ — довжина хвилі (в метрах),

P_{min} — мінімальна потужність сигналу, який може сприймати приймач (Вт).

Приклад розрахунку зони ефективної протидії РЕБ можна провести, взявши за основу параметри конюшинної антени, розрахованої в прикладі 1, але за умов, що:

- потужність передавача $P_t = 10$ Вт;
- коефіцієнт підсилення $G_t = 3$ дБ (прийmemo рівним 2);
- мінімальна потужність приймача $P_{min} = 10^{-6}$ Вт (–60 дБм);
- довжина хвилі $\lambda = 0.3$ м.

$$\text{Тоді, } R = \sqrt{\frac{10 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 0.3^2}{(4\pi)^2 \cdot 10^{-6}}} \approx 150 \text{ м.}$$

В результаті проведеного розрахунку можна зробити висновок, що:

- в ідеальних умовах зона ефективної протидії для потужності 10 Вт становить близько 0,15 км;
- в реальних умовах через втрати в середовищі зона може зменшуватися до 80-100 м.

Для значного збільшення зони дії потрібно використовувати більш потужні передавачі або вузькоспрямовані антени.

Для антенни з вказаними параметрами, розрахунки зони ефективної протидії (в метрах) для різних потужностей передавача виглядають так, як показано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Розрахунки зони ефективної протидії (в метрах) для різних потужностей передавача для конюшинної антени системи «глушіння» сигналів дронів або інших бездротових систем, що працюють на частоті 1 ГГц з 3 пелюстками

Потужність (Вт)	Ефективна зона (м)
15	130.76
20	150.99
25	168.81
30	184.92
35	199.74
40	213.53
45	226.48
50	238.73
55	250.38
65	272.20
70	282.47
75	292.39
80	301.98
85	311.27
90	320.29
95	329.07
100	337.62

Зона ефективної протидії зростає пропорційно квадратному кореню потужності передавача.

На рис.2.9 показана графічна залежність, побудована на основі даних, наведених в таблиці 2.3.

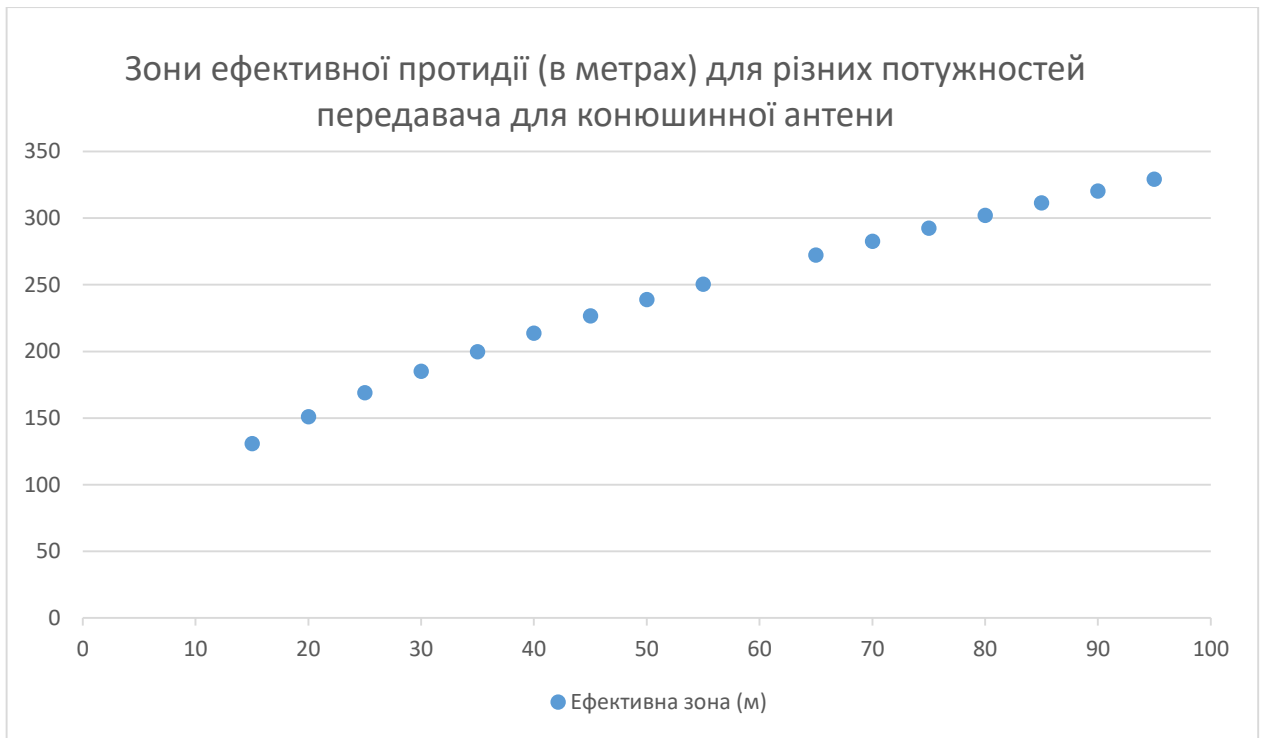


Рисунок 2.9 – Залежність зони ефективної протидії (в метрах) для різних потужностей передавача для конюшинної антени від потужності передавача (по ординаті)

З рис.2.9 видно, що зона ефективної протидії (в метрах) для різних потужностей передавача для конюшинної антени практично лінійно залежить від потужності передавача.

Далі розрахуємо купольний пристрій радіоелектронної боротьби (РЕБ).

2.4 Алгоритм розрахунку купольного пристрою радіоелектронної боротьби (РЕБ)

Купольний пристрій РЕБ застосовується для створення радіоперешкод у визначеному обсязі простору, використовуючи антени з круговою діаграмою спрямованості та спеціальні алгоритми для управління випромінюванням.

Основні етапи алгоритму розрахунку включають 9 основних етапів:

1. Визначення вимог до пристрою по параметру:

– діапазон частот – кожен пристрій РЕБ працює в конкретному частотному діапазоні (наприклад, 1–3 ГГц);

- радіус дії купола «глушіння» покриття (наприклад, 1 км, 5 км тощо);
- рівень потужності перешкод має спиратися на визначення мінімальної потужності сигналу, яка повинна забезпечувати перешкоди в зоні дії.

2. Розрахунок антенного комплексу для таких параметрів, як:

- тип антени (антени з круговою діаграмою спрямованості, наприклад: конюшинна, дипольна або спіральна);
- розташування антен для забезпечення рівномірного покриття на заданій висоті купола;
- висота антенної системи (h) розраховується виходячи з радіусу покриття та кута нахилу діаграми спрямованості випромінювання для «глушіння» сигналу:

$$h = R * \tan(\theta),$$

де R — радіус покриття;

θ — кут підйому діаграми спрямованості.

3. Розрахунок потужності передавача, який полягє у визначенні наступних параметрів:

- рівень сигналу на межі купола (P_{min}). Для цього використовується рівняння втрат вільного простору:

$$P_{min} = P_t - L_f,$$

де:

P_t — потужність передавача;

L_f — втрати вільного простору

В той же час, параметр втрати вільного простору можна визначити за формулою:

$$L_f = 20 * \log_{10}(d) + 20 * \log_{10}(f) - 147,55,$$

де:

d — відстань до об'єкта (в км);

f — частота (в МГц).

– розрахунок сумарної потужності для випадку багатопроменевих пристроїв необхідна потужність розраховується для кожного випромінювача з урахуванням перекриття діаграм спрямованості.

4. Розрахунок фільтрів робиться для:

– вхідного фільтру, який налаштовується на потрібний діапазон частот для блокування небажаних сигналів;

– смугові фільтри розробляються для кожного частотного піддіапазону, якщо пристрій працює у кількох діапазонах.

5. Алгоритми модуляції перешкод залежить від того, який тип модуляції сигналу перешкод використовуватиметься (амплітудний, частотний, фазовий). Але для РЕБ-систем використовуються широкосмугові сигнали з метою покриття ширшого діапазону частот.

6. Обчислення зони купола полягає у розрахунку геометрії покриття з урахуванням висоти антен (h), кута діаграми спрямованості (θ), та радіусу дії (R):

$$A_{zone} = 2 * \pi * R * h$$

7. Система управління випромінюванням станції РЕБ залежить від алгоритму управління випромінюванням. Випромінювання може бути постійним або адаптивним (виявлення джерел сигналу та створення перешкод тільки для них).

8. Захист від перевантажень забезпечується екранування елементів системи для захисту від власного електромагнітного випромінювання.

9. Тестування системи можна провести шляхом симуляції роботи створеного пристрою з використанням універсальних середовищ типу MATLAB, CST Studio тощо.

Після проведення тестування перевіряється ефективність створення перешкод даною РЕБ-системою у реальних умовах.

Приклад 2. Розрахунок потужності системи купольного РЕБ.

Припустимо, що частота придушення для РЕБ-системи складає 2 ГГц, а необхідній радіус захисної дії складає 5 км.

Розрахуємо втрати вільного простору L_f , які виникають L_f , які виникають через розсіювання енергії сигналу внаслідок збільшення відстані між передавачем і приймачем, а також через фундаментальні закони фізики, зокрема закони збереження енергії та геометрії поширення хвиль.

Втрати вільного простору розраховуються за формулою:

$$FSPL = 20 * \log_{10}(d) + 20 * \log_{10}(f) + 20 * \log_{10}(4\pi/c),$$

де:

d — відстань між передавачем і приймачем (м);

f — частота сигналу (Гц);

c — швидкість світла ($3 * 10^8$ м/с).

Відповідно початкових умов отримаємо наступні втрати вільного простору:

$$L_f = 20 * \log_{10}(5) + 20 * \log_{10}(2000) - 147,55 = 113 \text{ дБ.}$$

Слід зважати на те, що FSPL є ключовим параметром, який впливає на ефективність роботи РЕБ-систем, особливо на великій відстані або при високих частотах.

Необхідна потужність передавача визначається, як:

$$P_t = 20 + 113 = 133 \text{ дБм}$$

Шкала переведення з дБм у кВт дозволяє конвертувати рівні потужності з логарифмічної системи вимірювання (дБм) в абсолютну (у Ватах). Так, одиниця дБм (децибел-міліватт) визначає потужність відносно 1 мВт і розраховується за наступною формулою:

$$P_{\text{дБм}} = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Вт}}}{1 \text{ мВт}} \right)$$

Для переведення дБм у вати або кіловати можна використати обернену формулу:

$$P_{\text{Вт}} = 10^{\frac{P_{\text{дБм}}}{10}} * 10^{-3},$$

де 10^{-3} - коефіцієнт переводу результат у вати.

Отримані внаслідок розрахунку ключові значення для переведення можна звести до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Ключові значення для переведення в абсолютно шкалу у Вт та кВт

Потужність, дБм	Потужність, Вт	Потужність, кВт
0 дБм	1 мВт (0.001 Вт)	-
10 дБм	10 мВт (0.01 Вт)	-
20 дБм	100 мВт (0.1 Вт)	-
30 дБм	1 Вт	-
40 дБм	10 Вт	-
50 дБм	100 Вт	0.1 кВт
60 дБм	1 000 Вт	1 кВт
70 дБм	10 000 Вт	10 кВт
80 дБм	100 000 Вт	100 кВт

Для прикладу, обчислимо значення потужності передавача РЕБ системи для рівня сигналу в 50 дБм: $P_{\text{Вт}} = 10^{\frac{50}{10}} * 10^{-3} = 100 \text{ Вт}$.

Переведемо отриманий результат з дБм в кВт корисної потужності:

$$P_{\text{Вт}} = 10^{\frac{133}{10}} * 10^{-3} = 1,992 \text{ кВт}$$

Тобто, для того, щоб забезпечити ефективний захист від БПЛА або інших засоби нападу, що працюють на частоті 2 ГГц і створити радіус захисної дії 5 км потрібен випромінювач радіохвиль з потужністю близько 2 кВт.

Використовуючи наведений вище алгоритм розрахунку можна отримати параметри потужностей для аналогічних купольних РЕБ-систем, що протидіють найбільш популярним частотам, на яких працюють розвідувальні та FPV-дрони [7].

2.5 Аналіз частот роботи радіоелектронних засобів для протидії

Частоти радіохвиль, які слід враховувати для глушіння БПЛА можуть бути різними, адже один і той самий об'єкт може використовувати декілька частот для управління і телеметрії, передавання відеоінформації, радіолокації або інших, спеціалізованих функцій.

2.5.1 Популярні частоти роботи розвідувальних та FPV дронів варіюються залежно від призначення, типу дрона, його виробника, а також регіональних та міжнародних стандартів. Найпоширеніші частоти включають:

– частоти для керування та телеметрії наступні:

a) 2,4 ГГц є найбільш поширеною частотою через її доступність і універсальність існуючих рішень. Вона використовується для передавання керуючих сигналів і телеметрії;

b) 5,8 ГГц використовується для передачі відеосигналу (FPV) або керування. Така частота забезпечує кращу якість сигналу, але на відчутно менші відстані, ніж частота 2.4 ГГц;

c) 900 МГц використовується обмежено і використовується для керування на великих відстанях і в умовах перешкод.

- Частоти для передавання відео дронами:

a) 1,2 ГГц / 1,3 ГГц порівняно часто використовується для передавання відео на середніх і великих дистанціях;

б) 5,8 ГГц підходить для передавання високоякісного відео на коротких відстанях.

с) 2,4 ГГц може використовуватися для відеопередачі, але ризикує конфліктувати з сигналом керування через проблеми з інтерференцією сигналів аналогічної частоти, яка використовується для керування та телеметрії.

- Частоти для спеціалізованих військових дронів:

а) UHF (300 МГц - 3 ГГц). Використання даного діапазону частот забезпечує стійкість до перешкод і прихованість сигналу, адже переважна створення РЕБ для такого широкого діапазону частот технічно більш складна задача. Такий діапазон використовується для керування і передачі даних в умовах бойових дій;

б) L-діапазон (1-2 ГГц). Використовується для забезпечення зв'язку для БПЛА великого радіусу дії;

с) Ku-діапазон (12-18 ГГц) і Ka-діапазон (26-40 ГГц). Застосовуються переважно у високотехнологічних розвідувальних дронах для забезпечення супутникового зв'язку для керування і передавання даних з ними.

- Частоти для радіолокаційних та спеціальних функцій БПЛА:

а) X-діапазон (8-12 ГГц) використовується для радіолокації або визначення перешкод в режимах картографування, розвідки тощо;

б) C-діапазон (4-8 ГГц) часто застосовується в системах зв'язку з метою забезпечення стабільного з'єднання.

При виборі частот для роботи БПЛА можуть враховуватися багато факторів, наприклад:

- дальність роботи (частоти 900 МГц, 1.2 ГГц) забезпечують кращу якість зв'язку на великих відстанях;

- стійкість до перешкод більша на вищих частотах (5.8 ГГц), але тоді зменшується радіус дії;

- наявність юридичних обмежень в законодавчих базах країн, які можуть діяти для певних частот і в певних регіонах.

2.6 Розрахунок параметрів РЕБ для протидії реальним об'єктам

Взявши за основу популярні частоти роботи розвідувальних та FPV дронів розрахуємо параметри засобів РЕБ, необхідних для постановки радіоперешкод для них.

Результати розрахунків зводимо в таблицю 2.6.

2.6.1 Розрахуємо антену та визначимо потужність системи РЕБ для протидії дрону на частоті 2,4 ГГц з діаметром ефективного захисту 1 км.

Для розрахунку параметрів антени та потужності РЕБ на частоті 2,4 ГГц, що використовується для протидії дрону, розглянемо радіус ефективної дії $R = 1$ км

Маємо основні параметри для розрахунку:

- частота сигналу РЕБ (f): 2,4 ГГц = $2,4 \cdot 10^9$ Гц
- довжина хвилі (λ): $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,4 \cdot 10^9} = 0,125$ м
- радіус глушіння (R): 1 км = 1000 м.

Втрати вільного простору (L_f) для $R = 1000$ м і $\lambda = 0,125$ м визначимо, як:

$$L_f = 20 * \log_{10} \left(\frac{4 * 3,14 * 1000}{0,125} \right) = 20 * \log_{10}(100530) \approx 20 * 5,002 = 100,04 \text{ дБ.}$$

Далі визначаємо потрібну потужність передавача: $P_t + G_t + G_r + L_f$.

Потужність сигналу на приймальній стороні приймемо, як типовий рівень для глушіння $=(-90)$ дБм. Параметри G_t і G_r — коефіцієнти підсилення антени передавача і приймача візьмемо, як для РЕБ-систем ($G_t = 5$ дБі, а $G_r = 2$ дБі), тоді: $P_t = 10^{3,04/10} * 10^{-3} \approx 753$ Вт.

Розрахуємо антену для даного засобу РЕБ. Для кругової діаграми направленості використовуємо антену з розміром, близьким до чверті довжини

$$\text{хвилі: } r_{\text{антени}} = \frac{\lambda}{4} = \frac{0,125}{4} = 0,0548 \text{ м} \approx 0,055 \text{ м.}$$

Отримані параметри системи РЕБ для глушіння БПЛА на частоті 2,4 ГГц з зоною захисту 1 км будуть наступними: потужність передавача для глушіння сигналу на приблизно 753 Вт, діаметр антени має бути близько 5,5 см.

Зовнішній вигляд аналогічної антени показаний на рис.2.10.



Рисунок 2.10 – вигляд антени кругової направленості для купольного РЕБ

Аналогічним чином отримуємо дані розрахунків РЕБ систем для глушіння БПЛА для частот 900 МГц, 1,2 ГГц, 1,3 ГГц, 300 МГц, 500 МГц, 750 МГц, 1 ГГц, 1,5 ГГц, 2 ГГц.

Таблиця 2.5

Результати розрахунків параметрів РЕБ систем для різних частот протидії (глушіння)

Частота «глушіння», МГц	Параметри антени (діаметр)	Потужність сигналу на приймальній
----------------------------	-------------------------------	--------------------------------------

300	0,5 м	22 Вт
500	0,6 м	44,67 Вт
750	0,2 м	98,5 Вт
900	0,1665 м	142,3 Вт
1000	0,15 м	175,8 Вт
1200	0,125 м	254,1 Вт
1300	0,115 м	297,6 Вт
2000	0,075 м	705,5 Вт
2400	0,055 м	753 Вт

Можна порівняти отримані розрахункові параметри з реальним купольним РЕБ-пристроєм [11].

Взагалі, проведений аналіз різних доступних у відкритому доступі систем глушіння, показує, що різні моделі застосовують схожі способи постановки радіоперешкод.

На рис.2.11 показано графічні залежності між частотою протидії та номінальною потужністю пристрою РЕБ.



Рисунок 2.11 – графічні залежності між частотою протидії та номінальною потужністю пристрою РЕБ

Наведені в таблицях результати дає орієнтовні параметри для оптимізації пристроїв РЕБ.

Окремо слід зазначити, що ефективність механізмів глушіння також залежить і від технології, що забезпечує можливість виявлення та нейтралізації різних електронних сигналів.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕБ-СИСТЕМ ТА ЇЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ

Зрозуміло, що практична реалізація РЕБ-систем пов'язана з вирішення низки технічних та економічних питань. При проектуванні таких систем передбачається використання сучасної елементної бази та проведення оптимізації антенно-фідерних пристроїв, що супроводжується забезпеченням потрібної для функціоналу даного засобу РЕБ потужності випромінювання. В той же час,

необхідно враховувати економічну доцільність, ефективність виробництва та проведення технічного обслуговування цих систем під час експлуатації, що є важливим для забезпечення їх широкого застосування в умовах обмежених ресурсів. Такі обмеження дійсно присутні у фронтових або подібних екстремальних умовах. Тому важливим питанням є вартість самої РЕБ системи та її експлуатації.

3.1 Визначення технічних та економічних показників для створених систем РЕБ

Для розрахованої системи РЕБ, здатної глушити дрони на частоті 900 МГц діаметром захисного куполу близько 1 км з розрахованими в п. 2.5 параметрами наступна:

Технічна специфікація системи РЕБ

1. Антена

- Тип антени: Параболічна відбивна антена або спрямована антена (Yagi).
- Діаметр рефлектора 0,1665 м.
- Частота роботи 900 МГц.
- Коефіцієнт посилення $G \approx 19$ дБГ
- Ширина променя близько $20-30^\circ$, залежно від конструкції антени.

2. Передавач

- Робоча частота: 900 МГц.
- Потужність передавача: 142,3 Вт (у імпульсному або CW-режимі).
- Клас підсилювача: Клас АВ або клас Е (високоєфективний для РЕБ-систем).
- Тип підсилювача: лінійний RF-підсилювач на базі LDMOS або GaN транзисторів.
- Живлення: 24–48 В постійного струму.

3. Фільтр має характеристики:

- тип фільтра - смуговий фільтр (BPF) для обмеження випромінювання в діапазоні 900 МГц.

- Смуга пропускання: ± 10 МГц навколо центральної частоти.

- послаблення позасмугових сигналів: ≥ 50 дБ.

4. Система живлення

- Вхідна напруга: 220 В змінного струму або 24/48 В постійного струму.

- Блок живлення підтримує резервний живлення (акумулятори або джерела безперебійного живлення).

- Споживана потужність: близько 250 Вт (з урахуванням ККД системи).

5. Система управління наступна:

- тип управління автоматичне або ручне налаштування частоти.

- Модуль керування - вбудований модуль мікроконтролера для зміни частоти/потужності.

- Інтерфейси: Ethernet, RS-485 або бездротове з'єднання для моніторингу.

6. Корпус РЕБ системи:

- Тип корпусу - герметичний, IP65 або вище (для зовнішньої установки).

- Матеріал корпусу - алюмінієвий сплав або сталь із антикорозійним покриттям.

- Температурний діапазон: від -40°C до $+55^{\circ}\text{C}$.

- Система охолодження пасивна (радіатори) або активне охолодження (вентилятори).

7. Додаткові функції системи можуть бути наступними:

- захист від перешкод: Вбудовані модулі захисту від сторонніх сигналів.

- Режими роботи: смуговий (глушіння лише в діапазоні 900 МГц) та широкосмуговий (за потреби адаптації для інших частот).

- Час розгортання: < 10 хвилин (мобільна версія).

8. Габарити та вага залежать від конфігурації, і складають приблизно $0,5 \text{ м} \times 0,5 \text{ м} \times 0,3 \text{ м}$ при вазі у 5–10 кг.

Кошторис елементної бази системи РЕБ на частоту 900 МГц складається з кошторису окремих її компонентів і наведений в таблиці 3.1 – 3.6.

Таблиця 3.1

Кошторис антенного модуля для РЕБ частоти 900 ГГц діаметром захисного куполу близько 1 км з розрахованими в п. 2.6 параметрами

Елемент	Модель/Марка	Кількість	Ціна за одиницю, \$	Загальна ціна, \$
Параболічна антена		1	105	105
Кріплення та аксесуари	TP-Link Mounting Kit	1 комплект	20	20

Таблиця 3.2

Кошторис модуля передавача для РЕБ частоти 900 ГГц діаметром захисного куполу близько 1 км з розрахованими в п. 2.6 параметрами

Елемент	Модель/Марка	Кількість	Ціна за одиницю, \$	Загальна ціна, \$
RF підсилювач потужності	Ampleon BLF184XR	1	450	450
Радіатор для охолодження	Noctua NH-U12S	1	70	70

Смуговий фільтр (900 МГц)	Mini-Circuits BPF-VM901+	1	100	100
---------------------------	--------------------------	---	-----	-----

Таблиця 3.3

Кошторис модуля живлення для РЕБ частоти 900 ГГц діаметром захисного куполу близько 1 км з розрахованими в п. 2.6 параметрами

Елемент	Модель/Марка	Кількість	Ціна за одиницю, \$	Загальна ціна, \$
DC/DC конвертер 24/48 В	Mean Well SD-100B-24	1	70	70
UPS (резервне живлення)	APC Back-UPS 650VA	1	120	120

Таблиця 3.4

Кошторис модуля управління для РЕБ частоти 900 ГГц діаметром захисного куполу близько 1 км з розрахованими в п. 2.6 параметрами

Елемент	Модель/Марка	Кількість	Ціна за одиницю, \$	Загальна ціна, \$
Мікроконтролер	STM32F407 Discovery	1	35	35
Дисплей для моніторингу	Nextion NX4827T043	1	45	45

Інтерфейсний модуль (Ethernet/RS-485)	Waveshare Ethernet Board	1	25	25
---------------------------------------	--------------------------	---	----	----

Таблиця 3.5

Кошторис корпусу для РЕБ частоти 900 ГГц діаметром захисного куполу близько 1 км з розрахованими в п. 2.6 параметрами

Елемент	Модель/Марка	Кількість	Ціна за одиницю, \$	Загальна ціна, \$
Герметичний корпус (IP65)	Hammond 1555F2GY	1	80	80
Система вентиляції	Sunon MagLev Fan	1	40	40

Таблиця 3.6

Кошторис інших витрат для РЕБ частоти 900 ГГц діаметром захисного куполу близько 1 км з розрахованими в п. 2.6 параметрами

Елемент	Модель/Марка	Кількість	Ціна за одиницю, \$	Загальна ціна, \$
RF кабелі та конектори	Amphenol RF N-Type	1 комплект	50	50

Інструменти для налаштування	Комплект паяльного обладнання	1 комплект	100	100
Транспортні витрати	-	1	100	100

Загальна сума без врахування транспортних витрат та джерела резервного живлення, інструментів для налаштування складає приблизно 1185 доларів.

Таблиця 3.7 містить результати проведеного техніко-економічного аналізу вартості комплектуючих засобів РЕБ.

Таблиця 3.7
Техніко-економічний аналіз вартості комплектуючих засобів систем РЕБ різної частоти

Частота роботи РЕБ, МГц	Номінальна потужність	Вартість, USD
300	22	1210
500	44,67	1445
750	98,5	1655
900	142,3	2070
1000	175,8	2240
1200	254,1	2620
1300	297,6	2880
2000	705,5	3670
2400	753	4210

Даний аналіз проводився стосовно найбільш популярних і розповсюджених частот роботи РЕБ систем. В ньому враховувалася вартість всіх складників системи РЕБ: передавача, підсилювача, антени, блока живлення, контролера та інших

допоміжних компонентів (контролер, кабелі, корпус). В розрахунку бралися усереднені ціни комплектуючих.

На основі отриманих даних побудуємо графічну залежність вартості РЕБ від частоти їх роботи. Отримана залежність наведена на рис.3.1.

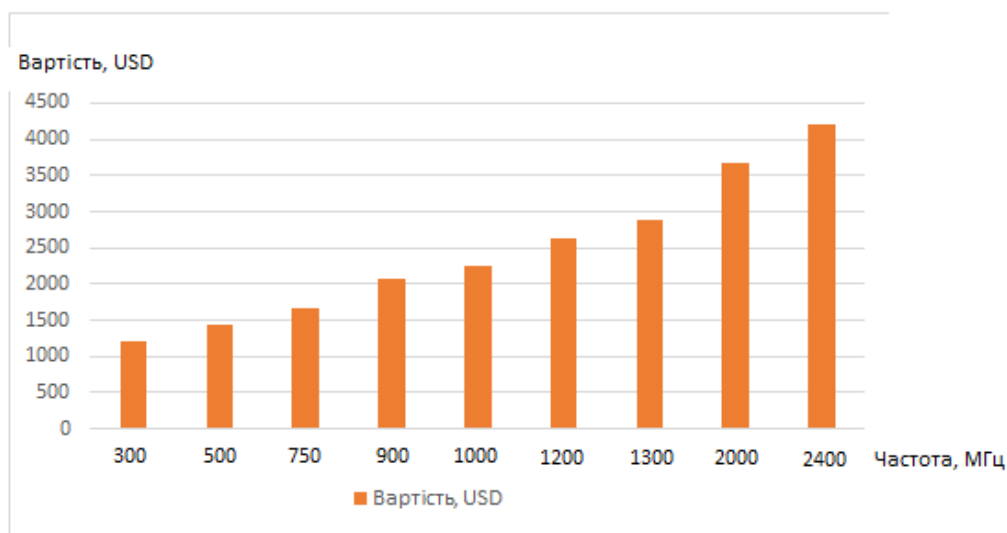


Рисунок 3.1 – графічна залежність вартості РЕБ від частоти їх роботи

Особливу увагу в реальних сучасних РЕБ-системах приділяють питанням глушіння сигналів у різних частотних діапазонах. Наприклад, таких як 433 МГц, 2,4 ГГц та 5,8 ГГц. Ці частоти широко використовуються в комунікаціях та управлінні безпілотними літальними апаратами. Створення сучасних РЕБ-систем вимагає інтеграції інноваційних технологій, таких як адаптивні алгоритми обробки сигналів з використанням машинного навчання, високочастотних підсилювачів та ефективних антенних комплексів, так і окремих антен.

Таким чином, дослідження техніко-економічних аспектів РЕБ-систем є актуальним і необхідним для розробки ефективних і економічно доцільних засобів радіоелектронної боротьби, які здатні забезпечити оперативний захист і зниження витрат на впровадження та експлуатацію засобів РЕБ.

3.2 Засоби протидії глушінню

Зараз існують військові технології протидію глушінню. Це є важливим елементом для комунікації та командування. Системи електронної боротьби, такі як радіоелектронні засоби, повинні реагувати на різноманітні тактики глушіння противника

Слід розуміти, що існують способи протидії глушінню. Такі методи є нетривіальними – це поєднання традиційних методів з новими технологіями, як машинне навчання та штучний інтелект, відкриває можливості для ефективної протидії глушінню, що є актуальним завданням у сучасних умовах бойових дій.

Основні відомі заходи протидії глушінню та їх характеристики наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8
Заходи протидії глушінню

Спосіб протидії	Ефективність (%)	Нотатки
Розширений спектр стрибкоподібної зміни частоти (FHSS)	95	Широко використовується у військових комунікаціях для уникнення заклинювання.
Спектр прямої послідовності (DSSS)	90	Забезпечує стійкість до перешкод і заклинювання.
Адаптивне керування живленням	80	Регулює рівні потужності для забезпечення цілісності сигналу.
Протоколи глушіння імунітету	85	Протоколи, розроблені для мінімізації вразливості до глушіння.
МІМО (кілька входів, кілька виходів)	92	Підвищує надійність і продуктивність зв'язку.

Використання альтернативних частот	75	Перехід на менш переповнені або менш цільові діапазони.
------------------------------------	----	---

Сучасні системи глушіння відіграють важливу роль у зменшенні сили противника.

В різних джерелах наведені приклади використання самозахисту на сучасних військових літаках. Такі приклади досліджується та удосконалюються, що підвищує живучість техніки під час місій. Даний факт підтверджує те, що протиборчі сторони постійно вдосконалюють свої тактики, тому дуже важливо впроваджувати нові неординарні та іноваційні рішення для захисту військових систем.

Використання різних методу глушіння радіосигналів стає все більш популярним адже такі техніки мажуть бути використані для атак не тільки на комунікації, але й різні датчики військових систем противника. Це пов'язано перш за все з тим, що сучасні військові дії частіше відбуваються з використанням технологій бездротових комунікацій. Тому, ефективно глушіння бездротових комунікацій може суттєво знизити бойові спроможності супротивника та допомогти у проведенні власних військових операцій.

ВИСНОВКИ

У сучасному світі роль засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) постійно зростає, оскільки використання бездротових комунікаційних технологій стало важливим компонентом як цивільних, так і військових систем. РЕБ-системи дозволяють ефективно захищати важливі об'єкти та інфраструктуру від небажаного втручання, нейтралізуючи роботу ворожих засобів зв'язку, дронів та

інших пристроїв, які використовують радіочастотний спектр. З існуючих на сьогодні технологій РЕБ жодна не є універсальною, а кожна програма глушіння потребує особливого аналізу та налаштування згідно з умовами протидії.

В той же час можна помітити ряд тенденцій, які зумовлюють раціональність використання певних видів РЕБ та деяких частот глушіння, зокрема:

- існує залежність вартості РЕБ від частоти їх роботи (чим більшою є частота глушіння, тим вищою буде вартість засобів РЕБ);
- використання купольних широкополосних РЕБ дає стійкий ефект, але має і ряд практичних недоліків, які були підтвержені проведеними розрахунками - розширення радіуса дії потребує значного збільшення потужності, що призводить до зростання енергоспоживання та розмірів обладнання. До того ж, сучасні методи адаптивної модуляції та перехід на вузькосмугові або малопотужні сигнали можуть зменшувати ефективність купольного РЕБ.

- частота на якій РЕБ протидіє об'єкту прямо пропорційна номінальній потужності пристрою РЕБ. Тим самим виявляється, що певні види РЕБ, які глушать високі частоти взагалі нераціонально використовувати: наприклад, створення купольних РЕБ зі значними діаметрами захисту для частоти протидії РЕБ у 5,8 ГГц (використовується для передачі відеосигналу при роботі FPV-дронів) не має великого сенсу через високу вартість та габарити таких систем, що робить їх особливо вразливими до інших видів військових впливів.

- при глушінні розвідувальних БПЛА невеликого радіусу дії високочастотні РЕБ, які здатні забезпечити висоту захисту в 2,5 або 3 км навряд чи можуть бути використані в реальних умовах через свої значні габарити, високу вартість та вразливість.

- через характеристики залежності зони ефективної протидії для різних потужностей передавача для конюшинної антени від потужності передавача такі антени мають суттєві переваги при їх використанні на високих частотах глушіння.

В ході даного дослідження проаналізовано факти, що підтверджують високу ефективність засобів глушіння у сучасній практиці застосування РЕБ. На практиці

всі змодельовані засоби РЕБ використовують приблизно однаковий спосіб глушіння сигналів, що складається з лінійної частотної модуляції однієї тональності. Такий прийом допомагає знизити ймовірність виявлення їх сигналів та підвищити захист від GPS-діапазону.

В перспективі подальша взаємодія безпілотних систем може призвести до появи нових методів ведення війни, що свідчить про необхідність проведення додаткових досліджень [9]. Слід також відзначити, що успіх у проведенні електронних операцій полягає не стільки у використанні сучасних і креативних засобів РЕБ, а передбачає насамперед тісної співпраці між різними рівнями командування та цивільними структурами для того, щоб чітко визначити та дотримуватися стратегії дій під час інтенсивних військових конфліктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shamanov D. Аналіз сучасних методів радіоелектронної боротьби / D. Shamanov, A. Sorokin // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Т. 1 (75). – С. 211-214. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.211>.
2. Впровадження інноваційних технологій та модернізація технічної складової В80 сектору безпеки і оборони як вагомий чинник у боротьбі з агресором

: зб. матеріалів міжвідомчої науково-практичної конференції, 27 березня 2024 р., Київ / [відп. ред. Парфило О.А.] ; Укр. наук.-дослід. ін.-т спец. техніки та судових експертиз Служби безпеки України. — Київ : ІСТЕ СБУ, 2024. — 298 с.

3. XVII міжнародна наукова конференція Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору": тези доповідей, 14 – 15 квітня 2021 року. – Х.: ХНУПС ім. І. Кожедуба, 2021. – 764 с.

4. Пічугін М. Ф., Носова Г.Д. Збірник наукових праць ЖВІ НАУ. Випуск 3 — Аналіз тактики застосування підрозділів РЕБ у сучасних війнах та локальних збройних конфліктах. — К., 2010.

5. О. М. Семененко, Р. В. Бойко, Ю. Б. Добровольський, В. Л. Іванов, О. І. Кремешний. Контррадіоелектронна боротьба як складова частина радіоелектронної боротьби в Збройних Силах України // Системи озброєння і військова техніка. — 2016. — Вип. 46. — С. 141-145. — ISSN 2518-1580

6. McDermott, Roger N (September 2017). Russia's Electronic Warfare Capabilities to 2025: Challenging NATO in the Electromagnetic Spectrum. International Centre for Defence and Security. ISBN 978-9949-9972-0-6. Архів оригіналу за 7 листопада 2017. Процитовано 28 листопада 2024.

7. Довідник військового зв'язківця. Засоби радіоелектронної боротьби та розвідки, які використовуються російською федерацією. — Київ: «ЦУЛ», 2024. — 64 с.

8. Jonas Kjellèn (4 жовтня 2018). Russian Electronic Warfare. The role of Electronic Warfare in the Russian Armed Forces (Звіт). Stockholm: FOI, Swedish Defence Research Agency. с. 105. FOI-R--4625--SE. Архів оригіналу (PDF) за 16 жовтня 2018. Процитовано 01 грудня 2024.

9. U.S. Army. (2009). Field manual FM 3-36: Electronic warfare in operations. Department of the Army. Retrieved from <https://www.bits.de/NRANEU/others/amd-us-archive/fm3-36%2809%29.pdf>

10. U.S. Army. (2023). *ATP 3-12.3: Electronic warfare techniques*. Department of the Army. Retrieved from <https://irp.fas.org/doddir/army/atp3-12-3.pdf>.
11. Escadrone. (2004). Окопний РЕБ “Грець” 5ML. Retrieved December 5, 2024, from <https://escadrone.com.ua/reb/okopnyy-reb-%E2%80%9Cgrets%E2%80%9D-5ml>
12. Лінії радіозв’язку та антенні пристрої. Навчальний посібник / [М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценюк]. – К.: ВІТІ, 2018. – 250 с.