

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем**

«На правах рукопису»
УДК 621.391.823

До захисту допущено:
Завідувач кафедри РТС
Смч Сергій ЖУК
« 9 » грудня 2024 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»
зі спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
на тему: «Програмне забезпечення для розрахунку електромагнітної сумісності
радіоелектронних пристроїв»**

Виконала:
студентка 2 курсу, групи РС-31мп
Голодяєва Поліна Василівна
Керівник:
К.т.н., доц. каф. РТС
Товкач Ігор Олегович
Рецензент:
Ст. викл., PhD каф. ПРЕ
Сокольський Сергій Олегович




Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студентка Смч

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти — другий (магістерський)

Спеціальність — **172 «Електронні комунікації та радіотехніка»**

Освітньо-професійна програма «**Радіотехнічні комп'ютеризовані системи**»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри РТС

_____ *СЖУ* Сергій ЖУК

« 2 » вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студентці

Голодяєвій Поліні Василівні

1. Тема дисертації: «Програмне забезпечення для розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв»,
науковий керівник роботи Товкач Ігор Олегович, к.т.н., доц. каф. РТС,
затверджені наказом по університету від «8» листопада 2024 р. № 5023-с.
2. Термін подання студентом роботи 9 грудня 2024 р.
3. Об'єкт дослідження: Методика розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв.
4. Вихідні дані: Параметри, що впливають на електромагнітну сумісність радіоелектронних пристроїв, програмне середовище Visual Studio.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1. Дослідження складників електромагнітної обстановки. 2. Аналіз програм-аналогів. 3. Розробка програмного

забезпечення для розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв. 4. Аналіз ефективності розробленого програмного забезпечення.

6. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) Презентація обсягом 25 слайдів.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Дві доповіді на конференціях.

8. Консультанти розділів дисертації: Науково-педагогічні працівники радіотехнічного факультету.

9. Дата видачі завдання 2 вересня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання на дипломну роботу	2.09.2024	Виконано
2.	Аналіз літератури з електромагнітної сумісності	20.09.2024	Виконано
3.	Аналіз складників електромагнітної обстановки	15.10.2024	Виконано
4.	Аналіз програм-аналогів	26.10.2024	Виконано
5.	Розробка програмного забезпечення	28.11.2024	Виконано
6.	Аналіз результатів роботи розробленого програмного забезпечення	1.12.2024	Виконано
7.	Отримання допуску до захисту	6.12.2024	Виконано
8.	Оформлення дипломної роботи	9.12.2024	Виконано

Студентка

 Поліна ГОЛОДЯЄВА

Керівник

 Ігор ТОВКАЧ

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Широке використання невеликих високошвидкісних електронних пристроїв, які часто експлуатуються поблизу інших електричних систем, а також стрімке зростання кількості та різноманітності пристроїв бездротового зв'язку призвело до занепокоєння щодо впливу інтерференції. Швидші та складніші схеми розміщуються на все менших площах, що збільшує ймовірність того, що пристрої, які містять такі системи, будуть негативно впливати один на одного. Тому сучасні електронні пристрої повинні мати можливість нормально функціонувати в електромагнітному середовищі, яке стає дедалі більш зашарашаним. Таким чином, мінімізація електромагнітних перешкод і сприйнятливості стала основною метою.

Для економії ресурсів розрахунки електромагнітної сумісності встановлених в системі радіоелектронних пристроїв проводиться ще на етапі проектування, однак «ручні» розрахунки є занадто громіздкими та займають велику кількість часу, тому з розвитком комп'ютерних технологій почали з'являтися спеціальні програми для подібних розрахунків.

Існує значна кількість програм для аналізу електромагнітної обстановки, однак багато з них є перевантаженими різноманітними функціями і потребують чимало часу на освоєння, або навпаки, в них бракує необхідних для розрахунків параметрів. Тому розробка програмного забезпечення для розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв, яке матиме інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та виконуватиме чітку задачу, є актуальною темою.

Мета роботи. Розробка програмного забезпечення для розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв з урахуванням необхідних параметрів.

Завдання дослідження. Проаналізувати доступні програми для розрахунку електромагнітної сумісності, виявити їх недоліки, дослідити можливі джерела впливу на електромагнітну обстановку системи та на основі цих даних розробити програмне забезпечення.

Об’єкт дослідження. Процеси оцінки електромагнітної обстановки системи.

Предмет дослідження. Алгоритми кількісного розрахунку електромагнітного випромінювання в системі.

Практична цінність. Розроблене програмне забезпечення дозволяє швидко та точно оцінити електромагнітну сумісність радіоелектронних пристроїв та на основі цих даних зробити висновок про доцільність використання такої конфігурації системи.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Повний обсяг дисертації складає 90 сторінок, в тому числі 83 сторінки основного тексту, 11 таблиць, 26 рисунків, 3 сторінки списку використаних джерел у кількості 33 найменувань, 1 додаток.

Ключові слова. ЕМС, ЕМО, частотний аналіз, енергетичний аналіз, РЕП.

ABSTRACT

Relevance of the topic. The proliferation of compact, high-speed electronic devices, often used near other electrical systems, along with the rapid expansion of wireless communication technologies, has raised significant concerns about interference. As faster and more intricate circuits are integrated into increasingly smaller spaces, the risk of devices negatively impacting one another grows. Consequently, modern electronics must operate effectively in an electromagnetic environment that is becoming progressively more crowded. Reducing electromagnetic interference and improving device immunity has therefore emerged as a critical objective.

To save resources, the electromagnetic compatibility of electronic devices installed in the system is calculated at the design stage, but manual calculations are too cumbersome and time-consuming, so with the development of computer technology, special programs for such calculations began to appear.

There is a considerable number of software programs for analysing the electromagnetic environment, but many of them are overloaded with various functions and require a lot of time to master, or vice versa, they lack the parameters necessary for calculations. Therefore, the development of software for calculating the electromagnetic compatibility of electronic devices, which will have an intuitive interface and perform a clear task, is a relevant topic.

Research purpose. Development of software for calculating the electromagnetic compatibility of radio electronic devices with regard to the required parameters.

Research objectives. To analyse the available programs for calculating electromagnetic compatibility, identify their shortcomings, investigate possible sources of influence on the electromagnetic environment of the system and develop software based on these data.

Object of study. Processes for assessing the electromagnetic environment of a system.

Subject of study. Algorithms for quantitative calculation of electromagnetic radiation in the system.

Practical value. The developed software allows you to quickly and accurately assess the electromagnetic compatibility of electronic devices and, based on these data, draw a conclusion about the feasibility of using such a system configuration.

The thesis consists of an introduction, four chapters and conclusions. The full volume of the dissertation is 90 pages, including 83 pages of the main text, 11 tables, 26 figures, 3 pages of the list of references in the amount of 33 items, 1 appendix.

Keywords. EMC, EME, frequency analysis, energy analysis, RED.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ, АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД.....	13
1.1 Актуальність теми	13
1.2 Основні терміни та поняття.....	14
1.3 Історія досліджень.....	16
1.4 Потенційні загрози при порушенні електромагнітної сумісності.....	17
1.5 Класифікація джерел та рецепторів електромагнітних завад	19
1.6 Методи захисту від електромагнітних перешкод	22
1.7 Методи проведення випробувань на ЕМС	25
1.8 Стандарти та норми.....	31
1.9 Висновок	35
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ПРОГРАМ-АНАЛОГІВ.....	36
2.1 Загальна інформація.....	36
2.2 CST Studio Suite	36
2.3 FEKO.....	39
2.4 EMIT	41
2.5 EMCoS Studio.....	43
2.6 XFDTD.....	46
2.7 WIPL-D	48
2.8 Висновок	50
РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМИ.....	52
3.1 Постановка задачі.....	52
3.2 Частотний аналіз.....	52
3.3 Енергетичний аналіз	56
3.4 Розроблене ПЗ.....	63
3.5 Висновок	69
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	70

4.1 Приклади результатів виконання програми	70
4.2 Висновок	74
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	75
5.1 Опис ідеї проекту	75
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	77
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	77
5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	81
5.5 Висновок	82
ВИСНОВОК.....	83
ДОДАТОК А.....	87

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АФТ — антенно-фідерний тракт.

ДН — діаграма направленості.

ЕМІ — електромагнітне випромінювання.

ЕМО — електромагнітна обстановка.

ЕМС — електромагнітна сумісність.

ПЗ — програмне забезпечення.

РЕП — радіоелектронний пристрій.

ВСТУП

За останні роки технології радіоелектроніки набувають стрімкого розвитку, зменшуючи розміри пристроїв, збільшуючи їх потужність та розширюючи частотні діапазони, а також знаходять застосування у все більшій кількості сфер. Однак це збільшує ризики впливу одних пристроїв на інші, що може стати критичною проблемою для їх роботи, що в результаті може призвести до катастрофічних наслідків. Саме тому виникає все більша потреба для оцінки електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв в системі ще на етапі проектування, щоб запобігти потенційним втратам ресурсів.

Для оцінки електромагнітної обстановки необхідно врахувати значну кількість параметрів та чинників, таких як, наприклад, інтермодуляційні завади, втрати у високочастотних кабелях, діаграми направленості антен, вплив типу поляризації на взаємодію пристроїв, що робить розрахунки доволі громіздкими і підвищує ризик помилки при розрахунках людиною, тому логічним рішенням є використання спеціалізованого ПЗ.

На сьогодні існує велика кількість програмних засобів для аналізу електромагнітної обстановки, однак багато з них мають надмірну кількість функцій, що ускладнює їх освоєння, або ж, навпаки, вони не забезпечують усіх необхідних параметрів для розрахунків. З огляду на це, існує потреба у створенні програмного забезпечення для визначення електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв, яке матиме зрозумілий інтерфейс та буде орієнтоване на вирішення конкретних завдань.

Мета роботи. Розробка програмного забезпечення для розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв з урахуванням необхідних параметрів.

Завдання дослідження. Проаналізувати доступні програми для розрахунку електромагнітної сумісності, виявити їх недоліки, дослідити можливі джерела впливу на електромагнітну обстановку системи та на основі цих даних розробити програмне забезпечення.

Об'єкт дослідження. Процеси оцінки електромагнітної обстановки системи.

Предмет дослідження. Алгоритми кількісного розрахунку електромагнітного випромінювання в системі.

РОЗДІЛ 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ, АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЗАВАД

1.1 Актуальність теми

Через понад століття після початку використання електромагнітних випромінювань для потреб людства, ці випромінювання знаходять дедалі нові й нові застосування в різних галузях промисловості, науки і техніки. Радіомовлення, телебачення, радіозв'язок, радіолокація, радіонавігація, судноплавство, радіокерування літальними апаратами і рухомими засобами - найвідоміші галузі застосування електромагнітних хвиль. Крім цього медицина, хімія, геологія, метеорологія і багато інших галузей людської діяльності все ширше впроваджують для своїх потреб досягнення сучасної радіотехніки та електроніки. Освоєння Світового океану і космічного простору також відкрили нові можливості для радіоелектроніки.

Широке впровадження радіоелектронних пристроїв (РЕП) призводить до того, що під час одночасної роботи вони починають впливати один на одного. Тому під час проектування РЕП необхідно враховувати умови їхньої експлуатації, включно з електромагнітною обстановкою, у якій належить працювати РЕП.

Електромагнітна обстановка (ЕМО) — це сукупність електромагнітних випромінювань у точці або районі, де розміщується (або планується розмістити) РЕП. Електромагнітні випромінювання можуть порушити якість роботи РЕП, аж до повної неможливості виконання ним своєї основної функції. Поява нового РЕП змінює ЕМО в точках, де вже розташовані працюючі засоби. Ця зміна може погіршити якість функціонування деяких із них.

Вирішення завдань забезпечення задовільного функціонування РЕП в навколишньому ЕМО, не чинячи неприпустимого впливу на неї та інші засоби, становить сутність проблеми електромагнітної сумісності (ЕМС)[1].

Міжнародне співтовариство прийшло до розуміння необхідності посилити вимоги ЕМС і поширити регулювання в цій галузі на технічні засоби всіх видів і призначень, що піддаються впливу електромагнітних завад і є їхніми джерелами.

Забезпечення електромагнітної сумісності, тобто досягнення такого стану, коли електротехнічні, електронні та радіоелектронні апарати, системи та установки будуть придатні до виконання функцій за призначенням під час впливу перешкод, створених електротехнічними виробами та спричинених природними явищами, стало необхідною умовою науково-технічного прогресу, а отже, і сталого розвитку економіки, суспільства та держави.

Будь-які електричні та електронні вироби, включно з апаратами, системами, стаціонарними та рухомими установками, що здатні створювати електромагнітні завади та (або) сприйнятливі до їхнього впливу, мають бути виготовлені таким чином, щоб:

- створювані ними електромагнітні завади не перевищували рівня, що забезпечує функціонування радіо- і телекомунікаційного обладнання та інших виробів відповідно до їх призначення;
- вироби мали достатній рівень власної стійкості до електромагнітних завад, що забезпечує їхнє функціонування відповідно до призначення[2].

Сьогодні людина настільки залежить від використовуваної електро- і радіотехніки, що проблема забезпечення ЕМС стала для неї життєво важливою.

1.2 Основні терміни та поняття

Електромагнітна сумісність радіоелектронних пристроїв — це здатність цих пристроїв одночасно функціонувати в реальних умовах експлуатації з потрібною якістю під час впливу на них ненавмисних радіозавад і не створювати неприпустимих радіозавад іншим радіоелектронним засобам[3].

Ненавмисною електромагнітною завадою вважають будь-яку радіоперешкоду, створювану джерелом штучного походження, не призначену для порушення функціонування радіоелектронних засобів. Часто замість радіоперешкод говорять про електромагнітні перешкоди. Електромагнітна перешкода визначається як небажаний вплив електромагнітної енергії, що погіршує або може погіршити показники якості функціонування РЕП. Можна

вважати, що радіоперешкода — це електромагнітна перешкода в діапазоні радіочастот.

Радіоперешкода, створена в просторі за рахунок поширення електромагнітних хвиль, називається випромінюваною.

Стійкість до електромагнітної завади, або завадостійкість, — це здатність технічного засобу зберігати задану якість функціонування під час впливу на нього зовнішніх перешкод із регламентованими значеннями параметрів за відсутності додаткових засобів захисту від перешкод, які не належать до принципу дії або побудови технічного засобу.

Завадозахищеність — це здатність послаблювати дію електромагнітної завади за рахунок додаткових засобів захисту від завад, які не належать до принципу дії або побудови технічного засобу.

Під радіоелектронним пристроєм розуміють технічний засіб, що складається з одного або декількох радіопередавальних і (або) радіоприймальних пристроїв та допоміжного обладнання. До РЕП відносять радіостанції, радіолокатори тощо. Таке визначення РЕП має на увазі, що всі компоненти, які входять до цього пристрою, знаходяться територіально в одному місці.

Наведене визначення електромагнітної сумісності виділяє як основний фактор, що викликає проблему ЕМС, перешкоди між пристроями.

Джерела електромагнітної перешкоди — клас будь-яких пристроїв, які можуть створювати електромагнітне випромінювання. Сюди включають пристрої, не призначені для випромінювання електромагнітних хвиль (наприклад, двигуни, системи запалювання тощо).

Рецептори електромагнітної завади — усі пристрої, які змінюють (оборотно або необоротно) значення своїх параметрів під впливом електромагнітних завад.

Виділяють також поняття прийнятна радіоперешкода — ненавмисна радіоперешкода, рівень якої не впливає на роботу РЕП.

Крім цього за ієрархією побудови РЕП виділяють такі види радіоперешкод:

- міжсистемна радіоперешкода — ненавмисна радіоперешкода, що виникає між РЕП різних радіосистем;
- внутрішньосистемна радіоперешкода — ненавмисна радіоперешкода, що виникає між РЕП однієї радіосистеми;
- внутрішньо апаратурна завада — ненавмисна завада, що виникає між частинами одного блоку РЕП [4].

Під час розгляду проблеми сумісності в глобальному масштабі під радіочастотним ресурсом розуміють весь діапазон частот, придатний для зв'язку, локації тощо. Його споживачами виступають регіони, країни, області тощо, а також радіослужби, радіосистеми.

1.3 Історія досліджень

На початку 20-го століття з'явилися перші нормативні документи з електромагнітної сумісності. Щоб зменшити проблему радіоперешкод, для приватних радіостанцій і військово-морського флоту були виділені різні частоти. З технічного боку, розроблялися передавачі з усе більш вузькою смугою пропускання. Цей та інші технологічні досягнення уможливили передачу чіткої людської мови і ознаменували початок золотого віку радіомовлення.

Для вирішення проблеми електромагнітних завад, що виникли внаслідок зростання популярності радіо, була створена Федеральна комісія з питань зв'язку (FCC). Перед цією установою було поставлено завдання регулювати весь зв'язок по радіо, проводах і кабелях. Регулювання FCC призвело до значного зменшення проблем радіозавад, але нові проблеми почали розвиватися, коли широка громадськість почала користуватися електроприладами.

Під час Другої світової війни розроблялися нові типи радіопередавачів і приймачів для використання на війні. Через терміновість воєнного часу не було проведено жодних широких випробувань, і в результаті це обладнання спричинило серйозні проблеми з електромагнітною сумісністю на кораблях і літаках. Наприкінці війни ВМС випустили перший стандарт RFI, і EMC стала шанованою

інженерною спеціалізацією. У 1954 році дебютувала конференція Фонду досліджень бронетехніки з радіочастотних перешкод. Ця конференція існує і сьогодні під назвою Товариство електромагнітної сумісності Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE).

У 1970-х роках мікропроцесори почали з'являтися в побутових пристроях. Вони поширилися завдяки низькій вартості розробки, але також спричинили нові проблеми з електромагнітною сумісністю, спричинені більш чутливими схемами. Ці події призвели до ще більшої уваги до запобігання проблемам електромагнітної сумісності. У 1970-х роках було створено низку керівних принципів і стандартів для вирішення проблем, спричинених усіма цими новими електронними пристроями.

У 1980-х роках поява персональних комп'ютерів висунула на перший план нові проблеми ЕМС, але також дала інженерам обчислювальну потужність для аналізу та вирішення цих проблем. І FCC, і Європейський Союз адаптували широкі правила ЕМС, щоб зменшити передачу ненавмисних випромінювань від електронних пристроїв. Компанії були змушені почати думати про електромагнітну сумісність у процесі проектування своєї продукції. Так народилася ціла нова галузь. Створювалися нові процедури випробувань і стандарти, що призвело до значного зменшення кількості проблем, пов'язаних з ЕМС[5].

1.4 Потенційні загрози при порушенні електромагнітної сумісності

Порушення електромагнітної сумісності здатне спричинити суттєві наслідки в різних галузях, від тимчасових несправностей обладнання до критичних аварій із трагічними наслідками.

Проблеми з ЕМС можуть провокувати збої в роботі таких важливих медичних пристроїв, як кардіостимулятори, дефібрилятори та апарати штучної вентиляції легень. Наприклад, медичні прилади, такі як МРТ-сканери чи ультразвукові апарати, можуть показувати недостовірні результати через вплив

перешкод, що створює ризики для пацієнтів і, в окремих випадках, може стати причиною летальних наслідків.

Електричні й магнітні поля суттєво впливають на живі організми. Наприклад, поблизу ліній електропередач у комах спостерігається змінена поведінка: у бджіл — підвищена агресія, зменшення продуктивності та часткове втрачання маток; у жуків, комарів та інших літаючих комах — змінений напрямок руху. У рослин можуть виникати аномалії розвитку, як-от зміна розміру та форми листя чи квіток. Люди, перебуваючи в зонах сильного електромагнітного впливу, також можуть зазнавати негативних наслідків, зокрема вразливі групи ризику — хворі з алергічними реакціями або гіперчутливістю. Серед довготривалих наслідків часто згадуються онкологічні захворювання.

У транспорті взаємодія електромагнітних полів може спричинити несправності бортової електроніки літаків, автомобілів чи потягів, що створює ризик аварійних ситуацій. Для безпілотних транспортних засобів або автоматизованих систем керування така проблема є ще критичнішою, адже збій може призвести до втрати управління.

В енергетиці перешкоди можуть впливати на роботу мереж і обладнання. Наприклад, у відновлюваних джерелах енергії (сонячні чи вітрові електростанції) електромагнітні перешкоди можуть порушити синхронізацію і контроль, спричиняючи відключення енергії або навіть аварії.

В електромагнітно насиченому середовищі можливі збої у мобільному зв'язку, інтернеті чи радіокомунікаціях, що створює труднощі в роботі екстрених служб, таких як швидка допомога, поліція або пожежники.

Автоматизовані виробничі системи також є вразливими до електромагнітних перешкод. Збої в системах моніторингу чи управління можуть призвести до економічних втрат, простоїв виробництва або навіть аварій, особливо у хімічній чи нафтовій галузях.

Потужні електромагнітні імпульси здатні вивести з ладу не тільки окремі пристрої, а й цілі мережі. Такий сценарій може бути використаний як метод атак на критичну інфраструктуру, банківські системи чи інші стратегічні об'єкти.

У військовій сфері ЕМС порушення впливають на роботу систем зв'язку, радіолокації та управління. Це може послабити обороноздатність і зробити техніку вразливою для зовнішніх впливів.

Порушення електромагнітної сумісності здатне призвести до значних економічних збитків через зупинку виробництва або необхідність виправлення технічних несправностей. У разі порушення норм ЕМС компанії ризикують втратити довіру клієнтів і зіпсувати свою репутацію.

Електромагнітна сумісність є важливим фактором у проєктуванні, експлуатації й управлінні багатьма системами, тому її порушення може мати серйозні наслідки на різних рівнях[6].

1.5 Класифікація джерел та рецепторів електромагнітних завад

Джерела ненавмисних електромагнітних завад поділяють на дві групи: природні та штучні. На рисунку 1.1 зображена класифікація джерел електромагнітних завад[7].



Рисунок 1.1 – Класифікація джерел електромагнітних завад

Джерела природних перешкод поділяють на земні та позаземні. Земні джерела — пов'язані з атмосферою, як середовищем поширення радіохвиль. Це насамперед атмосферні перешкоди і статичні розряди. Джерелами атмосферних перешкод є електричні розряди під час гроз, які мають широкий спектр частот і поширюються на великі відстані. У північних широтах джерелами перешкод є полярні саява. Накопичення електричних зарядів в опадах і подальший їхній розряд на елементах антени, заземлення або поблизу антени також призводять до електромагнітних перешкод. До природних джерел перешкод слід віднести також спотворення сигналів у середовищі поширення.

Крім того, джерелом радіоперешкод у короткохвильовому діапазоні та на нижчих частотах є земна магнітосфера, що простягається на кілька тисяч кілометрів від поверхні Землі та збирає корпускулярне випромінювання Сонця та інших зірок. До позаземних джерел перешкод відносять перешкоди, зумовлені електромагнітними випромінюваннями Сонця, планет, зірок та інших небесних тіл. Ці випромінювання є джерелами додаткових космічних завад, і їх слід враховувати під час визначення характеристик приймачів, особливо тих, що працюють у діапазонах УВЧ, НВЧ і на більш високих частотах. Джерелами штучних електромагнітних завад є радіоелектронні пристрої, принцип роботи яких пов'язаний з випромінюванням електромагнітної енергії.

Електромагнітні завади радіоелектронним засобам створюють також пристрої, не призначені для випромінювання електромагнітної енергії: джерела електричної енергії, устаткування і машини, системи запалювання двигунів, апаратура промислового і широкого вжитку. Завади, створювані цими об'єктами, утворюють широкий клас індустріальних завад. Інтенсивність індустріальних перешкод і ширина їхнього спектра різні для різних джерел. З індустріальними перешкодами доводиться рахуватися до частот у кілька сотень мегагерц. Відстані від джерела, на яких радіоприймачі відчувають вплив завади, можуть досягати кількох кілометрів.

За спектральними і часовими характеристиками виділяють зосереджені, імпульсні, флуктуаційні перешкоди. Зосереджена перешкода являє собою вузькосмугове коливання, параметри якого повільно змінюються (порівняно з центральною частотою коливань) або залишаються постійними в часі. Імпульсна і флуктуаційна перешкоди — широкосмугові. Флуктуаційну заваду можна розглядати як граничний випадок імпульсної завади, коли відбувається накладення в часі випадкового числа імпульсів із випадковими амплітудами. Отже, флуктуаційна перешкода — випадковий процес. Такою перешкодою можуть бути космічні шуми і внутрішні шуми радіоапаратури.

На рисунку 1.2 представлено можливі рецептори електромагнітних завад[8].

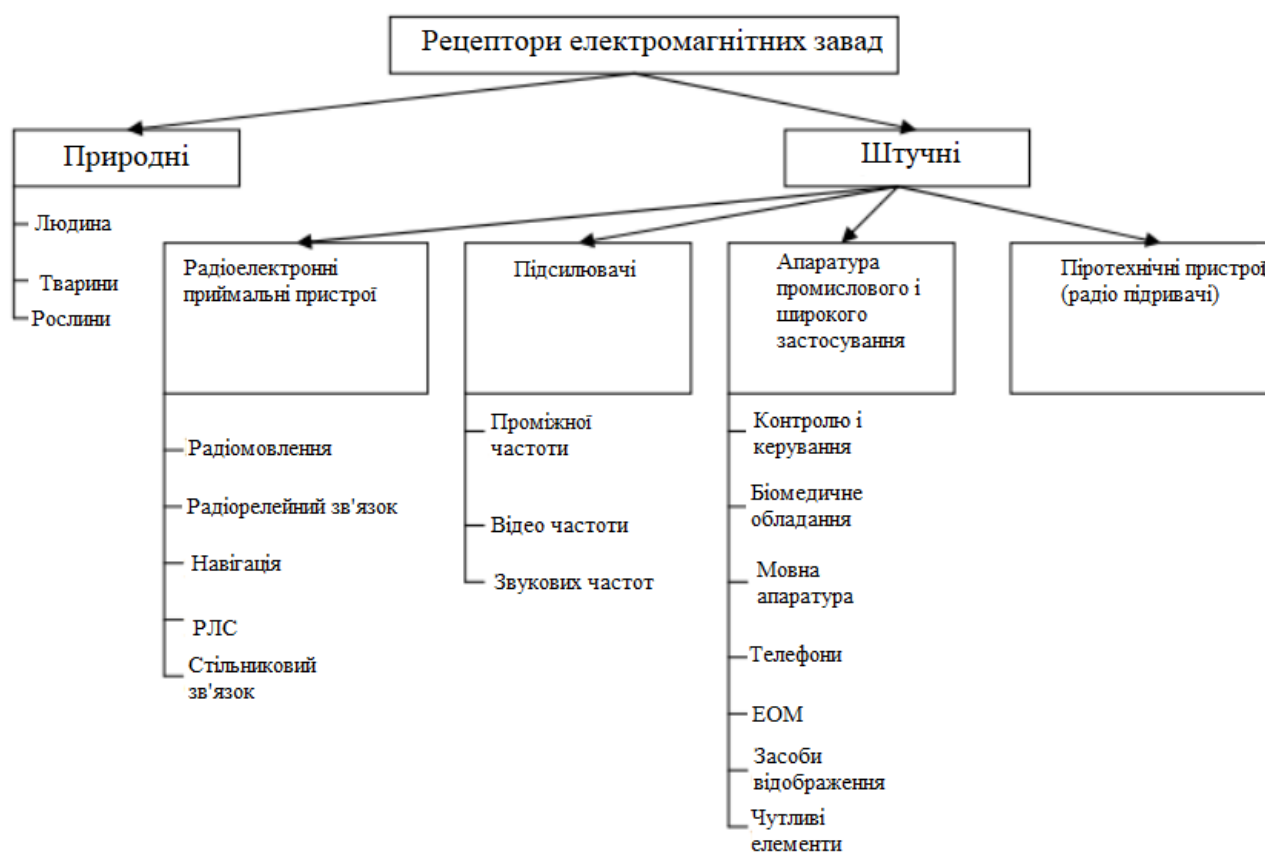


Рисунок 1.2 – Класифікація рецепторів електромагнітних завад

Їх так само, як і джерела завад, поділяють на природні та штучні. Враховувати сприйнятливість природних рецепторів до електромагнітних завад

важливо як з погляду збереження здоров'я людини, так і для захисту навколишнього середовища. З цією метою встановлюються допустимі санітарні норми для рівнів радіо- та НВЧ-опромінення. Штучні рецептори можна розбити на дві групи: рецептори, що працюють на принципах добування корисної інформації з навколишнього електромагнітного поля, і рецептори, які за принципом своєї роботи не повинні реагувати на зовнішні електромагнітні поля. Першу групу складають радіоелектронні приймальні пристрої та радіодетонатори. Для них найбільш важкозахищеним від перешкод є антенний тракт, оскільки поля всіх працюючих передавачів створюють в антені приймача струми своїх сигналів. Однак антена і приймальний пристрій мають вибіркові властивості: реагують на сигнали, що займають певну смугу частот, а сигнали, що лежать поза смугою пропускання, сильно пригнічуються.

1.6 Методи захисту від електромагнітних перешкод

Розв'язання проблеми електромагнітної сумісності технічного засобу полягає у створенні умов, за яких він ідеально сумісний з навколишнім середовищем, тобто несприйнятливий до зовнішніх завад і не створює завад для інших засобів.

Для забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів застосовуються організаційні та технічні методи[9].

Організаційні методи застосовуються, як правило, на етапі встановлення (монтажу) технічного засобу і системи захисту інформації та під час їх експлуатації.

Основними організаційними методами забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів є:

- зниження рівня супутнього (небажаного) випромінювання за рахунок збільшення відстані між потенційно конфліктними технічними засобами;
- рознесення технічних засобів, які збігаються або частково збігаються за спектром завадових випромінювань технічних засобів, і випромінювань, що

сприймаються рецептором, на частотний інтервал, що допускає їхню спільну роботу без зниження якості функціонування останнього;

- рознесення в часі інтервалів роботи потенційно конфліктних технічних засобів (використання спільного радіоресурсу за часовим графіком)[10].

Однак одними організаційними методами завдання забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів розв'язати доволі складно, тому поряд з організаційними використовують і технічні методи.

Технічні методи застосовуються для зниження рівня супутнього випромінювання, що призводить до зниження «зони заважань», і зменшення спектра супутнього випромінювання, що сприяє більш економічному використанню частотного ресурсу.

Основними технічними методами забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів є:

- екранування — оточення джерела завадового електромагнітного випромінювання або рецептора кожухом зі сплаву металу, склад якого залежить від того, що необхідно захищати і від якого виду поля будується захист;

- фільтрація — створення на шляху поширення паразитних струмів, що спричиняють супутні (небажані) випромінювання, фільтрів, які усувають або знижують до допустимого рівня перешкоди, що заважають;

- заземлення — забезпечення стікання паразитних струмів, що утворюються на екранах, корпусі та інших загальноосхемних з'єднаннях технічного засобу, у землю, тим самим, унеможливаючи накопичення потенціалу до небезпечних (зокрема і для людини) меж[10].

Екранування в задачах електромагнітної сумісності та захисту інформації передбачає, головним чином, захист інформаційних ліній і технічних засобів від наведень, викликаних зовнішніми випадковими в часі електричними та магнітними полями. Екранування кабельних ліній сприяє також зниженню рівня напруженості поля, що створюються лініями зв'язку та електроживлення в навколишньому просторі, але воно тут менш значуще, оскільки значення напруги і струмів у лініях

незначні, а взаємний вплив усувається під час їх встановлення на етапі монтажу всієї системи.

Завдання виробництва та оснащення технічних засобів екранами досить складні в розрахунках і технології виконання і тому в процесі застосування технічних засобів, як правило, не вирішуються. Однак користувачеві потрібно знати роль і значення цих пристосувань, і під час вибору та монтажу кабельного обладнання і технічних засобів під час створення (модернізації) системи оброблення інформації, що захищається, а також під час місцевого ремонту не нехтувати їх встановленням.

Фільтрацію в технічному засобі здійснюють для унеможливлення впливу зовнішніх електромагнітних полів на рецептор за всіма з'єднаннями і входами, а також для захисту кабельних ліній від перешкод, що створюються самим засобом. Крім цього, фільтри передбачаються для унеможливлення завад у колах електроживлення, керування, контролю і комутації. Фільтр зазвичай являє собою Г-, Т- або П-подібні LC-ланки, які вмикають у розрив фази та нульового дроту мережі живлення для унеможливлення завад у ланцюгах електроживлення. Грамотне використання фільтрувальних пристроїв під час монтажу обладнання системи, що обробляє захищену інформацію, дасть змогу запобігти її спотворенню або втраті під час впливу зовнішніх електромагнітних полів. Екранування практично не виконується без забезпечення фільтрації входних (вихідних) провідників.

Завдання забезпечення достатньої фільтрації в технічних засобах можуть реалізовуватися й окремо від екранів. Вони також складні в розрахунках і технології виконання і в процесі застосування технічних засобів не вирішуються. Задачі екранування і фільтрації технічних засобів повинні вирішуватися на стадії встановлення і монтажу обладнання системи захисту інформації.

Вирішенням задачі побудови правильного заземлення технічного засобу займається його користувач у період встановлення та в процесі експлуатації. За міжнародним стандартом, побутова мережа електроживлення, окрім звичайних

дротів «фаза» і «нуль», містить третій дріт «земля», який для побутових технічних засобів є заземленням. Відсутність у мережі електроживлення дроту «земля» визначає для користувача технічних засобів необхідність самостійної організації грамотного заземлення.

У техніці заземлення використовують заземлювачі, під якими розуміють металеві електроди будь-якої форми (труба, стрижень, лист тощо), які розміщені безпосередньо в земляному ґрунті та мають із ним електричний контакт певного опору (що він менший, то ефективніше заземлення). Якість заземлення залежить від кількості заземлювачів, площі їхнього зіткнення з ґрунтом, кінцевого опору, який дорівнює сумі електричних опорів дротів, що підводять від технічних засобів, перехідного контакту між заземлювачами і ґрунтом, а також опору розтіканню струмів у прилеглих шарах ґрунту. Останнє залежить від провідності ґрунту, конструкції заземлювачів та їхнього розташування (ефективність заземлення зростає в разі зволоження ґрунту соляним розчином). Недоліками, що часто трапляються і призводять до появи перешкод, що заважають, у колах заземлення, є випадки, коли:

- різні технічні засоби заземлюються загальним провідником до шини заземлення;
- у колах заземлення утворюються замкнуті контури, спільні для різних під'єднаних технічних засобів.

1.7 Методи проведення випробувань на ЕМС

Тестування на електромагнітну сумісність має важливе значення для забезпечення належної роботи електронних пристроїв без створення неприпустимих перешкод для інших електронних систем. Це дозволяє виробникам оцінювати пристрої відповідно до стандартних і нормативних документів, таким чином уникаючи можливих проблем під час експлуатації. Рисунок 1.3 ілюструє різні методи вимірювання електромагнітних завад, розділені на дві основні

категорії: випробування на випромінювання та випробування на завадостійкість[11].

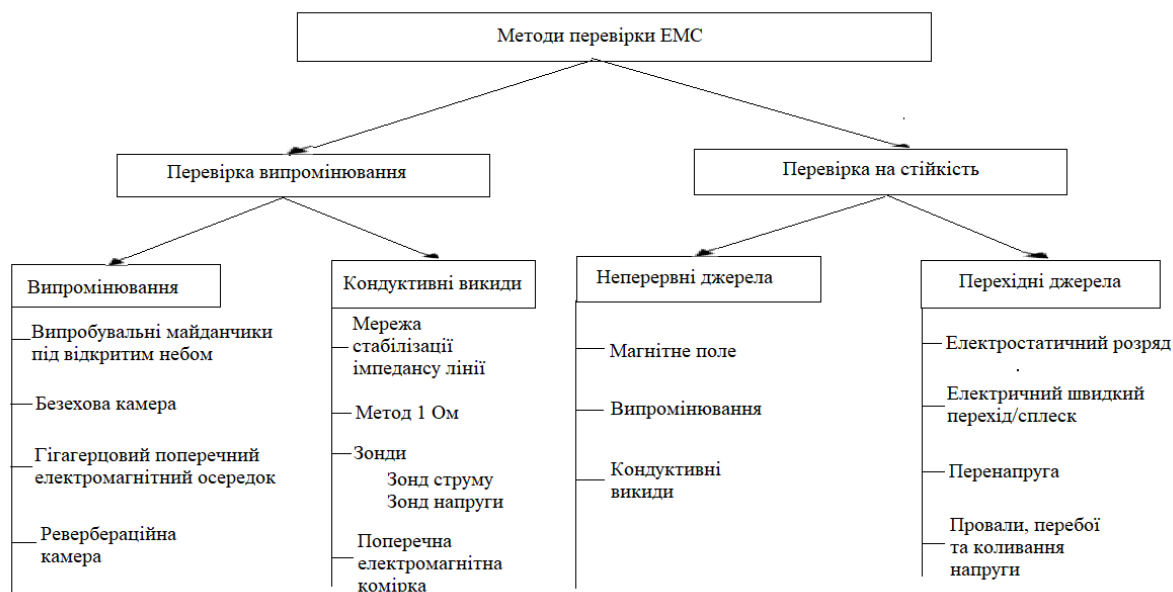


Рисунок 1.3 – Класифікація методів перевірки ЕМС

Випромінювання електромагнітної енергії можуть бути оцінені шляхом вимірювання шуму, який може передаватися навколишнім електронним системам, створюючи тим самим проблеми в їхній роботі.

Випробувальні майданчики на відкритій місцевості — це відкриті майданчики у відкритому, але контрольованому середовищі, де вимірюються електромагнітні випромінювання. Такі випробувальні майданчики розташовані подалі від типово відбиваючих поверхонь або джерел електромагнітного «шуму», щоб забезпечити точність отриманих вимірювань випромінювання. З цієї причини цей метод є дуже репрезентативним для реальних умов і, отже, надійним способом вимірювання роботи пристроїв у реальному робочому середовищі.

Безехові камери — це нереревербераційні камери, виготовлені з поглинаючими матеріалами на стінках, які можуть поглинати відбиття електромагнітних хвиль. Безехові камери забезпечують середовище, вільне від відбиття, ефективно захищаючи від зовнішнього електромагнітного шуму, таким чином досягаючи точності вимірювань. Камера може бути повністю безеховою або напіванеховою.

У повністю безшумній камері всі поверхні покриті поглинаючим матеріалом. У напіванехоїчних камерах використовується відбивна площина, що дозволяє більш реалістично моделювати навколишнє середовище.

Гігагерцові поперечні електромагнітні камери (GTEM) — це спеціалізовані камери, які полегшують контрольоване, повторюване вимірювання випромінювання. Ці комірки створюють імітацію умов вільного простору для пристрою, що тестується, що дозволяє правильно аналізувати випромінювання в широкому діапазоні частот. Осередки GTEM популярні завдяки своїм невеликим розмірам і швидким можливостям вимірювання і особливо застосовні для попереднього тестування на відповідність вимогам, тобто раннього виявлення можливих проблем з випромінюванням без необхідності використання повної безехової камери. Це зазвичай економить час, оскільки можливості ймовірних викидів відомі ще до проведення повних випробувань на відповідність.

Ревербераційна камера — це металева порожнина, яка відбиває електромагнітні хвилі, створюючи всередині неї складне польове середовище. Це відбиття забезпечує необхідні рівномірні і повторювані умови для пристрою, що тестується. Це означає, що пристрій піддається впливу високої напруженості поля для оцінки в повторюваних умовах відбиття. Ревербераційні камери часто використовуються для тестування пристроїв в жорстких електромагнітних умовах, оскільки висока напруженість поля, що генерується всередині, може ефективно імітувати реальні сценарії перешкод.

Випробування на кондуктивні випромінювання вимірює електромагнітну енергію, що проходить через силові з'єднання та інші з'єднувальні кабелі.

Мережа стабілізації імпедансу лінії використовується для вимірювання кондуктивних випромінювань, що передаються по лініях електропередач від пристрою, що тестується. Вона працює шляхом ізоляції від зовнішніх перешкод, таким чином стабілізуючи імпеданс для точного вимірювання. Основна мета використання полягає в тому, щоб переконатися, що рівень випромінювання знаходиться в заданих межах. Завдяки цьому створюється стабільний імпеданс,

який забезпечує більш однорідні умови вимірювання, що є важливим для проведення реальних порівнянь між будь-якими випробуваними пристроями.

Метод 1 Ом допомагає з'ясувати, чи не відбувається з'єднання випромінювань через непередбачені шляхи. Дуже часто цей тип досліджень проводиться для перехресної перевірки відповідності проведених викидів, зокрема, з точки зору диференціального режиму на лініях електропередач. Метод 1 Ом може допомогти визначити шлях, через який проходить шум.

Струмовий зонд може вимірювати струм, що проходить вздовж силових або сигнальних ліній, без необхідності протікання цього струму через датчик конкретного вимірювального обладнання. Він пропонує ефективний спосіб оцінки випромінювань, що проводяться, у неінтрузивний спосіб і широко застосовується для визначення рівня випромінювань від ЗВТ. Зонди струму є зручними пристроями, оскільки їх можна затискати навколо кабелів без необхідності їх від'єднання, що забезпечує високу ефективність швидкої діагностики та попереднього тестування на відповідність вимогам.

Зонд напруги вимірює рівень кондуктивних випромінювань. Безпосередньо застосовуваний на лініях живлення або сигналу для визначення рівнів напруги будь-якого кондуктивного шуму, вимірювач напруги цілком задовільно визначає диференціальний режим шуму, щоб інженери могли зрозуміти вплив шуму у вигляді випромінювань по лініях електропостачання.

Для створення рівномірного електромагнітного поля для тестування на випромінювання провідності пристрій, що тестується, поміщується всередину поперечної електромагнітної комірки. Електромагнітні характеристики будь-якого пристрою можуть бути перевірені шляхом вимірювання випромінювання провідності через комірку. ТЕМ-комірки виявляються дуже корисними для невеликих пристроїв і є універсальним засобом електромагнітного тестування, оскільки застосовуються як для тестування випромінювання, так і для тестування стійкості для всіх видів гаджетів.

Тестування на стійкість визначає, наскільки добре пристрій ізольований від електромагнітних сил у навколишньому середовищі, і, як правило, гарантує, що робота пристрою залишається безперервною, навіть якщо на нього впливають різні види електромагнітних завад.

Випробування магнітним полем вимірює чутливість пристрою до перешкод магнітного поля. Тестування магнітного поля особливо важливе для пристроїв, які базуються на магнітних датчиках або трансформаторах, оскільки будь-які перешкоди можуть призвести до їхньої низької ефективності та неточності. Випробування включає в себе вплив на пристрій магнітного поля різної напруженості та частоти, щоб перевірити, чи продовжує він працювати належним чином.

Випробування на стійкість до випромінювання оцінює сприйнятливість пристрою до імітованих безперервних хвильових збурень електромагнітного поля від навколишніх джерел випромінювання. Пристрій піддається впливу електромагнітних хвиль різної частоти для перевірки його захищеності. Таке тестування проводиться переважно в безеховій камері, де електромагнітне середовище контролюється таким чином, щоб переважали лише бажані сигнали. Випромінювальна стійкість є важливою вимогою для пристроїв, що працюють в середовищах, де може бути кілька джерел електромагнітного випромінювання, наприклад, в лікарнях або на виробництві.

Тестування на стійкість до кондуктивних завад оцінює сприйнятливість пристрою до постійних електромагнітних завад, які вносяться через лінії електропередач або іншу електропроводку. Основне значення цього виду тестування полягає в тому, щоб визначити, чи може апарат протистояти проведенням перешкодам. Завади вносяться в лінії електропередач або сигнальні лінії, а продуктивність пристрою, що тестується, спостерігається при обробці таких ситуацій. Проведення тесту на завадостійкість є дуже важливим, особливо для пристроїв, підключених до електромережі, оскільки в лініях можуть виникати перешкоди від різних джерел.

Перехідні джерела — це короткочасні завади, які в основному спричиняють переривчасті збої в роботі. Ці збурення іноді спричиняються такими явищами, як вимкнення електричних пристроїв, висока напруга, спричинена блискавкою, або дуже швидкі електростатичні розряди.

Випробування електростатичним розрядом призначене для перевірки стійкості продукту до пошкоджень від електростатичних зарядів, яким він може піддаватися в повсякденних ситуаціях, наприклад, коли користувач контактує із зарядженим пристроєм. Воно передбачає подачу розрядів від електростатичних генераторів на різні точки пристрою і перевірку його реакції, щоб побачити, чи продовжує він працювати належним чином.

Випробування на швидкий електричний перехід/сплеск призначене для перевірки стійкості пристрою до швидких перехідних процесів або сплесків завад, особливо тих, що генеруються індуктивними навантаженнями.

Випробування на перенапругу перевіряє, як конкретний прилад або обладнання справляється з раптовими перепадами високої напруги, наприклад, при ударах блискавки або стрибках напруги на лініях електропередач. Це необхідно для периферійних пристроїв, підключених до мережі змінного струму або зовнішніх установок, оскільки перенапруги можуть викликати величезні стрибки напруги, які можуть перегоріти електронні компоненти, встановлені в пристрої. Контрольовані перенапруги подаються в мережу пристрою контрольованим чином, і його виживання без збоїв забезпечує оцінку його стійкості до перенапруг.

Випробування на провали та переривання напруги оцінюють продуктивність обладнання щодо змін у вхідному живленні, які можуть бути у вигляді короткочасних переривань або поступового зниження напруги (так звані провали напруги). Пристрій піддається різним сценаріям, щоб оцінити його стійкість до проблем з якістю електроенергії. Провали і переривання напруги виникають, коли в електромережі з'являється несправність або під час перемикань. Під час тестування потужність, що подається на пристрій, який тестується, навмисно

змінюється, щоб імітувати ці умови, а потім визначається його здатність продовжувати належне функціонування[12].

1.8 Стандарти та норми

Стандарти електромагнітної сумісності визначають різні групи стандартизації у світі, такі як Міжнародна електротехнічна комісія (IEC), Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) та Європейський комітет з електротехнічної стандартизації (CENELEC). Основна мета цих організацій — визначити стандартні процедури та вимоги, щоб виробники могли розробляти дизайн пристрою таким чином, щоб він міг співіснувати в електромагнітному середовищі, не створюючи шкідливих перешкод.

Стандарти EMC в основному розробляються на міжнародному рівні Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), яка є головним органом. Серед найпоширеніших наборів стандартів, які стосуються різних аспектів завад, включаючи випромінювання, завадостійкість і процедури тестування, є ті, що належать до серії IEC 61000. Мета цих стандартів — допомогти виробникам мати загальний орієнтир для забезпечення того, щоб їхні продукти не випромінювали електромагнітного забруднення і могли працювати без перешкод з боку інших гаджетів [13].

IEC 61000-3 вводить обмеження для обладнання з номінальним струмом гармонік, що не перевищує 16 А на фазу. Цей стандарт має особливе значення для зменшення проблем з якістю електроенергії в електричних мережах і для запобігання внеску надмірних гармонійних спотворень від обладнання, які можуть призвести до перегріву трансформаторів і двигунів.

IEC 61000-4 описує методи випробування та вимірювання — завадостійкість в цілому. Базові випробування на завадостійкість мають вирішальне значення для перевірки того, чи достатньо надійні пристрої і чи здатні вони правильно працювати навіть у середовищі, де є потенційні джерела, що створюють електромагнітні завади[14].

Свій внесок у розробку стандартів електромагнітної сумісності для автомобільної та промислової техніки зробили й інші міжнародні організації, такі як Міжнародна організація зі стандартизації (ISO). Наприклад, стандарт ISO 7637 стосується вимог до електромагнітної сумісності для дорожніх транспортних засобів з точки зору завад, що виникають вздовж ліній електропередач і кабелів[15].

Стандарти електромагнітної сумісності в Європі регулюються в основному CENELEC і гармонізовані відповідно до Директиви ЄС з електромагнітної сумісності. Вимоги, яким повинен відповідати пристрій для продажу в ЄС, наразі містяться в Директиві 2014/30/ЄС. Директива перевіряє, чи розроблені продукти з відповідними заходами, які можуть обмежити електромагнітні випромінювання та стійкість до перешкод. Це означає, що кожен електронний електротехнічний виріб, який продається в межах Європейського Союзу, відповідає вимогам Директиви з електромагнітної сумісності.

Ключові європейські стандарти включають, серед іншого, EN 55032/EN 55022 для випромінювання від інформаційно-технологічного обладнання, але не обмежуються ними. EN 55032 по суті замінив EN 55022 і тепер охоплює ширший спектр мультимедійного обладнання; відповідно, він покликаний гарантувати, що комп'ютерні пристрої, телевізори та аудіотехніка не випромінюють небезпечних рівнів електромагнітного випромінювання[14].

EN 61000-6-1 та EN 61000-6-3 стосуються вимог до житлових, комерційних та легких промислових приміщень. Стандарт EN 61000-6-1 регулює захист від випромінювання, а стандарт EN 61000-6-3 — випромінювання.

Маркування CE є видимим знаком, який показує, що виробник або його уповноважений представник підтверджує, що продукт відповідає всім європейським вимогам щодо безпеки, здоров'я та захисту навколишнього середовища споживачів.

Електромагнітна сумісність у США регулюється вимогами, встановленими для електронних пристроїв Федеральною комісією з питань зв'язку. Зокрема,

вимоги до ненавмисних випромінювачів містяться в Частині 15 FCC, що охоплює такі пристрої, як комп'ютери, побутові прилади або будь-які інші електронні пристрої, які можуть ненавмисно генерувати радіочастотну енергію. FCC встановлює ліміти як на кондуктивне, так і на безпроводне випромінювання, щоб контролювати рівень випромінювання від пристрою, щоб не створювати шкідливих перешкод для інших радіослужб, особливо таких, як системи екстреного зв'язку[16].

У Канаді Міністерство інновацій, науки та економічного розвитку Канади (ISED) вимагає, щоб правила були аналогічними згідно з ICES-003, що обмежує рівень випромінювання цифрових апаратів. Вони викладені як методи, призначені для уникнення неконтрольованого генерування або смикання електромагнітного випромінювання до такого рівня, який може несвідомо заважати іншим пристроям функціонувати належним чином, а зв'язку — служити певній меті[17].

IEEE бере участь у розробці стандартів електромагнітної сумісності в Північній Америці; гарним прикладом є стандарт IEEE C63.4 спрямований на досягнення однорідності між різними випробуваннями на випромінювання та проведенням випробувань на електромагнітну сумісність, щоб досягти повторюваності результатів, що є критичною вимогою в регуляторних органах, а також при сертифікації продукції[18].

Проблеми електромагнітних завад та електромагнітної сумісності є особливо важливими у військовому застосуванні, оскільки військове обладнання повинно надійно працювати в електромагнітно «зашумлених» середовищах, таких як кораблі, літаки та на полі бою. MIL-STD-461 — це військовий стандарт, визнаний у США, який встановлює вимоги до обмеження характеристик електромагнітних завад електронного обладнання[19].

SAE та ISO, наприклад, розробляють такі стандарти, як ISO 11452 щодо стійкості до електромагнітних полів у транспортних засобах і SAE J1113 щодо випробувань на відповідність процедурам. Це пов'язано з особливими викликами, які виникають в автомобільному середовищі, оскільки сучасні транспортні засоби

оснащені великою кількістю електронних систем, таких як блоки керування двигуном, інформаційно-розважальні системи і навіть антиблокувальна система гальм, що відповідає за безпеку[14].

Більшість країн мають власні стандарти електромагнітної сумісності, часто засновані на міжнародних нормах, але адаптовані до конкретних національних вимог.

В Японії за встановлення стандартів електромагнітної сумісності для ІТ-обладнання відповідає VCCI (Добровільна рада з контролю за перешкодами, що створюються інформаційно-технологічним обладнанням). Виріб зі знаком VCCI означає, що він відповідає японським нормам електромагнітної сумісності, які схожі на європейські та північноамериканські, але можуть мати особливі вимоги до тестування та сертифікації[20].

Маркування China Compulsory Certificate або CCC означає, що продукт відповідає вимогам щодо електромагнітної сумісності, встановленим Китайським центром сертифікації якості в Китаї. Щоб легально продаватися в Китаї, новий електронний продукт повинен відповідати вимогам CCC, а процес сертифікації передбачає досить сувору перевірку, що охоплює всі аспекти безпеки та стандартів електромагнітної сумісності[21].

Згідно з відповідними стандартами, виробник повинен бути в змозі виготовити декларацію про відповідність. Для сертифікаційного маркування на різних ринках це може бути, зокрема, CE, FCC, VCCI. Декларація відповідності є офіційним підтвердженням виробника, що продукт відповідає всім вимогам щодо електромагнітної сумісності та пройшов встановлені процедури випробувань. Серед документів, які регуляторні органи можуть вимагати від виробника для перевірки, може бути технічний файл, що супроводжується протоколами випробувань, точним описом, що вказує на продукт, і діаграмами.

Різні галузі мають різні вимоги до електромагнітної сумісності, оскільки їхні робочі середовища не однакові. Найбільш чутливими пристроями є медичні прилади. Вони повинні відповідати стандартам електромагнітної сумісності, щоб

не створювати перешкод для медичного обладнання; це може виявитися небезпечним для життя, якщо хтось отримує медичну допомогу, а на нього створюються перешкоди.

1.9 Висновок

У цьому розділі було описано основні терміни та поняття електромагнітної сумісності, а також досліджено історію досліджень. Було проаналізовано потенційні загрози при недотриманні електромагнітної сумісності в системі та основні методи захисту. Також було описано класифікацію джерел та рецепторів електромагнітних завад та досліджено методи перевірки електромагнітної сумісності пристроїв і стандарти та норми, якими вони супроводжуються.

Таким чином, в результаті проведеного аналізу було закладено основи для створення програмного забезпечення для ефективного аналізу впливу електромагнітних завад і покращення роботи радіоелектронних пристроїв.

РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ПРОГРАМ-АНАЛОГІВ

2.1 Загальна інформація

Зростаюча тенденція до глобального ринку змушує багатьох виробників приділяти особливу увагу дотриманню вимог щодо електромагнітної сумісності. Внутрішні випробування на електромагнітну сумісність можуть забезпечити певну гарантію того, що продукція буде відповідати застосовним критеріям випробувань. Внутрішні можливості ЕМС також допомагають оцінювати прототипи на різних стадіях розробки продукту і визначати вплив змін, що вносяться в продукцію після виробництва, на її електромагнітну сумісність.

Перш за все, незалежно від того, чи обране програмне забезпечення для випробувань на електромагнітну сумісність або електромагнітну сумісність, воно повинно підвищувати продуктивність за рахунок скорочення часу випробувань і збільшення пропускної здатності без ризику пошкодження випробувального обладнання. Безсумнівно, що певний рівень власних можливостей тестування ЕМС в якості інструменту розробки може призвести до значної економії часу і коштів на протипагу пошуку і усуненню несправностей в лабораторії для випробувань ЕМС. Оскільки на ринку доступні численні пакети програмного забезпечення для автоматизації, знайти такий, який задовольнить всі потреби в тестуванні і при цьому буде дійсно сумісний з наявним випробувальним обладнанням, може бути реальним завданням.

Розуміючи можливості та обмеження кожного інструменту, ми можемо оцінити можливості та виклики, пов'язані з розробкою нової платформи для аналізу ЕМС.

2.2 CST Studio Suite

SIMULIA CST Studio Suite — це набір інструментів для проектування, моделювання та оптимізації тривимірних електромагнітних систем, який

використовується найсучаснішими технологічними та інженерними компаніями по всьому світу.

Високий рівень технології моделювання CST досягнуто завдяки постійному вдосконаленню обчислювальних модулів, які узагальнюють досвід багаторічних досліджень в області точних і ефективних обчислювальних методів. Висока надійність результатів програмного пакету CST STUDIO SUITE дозволяє користувачам створювати віртуальні прототипи, які імітують поведінку реальних пристроїв, тим самим заощаджуючи час і гроші на етапі розробки.

Сучасна версія пакету CST STUDIO SUITE включає наступні модулі:

- Комп'ютери загального призначення в часовій і частотній областях для моделювання низькочастотних і високочастотних задач;
- Повнохвильовий калькулятор, що використовує інтегральні рівняння;
- Модуль знаходження власних форм та асимптотичний калькулятор;
- Самоузгоджений алгоритм Particle-In-Cell (PIC);
- Калькулятор статичної та мультифізики;
- Багато додаткових спеціалізованих обчислювальних модулів[22].

Поєднання вищезазначених модулів забезпечує точний і універсальний підхід для вирішення широкого спектру завдань.

У деяких випадках розв'язання однієї і тієї ж задачі може бути реалізовано за допомогою різних обчислювальних методів. Універсальний підхід CST дозволяє виконувати верифікацію отриманих даних шляхом порівняння результатів моделювання, отриманих різними обчислювальними методами в єдиному робочому середовищі. Така перехресна перевірка підвищує достовірність результатів і допомагає інженерам виявити помилки в описі конструкції або процесі вимірювання.

З таким широким набором інструментів, які тепер доступні в CST STUDIO SUITE, важливо мати під рукою потрібний інструмент у потрібний момент. Для полегшення роботи користувача в пакеті передбачено механізм налаштування

середовища проектування під конкретні потреби на певному етапі роботи, будь то побудова конструкції, моделювання або обробка результатів.

Графічний інтерфейс, зображений на рисунку 2.1[22], на основі динамічно оновлюваних панелей дозволяє групувати функції і розділи меню в залежності від їх місця в процесі моделювання. Це дає можливість запропонувати користувачеві тільки ті дії, які доступні для даної частини проекту на певному етапі роботи. Додаткові контекстні панелі з'являються при виконанні специфічних завдань, таких як налаштування сітки розбиття або перегляд результатів аналізу.

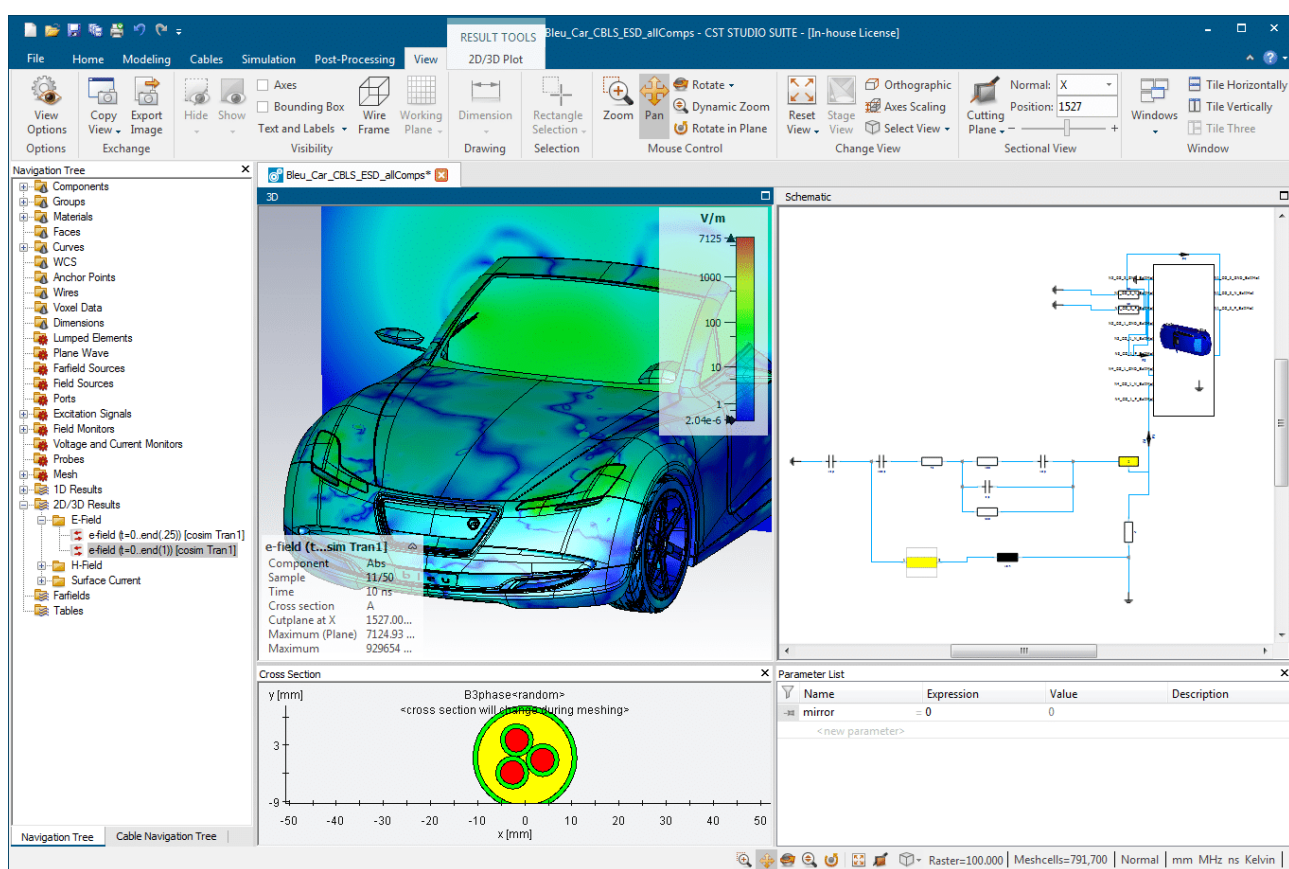


Рисунок 2.1 – Інтерфейс CST Studio Suite

Спеціальні інтерфейси обміну даними з іншими EDA-системами призначені для вирішення завдань аналізу цілісності сигналів, змішаних ЕМ і моделювання схем. Спеціальна мова макрокоманд, заснована на технологіях VBA і OLE, дозволяє здійснювати прямий обмін даними між різними програмами, наприклад, MATLAB® або MS Excel®.

2.3 FEKO

Altair Feko — система автоматизованого проектування для електродинамічного моделювання від компанії Altair Engineering, Inc. Поєднання обчислювальних методів в Altair Feko дозволяє ефективно вирішувати велику кількість електродинамічних і суміжних задач: проектування і позиціонування антен, дифракція і розсіювання електромагнітних хвиль, знаходження ефективної зони розсіювання, електромагнітна сумісність, імпульсна радіотехніка, оптика, високоінтенсивне випромінювання і проблеми радіаційної безпеки. На рисунку 2.2 зображений інтерфейс Altair Feko[23]:

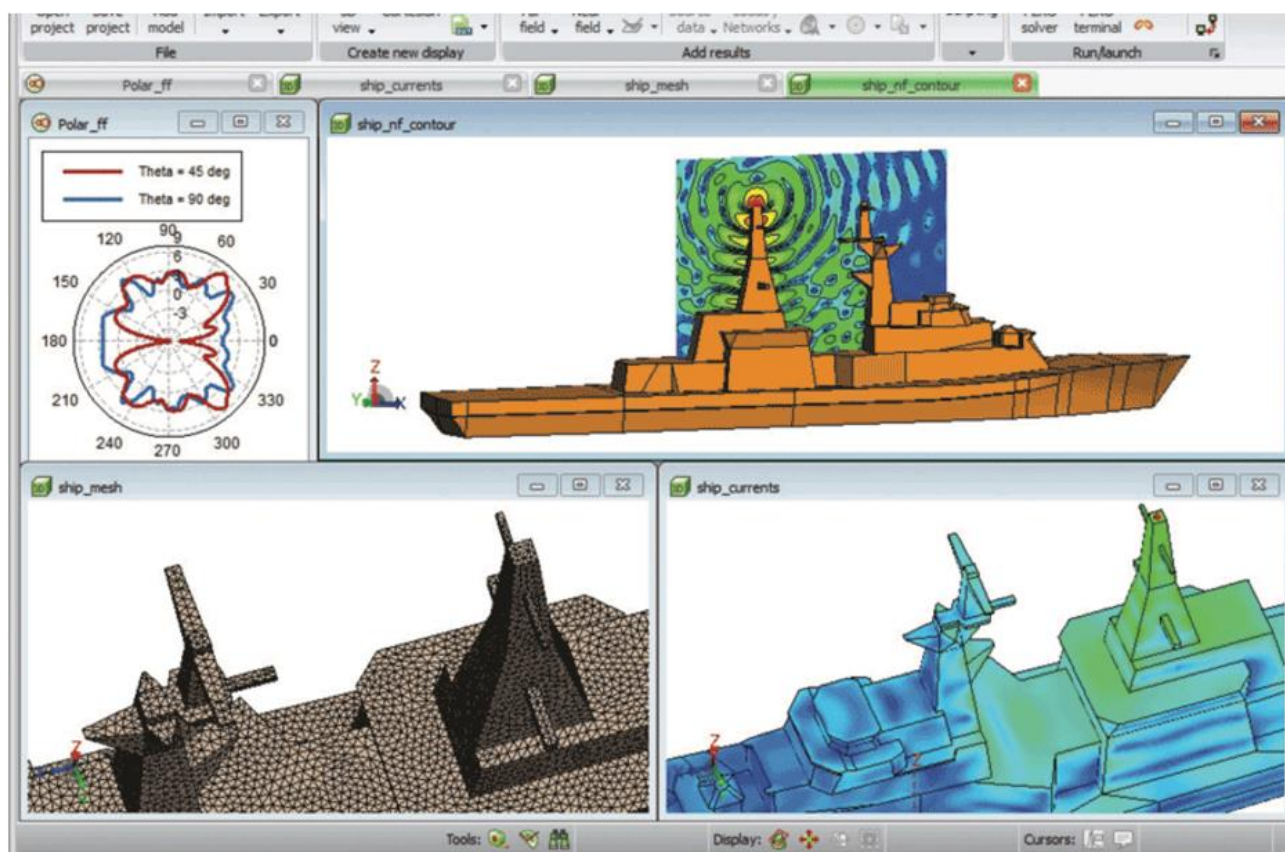


Рисунок 2.2 – Інтерфейс Altair Feko

Можливість вибору різних типів розв'язувачів дозволяє користувачам Altair FEKO використовувати найбільш підходящі та ефективні методи для вирішення різних завдань. Такий підхід дозволяє проводити перехресну перевірку, застосовуючи різні методи до однієї проблеми. Всі вирішувачі Altair FEKO

поставляються в єдиному пакеті, а також є частиною програмних рішень Altair HyperWorks.

Всебічна перевірка та вдосконалення чисельних методів в Altair FEKO забезпечує абсолютну впевненість у точності використовуваних підходів. Паралельні високопродуктивні обчислення безперервно оптимізуються для досягнення максимальної обчислювальної ефективності.

Altair Feko є першою комерційною CAD-системою, яка включає в себе вирішувач СМА (Characteristic Mode Analysis), який є найнадійнішим у своєму роді на сьогоднішній день. Altair Feko пропонує користувачеві вузькоспеціалізовані інструменти для аналізу електричного зв'язку між кабелями, антенами на криволінійних поверхнях і лобовому склі, а також багатoelementними антенними решітками.

Методи декомпозиції в моделюванні класичних проблем позиціонування і розміщення антен, а також ряду питань ЕМС забезпечують еквівалентне представлення передавальних і приймальних антен, а також інших пристроїв і вузлів.

Переваги використання Altair Feko[23]:

- Altair Feko реалізує сучасні підходи та методи проектування і позиціонування антен у просторі, розрахунку ефективної площі розсіювання;
- Аналіз електромагнітної сумісності, включаючи випромінювання, стійкість до затоплення та ефективність екранування;
- Широкі можливості у використанні гібридних методів для вирішення масштабних і складних завдань;
- Спеціалізовані інструменти, інтегровані в Altair Feko: антени на лобовому склі автомобілів, антенні решітки, моделювання кабелів, СМА solver (аналіз характеристичних режимів);
- Підтримка високопродуктивних обчислень, надійних і точних розв'язувачів.

2.4 EMIT

EMIT — це програмне забезпечення для моделювання, яке використовується для прогнозування електромагнітних завад у складних радіочастотних середовищах, що містять кілька радіочастотних систем, які повинні працювати одночасно. EMIT 4.0 являє собою революційний прогрес в аналізі просторових завад, надаючи безліч нових функцій і вдосконалень для зручності використання, обчислювальної ефективності та діагностики результатів. Інтерфейс застосунку можна побачити на рисунку 2.3[24]:

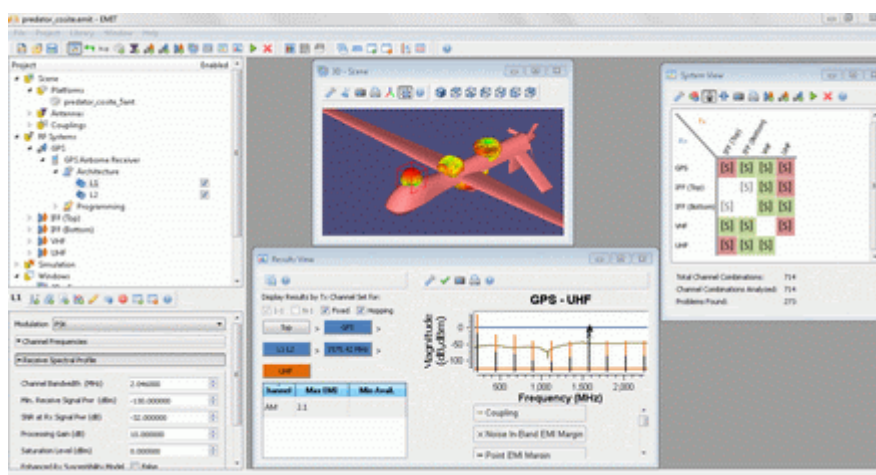


Рисунок 2.3 – Інтерфейс EMIT

EMIT забезпечує основу для управління даними про продуктивність радіочастотної системи, моделювання ефектів електромагнітного випромінювання (ЕМВ) космічних апаратів і співіснування, а також пом'якшення проблем ЕМВ, в результаті чого створюється повна модель, яку можна підтримувати протягом усього терміну служби платформи або транспортного засобу з декількома радіочастотними системами. Він використовує унікальний багатофакторний підхід до прогнозування радіочастотних завад космічних апаратів і співіснуючих об'єктів для забезпечення швидкої ідентифікації та аналізу "першопричин" проблем ЕМВ в складних радіочастотних середовищах.

EMIT забезпечує структуру управління даними та аналізу для моделювання електромагнітних завад в складних радіочастотних середовищах. EMIT об'єднує

складні механізми моделювання та параметричні моделі, які необхідні для точного прогнозування завад на супутниках або в будь-якому середовищі, включаючи автомобільні платформи і вузли зв'язку, а також співіснування і розсіювання завад в персональних електронних пристроях.

ЕМІТ — це комплексний інструмент аналізу, придатний для аналітиків різного рівня кваліфікації, які працюють з наявними системними даними з різним рівнем точності. Програмне забезпечення розроблене таким чином, щоб дозволити користувачеві починати моделювання на ранніх стадіях проектування і продовжувати його на етапах технічного обслуговування системи протягом усього її життя. При виявленні проблем із завадами в програмному забезпеченні можна дослідити стратегії їх зменшення до того, як вносити будь-які зміни в пристрій або систему. Зрештою, ЕМІТ може забезпечити вашій організації значну економію коштів завдяки виявленню проблем з космічними завадами на ранніх стадіях проектування та інтеграції.

Особливості ЕМІТ[24]:

- Прогнозує внутрішньосмугове та позасмугове ЕМВ в складних радіочастотних середовищах, що містять кілька передавачів і приймачів;
- Кілька пов'язаних представлень забезпечують швидку ідентифікацію "першопричини" навіть найскладніших проблем з електромагнітними завадами одним клацанням миші. Автоматично повідомляє про причини і механізми кожної перешкоди, виявленої в сценарії;
- Швидко тестуйте стратегії зменшення електромагнітних завад та оцінюйте їхній вплив на всю систему;
- Визначте необхідну ізоляцію або фільтрацію антени, щоб уникнути перешкод;
- Підхід багатофакторного моделювання працює з наявними системними даними. Не потрібно чекати на повну детальну інформацію перед початком аналізу ЕМВ. Моделі можуть бути легко уточнені в міру надходження додаткової інформації;

- Бездоганно працює з даними з інструментів електромагнітного моделювання, таких як Delcross Savant, ANSYS HFSS, CST STUDIO SUITE®, FEKO і WIPL-D;
- Багатоканальні широкосмугові радіомоделі фіксують внутрішньосмугові характеристики, а також позасмугові паразитні та гармонічні ефекти;
- Інтегрована бібліотека радіомоделей може бути розширена за потреби. Можна створювати власні бібліотеки радіосистем і ділитися ними;
- Моделює ефекти інтерференції 1-на-1 та N-на-1 між радіочастотними системами, включаючи продукти інтермодуляції;
- Включає зовнішні радіочастотні компоненти, такі як фільтри (в тому числі фільтри стеження), підсилювачі, мультиплексори, циркулятори, ізолятори, кабелі та розподільники живлення.

2.5 EMCoS Studio

EMCoS Studio піднімає процес розробки продукту на вищий рівень, безперешкодно інтегруючи процес генерації моделі та методологію моделювання систем. Результатом є дійсно революційний ієрархічний підхід до проектування. Цей підхід підвищує ефективність всього процесу моделювання, усуваючи розрив між кількома досі ізольованими методами моделювання.

EMCoS Studio — це потужний програмний пакет для складного комп'ютерного аналізу проблем електромагнітної сумісності. EMCoS Studio був спеціально створений для інженерів, які працюють з проблемами електромагнітної сумісності, що виникають у великих системах, таких як автомобілі, літаки, кораблі або комп'ютерні системи.

EMCoS Studio використовує найефективніші методи розрахунку, такі як метод моментів (MoM), метод допоміжних джерел (MAS), методи ліній електропередач (MTL) і мережевого аналізу, метод еквівалентної схеми за частковими елементами (PEEC 3D) в модулях EMC для розрахунку:

- Електромагнітних перешкод;
- Стійкості до електромагнітних полів;
- Типових лабораторних конфігурацій (Stripline, VCI ...)[25].

EMCoS Studio підтримує повний ланцюжок процесу електромагнітної сумісності. Вона може допомогти у прийнятті ранніх концептуальних рішень, імітувати стендові випробування підсистем і розрахувати поведінку всієї системи на більш пізніх стадіях розробки.

Для аналізу електромагнітної сумісності реалізовані складні функції розрахунку антен. Це робить EMCoS Studio потужною програмою для розрахунку антен. Антени можна створювати, аналізувати, використовувати численні функції пост-обробки та оптимізувати для досягнення найкращих характеристик.

Простота використання — одна з найважливіших особливостей EMCoS Studio. Програма дозволяє в зручний і швидкий спосіб змоделювати складну проблему ЕМС, точно її вирішити і безпосередньо представити результати. Інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, показаний на рисунку 2.4[25], і потужні розрахункові можливості роблять EMCoS Studio незамінною.

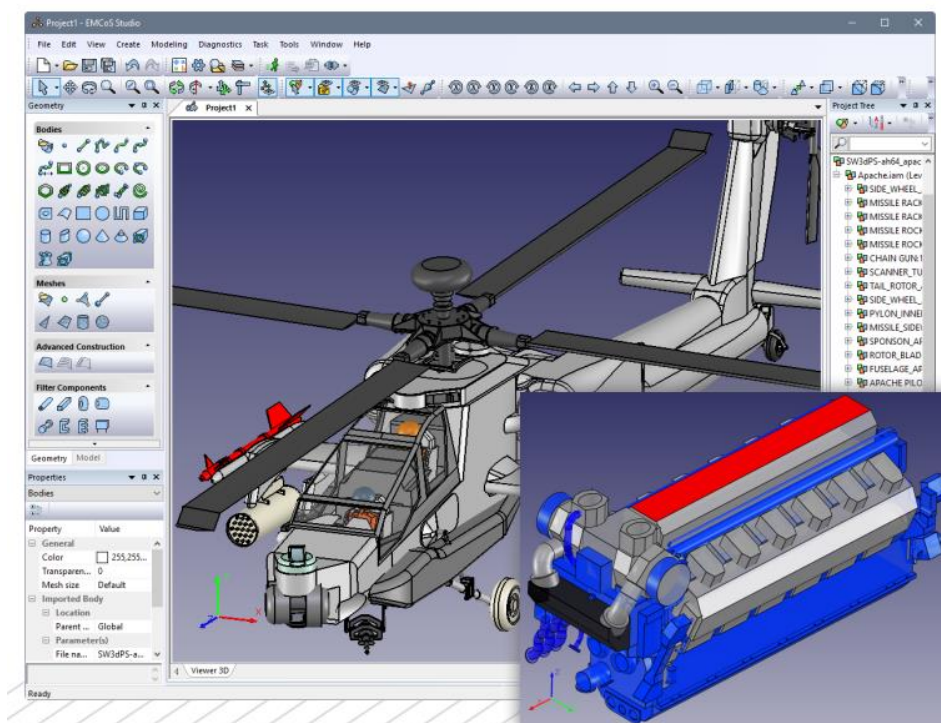


Рисунок 2.4 – Інтерфейс EMCoS Studio

ЕМС у великих системах, таких як автомобілі, літаки та кораблі, в основному визначається:

- Великими металевими конструкціями;
- Кабельними джгутами;
- Електричними компонентами;
- Антенами.

Точне моделювання перерахованих вище елементів і застосування відповідних методів розрахунку дозволяє передбачити поведінку ЕМС. За допомогою програми розрахунку чистого поля неможливо впоратися зі складністю великих систем. Створення відповідної розрахункової моделі в багатьох випадках є нерозв'язною проблемою.

EMCoS Studio заповнює ці прогалини. Вона допомагає створювати складні розрахункові моделі великих систем. Для розрахунку електромагнітної сумісності EMCoS Studio пропонує складні гібридні методи.

Приклади застосування:

- EMCoS Studio охоплює розрахунок багатьох ЕМС-проблем, що виникають у великих системах;
- Проблеми ЕМС складних дровових систем з нелінійними закінченнями;
- Проблеми зі стійкістю, пов'язані з кабельними з'єднаннями, як в автомобільній промисловості, суднобудуванні, літакобудуванні або військовій галузі, можуть бути вирішені;
- Випромінювання від складних дровових систем, таких як у транспортних засобах, літаках, комп'ютерах;
- Аналіз перехресних наведень у протяжних складних дровових конструкціях;
- Проектування, аналіз та оптимізація антен;
- Моделювання друкованих плат у складних умовах;

- Функції стендового тестування (BCI, віртуальна антена, смужкова лінія і TEM-клітина) на ЕМВ та стійкість;
- Моделювання гібридних/електричних транспортних засобів;
- Рішення для низькочастотного опромінення людини[25].

2.6 XFDTD

XFDTD — це програмне забезпечення для повнохвильового 3D електромагнітного моделювання, призначене для аналізу симуляції електромагнітного поля в складних пристроях з високою точністю, інтерфейс якого зображений на рисунку 2.5[26]. Унікальний набір функцій XFDTD спрощує аналіз навіть найскладніших і наймасштабніших задач. XFDTD включає спеціалізований розв'язувач FDTD, який випереджає інші методи за ефективністю при збільшенні кількості невідомих.

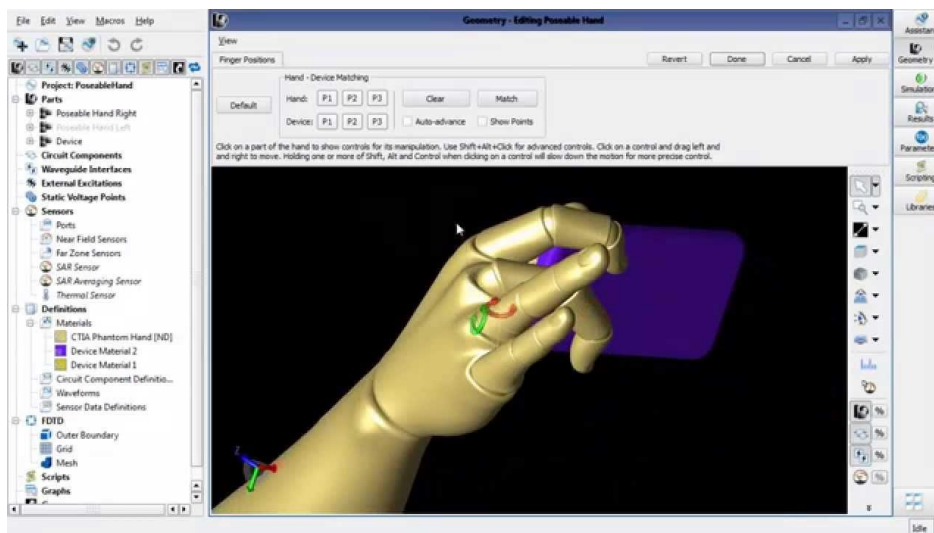


Рисунок 2.5 – Інтерфейс XFDTD

XFDTD дозволяє виконувати такі завдання[26]:

- Покращення продуктивності електромагнітного моделювання з використанням найсучасніших високопродуктивних обчислювальних технологій;

- Максимізація продуктивності пристроїв 5G за допомогою інструментів XFDTD для оптимізації характеристик випромінювання та керування променем антенних решіток;
- Швидкий аналіз комбінації фаз портів за допомогою однієї симуляції;
- Прогноз місця, де існує ризик пробою діелектрика, за допомогою колекції інструментів для моделювання ESD-тестування XF.

XFDTD включає повнохвильові, статичні, біотермічні, оптимізаційні та схемотехнічні розв'язувачі для вирішення широкого спектру задач, включаючи проектування та розміщення антен, біомедичні та радіолокаційні дослідження, EMB/EMC, мікрохвильові пристрої, радары та розсіювання, автомобільні радары та багато іншого. Він також працює з продуктами Remcom для трасування променів, забезпечуючи ретельне моделювання в низько-, середньо- та високочастотній частинах електромагнітного спектру.

Антенні технології постійно розвиваються, щоб задовольнити зростаючі потреби промисловості. Компанія Remcom також не відстає, щоб забезпечити інженерів програмним забезпеченням для моделювання антен, яке відповідає їхнім технологічним процесам і допомагає їм відповідати вимогам до дизайну пристроїв.

Програмні засоби моделювання антен від Remcom забезпечують правильне проектування і розміщення антен практично в будь-якому застосуванні. Інструменти моделювання можуть працювати окремо або разом для повного аналізу роботи антени.

Точність є ключовим фактором при проектуванні сучасних складних мобільних пристроїв, і інженери не можуть дозволити собі розбіжності між ефективністю пристрою та результатами моделювання. Користувачі Remcom бачать різницю в ефективності пристрою менше 0,5 дБ у порівнянні з результатами електромагнітного моделювання.

XFDTD включає кілька нововведень, які спрощують проектування узгоджувальних мереж, в тому числі редактор схем і оптимізатор елементів схеми.

Технологія моделювання вдосконалюється, щоб відповідати більш суворим вимогам до дизайну автомобільних радіолокаційних датчиків 24 ГГц і 77 ГГц, включаючи виявлення сліпих зон (BSD) і допомогу при зміні смуги руху (LCA). Remcom пропонує інтегрований підхід від проектування датчика до сценаріїв дорожніх випробувань.

Використання симуляцій випробувань на електростатичний розряд XFDTD дозволяє інженерам точно визначити місця, схильні до пошкоджень від електростатичного розряду, і оптимізувати пом'якшення наслідків електростатичного розряду на етапі розробки концепції та проектування продукту.

XFDTD підтримує моделювання пристроїв, що містять метаматеріали, включаючи матеріали з від'ємним індексом, структури з електронною забороненою зоною та частотно-селективні поверхні. Також підтримуються спеціальні матеріали, включаючи частотно-залежні моделі, анізотропні та феритні матеріали, а також обчислювальні розширення методу FDTD.

Програмне забезпечення XFDTD від Remcom добре підходить для будь-яких завдань з проектування та аналізу мікрохвильових пристроїв. Незалежно від того, чи йдеться про хвилеводи, дільники потужності, фільтри, з'єднувачі тощо, XFDTD може надати швидкі, ефективні і точні результати моделювання ЕМ.

Інструменти ЕМ-моделювання від Remcom прискорюють процес проектування та сертифікації, дозволяючи реалістично моделювати роботу пристрою ще до дорогого етапу створення прототипу.

2.7 WIPL-D

WIPL-D Pro — це надзвичайно потужний вирішувач для швидкого і точного електромагнітного аналізу довільних композитних 3D металевих і діелектричних структур, інтерфейс якого можна побачити на рисунку 2.6[27].

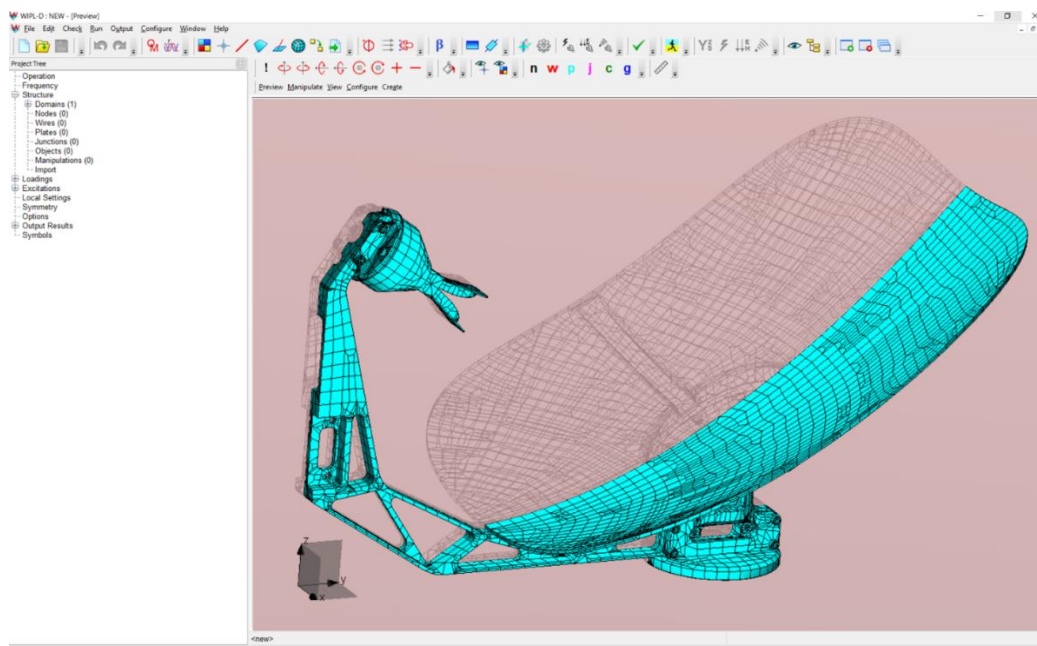


Рисунок 2.6 – Інтерфейс WIPL-D

Ядро WIPL-D має набір унікальних особливостей, кожна з яких сприяє безпрецедентній чисельній ефективності. Поряд з унікальними можливостями повноволнового моделювання ЕМ, ядро використовує унікальний спосіб вираження електричного розміру задачі через кількість невідомих, а не через кількість елементів сітки.

У ядрі реалізовано низку спеціально розроблених чисельних методів, які забезпечують високу стабільність обчислень. Завдяки високій чисельній стабільності можна ефективно моделювати моделі, в яких надзвичайно малі елементи сітки, що вимірюють лише невеликий фрагмент довжини хвилі, змішуються з великими елементами сітки, що вимірюють навіть пару довжин хвиль. Типовим прикладом такого змішаного розташування може бути випадок антени з електрично дрібними деталями, встановленими на великій металевій платформі, довжина якої перевищує десятки, а то й сотні довжин хвиль.

Окрім безпрецедентної швидкості обчислень, не менш важливою властивістю ядра WIPL-D є його висока точність. Не існує компромісу між швидкістю і точністю, оскільки остання підтверджена численними тестами, включаючи порівняння з виміряними даними або з результатами, доступними в

аналітичній формі. Оскільки моделювання є дуже ефективним, для випадків, коли надійні дані для порівняння недоступні, можна провести детальне дослідження збіжності, що забезпечить високий рівень впевненості для користувачів з різним рівнем навичок і досвіду моделювання ЕМВ.

Для мінімізації обчислювальних зусиль, необхідних для випадків, коли розрахунки є дуже складними, були розроблені складні алгоритми інтерполяції, що дозволяють проводити точну інтерполяцію між розрахованими відгуками в частотних точках або точках діаграми направленості. Можна навіть інтерполювати поточні коефіцієнти, розраховані за елементами сітки.

WIPL-D Pro може бути успішно використаний для широкого спектру застосувань, але особливо добре підходить і надає значні переваги при аналізі таких елементів[27]:

- 3D-антени та антенні решітки довільної форми;
- Великі розсіювачі - автомобілі, літаки, човни, ракети;
- Розміщення антен на великих платформах;
- Лінії електропередач та хвилеводи;
- Мікрохвильові схеми на скінченній або нескінченній підкладці;
- Металеві та/або діелектричні розсіювачі довільної форми;
- Проблеми з електромагнітною сумісністю;
- Застосування в діапазоні нижче кГц.

2.8 Висновок

Проаналізувавши доступні на ринку програмні забезпечення зі схожими функціями, доцільно розробляти програмне забезпечення, якщо цільова аудиторія в першу чергу включає невеликі організації, дослідників або інженерів, які потребують простого рішення для базових завдань ЕМС. Обмежена функціональність і спрощений інтерфейс можуть принести значну користь, знизивши бар'єр для входу в аналіз електромагнітної сумісності. Однак для більш масштабних застосувань або для користувачів, які потребують комплексних

можливостей моделювання ЕМВ у різних фізичних областях, кращим вибором, швидше за все, залишаться існуючі комерційні рішення. При розробці запропонованого програмного забезпечення слід зосередитися на простоті використання, економічній ефективності та наданні основних функцій, які відповідають специфічним потребам користувачів, що не потребують повної функціональності, пропонованої більш складними інструментами.

РОЗДІЛ 3. АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СИСТЕМИ

3.1 Постановка задачі

Радіопередавальний пристрій (РПП), що складається з радіопередавача й антенно-фідерної системи, призначений для генерації несучого гармонійного коливання, його модуляції та випромінювання за допомогою передавальної антени. Крім основного (корисного) радіовипромінювання, на вході антени РПП присутні неосновні (небажані) випромінювання. Ці випромінювання можуть заважати приймачам інших РЕП, створюючи їм ненавмисні перешкоди та погіршуючи ЕМС РЕП[28].

Також на рівень сигналу, який потрапить у радіоприймальний пристрій, впливає безліч чинників, як-от: загасання сигналу з урахуванням затінення, вид поляризації, форма діаграми направленості (ДН) та загасання у високочастотних (ВЧ) кабелях; їх необхідно врахувати під час аналізу ЕМО в системі.

3.2 Частотний аналіз

Основне випромінювання займає деякі необхідні діапазони частот (B_n) для передачі корисних радіосигналів. Усі інші (неосновні) випромінювання, розташовані за межами основної (робочої) області радіочастотного спектру B_n , є небажаними [28].

Позасмугове випромінювання — небажане радіовипромінювання, яке, як і основне випромінювання, є результатом модуляції несучої f_0 переданого повідомлення.

Бічні випромінювання — це небажані радіовипромінювання, які виникають через будь-який нелінійний процес (окрім процесів модуляції) на шляху формування високочастотного сигналу РПП. Види бічного розряду:

- Гармонічне радіовипромінювання — побічне випромінювання з частотою f_n , що в ціле число перевищує частоту f_0 основного випромінювання: $f_n = nf_0, n = 2, 3, \dots$;

- Субгармонічне радіовипромінювання — побічне випромінювання з частотою f_{cz} , яка в ціле число менше частоти основного випромінювання:

$$f_{cz} = f_0 / n, n = 2, 3, \dots;$$

- Комбіноване випромінювання — бічні радіовипромінювання за рахунок взаємодії несучої частоти або коливань, що утворюють несучу частоту, і гармонік цих коливань на нелінійних елементах РПП;

- Паразитне випромінювання — бічне радіовипромінювання, що виникає внаслідок самозбудження радіопередавача за рахунок паразитних зв'язків у каскаді;

- Інтермодуляційне випромінювання — бічне радіовипромінювання внаслідок впливу генерованих коливань і зовнішніх електромагнітних полів (від інших передавачів) на нелінійні елементи високочастотного тракту радіопередавального обладнання [28].

Шумове випромінювання — це небажане радіовипромінювання, спричинене власним шумом елементів передавача та паразитною модуляцією несучої шумовими процесами.

Причини виникнення гармонік:

- Підсилювач потужності передавача працює з відсіканням струму анода (колектора);

- Нелінійності в характеристиках складових радіотракту передавача.

Рівень вихідних гармонік залежить від багатьох факторів: характеристик ланцюга передавача, якості фільтрації вихідного ланцюга, режиму роботи активного пристрою та ін. Амплітуда гармонік зменшується зі збільшенням порядку гармонік. При розрахунку радіозавад передбачається, що рівень потужності завад розподілений за нормальним законом, близьким до його середнього значення, і що середньоквадратичне відхилення не залежить від номера гармоніки [28].

Середнє значення рівня потужності випромінювання на частоті n -ї гармоніки, дБВт, можна виразити у вигляді.

$$P_z = P_0(f_0) + V_z \lg(f_0) + A_z, n \geq 2 \quad (3.1)$$

де $P_0(f_0)$ — рівень середньої потужності основного випромінювання, дБВт; V_c — коефіцієнт, що характеризує швидкість спадання спектра, дБ/дек; A_c — послаблення випромінювання на гармоніці щодо основного, дБ.

Субгармонічні радіовипромінювання характерні для радіопередавачів, у яких вихідний радіосигнал генерується за допомогою помножувача частоти. Хоча на виході помножувача зазвичай є фільтр для ізоляції коливань основної частоти f_0 , коливання частоти $f_n = f_0 / n, 2f_0 / n, 3f_0 / n \dots$ недостатньо послаблюються: вони досягають входу підсилювача потужності, а з його виходу потрапляють в антенну систему. Рівень випромінювання субгармонік в діапазоні частот можна оцінити за допомогою виразу (3.1) за такими значеннями: $V_{cz} = -20$ дБ/дек, $A_{cz} = -80$ дБ.

$$P_{cz} = P_0(f_0) + V_{cz} \lg(f_0) + A_{cz}, n \geq 2 [28] \quad (3.2)$$

Комбінаційне випромінювання — це побічне радіовипромінювання, яке виникає внаслідок взаємодії на нелінійних елементах РПП на несучій частоті або коливаннях, що утворюють несучу частоту та гармоніки цих коливань. Вони генеруються в збуджувачі або синтезаторі частоти передавача, коли робоча частота формується з однієї або декількох частот автоматичного генератора або опорного кварцового генератора. У синтезаторі сітка робочих частот створюється нелінійним перетворенням кількох коливань, частоти $f_1, f_2, f_3 \dots$ яких зазвичай у десять разів перевищують співвідношення. За рахунок їх змішування виникають різні комбіновані компоненти з частотами $f_k = pf_1 \pm qf_2 \pm mf_3, p, q, m = 1, 2, 3 \dots$, які з'являються на виході синтезатора разом з корисними коливаннями робочої частоти.

Оцінку рівня середньої потужності комбінаційного випромінювання, дБВт, дає вираз:

$$P_k(f) = P_0(f_0) + V_k \lg(f_k / f_0) + A_k \quad (3.3)$$

де $P_0(f_0)$ — рівень середньої потужності основного випромінювання, дБВт; f_k — частота комбінаційного випромінювання, Гц; V_k — коефіцієнт, що характеризує швидкість убуття спектра, дБ/дек; A_k — величина ослаблення комбінаційного

випромінювання, дБ. Рівні комбінаційних випромінювань зазвичай менші за рівні випромінювань на гармоніках[28].

Інтермодуляційне випромінювання — це різновид побічного радіовипромінювання, яке виникає в результаті впливу генерованих коливань і зовнішніх електромагнітних полів (від інших передавачів) на нелінійні елементи високочастотного тракту радіопередавального пристрою. Це можливо в разі близького розташування антен сусідніх радіостанцій або при роботі передавачів на антенах загального діапазону.

Причини інтермодуляційних коливань:

- Сигнал перешкод надходить на кінцевий каскад передавача і посилюється разом з корисним сигналом;
- Сигнал на частоті завади змінює параметри активних складових у часі, приводячи до модуляції корисного сигналу на робочій частоті та появи інтермодуляційних складових у спектрі вихідного сигналу.

Під час взаємодії двох передавачів із робочими частотами f_1 і f_2 інтермодуляційні складові виникають на частотах $f_n = pf_1 + nf_2$, $p, n = 1, 2, 3, \dots$.

Потужність інтермодуляційних коливань залежить від потужності передавача, що створює перешкоди, типу активних компонентів у вихідному каскаді, ступеня зв'язку між передавачами та різниці робочих частот f_1 і f_2 . Основними заходами щодо зменшення інтермодуляційного випромінювання є поліпшення фільтрації та зниження ступеня зв'язку між передавальними антенами шляхом правильного розміщення передавальних антен.

Усереднене значення потужності інтермодуляційного випромінювання:

$$P_m(f) = P_m(f_0) + A' \lg(f_n / f_0) + B' \quad (3.4)$$

де $P_m(f_0)$ — рівень основного випромінювання дБ Вт; m — номер гармоніки; f_n — частота побічного випромінювання; A', B' — коефіцієнт апроксимації[28].

3.3 Енергетичний аналіз

Затухання сигналу з врахуванням затінення

Почнемо з ідеалізованої моделі поширення у вільному просторі, де немає перешкод між передавальною та приймальною антенами, і випромінена хвиля поширюється єдиним можливим шляхом, який називається лінією прямої видимості (ЛПВ). Тоді на основі елементарної геометрії потужність прийнятого сигналу P_r може бути передбачена за допомогою формули Фрііза:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \quad (3.5)$$

де P_t — потужність випромінюваного сигналу, G_t і G_r — коефіцієнти посилення передавальної та приймальної антени відповідно, λ — довжина хвилі несучого колювання, а D — відстань між передавачем і приймачем. Як показує остання формула, ослаблення потужності сигналу вздовж лінії прямої видимості у вільному просторі обернено пропорційне квадрату відстані[29].

Модель поширення у вільному просторі можна безпосередньо використовувати в розрахунках ліній зв'язку, де навколишнє оточення можна уподібнити відкритому простору, наприклад, між космічними об'єктами або літальними апаратами, наземним центром контролю та супутником тощо. Середовище поширення наземних систем набагато менш сприятливе, і головними факторами впливу на інтенсивність сигналу виявляються затінення і багатопробенекий федінг (завмирання).

Затінення зумовлене деталями ландшафту та конструкцією системи, що перешкоджають прямолінійному поширенню. Унаслідок їхнього впливу інтенсивність сигналу падає з відстанню значно швидше, ніж передбачає формула Фрііза. Очевидно, що нерегулярний характер земних ландшафтів унеможлиблює або не приносить користі спроба створення деякої універсальної теоретичної моделі затінення. Запропоновано цілу низку емпіричних моделей можливих залежностей між прийнятою потужністю і довжиною шляху поширення. Серед фахівців у галузі мобільного зв'язку однією з найприйнятніших визнано модель

Окамури-Хати (Osumura-Hata). Згідно з останньою залежність середньої прийнятої потужності $\overline{P_r}$ підпорядковується рівності

$$\overline{P_r} = k P_t / D^e, \quad (3.6)$$

в якому конкретне значення показника e залежить від типу підстильної поверхні, а коефіцієнт k — визначається частотним діапазоном і висотою антен[29].

Прийнята потужність, розрахована таким чином, дає лише дуже грубу відправну цифру, яка відповідає усередненню за різними положеннями приймача, рівновіддаленими на D від передавача. Флуктуації P_r по дузі радіусу D з центром у місці розташування передавача значні та часто апроксимуються логнормальним законом, що означає, що розподіл прийнятої потужності в децибелах $x = 10 * \lg(P_r)$, є гауссовським (нормальним):

$$W(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}\right) [14]. \quad (3.7)$$

Середньоквадратичне відхилення σ_x величини $10 * \lg(P_r)$ зазвичай приймається таким, що лежить у межах від 6 до 12 дБ.

Загасання сигналу, зумовлене затіненням, має статичний характер і навіть для приймача, що рухається, прийнята потужність змінюється в часі порівняно повільно у зв'язку з відносно великою просторовою протяжністю елементів ландшафту (десятки-сотні метрів). З цієї причини затінення іноді фігурує і під такими назвами, як великомасштабні або довготривалі завмирання (федінг).

Розглянемо тепер другий фактор, що впливає на інтенсивність сигналу, що приймається: багатопроменеве поширення. У реальності випромінений сигнал може досягти приймальної антени різноманітними шляхами. Прямий шлях може виявитися одним із них, але може бути і повністю блокований, тоді як всі інші шляхи зобов'язані своїм походженням рефракції хвиль, і, що набагато характерніше, відбиттю випроміненої хвилі різними об'єктами. Подібними відбивачами можуть виявитися будівлі, заводські труби, повітряні судна, поверхня, що підстилає, і багато чого іншого.

Припустимо, що, поширюючись по i -му шляху, переданий сигнал із комплексною огибаючою $\dot{S}(t)$ набуває амплітуди A_i , затримки τ_i і початкової фази φ_i . Тоді комплексна огибаюча прийнятого сигналу запишеться як

$$\dot{S}_r(t) = \sum_i A_i \dot{S}(t - \tau_i) \exp(j\varphi_i) \quad (3.8)$$

де, без втрати спільності, дійсна амплітуда вихідного сигналу прийнята рівною одиниці[28].

У тому випадку, коли діапазон розсіювання за затримкою τ_{ds} , тобто максимальне значення взаємної затримки між сигналами різних шляхів, не перевершує тривалості сигналу, всі багатопроменеві репліки перекриваються й інтерферують між собою. Хаотичність розподілу відбивачів або розсіювачів на шляху поширення хвиль надає інтерференційній картині непередбачуваного характеру: потужність результуючого сигналу може як зростати, якщо фази сигналів окремих шляхів близькі, так і спадати, якщо вони протилежні (див. малюнок). Саме цей феномен і дістав назву багатопроменевий фединг (завмирання, зумовленого багатопроменевим поширенням), якому привласнюють й інші назви: дрібномасштабний або короткочасний фединг.

Вплив поляризації на потужність сигналу

Стани поляризації можна відобразити точками на сфері, яку заведено називати сферою Пуанкаре, якщо за довготу і широту точки, що визначає стан поляризації, узяти кути 2β і 2α , відповідно (рис. 3.1). Кожному стану поляризації відповідає точка на сфері Пуанкаре, і, навпаки, кожній точці на сфері Пуанкаре відповідає певний стан поляризації. Для кругової поляризації значення β не визначено, і їй відповідають полюси сфери, в яких не визначена довгота. Точки, розташовані на екваторі, відповідають різним видам лінійної поляризації, а всі інші точки сфери відображають різні види еліптичної поляризації. Північна півсфера представляє правобічну поляризацію, а південна — лівобічну.

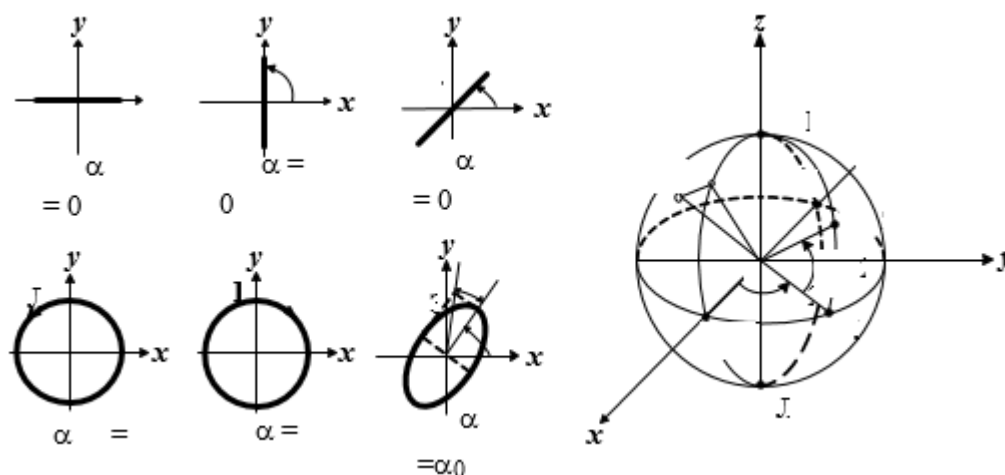


Рисунок 3.1 – Сфера Пуанкаре

Якщо на сфері Пуанкаре розглянути дві точки $M1$ і $M2$, одна з яких відповідає поляризаційному стану приймальної антени, а інша поляризації падаючої електромагнітної хвилі, то е.р.с. на затискачах антени можна розрахувати, використовуючи вираз:

$$e = Eh_0 \cos(\angle M1M2 / 2) \quad (3.9)$$

де e — е.р.с. на затискачах антени, В; E — напруженість поля в місці розміщення антени, В/м; h_0 — діюча висота антени, м; $\angle M1M2$ — кут між точками на сфері Пуанкаре, що визначають поляризаційні стани антени та електромагнітної хвилі, яка приходить

Ослаблення ν через розбіжність поляризацій сигналу, що надходить, і приймальної антени, виражене в децибелах, має вигляд:

$$\nu = 20 \lg(\cos(\angle M1M2 / 2)) [29] \quad (3.10)$$

Якщо $\angle M1M2 = 180^\circ$, то, як випливає з (3.9) і (3.10), $e = 0$ і $\nu = -\infty$. Поляризації такого виду називаються ортогональними. Ортогональними, зокрема, є горизонтальна і вертикальна поляризації, ліва і права кругові поляризації і, взагалі, дві будь-які поляризації, що відповідають точкам на сфері Пуанкаре, які лежать на протилежних кінцях діаметра сфери. Таким чином, теоретично сигнали, що мають ортогональну поляризацію, не створюють один одному перешкод, оскільки електрична енергія, що виникає на виходах антен, не призначених для

приймання цих сигналів, дорівнюватиме нулю, або, що те саме, антени забезпечують нескінченне придушення ортогональних сигналів.

Однак на практиці ідеально ортогональних сигналів не існує. Взаємне розташування антен, умови поширення і саме середовище поширення призводять до того, що $\angle M_1 M_2 / 2$ стає меншим за 90° . У результаті замість нескінченного ослаблення ортогонального сигналу в антені відбувається лише часткове його придушення. Так, наприклад, якщо замість 90° ($\angle M_1 M_2 / 2$) = 85° , то замість нескінченного ослаблення

$$\nu = 20 \lg(\cos(85^\circ)) = -20 \text{ дБ} [14]. \quad (3.11)$$

З огляду на цю обставину, під час оцінки ЕМС РЕП, що використовують ортогональні сигнали, ослаблення таких сигналів завжди беруть кінцеве, найчастіше в інтервалі -16...-25 дБ, залежно від коефіцієнта посилення антен і виду радіослужби.

У загальному випадку ослаблення ортогональних сигналів під час оцінки ЕМС обирають або, дотримуючись рекомендацій, або, виходячи з результатів практичних вимірювань, або на підставі теоретичних оцінок за прийнятих гіпотез про порушення ортогональності. Якщо інформація про придушення ортогональної поляризації відсутня, можна використовувати дані, наведені в табл. 3.1 для найпоширеніших на практиці видів поляризацій. Дані подано в децибелах.

Таблиця 3.1 Послаблення сигналів, що заважають, у разі розбіжності поляризації з приймальною антеною

Поляризація антени приймача		Поляризація антени джерела перешкоди					
		Горизонтальна		Вертикальна		Кругова	
		G_0 <10дБ	G_0 >10дБ	G_0 <10дБ	G_0 >10дБ	ліва	права
Горизонтальна	$G_0 < 10 \text{ дБ}$	0	0	-16	-16	-3	-3

	$G_0 > 10\text{дБ}$	0	0	-16	-20	-3	-3
Вертикальна	$G_0 < 10\text{дБ}$	-16	-16	0	0	-3	-3
	$G_0 > 10\text{дБ}$	-16	-20	0	0	-3	-3
Кругова	ліва	-3	-3	-3	-3	0	-16
	права	-3	-3	-3	-3	-16	0

Вплив діаграми направленості на потужність сигналу

У сферичній системі координат діаграма направленості є функцією, що описує значення коефіцієнта посилення антени залежно від напрямку приходу електромагнітної хвилі, $g(\varphi, \theta)$. Під час опису зазвичай вважають, що напрямок максимального випромінювання (приймання) ДН збігається з напрямком осі x , від якої в площині $хоу$ відлічується азимутальний кут φ . Кут місця θ , на відміну від класичної сферичної системи координат, де він відлічується від осі z , при описі ДН відлічують від площини $хоу$. Така система відліку кутів використовується для опису координат точок земної поверхні. У ній кут φ представляє довготу, а θ - широту точки на поверхні землі.

Діаграму направленості антени можна записати у вигляді:

$$g(\varphi, \theta) = g_0 g_N(\varphi, \theta) \quad (3.12)$$

де g_0 — максимальний коефіцієнт посилення антени; $g_N(\varphi, \theta)$ — нормована ДН, значення якої лежать в інтервалі $[0, 1]$, і $g_N(0, 0) = 1$ [29].

Хоча опис ДН у відносних одиницях використовують досить часто, в інженерних розрахунках діаграму направленості зазвичай описують у децибелах щодо ізотропної антени [dBi], які часто позначають просто дБ:

$$G(\varphi, \theta) = G_0 G_N(\varphi, \theta) \quad (3.13)$$

де $G(\varphi, \theta)$ — діаграма направленості антени, dBi; G_0 — максимальний коефіцієнт підсилення антени, dBi; $G_N(\varphi, \theta)$ — нормована ДН, значення якої $G_N(0, 0) = 0, G_N(\varphi, \theta) \leq 0$ та виражені в децибелах відносно G_0 [29].

Під час аналізу ЕМС сукупності РЕП, розміщених у дальній зоні, необхідно мати інформацію про тривимірні діаграми направленості антен, які використовують досліджувані засоби. Зазвичай є інформація тільки про два ортогональні перерізи ДН в горизонтальній і у вертикальній площині, тобто $G_H(\varphi) = G(\varphi, 0)$ і $G_V(\theta) = G(0, \theta)$. Їх відповідно називають діаграмою направленості в горизонтальній і діаграмою направленості у вертикальній площині. ДН в горизонтальній і у вертикальній площині отримують або за допомогою вимірювань, або на основі теоретичного аналізу. Ці діаграми використовуються для побудови тривимірної ДН, а точніше, для визначення коефіцієнта посилення антени в напрямі, що не лежить у жодній з вихідних площин. Зазвичай як вихідний матеріал використовують нормовані ДН в горизонтальній і у вертикальній площині. Отримавши з їхньою допомогою значення $G_N(\varphi, \theta)$, обчислюють $G(\varphi, \theta)$, використовуючи (3.13).

В області бічних і задніх пелюсток ДН найчастіше апроксимують деяким постійним рівнем. Значення цього рівня обирають, використовуючи статистику вимірювань коефіцієнта посилення за бічними і задніми пелюстками для конкретного типу антени, або на підставі теоретичних досліджень. Часто постійний рівень відповідає максимальному рівню бічних пелюсток.

Втрати потужності у ВЧ кабелях

Втрати під час передавання сигналу від передавача до антени або від антени до входу радіоприймального пристрою складаються з втрат безпосередньо в антенно-фідерному тракті (АФТ) і втрат неузгодженості АФТ з антеною або входом РПП.

Для АФТ зазвичай відома марка кабелю або хвилеводу, використовуваного для передавання сигналів, що надходять до нього, і, отже, відомі погонні втрати в

тракті $\delta(f)$ [дБ/м], які в загальному випадку залежать від частоти. Втрати в АФТ легко визначити, використовуючи рівняння:

$$L_{\text{АФТ}}(f) = l_{\text{АФТ}} \delta(f), \quad (3.14)$$

де $L_{\text{АФТ}}(f)$ — втрати в АФТ на частоті f , дБ; $l_{\text{АФТ}}$ — довжина кабелю або хвилеводу АФТ, м[29].

3.4 Розроблене ПЗ

Для реалізації описаних у попередніх пунктах етапів розрахунку ЕМС було розроблено програмне забезпечення, для якого в свою чергу було обрано найбільш підходящі для цього технології програмування.

Windows Presentation Forms (WPF) було обрано завдяки його здатності створювати динамічний та інтерактивний інтерфейс користувача, який підтримує розширену 3D-візуалізацію, критично важливу для позиціонування антен на моделі та імітації їхньої взаємодії. Підтримка прив'язки даних та архітектура MVVM спростили процес розробки та покращили зручність обслуговування.

HelixToolkit був обраний для забезпечення безперешкодної інтеграції візуалізації 3D-моделі в середовище WPF. Цей інструмент дозволить користувачам інтуїтивно розміщувати антени на моделі та спостерігати за їх просторовим розташуванням.

SQLite було обрано як рішення для бази даних завдяки його простоті, портативності та здатності впоратися з відносно скромними вимогами програми до даних, такими як зберігання параметрів та конфігурацій антен.

Для формалізації процесу розробки ПЗ та кращого розуміння поставлених задач щодо дизайну, архітектури коду та запропонованої реалізації складних програмних систем було використано UML-діаграми, а саме діаграма Use Case, діаграма класів і діаграма послідовності.

Діаграма Use Case в уніфікованій мові моделювання (UML) — це візуальне представлення, яке ілюструє взаємодію між користувачами (акторами) і системою.

Вона відображає функціональні вимоги до системи, показуючи, як різні користувачі взаємодіють з різними варіантами використання або конкретними функціональними можливостями в системі. Діаграми варіантів використання надають високорівневий огляд поведінки системи, що робить їх корисними для зацікавлених сторін, розробників та аналітиків, щоб зрозуміти, як система має працювати з точки зору користувача, і як різні процеси пов'язані один з одним. Вони мають вирішальне значення для визначення обсягу та вимог до системи[30]. Діаграма Use Case для розробленого ПЗ зображена на рисунку 3.2.

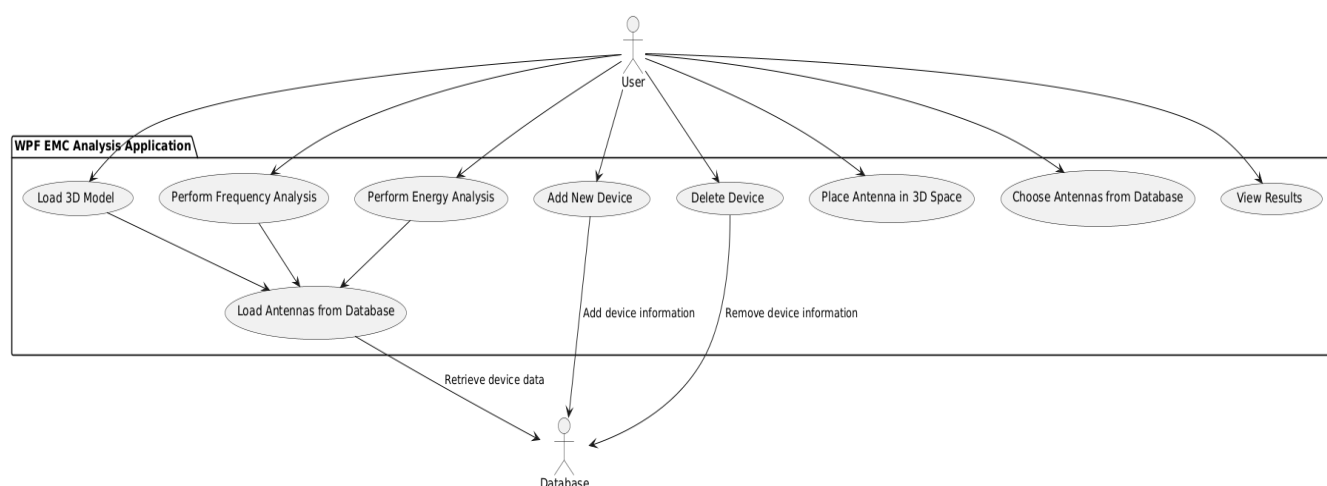


Рисунок 3.2 – Діаграма Use Case для розробленого ПЗ

Діаграма класів UML — це графічна нотація, яка використовується для побудови та візуалізації об'єктно-орієнтованих систем. Діаграма класів в UML — це тип статичної структурної діаграми, яка описує структуру системи, показуючи класи, їхні атрибути, операції (або методи) та взаємозв'язки між об'єктами[31]. Діаграма класів для розробленого ПЗ зображена на рисунку 3.3.

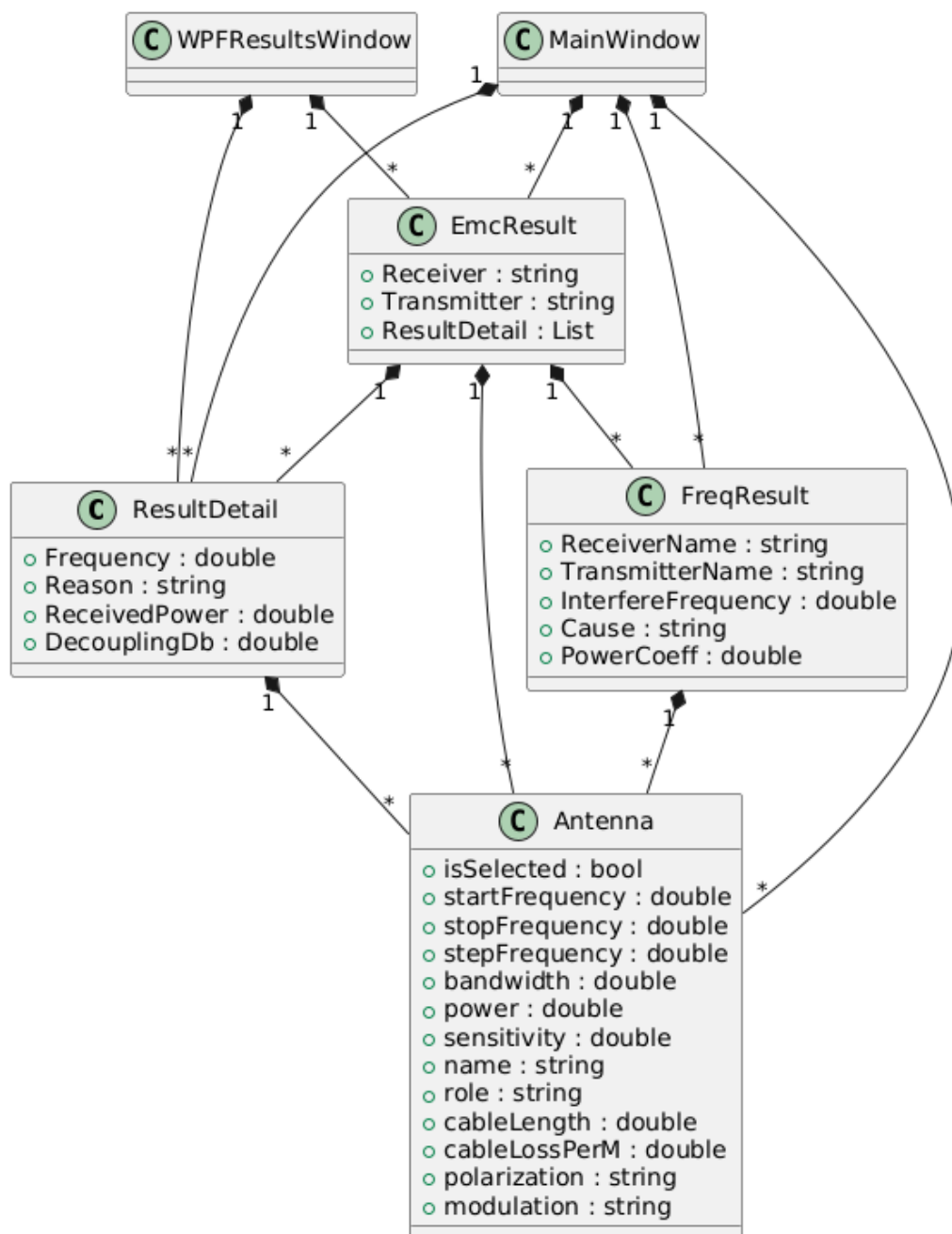


Рисунок 3.3 – Діаграма класів для розробленого ПЗ

Діаграма послідовності — це тип діаграми взаємодії, оскільки вона описує, як і в якому порядку група об'єктів працює разом. Ці діаграми використовуються розробниками програмного забезпечення та бізнес-професіоналами для розуміння вимог до нової системи або для документування існуючого процесу. Діаграми послідовності іноді називають діаграмами подій або сценаріями подій[32]. Діаграма послідовності для розробленого ПЗ зображена на рисунку 3.4.

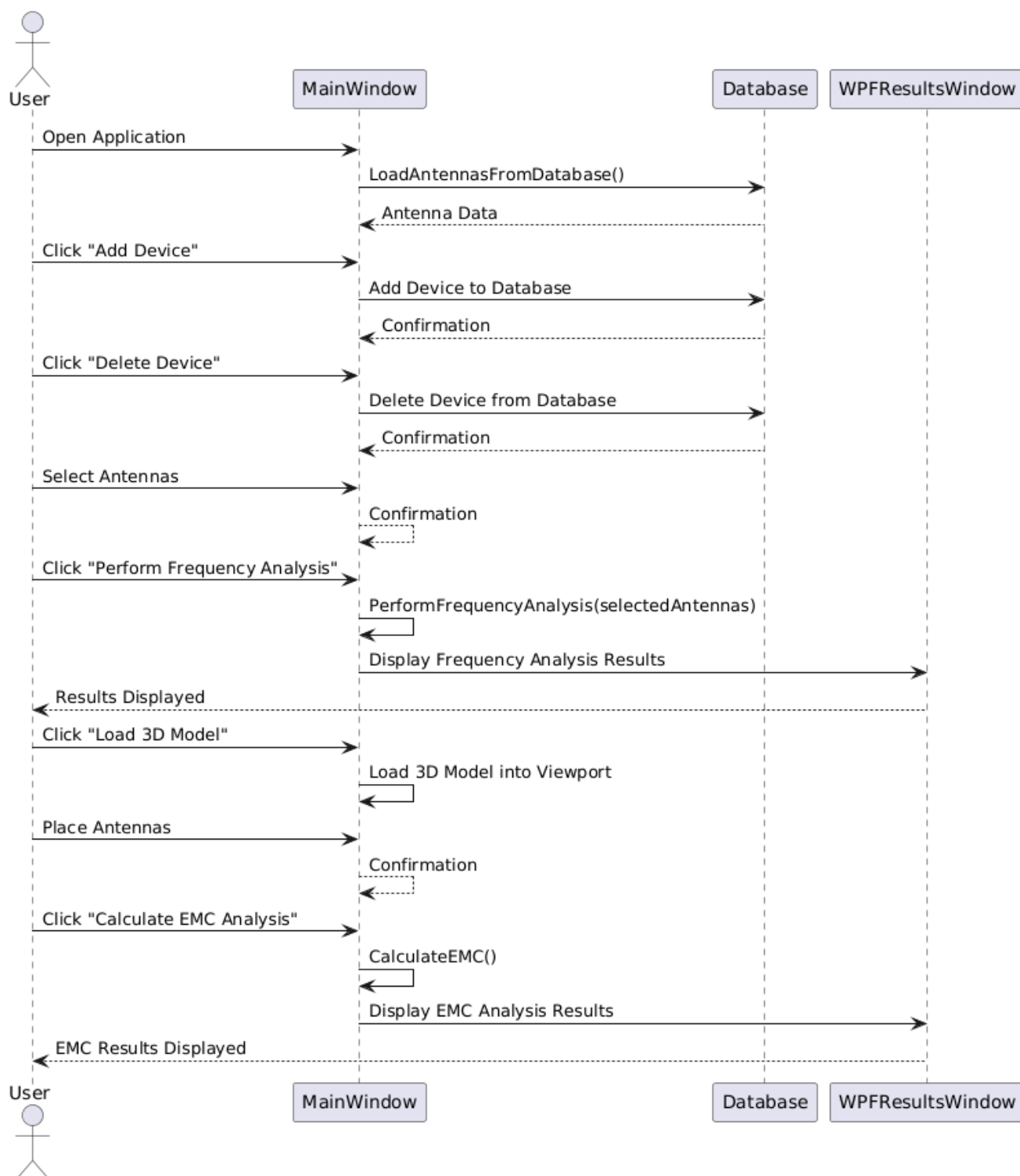


Рисунок 3.4 – Діаграма послідовності для розробленого ПЗ

Програмний код основних функцій наведений у додатку А.

Розроблене програмне забезпечення є програмним комплексом електромагнітного моделювання, призначеним для електромагнітного аналізу

різних систем, таких як транспортні засоби та літальні апарати. Інтерфейс трьох його вкладок зображений на рисунках 3.5 – 3.7.

MainWindow

Пристрої

3D Модель

Додати пристрій

	Назва пристрою	Початкова частота (МГц)	Кінцева частота (МГц)	Крок частоти (МГц)	Смуга пропускання (МГц)	Потужність (дБ)	Чутливість (дБ)	Тип	Довжина кабеля	Втрати в кабелі (дБ/м)	Поляризація	Модуляція
☐	VOR/LOC	108	118	2	0.03	-	-95	Приймач	25	0.2	Горизонтальна	AM
☐	KB p/ст	3	30	1	0.015	65	-110	Прийомопередавач	10	0.1	Вертикальна	AM
☐	УКВ p/ст	30	300	27	0.02	40	-120	Прийомопередавач	15	0.15	Вертикальна	ФМ
☐	ATC	118	137	1	0.025	50	-	Передавач	40	0.25	Вертикальна	AM
☐	GPS	1164	1610	411	0.03	-	-135	Приймач	5	0.2	Кругова	ВРСК
☐	TCAS	1030	1090	100	6	56	-80	Прийомопередавач	10	0.35	Вертикальна	ПМ
☐	Глісадна антена	330	335	1	0.02	-	-95	Приймач	12	0.15	Горизонтальна	AM
☐	Метеорадар	5400	5700	30	10	70	-120	Прийомопередавач	20	0.3	Горизонтальна	ПМ
☐	Радіовисотомір	4200	4400	20	196	35	-90	Прийомопередавач	7	0.2	Вертикальна	ФМ
☐	DME	961	1213	63	0.1	60	-100	Прийомопередавач	18	0.3	Вертикальна	ПМ
☐	Пеленгатор	0.19	1.75	0.312	0.003	-	-115	Приймач	20	0.15	Вертикальна	AM
☐	Маркерна антена	75	75	1	0.005	-	-95	Приймач	15	0.1	Вертикальна	AM

Частотний аналіз

Рисунок 3.5 – Вкладка частотного аналізу

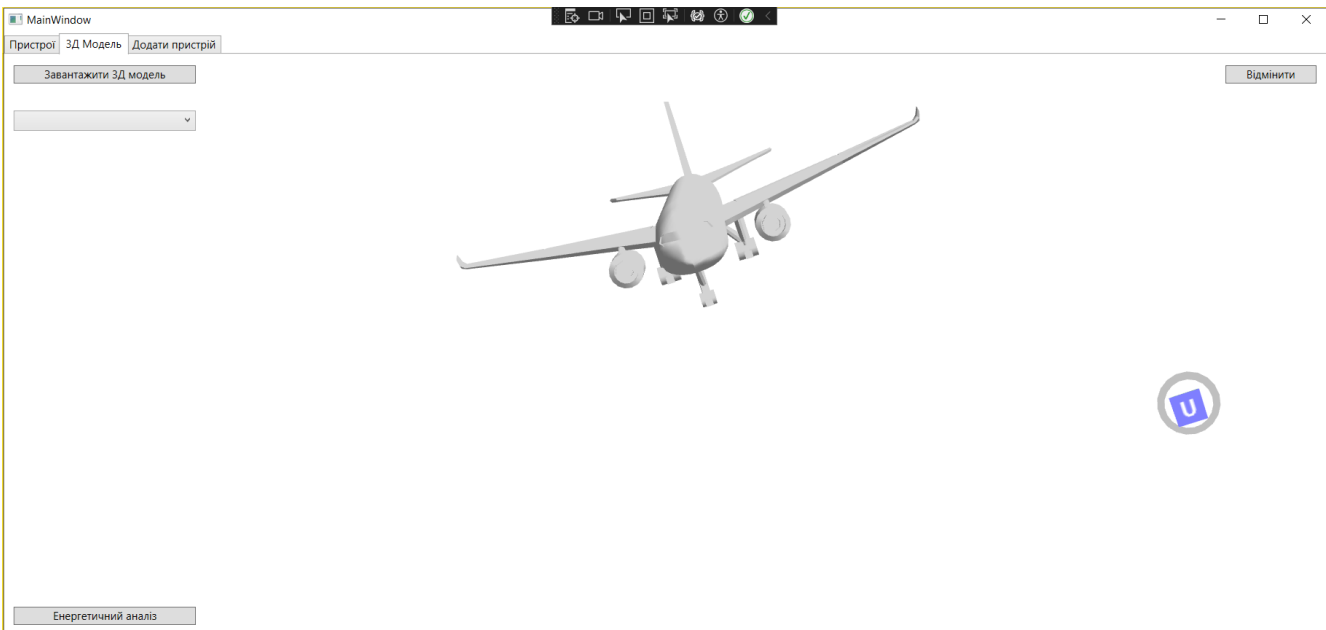


Рисунок 3.6 – Вкладка енергетичного аналізу

MainWindow

Пристрої 3D Модель Додати пристрій

Назва пристрою:

Початкова частота (МГц):

Кінцева частота (МГц):

Крок частоти (МГц):

Смуга пропускання (МГц):

Потужність (дБ): (Вкажіть 0, якщо приймач)

Чутливість (дБ): (Вкажіть 1000, якщо передавач)

Тип: (Передавач або приймач)

Довжина кабелю (м):

Втрати в кабелі (дБ/м):

Поляризація:

Модуляція:

Додати пристрій

Рисунок 3.7 – Вкладка розширення бази даних

Особливості:

- Відображає антени з бази даних, дозволяє їх вибір і виконує розрахунки узгодження частот;
- Дозволяє користувачеві розміщувати антени на 3D-моделі пристрою і проводити енергетичний аналіз, надаючи візуальний огляд поведінки антени. Ця вкладка включає зворотний зв'язок у реальному часі про розподіл енергії та можливість маніпулювати положенням антени для досягнення кращої продуктивності;
- Дозволяє користувачам додавати нові антени до бази даних з відповідними характеристиками.

Сильні сторони:

- Інтуїтивно зрозумілий користувацький інтерфейс для ефективного аналізу електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв;
- Поєднує в собі частотний аналіз і аналіз на основі енергії в одному простому середовищі;

- Програмне забезпечення має на меті забезпечити просте, доступне рішення для користувачів, які потребують базового аналізу ЕМС без складності провідних галузевих інструментів.

Слабкі місця:

- Обмежена функціональність у порівнянні з провідними інструментами галузі;
- Програмне забезпечення може не пропонувати просунуту мультифізику або гнучкість розв'язування, як в інших комерційних рішеннях, обмежуючи його використання базовими задачами ЕМС.

3.5 Висновок

У цьому розділі було розроблено алгоритм розрахунку електромагнітної сумсності радіоелектронних пристроїв. Під час розробки були описані частотний та енергетичний аналіз системи, що включало такі фактори як: випромінювання на гармоніках та субгармоніках, інтермодуляція, затухання сигналу з врахуванням затінення та втрат у ВЧ кабелях, вплив поляризації та ДН антен на потужність сигналу.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Приклади результатів виконання програми

Для оцінки ефективності роботи розробленого програмного забезпечення було проведено низку тестів, спрямованих на верифікацію його здатності коректно визначати параметри електромагнітної сумісності. Тестування проводилося за допомогою реальних та синтетичних даних, які моделювали типові умови використання радіоелектронних пристроїв.

Для прикладу скористаємось створеною базою даних, яка включає в себе радіоелектронні пристрої, розміщені на літаку Boeing 737, та розглянемо декілька варіантів розміщення різних наборів пристроїв[33].

На рисунку 4.1 можна побачити перший набір пристроїв, для яких буде проведено частотний аналіз.

	Назва пристрою	Початкова частота (МГц)	Кінцева частота (МГц)	Крок частоти (МГц)	Смуга пропускання (МГц)	Потужність (дБ)	Чутливість (дБ)	Тип	Довжина кабелю	Втрати в кабелі (дБ/м)	Поларизація	Модуляція
☐	VOR/LOC	108	118	2	0.03	-	-95	Приймач	25	0.2	Горизонтальна	AM
☐	KB p/ст	3	30	1	0.015	65	-110	Прийомопередавач	10	0.1	Вертикальна	AM
☐	УКВ р/ст	30	300	27	0.02	40	-120	Прийомопередавач	15	0.15	Вертикальна	ФМ
☐	ATC	118	137	1	0.025	50	-	Передавач	40	0.25	Вертикальна	AM
☒	GPS	1164	1610	411	0.03	-	-135	Приймач	5	0.2	Кругова	BPSC
☐	TCAS	1030	1090	100	6	56	-80	Прийомопередавач	10	0.35	Вертикальна	ПМ
☐	Глісадна антена	330	335	1	0.02	-	-95	Приймач	12	0.15	Горизонтальна	AM
☐	Метеорадар	5400	5700	30	10	70	-120	Прийомопередавач	20	0.3	Горизонтальна	ПМ
☒	Радіовисомітр	4200	4400	20	196	35	-90	Прийомопередавач	7	0.2	Вертикальна	ФМ
☐	DME	961	1213	63	0.1	60	-100	Прийомопередавач	18	0.3	Вертикальна	ПМ
☐	Пеленгатор	0.19	1.75	0.312	0.003	-	-115	Приймач	20	0.15	Вертикальна	AM
☒	Маркерна антена	75	75	1	0.005	-	-95	Приймач	15	0.1	Вертикальна	AM

Рисунок 4.1 – Перший набір пристроїв для проведення частотного аналізу.

На рисунку 4.2 показані отримані результати частотного аналізу для першого набору пристроїв.

Потенційних завад не виявлено

Рисунок 4.2 – Результат частотного аналізу для першого набору пристроїв.

Як бачимо, такий набір пристроїв має правильно підібрані частоти і не створює умов для потенційних проблем з електромагнітною сумісністю, тому проведення енергетичного аналізу не є необхідним.

Тепер оберемо інший набір пристроїв, як зображено на рисунку 4.3.

Назва пристрою	Початкова частота (МГц)	Кінцева частота (МГц)	Крок частоти (МГц)	Смуга пропускання (МГц)	Потужність (дБ)	Чутливість (дБ)	Тип	Довжина кабелю	Втрати в кабелі (дБ/м)	Поларизація	Модуляція
☐ VOR/LOC	108	118	2	0.03	-	-95	Приймач	25	0.2	Горизонтальна	AM
☐ KB p/ст	3	30	1	0.015	65	-110	Прийомопередавач	10	0.1	Вертикальна	AM
☒ УКВ p/ст	30	300	27	0.02	40	-120	Прийомопередавач	15	0.15	Вертикальна	FM
☒ ATC	118	137	1	0.025	50	-	Передавач	40	0.25	Вертикальна	AM
☒ GPS	1164	1610	411	0.03	-	-135	Приймач	5	0.2	Кругова	BPSK
☐ TCAS	1030	1090	100	6	56	-80	Прийомопередавач	10	0.35	Вертикальна	FM
☐ Глісадна антена	330	335	1	0.02	-	-95	Приймач	12	0.15	Горизонтальна	AM
☐ Метеорадар	5400	5700	30	10	70	-120	Прийомопередавач	20	0.3	Горизонтальна	FM
☐ Радіовисотомір	4200	4400	20	196	35	-90	Прийомопередавач	7	0.2	Вертикальна	FM
☐ DME	961	1213	63	0.1	60	-100	Прийомопередавач	18	0.3	Вертикальна	FM
☐ Пеленгатор	0.19	1.75	0.312	0.003	-	-115	Приймач	20	0.15	Вертикальна	AM
☐ Маркерна антена	75	75	1	0.005	-	-95	Приймач	15	0.1	Вертикальна	AM

Рисунок 4.3 – Другий набір пристроїв для проведення частотного аналізу.

Для другого набору пристроїв маємо відповідно такі результати частотного аналізу(рисунок 4.4):

Виникли потенційні завади між пристроями:

Виникли потенційні завади між УКВ p/ст і ATC (Причина: Гармоніка) на частоті 246 МГц

Виникли потенційні завади між УКВ p/ст і ATC (Причина: Гармоніка) на частоті 123 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 1164 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 582 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 388 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 291 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 194 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 97 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 525 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 315 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 225 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 175 МГц

Виникли потенційні завади між GPS і УКВ p/ст-ATC (Причина: Інтермодуляція) на частоті 105 МГц

Рисунок 4.4 – Результат частотного аналізу для другого набору пристроїв.

У цьому випадку ми отримали можливі завади для приймачів УКХ p/ст та GPS як з причин випромінювання на гармоніках, так і через інтермодуляцію. Для того щоб переконатись, чи виникнуть проблеми під час роботи, необхідно перейти до наступного етапу — провести енергетичний аналіз. Для цього завантажуюмо 3D-модель літака та розміщуємо на ній антени.

На рисунку 4.5 зображено початкові дані для проведення енергетичного аналізу:



Рисунок 4.5 – Початкові дані для проведення енергетичного аналізу.

На рисунку 4.6, відповідно, можемо побачити результати енергетичних розрахунків.

Перешкод не виявлено

Рисунок 4.6 – Результат проведення енергетичного аналізу.

Також на рисунку 4.7 можна побачити таблицю фінальних результатів проведення аналізу ЕМС.

Приймачі \ Передавачі		УКВ р/ст				АТС			
УКВ р/ст		Частота (МГц)	Причина	Прийнята потужність (дБ)	Розв'язка (дБ)	Частота (МГц)	Причина	Прийнята потужність (дБ)	Розв'язка (дБ)
						246	Гармоніка	-∞	44
						123	Гармоніка	-∞	38
GPS		Частота (МГц)	Причина	Прийнята потужність (дБ)	Розв'язка (дБ)	Частота (МГц)	Причина	Прийнята потужність (дБ)	Розв'язка (дБ)
		1164	Інтермодуляція	-∞	65	1164	Інтермодуляція	-∞	60
		582	Інтермодуляція	-∞	59	582	Інтермодуляція	-∞	54
		388	Інтермодуляція	-∞	55	388	Інтермодуляція	-∞	50
		291	Інтермодуляція	-∞	53	291	Інтермодуляція	-∞	48
		194	Інтермодуляція	-∞	49	194	Інтермодуляція	-∞	44
		97	Інтермодуляція	-∞	43	97	Інтермодуляція	-∞	38
		525	Інтермодуляція	-∞	58	525	Інтермодуляція	-∞	53
		315	Інтермодуляція	-∞	54	315	Інтермодуляція	-∞	48
		225	Інтермодуляція	-∞	51	225	Інтермодуляція	-∞	46
		175	Інтермодуляція	-∞	48	175	Інтермодуляція	-∞	43
		105	Інтермодуляція	-∞	44	105	Інтермодуляція	-∞	39
		75	Інтермодуляція	-∞	41	75	Інтермодуляція	-∞	36
		63	Інтермодуляція	-∞	40	63	Інтермодуляція	-∞	35
		45	Інтермодуляція	-∞	37	45	Інтермодуляція	-∞	32
		35	Інтермодуляція	-∞	34	35	Інтермодуляція	-∞	29

Рисунок 4.7 – Результат проведення аналізу ЕМС.

Для цього варіанту розміщення антен, потужність на приймачах не перевищує їх чутливості і розв'язка між антенами має оптимальне значення, що означає, що електромагнітна сумісність в системі дотримана.

Тепер розмістимо антени інакше і перевіримо стан ЕМО при конфігурації системи, зображеній на рисунку 4.8:



Рисунок 4.8 – Початкові дані для проведення енергетичного аналізу при іншій конфігурації системи.

На рисунку 4.9 показані результати другого варіанту енергетичного аналізу, які показують, що на цей раз отримали перевищення чутливості приймачів УКХ р/ст та GPS, тому такий спосіб розміщення антен призводить до порушення ЕМС системи і доцільно буде обрати першу конфігурацію.

Виникла перешкода між передавачем АТС і приймачем GPS
Відстань: 3.99 м, Прийнята потужність: 11.60 дБ, Чутливість: -135.00 дБ
Виникла перешкода між передавачем АТС і приймачем УКВ р/ст
Відстань: 5.66 м, Прийнята потужність: 15.20 дБ, Чутливість: -120.00 дБ
Виникла перешкода між передавачем УКВ р/ст і приймачем GPS
Відстань: 9.09 м, Прийнята потужність: 7.70 дБ, Чутливість: -135.00 дБ
Виникла перешкода між передавачем УКВ р/ст і приймачем GPS
Відстань: 9.09 м, Прийнята потужність: 10.60 дБ, Чутливість: -135.00 дБ

Рисунок 4.9 – Результат проведення енергетичного аналізу при іншій конфігурації системи.

Також на рисунку 4.10 зображено фінальний звіт з аналізу ЕМС, який показує всю необхідну для прийняття подальших рішень інформацію, причому можна помітити, що значення розв'язки між антенами значно зменшилось, що підтверджує перевагу першого варіанту стану системи.

Приймачі \ Передавачі		АТС				УКВ р/ст			
GPS	Частота (МГц)	Причина	Прийнята потужність (дБ)	Розв'язка (дБ)		Частота (МГц)	Причина	Прийнята потужність (дБ)	Розв'язка (дБ)
	1164	Інтермодуляція	-∞	46		1164	Інтермодуляція	-∞	53
	582	Інтермодуляція	-∞	40		582	Інтермодуляція	-∞	47
	388	Інтермодуляція	-∞	36		388	Інтермодуляція	-∞	43
	291	Інтермодуляція	-∞	34		291	Інтермодуляція	-∞	41
	194	Інтермодуляція	-∞	30		194	Інтермодуляція	-∞	37
	97	Інтермодуляція	14.8	24		97	Інтермодуляція	-∞	31
	525	Інтермодуляція	-∞	39		525	Інтермодуляція	-∞	46
	315	Інтермодуляція	-∞	34		315	Інтермодуляція	-∞	42
	225	Інтермодуляція	-∞	31		225	Інтермодуляція	-∞	39
	175	Інтермодуляція	10	29		175	Інтермодуляція	-∞	36
	105	Інтермодуляція	14.9	25		105	Інтермодуляція	-∞	32
	75	Інтермодуляція	14.3	22		75	Інтермодуляція	7.7	29
	63	Інтермодуляція	13.8	20		63	Інтермодуляція	10.6	28
	45	Інтермодуляція	12.6	18		45	Інтермодуляція	11.3	25
	35	Інтермодуляція	11.6	15		35	Інтермодуляція	10.9	22
УКВ р/ст	Частота (МГц)	Причина	Прийнята потужність (дБ)	Розв'язка (дБ)		Частота (МГц)	Причина	Прийнята потужність (дБ)	Розв'язка (дБ)
	246	Гармоніка	-∞	35					
	123	Гармоніка	15.2	29					

Рисунок 4.10 – Результат проведення аналізу ЕМС.

4.2 Висновок

Проаналізувавши результати проведеного дослідження, можна зробити висновок, що розроблене ПЗ виконує всі закладені в нього можливості та функції і надає достатньо інформації для висновків щодо доцільності запропонованих розміщень антен.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

В даному розділі виконано аналіз ідеї з точки зору практичності реалізації та зроблені висновки щодо конкурентоспроможності та потенціалу виходу на ринок.

5.1 Опис ідеї проекту

В таблиці 5.1 коротко описано зміст ідеї проекту, потенційні напрямки застосування та переваги, які це може надати.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Аналіз електромагнітної сумісності в системі	1. Розробка електронних пристроїв	Підвищення якості роботи пристроїв
	2. Транспортна сфера	Зменшення впливу електромагнітних завад
	3. Промисловість	Забезпечення надійної роботи обладнання
	4. Охорона здоров'я	Мінімізація впливу перешкод на медичне обладнання

Проведено аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї за моделлю М. Портера. Прямих конкурентів у цій галузі небагато, тому для порівняння взято компанії, що надають аналогічні послуги, такі як «CST Studio Suite» та «Altair FEKO». Результати представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Техніко-економічні характеристик и ідеї	Запропоноване ПЗ / Конкурентні концепції			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Конкурент 1	Конкурент 2			
1	Доступ до ресурсів	Імпорт з інших країн	Імпорт з інших країн	Імпорт з інших країн		+	
2	Обсяг капіталовкладень	Невеликі	Великі	Великі			+
3	Точність	Помірна	Висока	Висока	+		
4	Швидкодія	Висока	Помірна	Помірна			+
5	Контроль якості	Поки що немає відповідного контролю	Високий	Високий	+		
6	Постійні витрати	Середні	Дуже високі	Високі		+	
7	Переваги у затратах виробництва	Низькі	Високі	Високі			+

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

При технічному аудиті розглядаються необхідні технології для реалізації та доступність даних технологій, що наведено в таблиці 5.3

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність проекту

№ п/п	Ідея проєкту	Технології їх реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	ПЗ для розрахунку електромагнітної сумісності	Алгоритм частотного та енергетичного аналізу	Потрібна доопрацювати	Так
2		Обробка даних	Наявна	Так
3		Взаємодія з базою даних	Наявна	Так
4		Інтерфейс користувача	Наявна	Так
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: використання розробленого ПЗ для аналізу електромагнітної сумісності.				

Проект можна технологічно реалізувати.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Для оцінки ринкових можливостей проведено аналіз попиту, результати якого наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Невелика
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	Невідомо
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання якості продукції, стандартів та норм
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	Невідомо

Ринок виглядає привабливим за умов якісного позиціонування продукту. Цільовою групою для впровадження систем аналізу електромагнітної сумісності є підприємства у сфері телекомунікацій, промисловості та медичні заклади. Опис потенційних клієнтів представлено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Вимоги споживачів до товару
1	Точний аналіз електромагнітної сумісності	Телекомунікаційні компанії	Продукт повинен відповідати стандартам, забезпечувати надійність аналізу

2	Зменшення електромагнітних перешкод	Промислові підприємства	Адаптивність системи, висока точність
3	Захист медичних приладів від перешкод	Лікарні	Висока точність аналізу та безпека

Складено таблиці факторів ризику(табл. 5.6) та можливостей(табл. 5.7) для потенційного проєкту, які включають реакцію компанії.

Таблиця 5.6 – Фактори ризику

№ п/п	Фактор	Зміст ризику	Можлива реакція компанії
1	Якість системи	Невідповідність заявленим вимогам	Додаткові дослідження щодо точності результатів

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Індивідуальний підхід	ПЗ розроблене для вузьконаправлених досліджень	Налаштування під потреби кожного клієнта

Також проведено аналіз пропозиції та визначено загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Аналіз конкурентного середовища

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Загальна	Системи пропонуються лише для певних підприємств	Підвищення точності та ефективності роботи ПЗ
Локальний ринок	Відсутність конкурентів	Дії не потрібні оскільки конкурентів немає
Міжгалузева	Продукт може використовуватися в різних галузях	Розширення функціоналу
Цінова	Вартість проєкту набагато нижча через зменшену кількість можливостей	
Формування бренду	Необхідність створення впізнаваного бренду	Необхідність додаткового капіталовкладення

Основними факторами конкурентоспроможності системи є невелика кількість прямих конкурентів та унікальність продукту.

Для загального порівняння виконано SWOT-аналіз, який описує переваги, слабкі сторони, загрози та можливості(табл. 5.9)

Таблиця 5.9 – SWOT-аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: Простота використання, висока точність	Слабкі сторони: Потреба у фінансуванні, новизна продукту
--	--

Можливості: Розширення функціоналу, нові технології	Загрози: Відповідність стандартам, стабільність системи
---	---

5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для розробки маркетингової програми було створено трирівневу модель (таблиця 5.10) для уточнення концепції проекту та його характеристик.

Таблиця 5.10 – Трирівнева маркетингова модель

Рівні товару	Сутність та складові
I. Продукт за задумом	Система вирішує проблему аналізу електромагнітної сумісності електронних пристроїв
II. Продукт у реальному виконанні	Властивості/характеристики
	1. Висока точність аналізу 2. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача
	Якість: стандарти, норми тощо
III. Товар із підкріпленням	До продажу — рівень розробки
	Після продажу — підтримка користувачів та оновлення системи

Товар може бути захищений авторським правом на інтелектуальну власність.

5.5 Висновок

Розроблене програмне забезпечення забезпечує високу точність аналізу електромагнітної сумісності пристроїв, проте існують деякі фактори, що можуть ускладнити вихід на ринок. По-перше, алгоритм потребує доопрацювання, аби уникнути можливості розробки конкурентами більш ефективних рішень. Тому перед виходом на ринок необхідно розширити функціонал та поліпшити точність аналізу. Для цього потрібна команда фахівців та залучення інвесторів.

ВИСНОВОК

В результаті виконання магістерської дисертації поставлена задача була вирішена, а саме було розроблено програмне забезпечення для розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв.

Дисертація складалась з таких етапів:

- Дослідження складників електромагнітної обстановки, методів оцінки стану системи та покращення електромагнітної обстановки, стандартів та норм ЕМС.
- Аналіз програм-аналогів.
- Розробка програмного забезпечення для розрахунку електромагнітної сумісності радіоелектронних пристроїв.
- Аналіз ефективності розробленого програмного забезпечення.

Аналіз результатів розрахунку ЕМС для різних наборів пристроїв та різних варіантів їх розміщення на моделі дав змогу зрозуміти, які частоти є потенційно небезпечними для виникнення перешкод, а також які конфігурації цих пристроїв призводять до перевищення чутливості приймачів; причому значення розв'язки антен у випадках, коли перешкоди не виникали, лежало в межах від 30 до 50 дБ. Таким чином, значення розв'язки менше за 30 дБ вказує на некоректне розміщення пристроїв в системі та на необхідність зміни прийнятих рішень щодо установки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. High Frequency Electronics. // Summit Technical Media. – 2006. – №7. – С. 6–7.
2. Clayton P. Introduction to Electromagnetic Compatibility / Paul Clayton., 2005.
3. Закон України "Про радіочастотний ресурс України" [Електронний ресурс]. – 2004. – Режим доступу до ресурсу: https://ips.ligazakon.net/document/t001770?an=422399&ed=2004_06_24.
4. A GLOSSARY OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) TERMS. // Electromagnetic Compatibility Analysis Center. – 1973
5. A Brief History of EMC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://learnemc.com/introduction-to-emc>.
6. Williams T. EMC for Systems and Installations / T. Williams, K. Armstrong., 2000. – 312 с.
7. Norman V. Electromagnetic Compatibility Handbook / V. Norman, D. White, V. Michael., 1987.
8. Williams T. EMC for Product Designers 5th Edition / Tim Williams., 2016. – 564 с.
9. Mardiguian M. Controlling Radiated Emissions by Design / Michel Mardiguian., 2014. – 384 с.
10. Montrose M. Emc & the Printed Circuit Board: Design, Theory, & Layout Made Simple / Mark Montrose., 1998. – 325 с.
11. Mathur P. Electromagnetic Interference (EMI): Measurement and Reduction Techniques / P. Mathur, S. Raman. – 2020.
12. Kodali P. Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements, Technologies, and Computer Models / Prasad Kodali., 2001. – 476 с.
13. IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC) Standards and Testing for Equipment Manufacturers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:

<https://www.china-gauges.com/news/IEC-61000-Electromagnetic-Compatibility-EMC-Standards-and-Testing-for-Equipment-Manufacturers.html>.

14. EMC Standards [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.academyofemc.com/emc-standards>.

15. ДСТУ ISO 7637-1:2012 Колісні транспортні засоби. Електричні збурення, спричинені провідністю та взаємодією. Частина 1. Визначення та загальні правила (ISO 7637-1:2002, IDT + ISO 7637-1:2002/Amd 1:2008, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=52284.

16. FCC Part 15 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-15>.

17. ICES-003 — Information Technology Equipment (including Digital Apparatus) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://ised-isde.canada.ca/site/spectrum-management-telecommunications/en/devices-and-equipment/interference-causing-equipment-standards-ices/ices-003-information-technology-equipment-including-digital-apparatus>.

18. American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz. – 2020. – С. 1–170.

19. MIL-STD-461, MILITARY STANDARD: ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CHARACTERISTICS REQUIREMENTS FOR EQUIPMENT [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461_8678/.

20. VCCI mark [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.shiphub.co/vcci/>.

21. What is CCC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.china-certification.com/en/what-is-ccc/>.

22. CST Studio Suite [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>.

23. Altair Feko - Solving Connectivity, Compatibility, and Radar Challenges [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://altair.com/feko>.
24. EMIT [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.everythingrf.com/products/rf-software/delcross-technologies/679-349-emit>.
25. EMCoS Studio [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://emcos.com/?products=emcos-studio>.
26. XFDTD Software for 3D Electromagnetic Simulation [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.remcom.com/xfDTD-3d-em-simulation-software>.
27. WIPL-D Pro CAD [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://wipl-d.com/products/wipl-d-pro-cad/>.
28. Дружинін В. А. ЛЕКЦІЯ № 2. Технічна недосконалість передатчиків та приймачів, як причини виникнення взаємних завад. . / В. А. Дружинін. – 2016.
29. Ott H. Electromagnetic Compatibility Engineering / Henry Ott., 2009. – 843 с.
30. Use Case Diagram - Unified Modeling Language (UML) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.geeksforgeeks.org/use-case-diagram/>.
31. UML Class Diagram Tutorial [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.visual-paradigm.com/guide/uml-unified-modeling-language/uml-class-diagram-tutorial/>.
32. UML Sequence Diagram Tutorial [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.lucidchart.com/pages/uml-sequence-diagram>.
33. Boeing 737 Communications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.b737.org.uk/communications.htm>.

ДОДАТОК А

```

private string PerformFrequencyAnalysis(List<Antenna> antennas)
{
    double interferenceThreshold = 0.01;

    List<(double Frequency, string SourceAntenna, string SourceRole)> allFrequencies =
new List<(double, string, string)>();

    string result = "Результат частотного аналізу:\n";

    foreach (var antenna in antennas)
    {
        result += $"Пристрій: {antenna.Name} (Тип: {antenna.Role}), Початкова частота:
{antenna.StartFrequency} МГц, Кінцева частота: {antenna.StopFrequency} МГц, Крок частоти:
{antenna.StepFrequency} МГц\n";
        result += "Гармоніки:\n";

        for (double freq = antenna.StartFrequency; freq <= antenna.StopFrequency; freq +=
antenna.StepFrequency)
        {
            if ((antenna.Role == "Передавач") || (antenna.Role == "Прийомопередавач"))
            {
                for (int i = 1; i <= 100; i++)
                {
                    double harmonic = freq * i;
                    allFrequencies.Add((harmonic, antenna.Name, "Гармоніка"));
                    result += $" {i}-та гармоніка of {freq} МГц: {harmonic} МГц\n";
                }
            }
        }

        result += "\nІнтермодуляція:\n";
        for (int i = 0; i < antennas.Count; i++)
        {
            for (int j = i + 1; j < antennas.Count; j++)
            {
                if ((antennas[i].Role == "Передавач" || antennas[i].Role ==
"Прийомопередавач") && (antennas[j].Role == "Передавач" || antennas[j].Role ==
"Прийомопередавач"))
                {
                    foreach (var freq1 in GetFrequencies(antennas[i]))
                    {
                        foreach (var freq2 in GetFrequencies(antennas[j]))
                        {
                            result += $" {antennas[i].Name} i {antennas[j].Name}:\n";
                            for (int k = 1; k <= 3; k++)
                            {
                                for (int l = 1; l <= 3; l++)
                                {
                                    double intermod1 = k * freq1 + l * freq2;
                                    double intermod2 = k * freq1 - l * freq2;
                                    double intermod3 = l * freq1 + k * freq2;
                                    double intermod4 = l * freq1 - k * freq2;

                                    if (intermod1 > 0) allFrequencies.Add((intermod1,
$"{antennas[i].Name}-{antennas[j].Name}", "Інтермодуляція"));
                                    if (intermod2 > 0) allFrequencies.Add((intermod2,
$"{antennas[i].Name}-{antennas[j].Name}", "Інтермодуляція"));
                                    if (intermod3 > 0) allFrequencies.Add((intermod3,
$"{antennas[i].Name}-{antennas[j].Name}", "Інтермодуляція"));
                                }
                            }
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        if (intermod4 > 0) allFrequencies.Add((intermod4,
        $"{antennas[i].Name}-{antennas[j].Name}", "Інтермодуляція"));

        result += $"      {k}f1 + {l}f2: {intermod1} МГц\n";
        result += $"      {k}f1 - {l}f2: {intermod2} МГц\n";
        result += $"      {l}f1 + {k}f2: {intermod3} МГц\n";
        result += $"      {l}f1 - {k}f2: {intermod4} МГц\n";
    }
}
}
}
}

bool interferenceDetected = false;
List<string> interferenceDetails = new List<string>();
string add;

foreach (var antenna in antennas)
{
    if ((antenna.Role == "Приймач") || (antenna.Role == "Прийомопередавач"))
    {
        foreach (var freq in GetFrequencies(antenna))
        {
            for (int i = 1; i <= 50; i++)
            {
                double harmonic = freq / i;
                foreach (var (frequency, sourceAntenna, sourceRole) in
allFrequencies)
                {
                    if ((harmonic == frequency) &&
                        !sourceAntenna.Contains(antenna.Name))
                    {
                        interferenceDetected = true;
                        double coeff = 1;
                        if (frequency / antenna.StartFrequency < 1)
                        {
                            coeff = frequency / antenna.StartFrequency;
                        } else
                        {
                            coeff = antenna.StartFrequency / frequency;
                        }
                        freqResults.Add(new FreqResult
                        {
                            ReceiverName = antenna.Name,
                            TransmitterName = sourceAntenna,
                            InterfereFrequency = frequency,
                            Cause = sourceRole,
                            PowerCoeff = coeff
                        });
                        add = $"Виникли потенційні завади між {antenna.Name} і
{sourceAntenna} (Причина: {sourceRole}) на частоті {frequency} МГц";
                        if (!interferenceDetails.Contains(add))
                        {
                            interferenceDetails.Add(add);
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

using (StreamWriter writer = new StreamWriter("result.txt", false))

```

```

{
    writer.Write(result);
}

if (interferenceDetected)
{
    result = "\nВиникли потенційні завади між пристроями:\n";
    foreach (var detail in interferenceDetails)
    {
        result += detail + "\n";
    }
}
else
{
    result = "\nПотенційних завад не виявлено\n";
}

return result;
}

private void CalculateEMC_Click(object sender, RoutedEventArgs e)
{
    StringBuilder result = new StringBuilder();
    var emcResults = new List<EmcResult>();

    foreach (var transmitter in placedAntennas.Where(a => a.Antenna.Role == "Передавач"
|| a.Antenna.Role == "Прийомопередавач"))
    {
        foreach (var receiver in placedAntennas.Where(a => a.Antenna.Role == "Приймач" ||
a.Antenna.Role == "Прийомопередавач"))
        {
            double freq = 0;
            double coeff = 1;
            double receivedPower = 0;
            double distance = CalculateDistance(transmitter.Position, receiver.Position);
            var existingResult = emcResults.FirstOrDefault(r => r.Receiver ==
receiver.Antenna.Name && r.Transmitter == transmitter.Antenna.Name);
            if (existingResult == null)
            {
                existingResult = new EmcResult
                {
                    Receiver = receiver.Antenna.Name,
                    Transmitter = transmitter.Antenna.Name
                };
                emcResults.Add(existingResult);
            }
            foreach (var item in freqResults)
            {
                if ((item.ReceiverName == receiver.Antenna.Name) &&
(item.TransmitterName.Contains(transmitter.Antenna.Name)))
                {
                    freq = item.InterfereFrequency;

                    coeff = item.PowerCoeff;

                    if (receiver.Antenna.Name != transmitter.Antenna.Name)
                    {
                        double transmitterCableLoss =
convertToWatts(CalculateCableLoss(transmitter.Antenna.CableLength,
transmitter.Antenna.CableLossPerM));
                        double FSPL = convertToWatts(CalculateFSPL(distance, freq));
                        double receiverCableLoss =
convertToWatts(CalculateCableLoss(receiver.Antenna.CableLength,
receiver.Antenna.CableLossPerM));

```

```

        receivedPower = (convertToWatts(transmitter.Antenna.Power) -
transmitterCableLoss - FSPL - receiverCableLoss) * coeff;
        if (transmitter.Antenna.Polarization !=
receiver.Antenna.Polarization)
        {
            receivedPower *= 0.5;
        }

        if (receivedPower <= 0)
        {
            receivedPower = 0;
        }

        receivedPower = Math.Round((10 * Math.Log10(receivedPower) +
30), 1);

        if (receivedPower > receiver.Antenna.Sensitivity)
        {
            if (!result.ToString().Contains($"Відстань: {distance:F2}
м, Прийнята потужність: {receivedPower:F2} дБ, Чутливість:
{receiver.Antenna.Sensitivity:F2} дБ"))
            {
                result.AppendLine($"Виникла перешкода між передавачем
{transmitter.Antenna.Name} і приймачем {receiver.Antenna.Name}");
                result.AppendLine($"Відстань: {distance:F2} м,
Прийнята потужність: {receivedPower:F2} дБ, Чутливість: {receiver.Antenna.Sensitivity:F2}
дБ");
            }
        }
    }
    if (!existingResult.ResultDetails.Any(fd =>
        fd.Frequency == freq))
    {
        existingResult.ResultDetails.Add(new ResultDetail
        {
            Frequency = freq,
            Reason = item.Cause,
            ReceivedPower = receivedPower,
            DecouplingDb = Math.Round((20 * Math.Log10(4 * Math.PI *
distance * freq / 300)))
        });
    }
}
}
}
if (result.Length == 0)
{
    result.AppendLine($"Перешкод не виявлено");
}
WPFResultsWindow resultsWindow = new WPFResultsWindow(emcResults);
resultsWindow.Show();

ResultsTextBox2.Text = result.ToString();
}

```