

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему **«ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БПЛА В ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ»**

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

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Педченко О. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Шефер О.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025рік

## ВСТУП

До сумнозвісної дати, 24.02.2022, Україна була в авангарді впровадження сучасних технологій, у тому числі з використання дронів. Останніми роками відзначено збільшенням темпів зростання розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та використання їх у різних цивільних галузях та у сфері військового призначення.

Останні дослідження показали, що використання безпілотників може істотно здешевити будівельні проекти в Україні. Завдяки використанню дронів будівельні компанії можуть заощадити до 30%.

Дрони використовуються для тестування та оптимізації роботи бездротових мереж, включаючи 5G та майбутні покоління мереж зв'язку. Вони можуть проводити вимірювання швидкості передачі даних, якості сигналу, затримки тощо у різних районах, включаючи важкодоступні місця, що дозволяє вдосконалювати протоколи передачі даних та забезпечувати кращу якість зв'язку. Що нерозривно пов'язано із програмою Полтавської військової адміністрації «Цифрова Полтавщина» [1].

Дрони використовуються для розгортання мобільних базових станцій у важкодоступних або тимчасових об'єктах, таких як масові заходи, невеликі селища, невибудовані райони після руйнувань в наслідок військових дій, або природних катастроф. Це дозволяє забезпечувати швидкий та надійний доступ до мобільного зв'язку.

Питання застосування БПЛА для забезпечення безпеки об'єктів сьогодні виходять на перші ролі, і змушує все більше звертати увагу на нові методи контролю та моніторингу. Найбільше це турбує такі організації, які мають масштабні об'єкти, контроль за якими організувати досить складно. Насамперед це такі, важливі для розвитку суспільства процеси, як:

- Аналіз екологічного стану об'єктів.

- Безпека промислових об'єктів.
- Картографування місцевості.
- Спостереження за виконанням небезпечних робіт.
- Усунення можливих небезпечних екологічних наслідків.
- Моніторинг витоків тепла будівель та споруд.
- Покращене планування та аналіз можливих ризиків об'єктів видобутку вуглеводнів.
- Стандартизований збір даних та їх комплексний аналіз.
- Допомога при ліквідації аварій у нафтогазової галузі.
- Обстеження та допомога в усуненні пошкоджень газопроводів.
- Моніторинг цілісності та забезпечення безпеки газопроводів.

Важливим замовником послуг з використанням БПЛА є ПАТ «Укрзалізниця», ПАТ «Укртранснафта», ПАТ «Нафтогаз» й інші.

Всі ці організації можуть відчути економічний ефект від застосування безпілотних систем через дуже короткий період часу за рахунок застосування БПЛА. Також це дозволить знизити собівартість послуг на порядок, порівняно з традиційними супутниковими або авіаційними системами [2].

Крім того, сучасні БПЛА використовуються як один з найважливіших засобів підвищення бойових можливостей збройних сил України. Їхнє бойове застосування переважно при виконанні завдань, що характеризуються великою тривалістю польоту (часом патрулювання в заданому районі), підвищеною небезпекою та складністю (наприклад, у районах інтенсивної вогневої протидії засобів ППО).

У зв'язку з різноманітністю завдань, що виконують БПЛА у різних кліматичних умовах і місцях базування, під час бойового чергування і траєкторії польоту, за умовами експлуатації БПЛА можуть піддаватися прямому електромагнітному впливу [3].

Крім цього, необхідно врахувати, що сьогодні існує реальна загроза впливу на БПЛА різних навмисних деструктивних електромагнітних впливів, одним з яких є нове ефективне надкороткоімпульсне електромагнітне випромінювання (НКЕВ). Розвиток засобів генерації завад останнім часом набирає високі обороти, вплив таких джерел на бортові системи літальних апаратів є високоефективними. Тому що основною особливістю даного випромінювання є сумісність тривалості імпульсів, що діють, з тривалістю інформаційних сигналів. Наслідком цього є рівні наведених напруг і струмів, які можна порівняти з рівнем інформаційних сигналів, що призводить до збільшення ймовірності руйнування оброблюваної інформації системою управління БПЛА [4].

Завдяки високим темпам розвитку цифрової обчислювальної техніки, збільшення обсягу та швидкодії інформації, що передається в системі управління, а також можливості дистанційного управління БПЛА та корисним навантаженням в режимі реального часу, виникає необхідність забезпечення стійкого функціонування безпілотного літального апарату в умовах НКЕВ.

З урахуванням викладеного можна дійти невтішного висновку, що НКЕВ є новою серйозною загрозою для системи управління БПЛА.

# 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Аналіз електромагнітного впливу на безпілотні літальні апарати

Склад електромагнітних впливів (ЕМВ), яким можуть піддаватися безпілотні літальні апарати (БПЛА), пропонується визначити за їхньою спільністю природи, спільністю опису електромагнітних факторів та процесів їх впливу на БПЛА.

З цієї точки зору поняття електромагнітної стійкості БПЛА доцільно поширити на електромагнітні фактори та потужні ЕМВ, які описуються на основі уявлень про атомно-електронну структуру речовини, а саме:

- заряди та потенціали, статичні, квазістатичні та імпульсні струми, електричні та магнітні поля;

- електромагнітні поля діапазону радіочастот.

Таким чином, до складу ЕМВ входять такі їх групи та види:

- ЕМВ природного походження:

- електростатичні;

- грозові розряди:

- електростатичні поля в передгрозовий та грозовий періоди;

- прямий удар блискавки (електромагнітне поле близького удару блискавки).

- ЕМВ штучного походження:

- бойові ЕМВ (дії засобів ураження), що реалізуються лише у бойовій обстановці.

Проміжний і магніто-гідро-динамічний ЕМІ становлять серйозну небезпеку для протяжних наземних споруд (ліній провідного зв'язку, ліній електропередачі тощо), а для літальних апаратів вони небезпеки не представляють.

ЕМВ техногенного походження часто називають також експлуатаційними, оскільки вони виникають у процесі експлуатації БПЛА та в результаті роботи свого електро- та радіообладнання. Вони включають:

- електромагнітні поля радіопередаючих засобів;
- електромагнітні поля радіолокаційних станцій;
- електромагнітні поля високовольтних ліній електропередачі у нормальному режимі роботи та в режимі короткого замикання;
- електромагнітні поля контактної мережі залізниць у нормальному режимі роботи та в режимі короткого замикання;
- електромагнітні поля електрообладнання авіаційних та корабельних носіїв БПЛА.

Електромагнітна зброя:

- Вибухомагнітні генератори;
- Установки надширокосмугових (надкороткоімпульсних) імпульсів;
- Установки випромінювання в мікрохвильовому діапазоні.

Всі електромагнітні випромінювання, якими може піддаватися БПЛА у процесі виконання завдань, розглянуті рис. 1.1.

У зв'язку з колосальними темпами розвитку генераторів надкороткоімпульсного електромагнітного випромінювання (НКЕВ), недостатня поінформованість про механізми впливу навмисного впливу на пристрої телекомунікації, питання стійкості БПЛА до впливу НКЕВ недостатньо досліджі.

Особливо важливим є дослідження стійкості безпілотних літальних апаратів під час впливу НКЕВ для визначення вразливих вузлів та режимів роботи системи управління та подальшої розробки рекомендацій щодо захисту.



Рисунок 1.1 – Склад електромагнітних впливів, яким піддається БПЛА у процесі виконання завдань

## 1.2 Аналітичний огляд надкоротких електромагнітних імпульсів та засобів їх генерації

Встановлено, що при зменшенні тривалості НКЕВ до значень порядку  $10^{-10}$  с, коли їх спектральний склад лежить в інтервалі від сотень МГц до одиниць ГГц, випромінювання мають ряд властивостей, що дозволяють використовувати їх для вирішення нових завдань, недоступних для звичайній радіотехніки. Вони є тонким шаром електромагнітної енергії з імпульсною потужністю в десятки та сотні МВт, що поширюється у просторі зі швидкістю світла. Спочатку дослідження розвивалися у двох основних напрямках – НКЕВ радіолокації та НКЕВ радіозв'язку [5]. Були створені локатори для виявлення та ідентифікації об'єктів, як у повітрі, так і під покривом лісу, під водою та під поверхнею землі, завдяки тому, що послідовно відбиваючись від елемента

об'єкта, НКЕВ локатора несе інформацію, як про координати, так і про розміри, структуру та матеріал об'єкта. Проектування таких локаторів дозволило розробити цілий ряд технічних засобів для систем охоронної сигналізації та для автоматичного контролю з метою безпеки відстаней між транспортними засобами. Чутливість НКЕВ локаторів до виявлення сигналів, відбитих від пульсуючих органів людського тіла (серце, легені, магістральні судини) дозволило розробити дешеві малогабаритні прилади для безперервного дистанційного контролю пульсу, дихання та наповнення судин.

Розробки в напрямку засобів НКЕВ радіозв'язку також призвели до нових відкриттів у цій галузі. Дані засоби зв'язку, за дотримання певних правил, не заважають традиційному радіозв'язку. Були розроблені такі пристрої як, НКЕВ радіотелефон, а також апаратура прихованого двостороннього телефонного зв'язку та бездротовий локальний зв'язок [6].

Основні переваги НКЕВ зв'язку – мале енергоспоживання, нечутливість до переображений сигналу – виявилися надзвичайно важливими для військових застосувань. З ряду причин основна сфера застосування НКЕВ зв'язку – тактичний радіозв'язок на відстанях до 10км. Крім того, особливістю таких імпульсів у порівнянні з традиційними джерелами навмисних перешкод – надширокополосність та велика імпульсна амплітуда [7].

Розвиток обчислювальних систем характеризується постійним збільшенням кількості розв'язуваних завдань та підвищенням їх складності, розширенням інтелектуальних та адаптивних можливостей. Сучасні обчислювачі, які є ядром телекомунікаційних систем управління та контролю БПЛА, все більшою мірою оснащуються електронними елементами, чутливими до електромагнітних впливів. Підвищення ступеня інтеграції елементної бази електроніки, і, як наслідок, зниження електричної міцності окремих компонентів апаратури призводить до зниження стійкості бортової системи

управління БПЛА при впливі електромагнітних факторів різного походження, у тому числі надкороткоімпульсного електромагнітного випромінювання [7].

Під час впливу НКЕВ в колах радіоелектронних і електронно-обчислювальних систем наводяться сигнали, аналогічні робочим, що призводить до порушення цих систем [8]. Найбільш характерними прикладами проявів впливу НКЕВ на елементи та вузли можуть бути такі явища, як збої в каналах зв'язку, втрати інформації в бортових мережах, відмови всієї системи контролю та управління рухомим комплексом тощо.

Виявилося, що досить потужне НКЕВ здатне не тільки порушувати роботу електронно-обчислювальних засобів, а й може створюватися таємно, анонімно і на великій відстані від об'єкта, що вражається. Воно може вразити велику кількість цілей і, що найбільш суттєво, всі ці прилади недоступні для виявлення та придушення наявними засобами радіопротидії, що використовують вузькосмугові сигнали. У зв'язку з цим виник новий термін «електромагнітний тероризм».

На загальну думку, більшість зарубіжних та вітчизняних військових експертів, електромагнітна зброя, в тому числі і на основі випромінювачів НКЕВ, матиме те саме значення, що й ядерна зброя у другій половині ХХ століття. При цьому воно високоефективне, відносно екологічно чисте та гуманне, може діяти потай, спрямовано та миттєво. Огляд робіт показує, що в найближче десятиліття найбільш імовірно є поява випромінювачів потужних надкоротких електромагнітних імпульсів, які застосовуються в тому числі і для функціонального ураження інформаційних та телекомунікаційних систем шляхом руйнування (пошкодження) елементів або вузлів [9].

Так в останні роки з'явилися нові потужні генератори, що випромінюють періодичні та одноразові надкороткі електромагнітні імпульси (НКЕВ) з тривалістю імпульсів сотні пікосекунд, напруженістю поля сотні кВ і частотою повторення десятки мегагерц, рис. 1.

Установки надкоротких імпульсів складаються з генераторів імпульсів з малою тривалістю та випромінюючих антен, що дозволяють створювати спрямоване випромінювання з наступними параметрами [10]:

- частоти повторення імпульсів варіюються від сотень герц до кількох килogerц;
- тривалість імпульсів від 0,1 до 0,3 нс;
- амплітуда напруженості електричного поля 56 кВ/м з відривом 100 м;
- тривалість фронту імпульсу від 85 до 250 пс;
- амплітуда напруженості електричного поля 56 кВ/м з відривом 100 м.

### **1.3 Висновки за розділом та постановка завдань**

Проведено аналітичний огляд досліджень на тему магістерської роботи, що виконані вітчизняними та зарубіжними авторами. Показано, що є потенційна загроза появи нових силових електромагнітних засобів впливу НКЕВ. У зв'язку з цим у нашій країні та за кордоном ведеться активна робота з розробки засобів виявлення навмисних силових електромагнітних впливів та організації робіт із захисту від них.

З урахуванням вище викладеного впливає, що в даний час навмисні надширокосмугові електромагнітні перешкоди є новою серйозною загрозою телекомунікаційних систем управління БПЛА.

У зв'язку з цим, особливо важливим є вирішення завдання щодо забезпечення стійкості безпілотних літальних апаратів при дії НКЕВ, як найбільш перспективних і функціонально важливих в даний час, що виконують різноманітних завдань, як у цивільних, так і у військових гаузах.

Для вирішення цього завдання необхідно визначити найбільш уразливі вузли БПЛА до НКЕВ.

## 1. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 2.1 Огляд існуючих БПЛА, як об'єктів, що піддаються впливу НКЕВ

Революційний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є ефективним для вирішення широкого спектра завдань у різних галузях.

Існує перспектива застосування БПЛА і в тих сферах, де відсутність пілота на борту дозволяє зробити літальний апарат більш компактним і дешевим. У США та КНР спостерігається найінтенсивніший розвиток безпілотної літальної техніки, де витрачається 73% від витрат на розробку та виробництво БПЛА, що здійснюються у всьому світі та найближчими роками фінансування військових програм розвитку БПЛА планується збільшити майже на порядок. Цілком очевидно, що поряд із суто військовими розробками в області БПЛА з'являться також засоби та технології подвійного призначення. Американська авіаційна індустрія, яка зазнає кризи в результаті падіння попиту на пасажирські літаки, вже зараз активно вивчає сфери можливого розширення попиту в цивільній сфері на безпілотну техніку і робить наполегливі спроби широкого впровадження її в народному господарстві.

До найбільш перспективних напрямів можна віднести використання БПЛА для відеомоніторингу та охорони транспортних мереж паливно-енергетичного комплексу, патрулювання транспортних магістралей, лісових масивів і територій, що охороняються, з розвідувальною метою і для аерозйомок, огляду електроенергетичних мереж, ліній передачі електроенергії та інших енергетичних споруд; здійснення інспекції, виявлення потенційних проблем, такі, як пошкодження, утворення льоду на ЛЕП, а також збір даних про стан та ефективність енергетичних систем; для огляду, перевірки та моніторингу вітрових та сонячних електростанцій; можуть надавати зображення з високою роздільною здатністю для виявлення потенційних проблем, таких як

пошкодження обладнання або забруднення панелей, а також здійснювати вимірювання продуктивності систем і т.п.

У силу неоднозначного визначення сучасних БПЛА прийнято вважати, що під безпілотними літальними апаратами (загалом) розуміються керовані ЛА без екіпажу, призначені для польотів в атмосфері Землі та в космічному просторі. [11] Зокрема дана аббревіатура використовується для таких літальних апаратів, функціональне призначення яких реалізується в автоматичному режимі за рахунок бортових пристроїв (для безпілотних літаків-розвідників, а такі елементи, як зліт та посадка – у дистанційно-пілотованому [12].

За типом завдання БПЛА поділяються на:

а) у цивільних цілях:

- картографування, пошук природних ресурсів;
- наукові дослідження атмосфери;
- зв'язок;
- метеорологічні;
- моніторинг довкілля на користь вирішення екологічних проблем;
- прикордонна охорона узбережжя від порушників та браконьєрів;
- дотримання правопорядку;
- стеження транспортним потоком на автомобільних дорогах;
- стеження за терористами;
- прогнозування стихійних лих (пожежі, повені тощо);
- спостереження за трубопроводами;
- надання гуманітарної допомоги;

б) для забезпечення льотних навчань, присвячених безпеці польотів;

в) у військових галузях:

- збір важливої інформації про місцезнаходження своїх військ та військ противника, їх якісний та кількісний склад;
- розвідка поля бою до початку бойових дій;

- інженерна, радіаційна, хімічна, бактеріологічна розвідка;
- як ретранслятор зв'язку;
- у ролі рухомий системи постановки перешкод у тилу противника;
- завдання ударів по стратегічних об'єктах супротивника;
- вивчення об'єктів.

г) до виконання завдань РЕБ.

Більшість БПЛА оснащені кольоровими та інфрачервоними камерами високої розрізняювальної здатності, що передають зображення в режимі реального часу, різного типу антен, також є носіями важливої інформації, втрата якої може обійтися компанії великих матеріальних витрат [5].

Основними характеристиками сучасних БПЛА є:

- здатність поглинання радіолокаційного випромінювання;
- здатність літати на низьких висотах;
- здатність тривалих перельотів;
- всесезонність використання БПЛА;
- мінімальні часові та матеріальні витрати на ремонт.

Необхідно відзначити ефективність боротьби з БПЛА шляхом застосування засобів виявлення, оскільки це становить великі труднощі для їх знищення. Дана обставина пов'язана з їх малими розмірами і низькою відбиваючою здатністю, збільшує витрату боєприпасів для їх ліквідації. З іншого боку, при втраті БПЛА в порівнянні з втратою військових літаків не становить значних збитків. Тому в даний час ведуться розробки за новими видами виявлення цілей, що базуються на використанні НКЕВ, які дозволяють розпізнавати БПЛА, не дивлячись на його особливості конструкції та габарити, а також використовувати ці засоби генерації для постановки перешкод.

Безпілотні літальні апарати, як і пілотовані, бувають літакового, а також мультикоптерного типу.

Розглянемо вплив НКЕВ на різні класи безпілотних апаратів, доцільність впливу на них противником та вибір найбільш уразливого та стратегічно важливого класу БПЛА.

БПЛА легкого та середнього класів малого та середнього радіусу дії можуть використовуватися не тільки для аерозйомки та розвідки, а також для несення корисного навантаження значущою для виконання завдання.

Бортове обладнання оснащене металевими корпусами, які не мають високого ступеня захисту від проникнення електромагнітних перешкод. А також корпус сучасних БПЛА складається в більшості випадків з композитних матеріалів, які в свою чергу не мають екрануючих властивостей для впливу НКЕВ. Крім цього, легкі БПЛА в основному використовуються для дистанційно-пілотованого управління, що підвищує ефективність впливу засобу генерації НКЕВ. У зв'язку з цим підвищується інтерес з боку супротивника до виведення з ладу або перехоплення літальних апаратів існуючими засобами генерації НКЕВ.

Перелічені класи БПЛА є значущими для вирішення певного роду завдань та вразливими до впливу НКЕВ, що призводить до необхідності аналізу даного виду ЛА на стійкість до навмисного випромінювання.

Дальність дії і тривалість польоту говорять про те, що дані літальні апарати управляються в основному в автоматичному режимі або в окремих випадках в автоматизованому, передача команд здійснюється по супутниковому каналу зв'язку. Конструкція планера і бортова апаратура з високою ефективністю екранування дозволяє зробити висновок про високу стійкість функціонування системи управління до навмисного впливу.

Аналіз показав, що безпілотні літальні апарати найбільш схильні до впливу надкоротких електромагнітних імпульсів у процесі управління оператором в режимі реального часу та обробки прийомо-передавальної

інформації. Таким чином, необхідно докладно розглянути способи управління БПЛА та визначити найбільш уразливі системи до навмисного випромінювання.

## 2.2 Аналіз способів керування БПЛА

Існує кілька способів керування безпілотними літальними апаратами:

- дистанційно-пілотований спосіб:
- ручне управління, що здійснюється за рахунок управління БПЛА оператором у режимі реального часу;
- автоматизоване керування здійснюється автономно, але з можливістю внесення оператором змін польотного завдання або його коригування;
- автоматичне керування, відбувається автопілотом за заздалегідь заданою траєкторією на заданій висоті із заданою швидкістю і стабілізацією кутів орієнтації [13].

Найбільш перспективним на сьогодні є дистанційно-пілотований спосіб, що дозволяє в режимі реального часу проводити моніторинг необхідної місцевості та об'єктів, брати участь у рятувальних операціях. Оператор із наземного пункту керування польотами візуально за допомогою камер, що знаходяться на літальному апараті, в зоні прямої видимості управляє судном або вносить коригування у польотне завдання.

Але, з огляду перешкодозахищеності від електромагнітного впливу він є найбільш уразливим.

Розглянемо існуючі способи управління БПЛА в режимі реального часу та рівня їх перешкодозахищеності зв'язку з наземним пунктом.

**Перший спосіб** включає систему і метод забезпечення бездротового управління безпілотним літальним апаратом і доступу до даних спостереження, і включають:

- наземний пункт керування (НПК);

- БПЛА, обладнаний системами управління, системами передачі та прийому інформації;

- бездротову систему зв'язку між БПЛА та НПК.

Метод полягає в тому, що бездротова система зв'язку, ручні пристрої введення, прийому та передачі даних (наприклад, стільниковий телефон або PDA), а також інші аналогічні технології використовують для:

- зв'язки БЛА із НПК;

- передачі команд керування параметрами польоту безпілотного апарату;

- отримання даних спостереження з БПЛА.

Система зв'язку включає бездротову систему між наземним пунктом управління і БПЛА.

В якості мережі для передачі даних пропонується використовувати communications (GSM) network, як загальний пакет радіослужби (GPRS) network, а code division multiple access (CDMA) network, an evolution – data optimized (EV-DO) network, enhanced data rates for GSM еволюція (EDGE) мережа, третя генерація глобальної системи для мобільних комунікацій (3GSM) мережа, цифровий IS-136/time division multiple access (IS-136/TDMA) мережа, integrated digital enhanced network (iDEN) [14].

Для передачі команд управління в режимі реального часу за допомогою цих систем потрібна широкопasmовою система радіозв'язку, для якої характерні такі недоліки:

- низька перешкодозахищеність та перешкодостійкість;

- складність збору та передачі повної інформації про повітряну обстановку, що неминує знижує рівень безпеки польотів.

До складу системи *наступного способу* входять: - наземна станція управління (НСУ), обладнана пристроєм візуалізації; віддалений пілот-оператор на НСУ та система передачі даних між БПЛА та НСУ.

Метод дозволяє пілоту-оператору контролювати політ БПЛА за допомогою тривимірного зображення, що синтезується. Під час польоту бортова система періодично транслює свій ідентифікатор, розташування, висоту та азимут. За отриманими від БПЛА даними, у системі візуалізації генерується і відображається на екрані монітора обстановка навколо поточного розташування БПЛА. Протягом тих фаз польоту, коли система візуалізації не використовує управління, він виконує політ під керуванням автопілота. Додатково забезпечується канал зв'язку із системою управління повітряним рухом (УПР) та пілотами іншими ЛА, що мають прямий зв'язок із зазначеним пілотом-оператором.

Для передачі керуючих сигналів на борт БПЛА від органів управління, на які впливає пілот-оператор, потрібна широкосмугова радіолінія.

Недоліками цього способу управління є:

- у порівнянні з вузькосмуговою лінією передачі даних (ЛПД) вона має при тій же потужності передавача меншу дальність дії, а також ускладнює управління польотом в пілотованому режимі на далекі відстані та забезпечення необхідної якості сигналу.

- необхідність використання додаткових каналів передачі даних про повітряну обстановку для зв'язку із системою УПР та пілотами інших літальних апаратів, що знижує рівень надійності та безпеки польотів у повітряному просторі.

**Наступний спосіб** призначений для керування одним або декількома безпілотними літальними апаратами, кожен з яких обладнаний бортовою автоматичною системою керування, супутниковою навігаційною системою, бортовим обчислювачем та приймально-передавальною станцією, за допомогою якої здійснюється цифровий радіозв'язок із базовою радіостанцією, зі стаціонарним або рухомим пунктом управління (ПУ). ПУ обладнано автоматизованим робочим місцем оператора.

Сигнали управління формують у вигляді макрокоманд і передають до загального радіоканалу. У радіоканал також надходять повідомлення від усіх учасників повітряного руху, що містять дані про їх місцезнаходження, висоту, швидкість і напрямок польоту, а також додаткову інформацію.

Для певних фаз польоту безпілотної літальної апаратури план та програму його руху закладають у бортовий обчислювач заздалегідь, при цьому політ виконується в автономному режимі за допомогою бортової автономної системи. У реальних умовах потрібно коригувати параметри руху безпілотної літальної апаратури та перебудовувати програму в залежності від відомої ситуації виникнення нових завдань. З урахуванням підвищення точності та надійності вимірювання координат та параметрів руху, що забезпечуються супутниковими системами спостереження, реальним стає отримання достовірного та точного прогнозу руху БПЛА на деякому інтервалі часу з урахуванням його динаміки та впливу зовнішнього середовища. Це дозволяє використовувати дискретний спосіб управління, при якому керуюча інформація подається на бортову апаратуру в стисnutій формі, а саме у вигляді мікрокоманд. Зазначені команди містять необхідні дані про зміну програми руху та виконуються відповідно до заздалегідь алгоритмів.

Зазначений спосіб передачі команд у стисnutій закодованій формі дозволяє знизити швидкість передачі даних і, як наслідок, смугу частот, що призводить до збільшення дальності передачі і стійкості до перешкод у порівнянні з широкопasmовою лінією при тій же потужності передавача.

Використання загального вузькопasmового радіоканалу, з часовим поділом, дозволяє істотно підвищити стійкість до перешкод у порівнянні з широкопasmовою лінією передачі даних.

Використання вузькопasmового каналу зв'язку дозволяє досягти високої стійкості до перешкод, але має ряд недоліків для забезпечення зв'язку при управлінні БПЛА в режимі реального часу, наприклад, складність передачі

великого обсягу інформації [8]. Розглянемо докладніше передачу командно-телеметричних даних з радіоканалу щодо різних класів БПЛА та її особливості.

Крім обміну даними процесу управління між наземним пунктом управління та БПЛА, також є і є актуальним завданням – передача даних корисного навантаження ЛА на НПУ. І тут потрібно забезпечити передачу великого обсягу даних у смузі пропускання, ймовірності бітової помилки та інших.

При розгляді забезпечення радіоканалу малих БЛА (злітна маса до 5 кг), необхідно врахувати обмеження за габаритами та масою приймально-передавального обладнання, що призводить до раціонального використання єдиного радіоканалу зв'язку для передачі командно-телеметричних даних та даних корисного навантаження. Посадка таких ЛА здійснюється зазвичай за допомогою парашута, що не вимагає додаткової лінії передачі даних для зображення з відеокамер ЛА. Додатковим радіоканалом зв'язку є лише лінія передачі даних системи автоматичного порятунку.

При виборі приватного діапазону передачі даних по радіоканалу для систем зв'язку малих БПЛА вирішальними чинниками є маса і габарити бортового приймача і антенно-фідерного пристрою (АФП). У даному класі ЛА доцільним є вибір діапазону надвисоких частот (НВЧ), при цьому вдається створити антену малих розмірів, здатну розміститися в профілі крила. Одним із відповідних частотних діапазонів є діапазон 2,4 ГГц.

При розгляді систем зв'язку БПЛА середнього та великого класу пред'являються необхідно враховувати, що до них пред'являються більш жорсткі вимоги щодо дальності роботи, перешкодозахищеності та ймовірності бітової помилки. У цьому випадку є можливим та оптимальним комплексування кількох каналів зв'язку, що працюють у різних частотних діапазонах. У процесі роботи системи зв'язку оцінюються ймовірності бітової помилки кожного

каналу зв'язку, і приймається рішення про розподіл командно-телеметричного потоку даних між каналами.

Використання кількох каналів зв'язку підвищує надійність системи передачі і водночас є надлишковим з погляду ефективного використання радіочастотного спектра. Максимальна відстань для прямого радіозв'язку між БПЛА цивільного призначення та НПУ на сьогоднішній день, як правило, становить не більше 100 км. У разі необхідності передачі командно-телеметричного зв'язку на великі відстані використовується супутниковий канал зв'язку. Останнім часом перспективним напрямом у розвитку систем зв'язку є використання частотного діапазону понад 5 ГГц. Застосування таких систем дозволяє передавати інформацію корисного навантаження великого обсягу в режимі реального часу. Єдиним недоліком такої системи є сильна залежність від умов поширення електромагнітних хвиль від погодних умов та впливу багатопробеневої. Розглянемо можливі ситуації взаємного розташування БПЛА та НПУ, рис. 2.1. При цьому область повітряного простору можна умовно розділити на зону освітленості, півтіні і зону тіні. Зона півтіні (у ній знаходиться БПЛА №1)

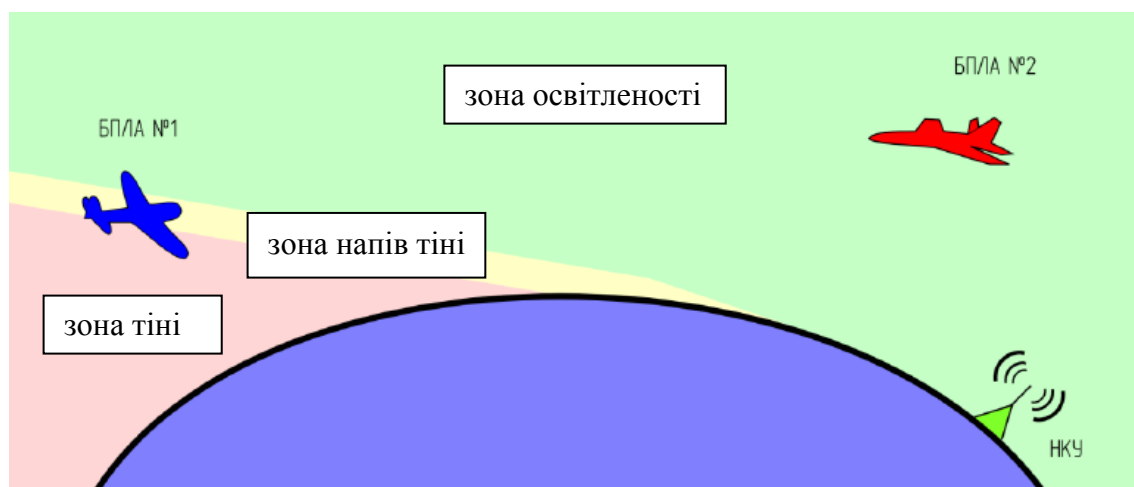


Рисунок 2.1 – Зони повітряного простору  
(НКУ – наземний комплекс управління)

Аналіз розглянутих способів управління безпілотними літальними апаратами в режимі реального часу та радіоканалів для різних класів БПЛА дозволяє систематизувати та відобразити всі існуючі лінії зв'язку БПЛА з кінцевими системами, рис. 2.2.

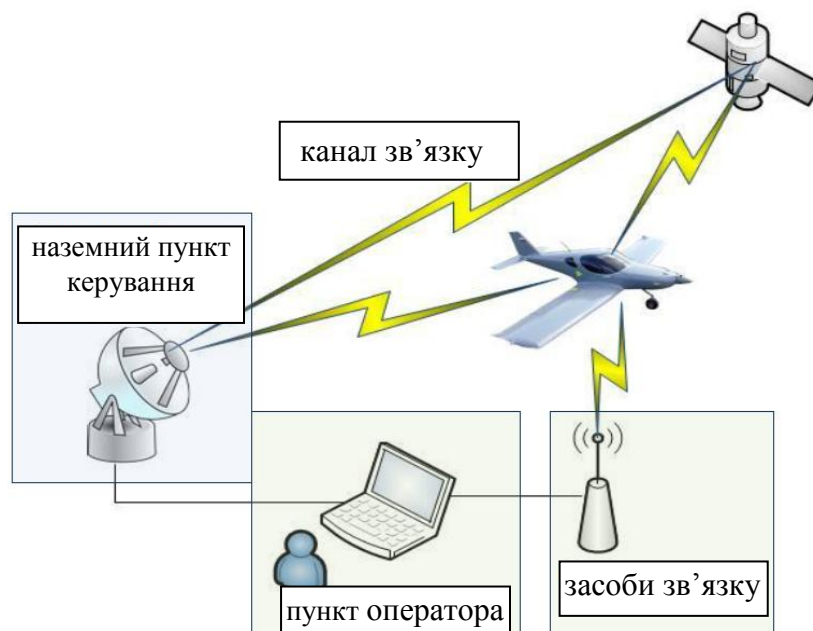


Рисунок 2.2– Оптимальний спосіб курування БПЛА

Отже, електромагнітні впливи, зокрема НКЕВ, можуть впливати на працездатність системи управління БПЛА на кожен із цих каналів зв'язку: наземний пункт керування, автоматизоване робоче місце оператора (АРМ оператора), засоби зв'язку, канал зв'язку.

### 2.3 Аналіз телекомунікаційної системи керування БПЛА

Під час опромінювання БПЛА навмисними електромагнітними хвилями, досягаючи корпусу літального апарату, вони проникають у його внутрішній простір, через апертури конструкції корпусу і через кабелі, що з'єднують

бортове радіоелектронне обладнання. Процес проникнення та поширення НКЕВ у БПЛА розглянуто на рис. 1.4 [14].



Рисунок 2.3– Процес розповсюдження електромагнітних перешкод у внутрішньому просторі БПЛА

Апаратура керування, як правило, використовує спеціалізовані обчислювачі на базі цифрових сигнальних процесорів або комп'ютери формату PC/104, MicroPC під управлінням операційних систем реального часу (QNX, VME, VxWorks, XOberon). Програмне забезпечення пишеться зазвичай мовами високого рівня, від Cі++.

Для передачі на пункт управління відеоданих, отриманих з бортових сенсорів, у складі БПЛА є радіопередавач, що забезпечує радіозв'язок з приймальним обладнанням. Залежно від формату зображень та ступеня їх стиснення пропускна здатність цифрових радіоліній передачі може становити одиниці-сотні Мбіт/с. З іншого боку, до складу бортових радіозасобів БПЛА повинні входити приймачі команд управління, і навіть передавачі службової (телеметричної) інформації [15].

У зв'язку з тим, що НКЕВ має такі особливості як надширокополосність і сумісність сигналу з робочим сигналом пристрою, найчутливішою системою БПЛА до даного випромінювання є телекомунікаційна система, що забезпечує обмін даними як локально між БРЕО, так із наземним пунктом управління.

Телекомунікаційна система, що забезпечує функціонування керуючих систем управлінням БПЛА, складається з пристроїв, між якими здійснюється обмін інформацією за спеціальними протоколами [16].

Системні шини є ефективними засобами обміну даними між різними бортовими пристроями системи керування БПЛА складаються з двох частин – шини адреси та шини даних. Шина даних передає фактичні дані, тоді як інформація адреси передається в шині в тому напрямку, куди ці дані повинні дійти. На шині даних літального апарату ці дві частини включені в межах одного слова даних. Шина може бути або послідовною або паралельною. Послідовна шина вимагає менше електропроводки, але працює повільніше. Паралельна шина вимагає один провід для кожного біта в слові даних, але передача відбувається набагато швидше. У системах шин даних літальних

апаратів, рис. 2.4, використовується паралельна передача даних, тому що вона зводить до мінімуму розмір і вагу кабелю літального апарату. [17]

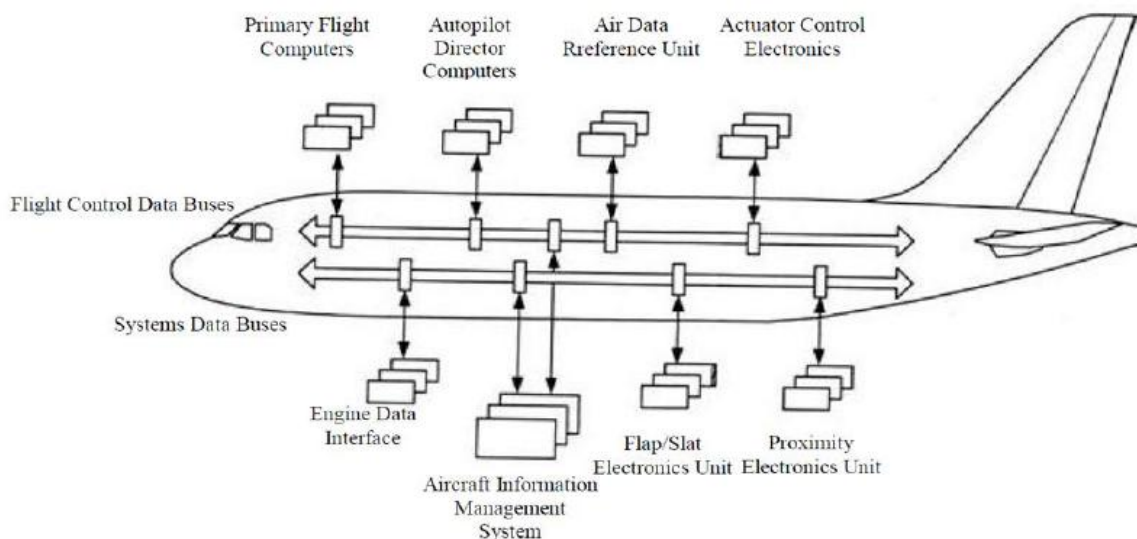


Рисунок 2.4— Розподіл телекомунікаційної системи в межах простору БПЛА

З такою великою кількістю пристроїв у системі управління, сучасні БПЛА потребують значної кількості кабелів. Кабелі літального апарату складають значну частку загальної ваги. Застосування мультиплексування дозволяє пов'язати всі підсистеми лише з одним комплектом дротів.

Мультиплексування має ряд переваг, наприклад, зниження ваги, стандартизація, гнучкість.

Мультиплексування полегшує передачу інформації в потоці даних. Це дозволяє здійснювати передачу кількох джерел сигналу лише у телекомунікаційній системі.

Виходячи з перерахованого вище, перешкоди НКЕВ наводяться в телекомунікаційній системі в основному на вхідні та вихідні сигнальні лінії та шини живлення. Наведені перешкоди залежать від властивостей, робочих сигналів та електричних характеристик.

## 2.4 Висновки за розділом

Проведено аналітичний огляд характеристик існуючих засобів генерації надкоротких електромагнітних імпульсів та особливості їхнього впливу на цифрові пристрої.

3. Проведено аналіз результатів досліджень, який засвідчив, що до цього часу відсутні ґрунтовні роботи в яких проводилися дослідження щодо забезпечення стійкого функціонування телекомунікаційної системи управління БПЛА до впливу НКЕВ.

З проведеного аналізу зроблено висновок щодо необхідності розробки універсального методу тестування стійкості телекомунікаційної системи управління БПЛА за умови впливу НКЕВ.

## 2. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЗВ'ЯЗКУ З БПЛА

### 3.1 Розроблення універсального методу та тестових систем для оцінки стійкості в умовах впливу надкоротких електромагнітних імпульсів

Для розробки універсальних методів та тестових систем необхідно визначити об'єкт дослідження та провести аналіз його характеристик.

Розглянемо склад та призначення бортового обладнання літального апарату.

Польоти безпілотних літальних апаратів нічим не відрізняються від польотів авіації, що пілотується. У процесі виконання польоту, як правило, управління БПЛА здійснюється автоматично або в режимі реального часу через бортове радіоелектронне обладнання.

Бортове устаткування – сукупність технічних засобів, встановлюваних борту ЛА. За своїм призначенням бортове обладнання поділяється на такі групи:

- а) для забезпечення керованості ЛА
  - радіотехнічне обладнання навігації, посадки та управління повітряним рухом;
  - електротехнічне обладнання;
  - пілотажно-навігаційне обладнання;
  - система охолодження ЛА;
  - радіозв'язкове обладнання;
  - засоби контролю силової установки;
  - світлотехнічне обладнання;
  - гідравлічне обладнання;
  - бортові інформаційні системи – системи відображення інформації, системи сигналізації тощо;

б) для забезпечення безпеки польотів

- протипожежна система;
- протиобмерзаюча система;

в) для вирішення цільових завдань відповідно до призначення ЛА

- розвідувальне обладнання;
- оглядово-прицільний комплекс тощо.

Структурно апаратура, машини та агрегати на борту ЛА об'єднуються у системи, призначені для вирішення окремих завдань. Навіть на невеликому ЛА їх десятки. Окремі системи можуть об'єднуватися у більші структурні – комплекси. Комплекс бортового обладнання - сукупність функціонально-зв'язкових систем, приладів, датчиків, обчислювальних пристроїв. Приклади комплексів: пілотажно-навігаційний, оглядово-прицільний, розвідувальний. Система управління безпілотного літального апарату забезпечує управління та взаємодію між комплексами, що входять до БПЛА, або системами.

Все радіоелектронне обладнання ЛА, незалежно від приналежності до тієї чи іншої з цих груп, часто називають авіонікою. Бортові інформаційні системи також належать до цієї групи устаткування.

У складі бортового обладнання опційно-пілотованого комплексу входять:

- антенна система, що включає приймальний пристрій;
- автоматизована система керування;
- супутниково-навігаційний пристрій, що забезпечує прийом навігаційної інформації від систем ГЛОНАСС та GPS;
- виконавча система;
- система датчиків, що забезпечує визначення орієнтації та параметрів руху БПЛА, вимірювання висоти та повітряної швидкості;
- система передачі зображень;
- система реєстрації часу.

Автоматизована система управління забезпечує:

- політ по заданому маршруту (завдання маршруту проводиться із зазначенням координат та висоти поворотних пунктів маршруту);
- зміна маршрутного завдання або повернення до точки старту за командою з наземного пункту управління;
- обліт зазначеної точки;
- автосупровід обраної мети;
- стабілізацію кутів орієнтації БПЛА;
- підтримку заданих висот та швидкості польоту (шляхової чи повітряної);
- збір та передачу телеметричної інформації та параметрів польоту та роботи корисного навантаження та спецобладнання;
- програмне керування пристроями корисного навантаження.

Антенна система:

- функціонує у дозволеному діапазоні радіочастот;
- забезпечує передачу даних з борту на АРМ та з АРМ на борт.

Дані, що передаються з борту на АРМ:

- параметри телеметрії;
- потокове відео- та фотозображення.

Дані, що передаються на борт, містять:

- команди управління БПЛА;
- команди управління корисного навантаження [18].

На рис. 3.1 зображено компонування бортового обладнання всередині опціонно-пілотованого комплексу.

Аналіз, проведений у розділі 1 та 2, показав, що найбільш чутливою до дії НКЕВ є телекомунікаційна система (ТКС) управління. ТКС управління призначена для передачі та обробки даних БРЕО.

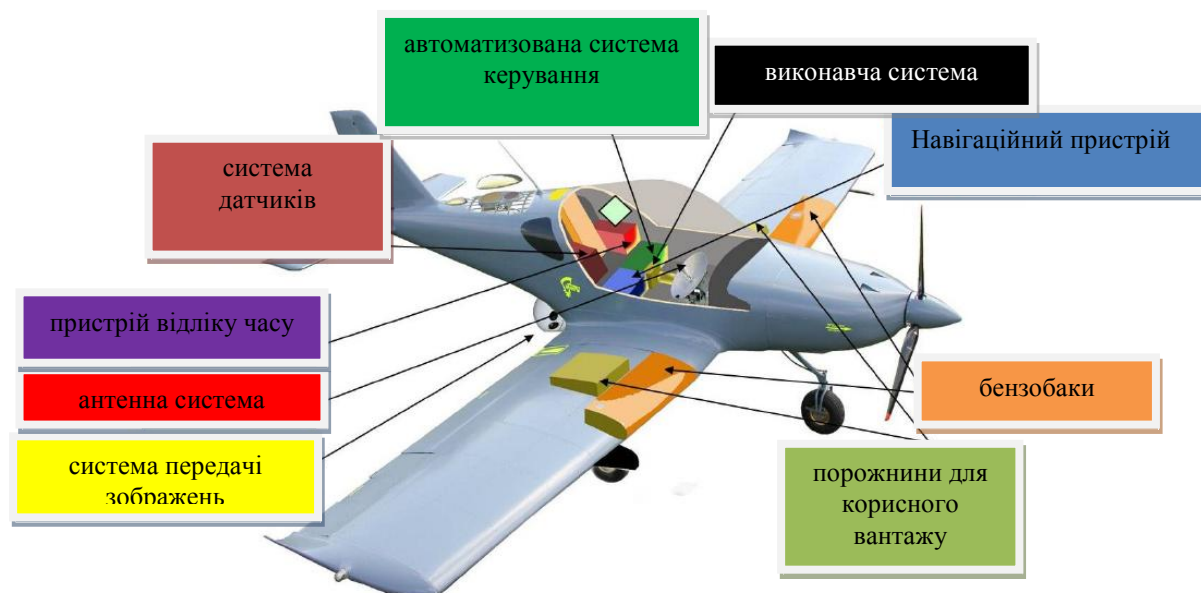


Рисунок 3.1 – Структура розташування бортового радіо-електронного обладнання БПЛА

Оскільки під час розгляду оцінки стійкого функціонування БПЛА до впливу надкоротких електромагнітних імпульсів необхідно враховувати сумісність тривалості імпульсів, що впливають з тривалістю інформаційних сигналів, тим самим оцінювати спотворення інформації, що передається по каналах зв'язку та обробляється ТКС.

Структурна схема ТКС управління літального апарату зображена на рис. 3.2.

Розглянемо основні пристрої ТКС для прийому, передачі та обробки даних.

Автоматизована система керування, в основі якої лежить обробка даних датчиків, команд пілота-оператора. А також управління та одночасне виконання поточної встановленої до старту програми польоту. При цьому оператор може змінювати раніше запрограмовані режими польоту залежно від оперативної обстановки, що склалася, і тим самим коригувати дані польотного завдання.

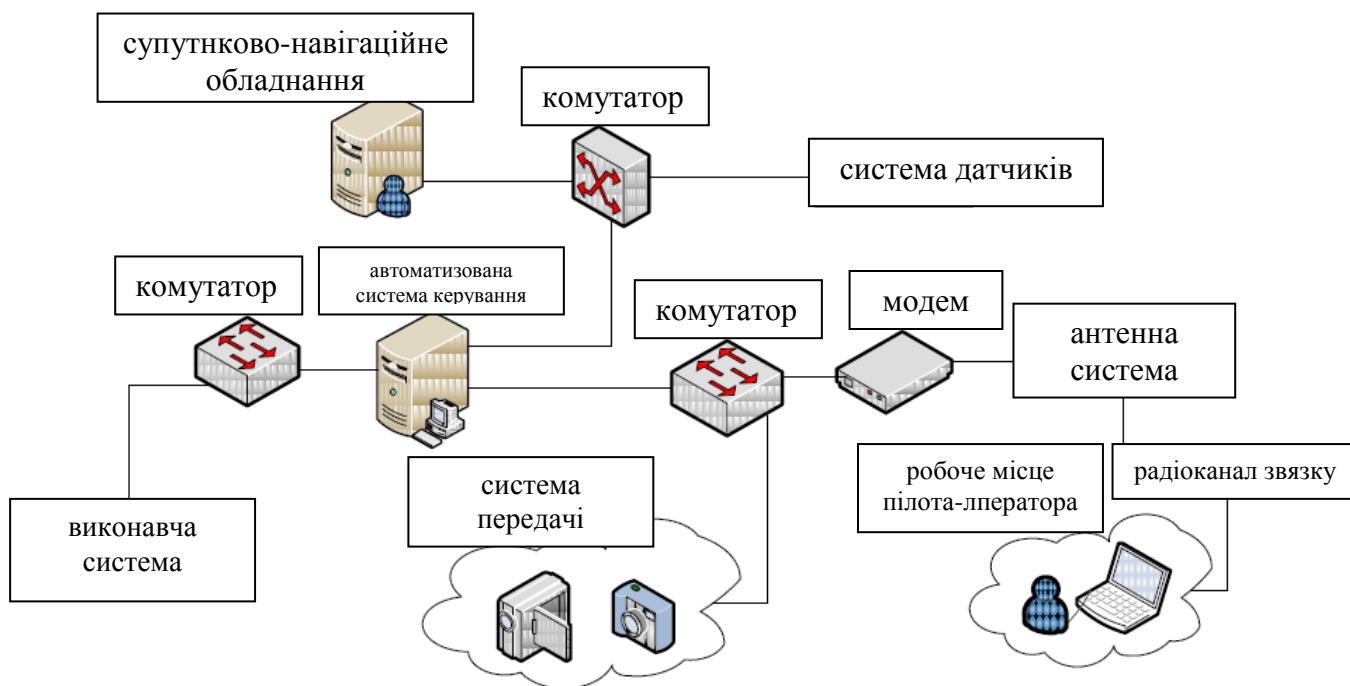


Рисунок 3.2 – Структурна схема телекомунікаційної системи керування БПЛА

Управління відбувається за командами, що надходять з автоматизованої системи управління у вигляді завдання бажаного положення сервоприводу та швидкості, з якою має прийти сервопривід до цього положення.

Також існують групи команд для опитування стану виконавчої системи та стану сервоприводу та група команд налаштування.

Основне призначення системи датчиків – прийом інформації з аналогових та цифрових датчиків первинної інформації, її математичної обробки з отриманням одного або кількох параметрів у необхідному вигляді, підготовка до видачі даних параметрів та їх видача на запит з автоматизованої системи управління.

Супутниково-навігаційний пристрій призначений для обчислення поточних координат та швидкості об'єкта в реальному масштабі часу в

автономному та диференціальних режимах, формування секундної мітки часу та обміну із зовнішнім обладнанням.

На рис. 3.3 зображено центральну плату навігаційного устаткування.



Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд центральної плати навігаційного обладнання

### **3.2 Критерії оцінки стійкості функціонування телекомунікаційної системи управління БПЛА за умови впливу НКЕВ**

Тестування телекомунікаційної системи управління БПЛА здійснюється з використанням критеріїв функціонування ТКС та її пристроїв на етапі стендових та льотних випробувань.

У період навмисного електромагнітного впливу та після його припинення ТКС та її пристрої системи управління БПЛА повинні продовжувати функціонувати відповідно до призначення без втручання оператора (нормальне функціонування в польоті).

Після припинення навмисного електромагнітного впливу ТКС та її пристрої системи управління БПЛА повинні продовжувати функціонувати відповідно до призначення без втручання оператора. Не допускається погіршення робочих характеристик допустимих нормованих рівнів.

Нормований рівень робочих характеристик ТКС можна замінити допустимими втратами якості функціонування.

У період навмисного електромагнітного впливу допускається незначне погіршення робочих характеристик з подальшим відновленням до нормального рівня без втручання оператора, які призводять до відмови одного з пристроїв ТКС. Однак не допускається припинення виконання встановленої функції або зміни даних, що зберігаються після тестування.

Припинення виконання ТКС встановленої функції, що призводить до відмови ТКС або одного з її пристроїв, навіть якщо її можна відновити за допомогою операцій управління, що виконуються оператором відповідно до технічної документації.

### **3.3 Оцінка критеріїв відмови стійкого функціонування БПЛА за умов впливу НКЕВ**

Для того щоб зробити висновки про ступінь стійкості при тестуванні ТКС управління БПЛА під час впливу надкороткого електромагнітного випромінювання необхідно визначити критерії працездатності, або критерії відмови для чіткого виявлення коли він здатний виконувати своє завдання і функціонувати в заданих умовах, а коли ні. А також встановлення відповідного деякого граничного значення характеристики випромінювання НКЕВ, що ще не призводить до відмови

Під відмовою розуміється будь-яке відхилення функціонування БПЛА від заданої програми, тобто відмова вузла або елемента, що призводить до припинення його функціонування, видачі хибної команди, збою, несанкціонованого спрацьовування та електричного пробою (навіть короткочасного).

Визначальною причиною відмов БПЛА при електромагнітному впливові є струми і напруги, що наводяться в їх ланцюгах [19].

До відмови всього аналізованого безпілотного літального апарату в нормальній електромагнітній обстановці призводить відмова однієї з наступних систем,:

- 1) супутниково - навігаційний пристрій;
- 2) система датчиків;
- 3) виконавча система;
- 4) автоматизована система управління.

Підвищені вимоги до відмовостійкості пред'являються до обладнання БПЛА, що здійснює навігацію та літаководіння, що забезпечує режими ручної посадки (якщо це необхідно), до сервоприводів та забезпечує надійність комплексу БПЛА в цілому. Вихід з ладу будь-якої зазначеної системи призводить до припинення виконання льотного завдання та повернення ЛА на базу.

Чим менше потужність електричних сигналів, що використовуються при функціонуванні об'єкта, тим більше він схильний до впливу НКЕВ. Зокрема, це можна віднести до електронних пристроїв, які містять напівпровідникові елементи з робочим рівнем порядку одиниці вольт. Специфіка впливу НКЕВ полягає у наведенні в цифрових схемах коротких електричних імпульсів, за амплітудою та тривалістю, близьких до робочих імпульсів. Сполучні дроти плат і міжблочні комунікації виступають у якості приймальних антен. Наведені сигнали під час логічної обробки приймаються за команди, що порушує роботу цифрових пристроїв. Що стосується аналогових електронних схем, з великим рівнем сигналів, то наведений короткий сигнал НКЕВ, як правило, інтегрується в її ланцюгах і амплітуда наведеної напруги мала.

Виходячи з цього, враховуючи робочі рівні напруги та струмів систем електропостачання та сервоприводів безпілотного літального апарату, можна стверджувати, що вони є стійкими до впливу НКЕВ.

### **3.4 Дослідження особливостей впливу НКЕВ на телекомунікаційні системи управління БПЛА**

Згідно з функціями, що виконуються, і значущості в телекомунікаційній системі найбільш критичним відмовою БПЛА в умовах навмисного впливу є відмова автоматизованої системи управління.

В основі автоматизованої системи управління лежить обробка даних датчиків, команд оператора управління та одночасно виконання поточної програми польоту, встановленої до старту. Також втручання оператора, залежно від оперативної обстановки, що склалася, в процес управління польотом і переходу на «ручне» управління в режимі реального часу робить її найбільш вразливою до НКЕВ.

Автоматизована система управління, що складається в основному з елементів мікроелектроніки, є найбільш уразливою до впливу потужного електромагнітного випромінювання. При виході її з ладу чи видачі спотвореної інформації БПЛА втрачає орієнтир та управління, тим самим не здатний виконати своє завдання.

При цьому слід мати на увазі, що навіть для тих елементів і вузлів ТКС, корпуси яких можуть виконувати роль електромагнітних екранів, електромагнітні імпульси будуть деструктивно впливати через сполучні лінії та роз'єми. Отже, усі види структурних кабельних мереж, що є у бортовому комплексі, відіграють роль колекторів небезпечної енергії. Наведені в провідниках струми та напруги можуть призвести як до збою підключених до провідників пристроїв, так і до електричного пробоя, якщо в них є чутливі до

перенапруги елементи [20]. Небезпеку для елементів системи управління становлять порівняно низька електрична міцність та висока чутливість до електричних перешкод [21].

Дослідження показали, що в загальному випадку факторами, що впливають, на елементи ТКС при впливі НКЕВ є:

- електромагнітні поля, що проникають через екрани конструкцій елементів та сполучні роз'єми;
- імпульсні напруги та струми в друкованих платах елементів ТКС, що наводяться електромагнітними полями, що проникають через неоднорідності корпусів серверів та маршрутизаторів;
- імпульсні напруги та струми, що наводяться в ланцюгах «екран-жила» сполучних кабелів та проводів, таких як кручена пара.

Отже, критерієм відмови центральної плати є перевищення допустимих рівнів наведених струмів та напруг під впливом надкоротких електромагнітних імпульсів.

Для визначення очікуваних критеріальних рівнів впливу НКЕВ на елементи системи управління необхідно розглянути особливості впливу деяких параметрів НКЕВ.

*Вплив амплітуди напруги електричного поля.* Усі енергетичні ефекти впливу НКЕВ пропорційні квадрату амплітуди. Результат дії, пов'язаний з електричною міцністю елементів системи керування, пропорційний амплітуді сигналу. Оскільки поле випромінювача в дальній зоні обернено пропорційне відстані, а дальність дії засобів генерації прямо пропорційно амплітуді випромінюваного сигналу.

*Вплив тривалості фронту НКЕВ.* Для імпульсного сигналу з фронтом  $\tau$  верхня гранична частота його спектра (на рівні 3 дБ) оцінюється співвідношення  $f_{гп}=0,35/\tau$ . Отже, скорочення фронту лінійно розширює спектральну густину сигналу в області високих частот, розширюючи частотний

діапазон впливів. Наприклад, при  $\tau=100$  пс ефективність впливу випромінювання поширюється до частоти 10 ГГц.

Напруженість поля, що проникає через отвір у корпусі БПЛА, пропорційна похідної від падаючого НКЕВ, тобто. обернено пропорційна тривалості фронту. Якщо говорити про проникність у всередину енергії, то вона також пропорційна крутості фронту.

*Вплив тривалості імпульсу НКЕВ.* Зміни логічного стану сигналу спостерігається, коли тривалість надкороткоімпульсного випромінювання набагато менша періоду тактових імпульсів мікросхеми пристрою [22].

*Вплив частоти проходження імпульсів НКЕВ.* Істотний вплив при інформаційному впливові на ланцюги системи управління та елементи мікроелектроніки, що передають цифрові сигнали, має частота слідування імпульсів. При достатній частоті наведених електричних імпульсів у ланцюгах системи управління з рівнем одиниці вольт, зростає ймовірність появи хибних сигналів, що порушують роботу системи управління [23].

### **3.5 Визначення мінімально допустимих рівнів НКЕВ, що впливають на стійкість телекомунікаційних пристроїв системи управління**

Можна виділити реакції на певні критеріальні рівні впливу НКЕВ та наведені струми та напруги. Докладніше розглянемо деякі з них.

#### **1. Енергонезалежна пам'ять.**

Напруга живлення сучасних мікросхем становить від 3 до 5В, а залежно від технології мікросхеми, завадостійкість за рівнем логічного "0" і "1" лежить в межах від 0,8 до 2,5 В.

Опроміненню НКЕВ з формою імпульсу зображеного на рис 3.4 були піддані мікросхеми AT28C64В (напруга живлення 5 В.) виробництва ATMEL,

карти пам'яті SD і mSD ємністю 1024 МБ (напруга живлення 3 В) виробництва Kingston та Transcend, а також побутові аудіо- та відеозаписувальні пристрої.



Рисунок 3.4 – Осцилограма тестового імпульсу

У процесі експерименту було отримано такі результати:

- при рівнях впливу від 40 до 70 кВ/м та тривалістю 500 пс на підставі імпульсу мікросхема має високу здатність збереження заздалегідь внесеної інформації;

- електромагнітний імпульс з амплітудою напруженості поля 10-30 кВ/м начать виявлятися спотворення в картах пам'яті SD і mSD у включеному аудіо-відеопристрої (запитаному), рис. 3.5;

- при опроміненні 3 хв і більше при рівні дії 1 кВ/м відбувається зависання пристрою;

- ефективний вплив на пристрої неспеціального призначення у стані виконання функції робочої групи починається із напруженості електричного поля 10 кВ/м і більше;

- при напруженості поля  $E=10$  кВ/м, тривалості імпульсу  $\tau=100$ пс наведені напруги і струм рівні відповідно значення 9 і 0,2А.



Рисунок 3.5 – Амплітудно-часова характеристика карти пам'яті після опромінення НКЕВ

## 2. Ethernet.

Розглядається специфікації 100Base-TX, в якості фізичного середовища передачі використовувалася екранована кручена пара категорії 5. При напруженості 0,5-1 кВ/м спостерігаються помилки в роботі локальної мережі, при рівні поля 6 кВ/м тимчасове порушення роботи, а за рівня понад 12 кВ/м відбувалося руйнування апаратного забезпечення. Експериментально встановлено, що при напруженості електричного поля 12 кВ/м в неекранованій кручений парі наводилося напруга до 90 В і спостерігалася втрата зв'язку.

На рис 3.6 представлені результати зниження продуктивності мережі Ethernet залежно від частоти проходження надширокосмугових імпульсів.

На рис. 3.7 наведено залежності параметрів імпульсних перешкод у лінії зв'язку (амплітуди та частоти прямування імпульсів), що періодично повторюються. Під дією зазначених імпульсів відбувається відмова активного мережевого обладнання.

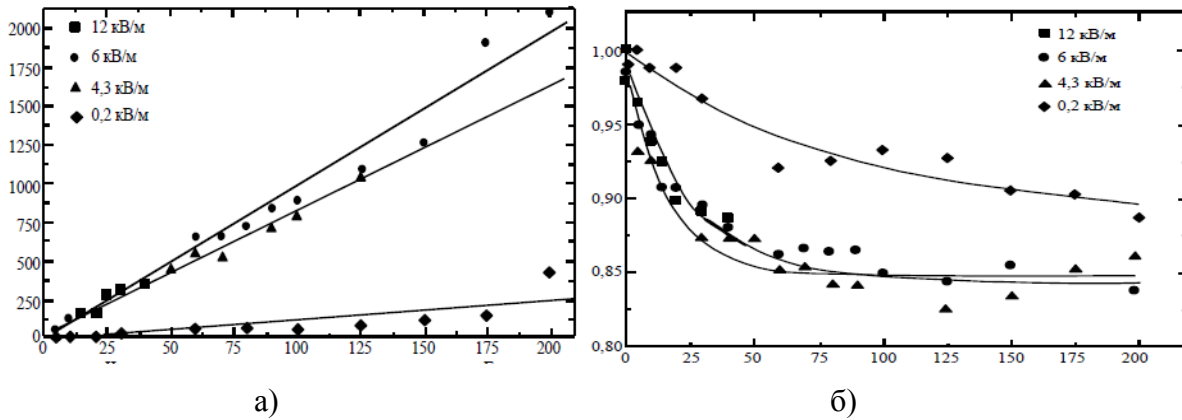


Рисунок 3.6 – а) залежність числа втрачених блоків від частоти повторення імпульсів завади; б) зниження готовності мережі зв'язку

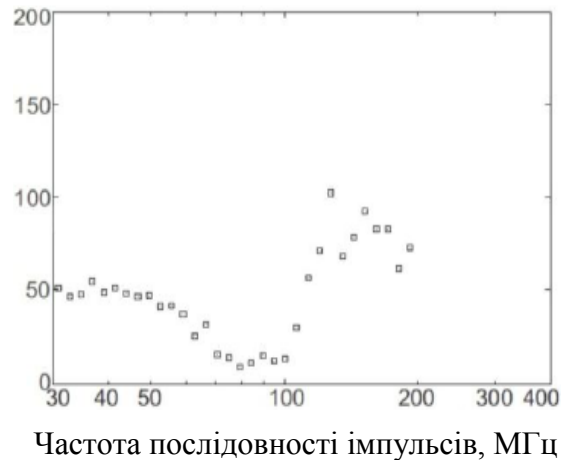


Рисунок 3.7 – Залежність амплітуди згенерованих імпульсів від частоти послідовності, за якої відбувається відмова обладнання

Отже, концентратор Ethernet найбільш вразливий до синфазних струмів  $\geq 10$  мА при частоті проходження імпульсів близько 80 МГц.

У магістерській роботі було отримано такі результати:

- довжина кадру - 1024 байти;
- тривалість імпульсної перешкоди – 120 нс (для Fast Ethernet та Gigabit Ethernet) та 600 нс (для 10 Gigabit Ethernet);

- частота повторення імпульсів – 30 кГц (для Fast Ethernet та Gigabit Ethernet) та 100 кГц (для 10 Gigabit Ethernet).

- за умови частоти повторення імпульсів 1 МГц і амплітуді напруженості електричного поля до 400 В/м НКЕВ деструктивно впливає на процес передачі в мережах Fast і Gigabit Ethernet;

- рівні наводок на навантаженні мережного інтерфейсу при якому відбувається руйнування мережного з'єднання становлять до 6 В при ємнісній інжекції та 12 В при індуктивній інжекції та тривалості імпульсів до 200 нс

В області частот від 10 до 500 кГц втрати кадрів починають зростати тільки коли амплітуда впливу починала перевищувати деяку граничну величину. Для стандарту Fast Ethernet ця величина дорівнює 2,6, для Gigabit Ethernet - 5, для 10 Gigabit Ethernet - 2,2 В. Також було відзначено, що залежність збільшення втрат кадрів від частоти повторення імпульсів перешкоди рівнозначна залежності від тривалості імпульсу перешкоди.

### **3.6 Визначення уразливих електронних частин БПЛА від дії зовнішнього опромінювання**

Враховуючи віддаленість джерела генерації НКЕВ від безпілотного літального апарату у разі навмисного впливу, розглянемо напруженість поля всередині БПЛА та електромагнітне екранування у дальній зоні.

Будь-яке проникнення всередину конструкції БПЛА здійснюється через:

- провідники та кабелі, що з'єднують зовнішнє та внутрішнє бортове радіоелектронне обладнання;

- ділянки поверхні корпусу БПЛА.

Напруженість поля, потрапляючи на поверхню корпусу ЛА, частково відбиваючись, потрапляє у внутрішній простір. Напруженість електричного і магнітного поля всередині корпусу розраховуються за формулами:

$$E_r = \frac{2E_0 r_0^3}{3\pi r^2} \cos \theta, \quad E_\theta = \frac{2E_0 r_0^3}{3\pi r^2} \sin \theta, \quad (3.1)$$

де  $E_0$  - електрична напруженість пласкої хвилі, що падає,

$E_\theta$  - тангенційна складова електричного поля,

$r_0$  - радіус отвору,

$r$  - відстань до джерела випромінювання,

$\theta$  - полярний кут.

$$H_r = \frac{2H_0 r_0^3}{3\pi r^2} \sin \varphi \sin \theta, \quad H_\varphi = \frac{2H_0 r_0^3}{3\pi r^2}, \quad H_\theta = \frac{2H_0 r_0^3}{3\pi r^2} \sin \varphi \cos \theta, \quad (3.2)$$

де  $H_0$  - магнітна напруженість плоскої хвилі, що падає,

$H_\theta$  - тангенційна складова магнітного поля,

$H_\varphi$  - азимутальна складова магнітного поля,

$\varphi$  - азимутний кут.

Розглянемо оцінку ефективності екранування неоднорідного екрану для джерела, що впливає об'єкт.

Ефективність екранування залежить від властивостей корпусу БПЛА, таких як конструктивні особливості екрану та матеріал з якого він виготовлений. Вважаємо ефективність екранування, яка складається з ефективності суцільного екрану та ефективності екранування для круглих отворів.

Загалом ефективність екранування неоднорідного екрану описується формулою

$$S_{ap} = A_{ap} + R_{ap} + B_{ap} + K_{ap1} + K_{ap2} + K_{ap3}, \text{ дБ}, \quad (3.3)$$

де  $A_{ap}$  – втрати на поглинання одиночної апертури;

$R_{ap}$  – втрати на відображення одиночної апертури;

$B_{ap}$  – поправочний коефіцієнт відбиття одиночної апертури;

Формула враховує вплив розташування великої кількості отворів на одиницю площі  $K_{ap1}$ , зміна товщини скін-шару на низьких частотах  $K_{ap2}$  та ефект близькості отворів на високих частотах  $K_{ap3}$ .

1) для суцільного екрану.

$$S_l = A + R \quad (3.4)$$

Співвідношення (3.4) визначає ефективність екранування суцільного екрану. Параметри ефективності визначаються так:

$$A = 131,4 \cdot t \cdot \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma_r} \quad (3.5)$$

$$R = 108,1 - 10 \cdot \lg \left( \frac{\mu_r \cdot f}{\sigma_r} \right) \quad (3.6)$$

де,  $A$  - втрати на поглинання, дБ;

$R$  - втрати на відбиття, дБ.

$$A_{ap} = 32 \frac{t}{D}, \quad R_{ap} = 102 - 20 \lg(D \cdot f), \quad B_{ap} = 20 \lg(1 - 10^{-A_{ap}/10}), \quad (3.7)$$

$$K_{av1} = 10 \lg(an), \quad (3.8)$$

де  $a$  – площа одного отвору,  $\text{см}^2$ ,

$n$  – кількість отворів на  $1 \text{ см}^2$ .

$$K_{ap2} = 20 \lg(1 + 35p^{-2,3}), \quad (3.9)$$

де  $p = \frac{c_w}{\delta}$  - коефіцієнт, що враховує розмір скіншару у відстані між

отворами;

Враховуючи, що  $\delta = \frac{0,0066}{\sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \sigma_r}}$ , товщина скін-шару становитиме:

$$p = \frac{\sqrt{c_w^2 \cdot f \cdot \mu_r \cdot \sigma_r}}{0,0066}$$

Тоді коефіцієнт стає значущим при  $p < 20$  де частота, нижче за яку слід враховувати  $K_{ap2}$  визначається за формулою:

$$f < \frac{0,017}{c_w^2 \cdot \mu_r \cdot \sigma_r}, \text{ МГц.}$$

Для обчислення загальної ефективності екранування використовуємо наступну формулу:

$$S_{\text{общ}} = \frac{1}{10^{S_1/20}} + \frac{1}{10^{S_2/20}} \quad (3.10)$$

На підставі наведеного аналізу рівнів НКЕВ на різні пристрої та системи телекомунікації, розрахунку ефективності екранування корпусу [84] БПЛА визначаємо мінімально допустимі рівні НКЕВ необхідні для початкового тестового впливу для оцінки стійкості ТКС управління опційно-пілотованого комплексу.

З літературних джерел відомо, що частотна смуга від 0,03 до 3 ГГц перекриває кілька частотних діапазонів:

- 3 – 30 МГц - радіомовлення, радіозв'язок, рації;
- 30 – 300 МГц - телебачення, радіомовлення, радіозв'язок, рації;
- 0,3 – 3 ГГц – телебачення, радіозв'язок, мобільні телефони, рації, супутникова навігація;
- 3 – 30 ГГц радіолокація, інтернет, супутникове телебачення, радіозв'язок, бездротові комп'ютерні мережі.

### **3.7 Автоматизація процесу тестування стійкості безпілотного літального апарату до впливу НКЕВ**

В рамках виконання кваліфікаційної роботи магістра пропонується автоматизувати процес тестування стійкості безпілотного літального апарату до впливу НКЕВ. Метод включає стеження за безпілотним літальним апаратом у повітряному просторі в режимі реального часу, збору та обробки вихідних даних про його місцезнаходження, а також визначення допустимих рівнів струмів і напруг, що наводяться в чутливих вузлах телекомунікаційної системи при заданому впливові, та реєстрації перевищення цих рівнів .

При виявленні БПЛА у просторі визначаються такі характеристики:

- координати ( $X_g$ ,  $Y_g$ ) розташування;
- азимут ( $\varphi$ );
- висоту над рівнем моря ( $h$ );
- відстань щодо тестової системи ( $r$ );
- швидкість ( $v$ );
- прогнозований подальший курс.

Далі формуються вихідні дані, що складаються з:

- навігаційних параметрів БЛА;
- електричних характеристик найбільш уразливого елемента системи управління до впливу НКЕВ.

На основі отриманих даних визначаються критеріальні рівні випромінювання НКЕВ, при яких не виявляється відмова вразливого елемента системи управління, але досягається вплив електричних характеристик при дії в межах нормованих, а також, відповідно до прогнозованого напрямку курсу БПЛА піддається випромінюванню.

На підставі отриманих даних від датчиків, що знаходяться на БПЛА, що фіксують перевищення струмів і напруг у ланцюгах системи управління,

приймається рішення про можливе збільшення параметрів випромінювання до перших змін характеристик ТКС, відмінних від нормованих [70,71].

На підставі аналізу можливих реакцій, що виникають в електричних ланцюгах пристроїв ТКС у процесі впливу, а також вихідних даних про конструкцію матеріалів та комплектуючих елементів визначаються можливі види відмов та оцінюються наслідки, до яких вони можуть призвести в системі управління. Тим самим проводиться оцінка стійкого функціонування бортового обладнання та виявлення критичних режимів роботи системи управління для розробки рекомендацій щодо захисту її від НКЕВ.

Оскільки сучасні літальні апарати виготовляються з композитних матеріалів, використання яких збільшує ширину спектра відбитого сигналу, їх виявлення звичайними засобами радіолокації представляє певну складність.

Як засіб сканування простору і виявлення безпілотного літального апарату запропоновано використовувати радіолокаційні системи на основі зверх коротких імпульсів (ЗКІ), як показано в роботах [23] такі системи мають наступні переваги, відмінні від звичайних РЛС:

- відсутність несучого коливання,
- дуже коротка тривалість (одиниці та частки наносекунд) і, відповідно, дуже широка смуга частот;
- період ЗКІ значно менший за час релаксації існуючих матеріалів;

На рис. 3.8 показаний один із варіантів виконання схеми, що реалізує запропонований метод.

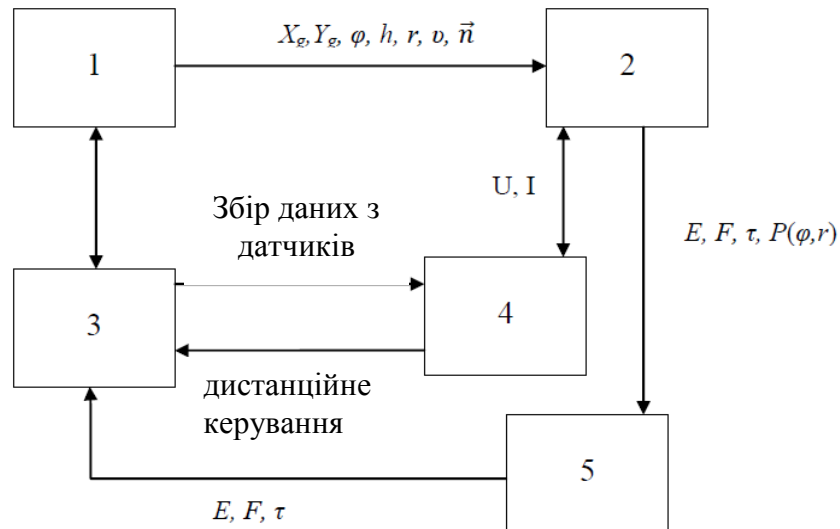


Рисунок 3.8 – Блок-схема запропонованого методу. 1 - пристрій виявлення БПЛА; 2 – АРМ управління комплексом випромінювання; 3 – БПЛА; 4- АРМ керування БПЛА та збору даних з датчиків з наземним пунктом управління; 5- комплекс випромінювання

- гарне проходження ЗКІ крізь перешкоди (крізь стіни), що дозволяє говорити про таку можливість, як бачити об'єкти крізь стіни;
- висока перешкодозахищеність по відношенню до пасивних перешкод, що дозволяє їх використовувати в системі селекції цілей, що рухаються.

Наземний пункт управління та АРМ управління БПЛА й збору даних з датчиків призначені для:

- дистанційного керування БПЛА;
- збирання даних з датчиків;
- визначення реакції системи управління на вплив завади;
- виявлення вразливого елемента;
- оцінка наводок у вразливому елементі;
- аналіз функціональності вразливого елемента.

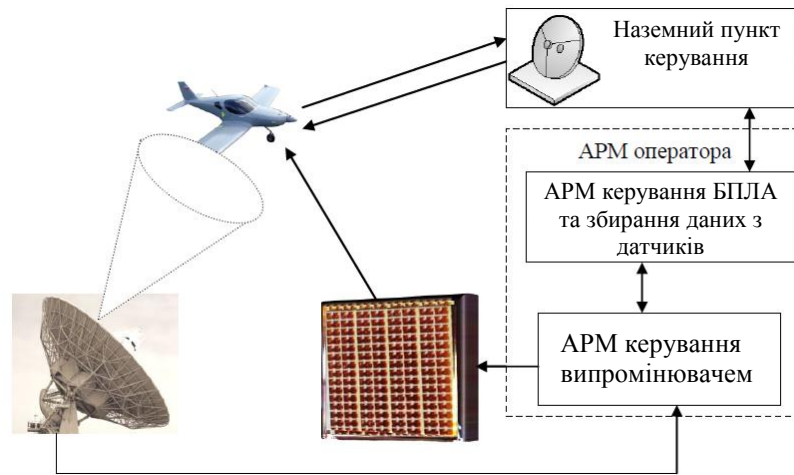


Рисунок 3.9 – Структурна схема методу тестування стійкої роботи БПЛА

### 3.8 Шляхи знаходження поля випромінювання щодо БПЛА

Знаходження поля випромінювання комплексу генерації зводиться до підсумовування кожного рупора в часовій області. У цьому випадку рупор представлений сумою елементів випромінювання у вигляді V-подібних антен, рисунок 3.10, напруженість електричного поля від кожної з них розраховується методом заданих струмів. [24]

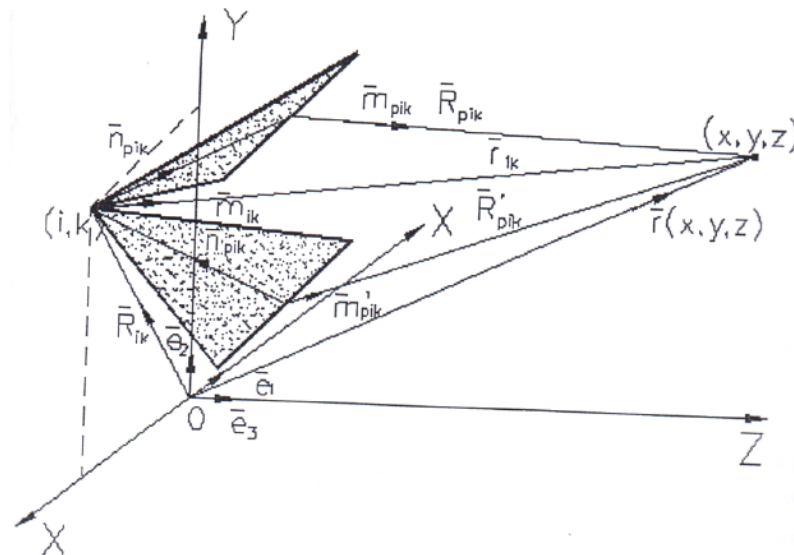


Рисунок 3.10 – Геометрія V-подібного елемента комплексу випромінювання

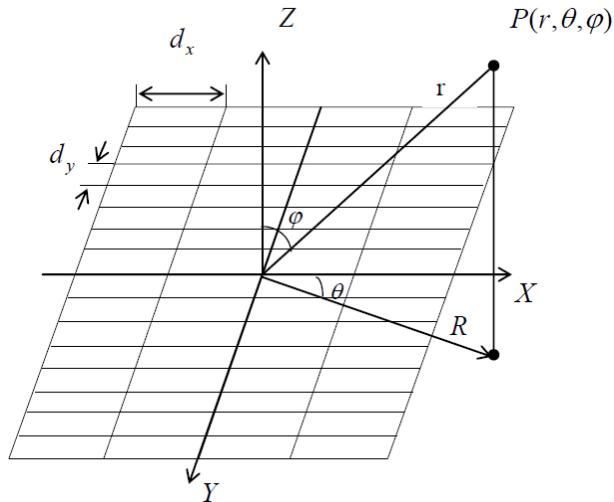


Рисунок 3.11 – Багатоканальний комплекс в площині X-Y

Вектор  $P(r, \theta, \varphi)$  характеризує розташування максимального антенного променя ґратки у просторі на дальності  $r$ , азимуті  $\varphi$  та куті місця  $\theta$ .

У напрямку осі X комірка має  $N_x = 4$  елементів - стовпців, розташовані паралельним способом з відривом  $d_x$  друг від друга. У напрямку осі Y розміщені  $N_y = 16$  елементів у вигляді паралельних рядків на відстань  $d_y$ . Загальна кількість елементів решітки дорівнює  $N_x \cdot N_y = 64$  [19]. У кожному рупорі розміщується чотири елементарні випромінювачі. Тим самим напруженість одного елемента випромінювання у точці спостереження з координатами  $(x, y, z)$  визначається формулою

$$\vec{E}_{p,i,k} = -\frac{\eta_0}{4\pi} \left\{ \frac{J_p(t - r_{ik}/c)}{r_{ik}} \left( \frac{\vec{n}_{p,i,k} - \vec{m}_{i,k}}{1 - \vec{m}_{i,k} \cdot \vec{n}_{p,i,k}} + \frac{\vec{n}_{p,i,k} + \vec{m}_{i,k}}{1 + \vec{m}_{i,k} \cdot \vec{n}_{p,i,k}} \right) \right\} -$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{J_p(t-l_p/c - R_{p,i,k}/c)}{R_{p,i,k}} \left( \frac{\vec{n}_{p,i,k} - \vec{m}_{i,k}}{1 - \vec{m}_{i,k} \cdot \vec{n}_{p,i,k}} + f \frac{\vec{n}_{p,i,k} + \vec{m}_{i,k}}{1 + \vec{m}_{i,k} \cdot \vec{n}_{p,i,k}} \right) - \\
& - \frac{J_p(t-l_p/c - R'_{p,i,k}/c)}{R'_{p,i,k}} \left( \frac{\vec{n}_{p,i,k} + \vec{m}_{i,k}}{1 + \vec{m}_{i,k} \cdot \vec{n}_{p,i,k}} + f \frac{\vec{n}_{p,i,k} - \vec{m}_{i,k}}{1 - \vec{m}_{i,k} \cdot \vec{n}_{p,i,k}} \right) + \\
& + f \frac{J_p(t-2l_p/c - r_{ik}/c)}{r_{ik}} \left( \frac{\vec{n}_{p,i,k} - \vec{m}_{i,k}}{1 - \vec{m}_{i,k} \cdot \vec{n}_{p,i,k}} + \frac{\vec{n}_{p,i,k} + \vec{m}_{i,k}}{1 + \vec{m}_{i,k} \cdot \vec{n}_{p,i,k}} \right) \Bigg\},
\end{aligned}$$

де  $R_{p,i,k}$  – радіус-вектор, що з'єднує початок координат з точкою збудження осередку з номерами  $i,k$  обчислюється за формулою:

$$\vec{R}_{p,i,k} = d_x(0.5(N_x + 1) - i) + d_y(0.5(N_y + 1) - k), \quad (3.11)$$

де,  $p$  – номер V-подібної антени;

$N_x = -2dx, -dx, dx, 2dx$  – число рупорів по горизонталі;

$N_y = -8dy, \dots -dy, dy, \dots 8dy$  – число рупорів по вертикалі;

$i$  – номер стовпця,  $1 \leq i \leq N_x$ ;

$k$  – номер рядка,  $1 \leq k \leq N_y$ ;

$\vec{n}_{p,i,k} = \sin(f(p))\vec{e}_1 + \cos(f(p))A\vec{e}_3 + \cos(f(p))A\vec{e}_2$  – одиничні вектори вздовж дроту

номера  $p$  у комірці  $i,k$ ;

$\vec{n}'_{p,i,k} = -\sin(f(p))\vec{e}_1 - \cos(f(p))A\vec{e}_3 + \cos(f(p))A\vec{e}_2$  – одиничні вектори вздовж

зворотного дроту номера  $p$  у комірці  $i,k$ ;

$A$  – половина кута розкриття кожного з рупорів;

$f(p) = \frac{A}{N}(2p-1-N)$  – кут, що припадає на кожну з дротів комірки;

$N$  – кількість проводів, що замінюють площину рупору;

$l_p = \frac{l_0}{\cos(f(p))}$  – довжина кожного із дротів;

$l_0$  – довжина, що утворює кожний рупор;

$J_p = \frac{V_0}{Z} S(p)$  – поточний струм через кожний дріт комірки;

$V_0 = 500$  В – вхідна напруга кожному рупорі;

$Z = 200$  Ом – хвильовий опір кожного з рупорів;

$S(p) = \frac{1}{\pi} (\arcsin \frac{2p-N}{N} - \arcsin \frac{2p-2-N}{N})$  - функція розподілу струму у

кожному з дротів комірки;

$\vec{m}_{i,k} = \frac{\vec{r} - \vec{R}_{i,k}}{r_{i,k}}$  – одиничні вектори, що проходять з точки збудження кожної

комірки в точку спостереження;

$r$  – радіус-вектор із початку координат системи в точку спостереження;

$\vec{m}_{p,i,k} = \frac{\vec{m}_{i,k} r_{i,k} - l_p \vec{n}_{p,i,k}}{R_{p,i,k}}$  – одиничний вектор, спрямований від кінців

дротів  $p$  комірки  $i,k$  у точку спостереження;

$\vec{m}'_{p,i,k} = \frac{\vec{m}_{i,k} r_{i,k} + l_p \vec{n}'_{p,i,k}}{R'_{p,i,k}}$  – одиничний вектор, спрямований від кінців

зворотних дротів  $p$  комірки  $i,k$  у точку спостереження;

$R_{p,i,k} = |\vec{F}_{p,i,k} - \vec{r}|$  – відстань від кінців прямого дроту  $p$  комірки  $i,k$  до точки

спостереження;

$R'_{p,i,k} = |\vec{F}'_{p,i,k} - \vec{r}|$  – відстань від кінців зворотного дроту  $p$  комірки  $i,k$  до

точки спостереження;

$\vec{F}_{p,i,k} = \vec{R}_{i,k} + l_p \vec{n}_{p,i,k}$  – вектор, що з'єднує початок координат елемента випромінювання з кінцями прямих дротів комірок;

$\vec{F}'_{p,i,k} = \vec{R}_{i,k} - l_p \vec{n}'_{p,i,k}$  – вектор, що з'єднує початок координат елемента випромінювання з кінцями зворотних дротів комірок.

Результуюча векторна сума складових сигналів для всіх елементів антеної ґратки у точці спостереження визначається виразом

$$\vec{E}(t, x, y, z) = \sum_{p=1}^N \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_y} \vec{E}_{p,i,k}(t, x, y, z)$$

Режим сканування дозволяє збільшити кут ефективного випромінювання в кілька разів. У аналізованому комплексі використовується електричне сканування, яке проводиться шляхом зміни затримок [12].

Максимум напруженості поля системи залежить від азимуту  $\varphi$  та кута місця  $\theta$ .

Діаграма спрямованості кожного рупора обмежується сектором сканування:

- по горизонталі  $\varphi_{\max} = 45^\circ$ ,
- по вертикалі  $\theta_{\max} = 90^\circ$ .

Отже, вводиться обмеження на формування вивчення  $\varphi_{\max} = \pm\pi/4$ ,  $\theta_{\max} = \pm\pi/2$ .

Максимум напруженості поля розташований у центрі антеної решітки при  $\varphi = \theta = 0^\circ$ . Цей спосіб керування зміни максимуму випромінювання називається рядково-стовпцевим [22].

З цього випливає, що розглянуті ґрати при розрахунку максимуму напруженості в основних площинах (XZ і YZ) можна вважати лінійною, якою

елементарними випромінювачами є стовпці при розрахунку максимуму у площині XZ, та рядки – при розрахунку у площині YZ.

Опис алгоритму роботи тестової системи починається з введення оператором вихідних даних:

- координати (Xg, Yg) або відстань щодо встановлення (r);
- азимут ( $\varphi$ );
- висота над рівнем моря (h);
- кутова швидкість ( $\nu$ );
- прогнозований подальший курс БПЛА (n);
- допустимі рівні напруги (Uдоп) або струму (Iдоп) вразливого елемента з точки зору впливу на нього НКЕВ.

Зпівставлення вихідних даних Uдоп або Iдоп рівням напруг з бази даних.

Визначення мінімально допустимих рівнів НКЕВ (E, F) відповідно до проведеного аналізу механізмів впливу НКЕВ.

Вплив випромінювання на характеристики елементів бортового радіоелектронного обладнання, що знаходяться у базі даних АРМ управління;

Під час формування заданої максимальної амплітуди напруженості електричного поля скористаємося формулою (3.11) для напруженості поля чотирьох елементарних випромінювачів  $E_i$ , k. При обмеженнях  $\varphi_{\max} = \pm\pi/4$ ,  $\theta_{\max} = \pm\pi/2$ .

### **3.9 Розроблення алгоритму тестування та візуалізації параметрів телекомунікаційної системи керування БПЛА**

Максимальна сумарна напруженість електричного поля  $E_{\max}$  у зазначеній точці простору формується за рахунок затримок та послідовного підключення рупорів з напруженістю електричного поля для кожного рупора рівного  $E_{i,k}$ .

Здійснюється визначення оптимальної кількості працюючих елементів антени ґратки по горизонталі та вертикалі, виходячи з розрахованої необхідної сумарної амплітуди сигналу, що формує з відривом  $r$  напруга електричного поля  $E$ .

Формування променя з параметрами  $E$ ,  $F$ ,  $\tau$  проводиться рядково-стовпцевим способом керування.

Дані з датчиків  $I_d$  та  $U_d$ , що реєструють перевищення допустимих рівнів струмів і напруг у ланцюгах системи управління, надходять на тестову систему, і визначається реакція вразливих елементів вплив НКЕВ.

Якщо реакції немає, то тестова система плавно збільшує амплітуду напруженості шляхом послідовного підключення рупорів до рівнів наведених струмів і напруг, що перевищують нормовані для зазначеного пристрої ТКС.

Для оперативного втручання оператора у процес випробувань, і навіть використання тестової системи на етапі стендових випробувань, на формування бажаних тестових впливів необхідно розробити алгоритм візуалізації тестової системи. Алгоритм візуалізації тестової системи розглянуто на рис.3.13.

Алгоритм візуалізації тестової системи для оперативного управління випробуванням БПЛА дозволяє в режимі реального часу відображати напрямок формування променя випромінювання НКЕВ з урахуванням обробки вихідних даних про місцезнаходження БПЛА, а також фіксацію критеріальних рівнів стійкого функціонування телекомунікаційної системи управління безпілотного літального апарату.

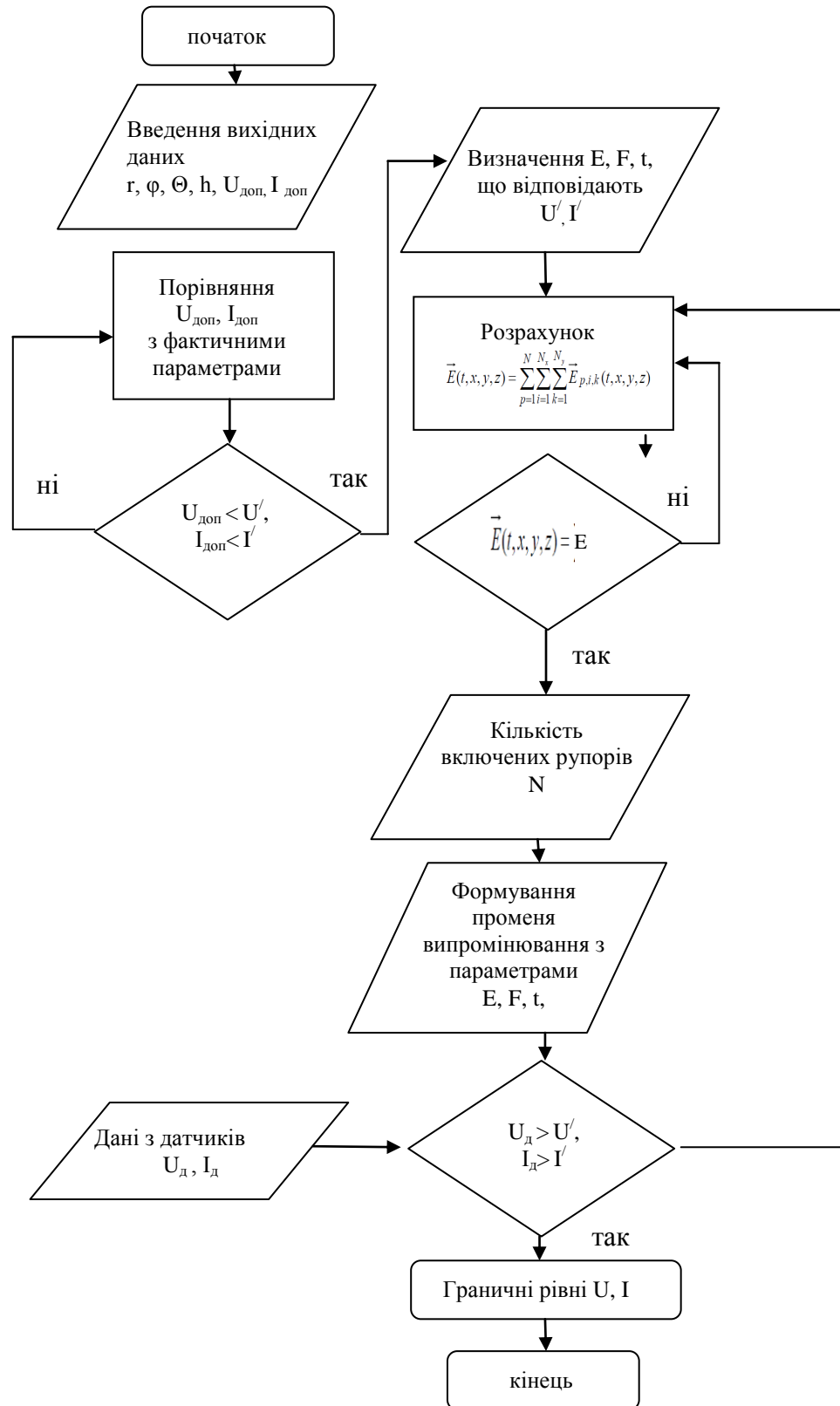


Рисунок 3.12 – Алгоритм тестування параметрів телекомунікаційної системи



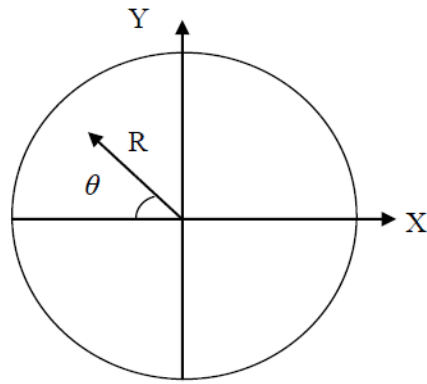


Рисунок 3.15 – Представлення точки та напрямку випромінювання завади в полярній системі координат

Вектор  $R$  визначає різницю відстаней  $r$  та  $r'$ , де  $r$  – відстань від центру антеною ґратки до точки спостереження, а  $r'$  – відстань від каналу випромінювання з максимальними параметрами до точки спостереження у дальній зоні.

Вектор  $R$  залежить від координат каналу випромінювання у площині  $XU$  та кута місця  $\theta$ , і визначається формулою:

$$R = z(n_x d_x, n_y d_y) \cos \theta,$$

де  $n_x, n_y$  - номер рядка і номер стовпця в комірці,  
 $d_x, d_y$  - координата елементарного випромінювача.

Отже, у разі вибору оператором точки випромінювання НКЕВ полярною системою координат, в полях параметрів  $X, Y$  і  $\theta$  визначаються їх чисельні значення, що відповідають вектору  $R$ . Прямокутні та сферичні координати точки спостереження  $P$  з координатами  $(x, y, z)$  пов'язані між собою наступними співвідношеннями

$$x = r \cdot \sin \varphi \cos \theta,$$

$$y = r \cdot \sin \theta \sin \varphi,$$

$$z = r \cdot \cos \theta.$$

Якщо ж оператору необхідно задати точні координати випромінювання та відстань до об'єкта, він вводить їх у відповідні поля, і в полярній системі координат автоматично визначиться область впливу щодо антени.

Перевірка амплітуди напруженості електричного поля НКЕВ проводиться на підставі отриманих даних про необхідні параметри випромінювання, які комплексу випромінювання необхідно сформувавши на певній відстані.

Для перевірки коректного формування амплітуди напруженості поля НКЕВ виробу та його складових частин необхідно провести вимірювання у 3 етапи:

- на різних відстанях  $r$  від багатоканальної випромінюючої системи при постійних азимуті та куті місця;
- з різними кутами місця при постійних азимуті та відстані до комплексу випромінювання;
- з різним значенням азимуту при постійних куті місця та відстані до комплексу випромінювання.

Для встановлення частоти слідування імпульсів в інтерфейсі користувача автоматизованого робочого місця (АРМ) тестової системи вибирається частотний діапазон (1...15 МГц), x2 (2...30 МГц) та x4 (4...60 МГц).

Вимірювальний перетворювач, що використовується в якості детектора поля для вимірювання параметрів випромінюваних НКЕВ, приєднується до входу цифрового запам'ятовуючого осцилографа зі смугою пропускання 16 ГГц через лінію зв'язку та дільник напруги, рис. 3.16.

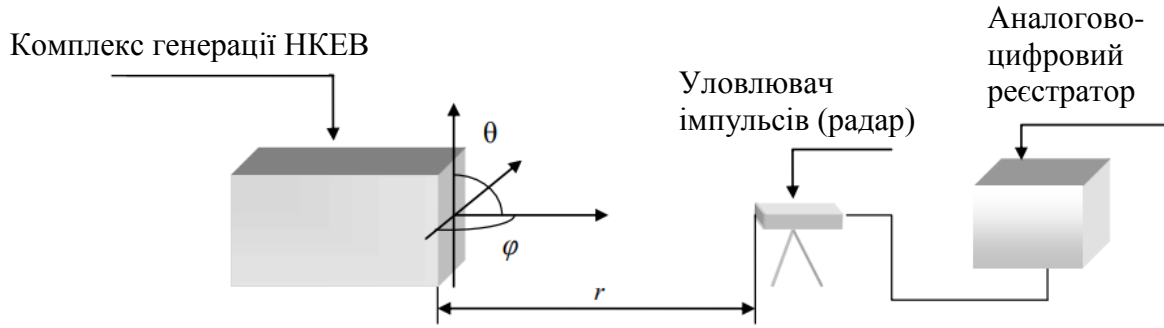


Рисунок 3.16 – Схема вимірювання основних параметрів

Проводиться реєстрація імпульсів на екрані осцилографа. За допомогою маркерів осцилографа визначається амплітуда  $U_i$  імпульсів на виході. Амплітуда імпульсів напруженості електричного поля  $E_i$  визначається за такою формулою:

$$E = U_{oc} / K_{пер}$$

$E$  - напруженість імпульсного електричного поля;

$U_{oc}$  - амплітуда імпульсу напруги на вході осцилографа;

$K_{пер}$  - коефіцієнт перетворення вимірювального перетворювача.

Проводиться перевірка відповідності заданої амплітуди напруженості електричного поля з виміряними даними. Вимірювання проводиться при частоті проходження імпульсів 10 МГц. Для кожного випадку проводиться щонайменше три виміри.

Перевірка тривалості імпульсів НКЕВ.

У тестовій системі задаються такі параметри:

- Частота повторення імпульсів  $F = 1$  МГц;
- Напруженість електричного поля  $E = 1,5$  кВ/м;
- Відстань до об'єкта  $r = 1$  м;

- Тривалість імпульсів  $\tau = 250$  пс;
- Азимут та кут місця  $\theta = \varphi = 0^\circ$ .

Тривалість НКЕВ на рівні 0,5 від амплітуди визначається у заданій точці, відповідно до схеми наведеній на рис.3.16. Проводиться реєстрація імпульсів на екрані осцилографа аналогічно і за допомогою маркерів осцилографа визначається тривалість НКЕВ на рівні 0,5 від амплітуди.

#### Перевірка частоти повторення НКЕВ

У тестовій системі задаються такі параметри:

- Частота повторення імпульсів  $F = 30$  МГц;
- Напруженість електричного поля  $E = 1,5$  кВ/м;
- Відстань до об'єкта  $r = 1$  м;
- Тривалість імпульсів  $\tau = 250$  пс;
- азимут та кут місця  $\theta = \varphi = 0^\circ$ .

Визначення частоти повторення НКЕВ комплексу випромінювання проводиться у заданій точці відповідно до рис.3.16. Для цього вимірювальний перетворювач через лінію зв'язку приєднується до входу осцилографа цифрового запам'ятовуючого. Проводиться реєстрація імпульсів на екрані осцилографа. Маркерами осцилографа визначається період  $T_{\text{імп}}$  прямування імпульсів. Частота слідування НКЕВ визначається за формулою:

$$f_{\text{імп}} = 1/T_{\text{імп}}$$

Метою перевірки є визначення та реєстрації максимуму амплітуди напруженості електричного поля  $E$  тестування при заданих параметрах:  $\tau = 250$  пс,  $F$ ,  $r$ . Схема вимірювання визначення максимуму напруженості електричного поля наведено на рис. 3.17.

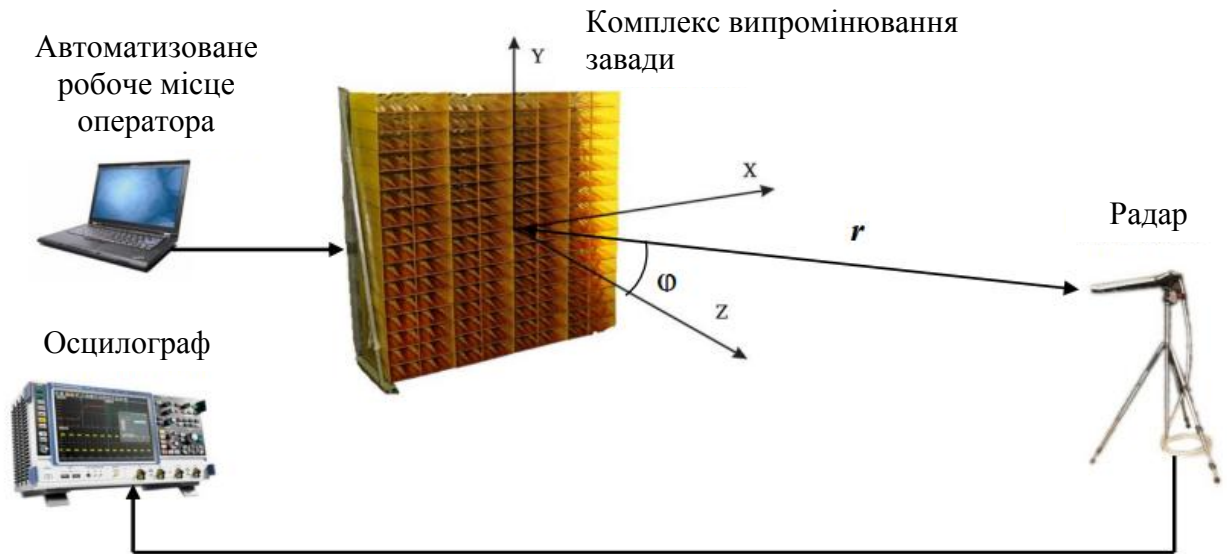


Рисунок 3.17 – Схема перевірки коректності визначення параметрів

Обробці підлягають такі дані:

- зареєстровані осцилограми імпульсів напруженості електричного поля, що формуються антенними модулями зі складу засобу тестування на заданих відстанях  $r$  при куті місця  $\theta=0^\circ$  та частоті повторення імпульсів 10 МГц;
- зареєстровані осцилограми імпульсів напруженості електричного поля, що формуються антенними модулями зі складу засобу тестування на заданих кутах місця  $\theta$  на відстані  $r = 10$  м, при  $\varphi = 0^\circ$  і при частоті повторення імпульсів 10 МГц;
- зареєстровані осцилограми імпульсів напруженості електричного поля, що формуються антенними модулями зі складу засобу тестування на заданих кутах азимуту на відстані  $r = 10$  м, при  $\theta = 0^\circ$  і при частоті повторення імпульсів 10 МГц;
- зареєстровані осцилограми імпульсів, що формуються тестовою системою для визначення частоти повторення;
- зареєстрована на осцилографі тривалість імпульсів випромінювання;

- зареєстровані осцилограми імпульсів напруженості електричне поле для перевірки коректності ручного введення даних;

- зареєстровані осцилограми імпульсів напруженості електричного поля для перевірки коректності розташування графічного символ.

Обробка первинної інформації проводиться з використанням програмного забезпечення "Mathcad".

На підставі отриманих результатів визначається похибка вимірів:

Середнє значення вимірюваної величини.

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n},$$

де  $A$  - вимірювана величина,

$n$  – кількість вимірів.

Абсолютна похибка середнього значення вимірюваної величини.

$$\Delta \bar{A} = t_{\gamma, n-1} \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_i^2}{n-1}}}{\sqrt{n}},$$

$t_{\gamma}$  - коефіцієнт Ст'юдента.

Відносна похибка середнього значення вимірюваної величини.

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{A}}{\bar{A}} \cdot 100\%.$$

Були отримані наступні результати:

Тривалість  $\tau = 250$  пс за рівнем 0,5 напівперіоду, що відповідає заданому значенню.

Осцилограма імпульсу зображено рис. 3.18.

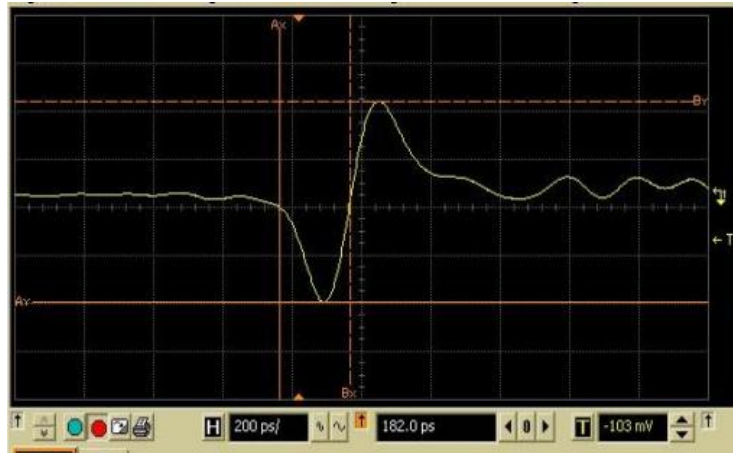


Рисунок 3.18 – Визначення тривалості імпульсів за рівнем 0,5 від напівперіоду

Результати визначення частоти повторення.

Як видно з осцилограми зареєстрованих імпульсів, рисунок 3.19, задана в тестовій системі частота проходження імпульсів 30 МГц відповідає отриманому значенню.

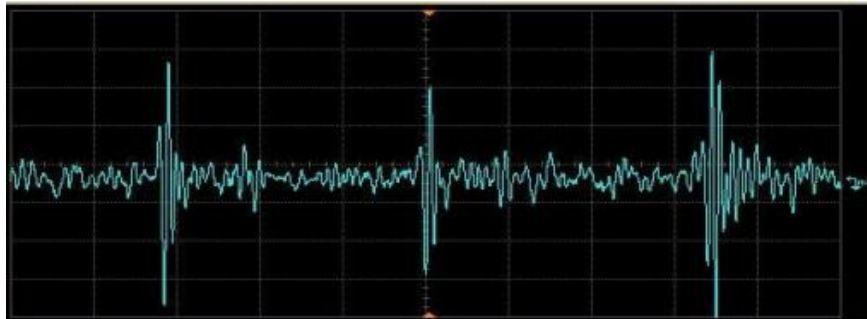


Рисунок 3.19 – Осцилограма імпульсу з частотою повторення 30 МГц

Результати показали достовірність використовуваного алгоритму, закладеного в тестову систему.

### 3.10 Висновки за розділом

Розроблено універсальний метод тестування стійкості телекомунікаційної системи керування БПЛА на основі аналізу механізмів впливу НКЕВ на характеристики елементів бортового радіоелектронного обладнання. Метод дозволяє автоматизувати процес тестування.

2. Розроблено алгоритм управління оригінальної тестової системи, що реалізує використаний метод, що дозволяє формувати необхідні тестові впливи НКЕВ у заданій точці простору.

3. Розроблено алгоритм візуалізації тестової системи, призначений для оперативного управління випробуванням БПЛА, що забезпечує в режимі реального часу відображення напрямку формування променя випромінювання НКЕВ з урахуванням обробки вихідних даних про місцезнаходження та характеристики БПЛА, а також фіксацію критеріальних рівнів сталого функціонування телекомунікаційної системи управління безпілотного літального апарату.

## Висновки

1. У ході виконання магістерської роботи автором було отримано такі результати, що визначають значущість для вирішення задачі забезпечення сталого функціонування системи керування безпілотного літального апарату.

2. Проведено аналітичний огляд досліджень на тему магістерської роботи. Показано, що є потенційна загроза нових засобів генерації НКЕВ. У зв'язку з цим в Україні ведеться активна робота засобів виявлення навмисних силових електромагнітних впливів та організації робіт із захисту від них. З проведеного аналізу зроблено висновки про необхідність удосконалення методу тестування стійкості телекомунікаційної системи управління БПЛА за умови впливу надкороткого електромагнітного випромінювання.

3. Дослідження особливостей впливу НКЕВ на системи керування БПЛА, показало, що найбільш уразливою ланкою в системі управління є телекомунікаційна система, а також встановлено, що основні параметрами якої впливають на її функціонування є: амплітуда напруженості електричного поля, тривалість імпульсів, тривалість фронту імпульсів, частота проходження імпульсів.

4. Розроблено критерії оцінки стійкого функціонування телекомунікаційної системи управління БПЛА в умовах впливу НКЕВ, які показали, що критерієм відмови працездатності БПЛА за умови даного впливу є відмова системи автоматичного керування. В основі, якою лежить обробка даних датчиків, команд оператора керування та одночасно виконання поточної встановленої до старту програми польоту, а також система автоматичного керування є основним ядром у роботі телекомунікаційної системи.

5. Визначено мінімально допустимі рівні НКЕВ, що дозволяють виявити закономірність впливу НКЕВ з різними параметрами на стійкість елементів

бортового обладнання, необхідних для початкового тестування системи. При визначенні були враховані властивості конструкції БПЛА, що екранують.

6. Удосконалено метод тестування стійкості функціонування телекомунікаційної системи управління безпілотних літальних апаратів за умови впливу НКЕВ на етапі їх стендових та льотних випробувань, що дозволяє встановлювати поточні навігаційні параметри БПЛА в режимі реального часу та реєструвати перевищення допустимих критеріальних рівнів.

Отже, результати виконання магістерської кваліфікаційної роботи, спрямовані на вирішення актуальної задачі забезпечення стійкого функціонування телекомунікаційної системи керування безпілотним літальним апаратом за умови впливу надкоротких електромагнітних випромінювань.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Регіональна програма інформатизації «Цифрова Полтавщина» на 2024 – 2026 роки. Режим доступу: [https://media.poda.gov.ua/docs/ccfly4kk/proect\\_cp22022024d.pdf](https://media.poda.gov.ua/docs/ccfly4kk/proect_cp22022024d.pdf)
2. Ніколаєнко Б.А., Пелешок Є.В. Сучасні супутникові системи зв'язку: навч. посібник. К.: ІСЗЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 146 с.
3. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту: монографія / Д.В. Бондар, А.В. Гурник, А.О. Литовченко, В.В. Хижняк, В.Л. Шевченко, Д.М. Ядченко. Київ, 2022, 312 с.
4. Ергодизайн безпілотних повітряних суден. Монографічне видання / М. П. Матійчик, А. Л. Рубцов, В.О. Свірко, В. П. Харченко, М. І. Фузік – К. : УкрНДІ ДЕ, 2019. – 193 с.
5. Про затвердження Правил технічної експлуатації безпілотних авіаційних комплексів I класу державної авіації України від 10.08.2018 № 401 [Електронний ресурс] : Наказ МО України. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1062-18#Text>.
6. Книш Б. Класифікація відомих видів безпілотних літальних апаратів [Електронний ресурс] / Б. Книш, П. Бровко, Д. Попіль // Modern engineering and innovative technologies. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 34–39. – Режим доступу: <http://www.moderntechno.de/index.php/meit/article/view/g117-004>.
7. Воронько І. Области застосування безпілотних літальних апаратів / І. Воронько, В. Воронько // Сучасний стан проведення наукових досліджень у ІТ-технологіях, галузях електроніки, інженерії, нанотехнологіях та транспортній сфері : кол. наук. монографія. – Вінниця, 2020. – С. 160. – Режим доступу: <https://publishing.logos-science.com/index.php/books/issue/view/14/9>.

8. Кутовий О. П. Тенденції розвитку безпілотних літальних апаратів / О. П. Кутовий // Наука і озброєння – 2014. – № 4. – С. 39 – 47.

9. Корисне навантаження дрону як підґрунтя для обґрунтування дальності польоту / І. Маладика та ін. // Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : Матеріали XII Міжнар. науково-практ. конф., м. Черкаси, 8 січня 2021 р. – Черкаси, 2021. – С. 91–92.

10. Yukhanov A.Y., Andrianov V.I., Ostrovsky A.G., Los V.F. Peculiarities of videopulse Scanning Antenna Array desing // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals. – Sevastopol, Ukraine. – 18-22 September, 2006. – pp. 85-89.

11. Безпілотні літальні апарати повітряного бою [Електронний ресурс] / Бурсала О., Горошко Д., Кульба П., Чуприна В. // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2019. – № 1(1). – С. 50-57.

12. Kresimir. Malaria EMI Protection for Communication Systems. – Artech House Publishers, 2009. – 273 p.

13. Збірник бойового досвіду застосування Військ зв'язку Збройних сил України під час проведення антитерористичної операції. К.: ВІТІ, 2015. 59 с.

14. Крицький Д. Особливості масової моделі безпілотного літального апарату [Електронний ресурс] / Д. Крицький, С. Яшин, С. Коба // Математичне моделювання та симуляція систем (MODS'2020). MODS 2020. Досягнення інтелектуальних систем і обчислень / за ред. Шкарлет С., Морозов А., Палагін А. – Springer, Cham, 2021. – Т. 1265. – Режим доступу: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29).

15. Kohlberg I. Functional and Communication Theory Models in Susceptibility Analysis / I. Kohlberg, R. L Gardner // Conference Paper, IEEE-APS/URSI In-ternational Symposium, Columbus, Ohio, 2003.

16. Zhang Z., Dolecek L., Nikolic B., Anantharam V., Wainwright M. J. Lowering LDPC Error Floors by Postprocessing / Z. Zhang and at all // IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), New Orleans, LA, 2008.

17. IEC/TR 61000-1-5: 2004. Electromagnetic compatibility (EMC). – Part 1–5: General – High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems. – 43 p.

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

19. IEC/TS 61000-5-8: 2009 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 5–8: Installation and mitigation guidelines - HEMP protection methods for the distributed infrastructure. – 27 p.

20. IEC/TS 61000-5-9: 2009 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 5–9: Installation and mitigation guidelines - System-level susceptibility assessments for HEMP and HPEM. – 66 p.

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

22. Березіна С. І., Логачов С. В., Солонець О. І. Метод координатної прив'язки знімків, отриманих з БПЛА, за елементами зовнішнього орієнтування. *Системи озброєння і військова техніка*, 2018. Вип. (1). С. 76-83.

23. Plumer A. System functional upset testing of aircraft electrical and avionics systems: how to approach the planning and conduct of the tests . International Conference on Lightning and Static Electricity. Seattle, USA, 2005.

24. Чернишев М. І., Куценко В. В. Оцінка точності визначення положення БПЛА різницево-далекомірним методом в рухомій системі

пасивної радіолокації зенітних комплексів малої дальності. *Системи озброєння і військова техніка*, 2018. Вип. (2). С. 61-66.

25. Сальник Ю. П. Аналіз технічних характеристик і можливостей безпілотних авіаційних комплексів оперативно-тактичного та тактичного радіуса дії армій розвинених країн / Ю. П. Сальник, І.В. Матала // *Військовотехнічний зб.* – 2013. – № 7 – С. 70–74.

26. Методика розрахунку БПЛА мультикоптерного типу / Ю. Ковальов та ін. // *Управління високошвидкісними рухомими об'єктами та професійна підготовка операторів складних систем : матеріали VIII Міжнар. науково-практ. конф., м. Кропивницький, 20 грудня 2019 р.* – Кропивницький, 2019. – С. 54–56.

27. Класифікація безпілотних літальних апаратів [Електронний ресурс] / О. Тимочко та ін. // *Системи озброєння і військова техніка.* – 2007. – № 1(9). – С. 61–66. – Режим доступу: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/878899d8-b7a7-4481-af22-9835c0748ba0/content>.

28. Єфремов О. Методика вибору раціонального типу і варіанта обладнання безпілотних літальних апаратів для виконання завдань / О. В. Єфремов, О. А. Коршець // *Системи управління, навігації та зв'язку : збірник наукових праць.* – Полтава, 2018. – Т. 5 (51). – С. 3-7.

ДОДАТКИ

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

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Забезпечення стійкості телекомунікаційної системи  
керування БПЛА в динамічному режимі**

Магістерська кваліфікаційна робота

Виконав  
магістрант:

**О. С. ПЕДЧЕНКО**

Керівник:  
д.т.н., професор

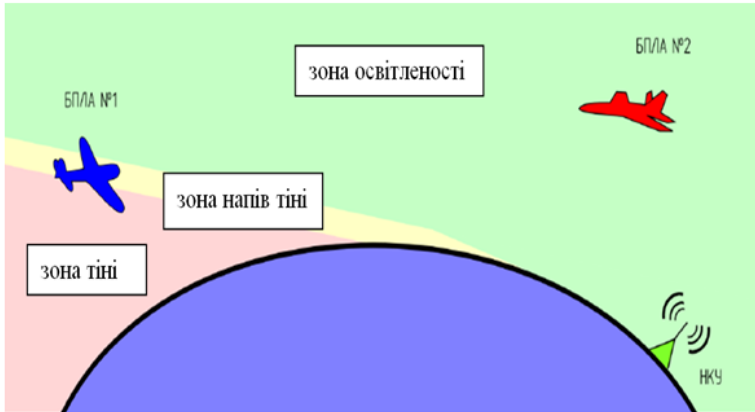
**О.В. ШЕФЕР**

Полтава 2025

**Метою кваліфікаційної роботи** є забезпечення стабільного функціонування системи керування безпілотного літального апарату за умови впливу надкороткого електромагнітного випромінювання, шляхом визначення критеріальних рівнів її стійкість.

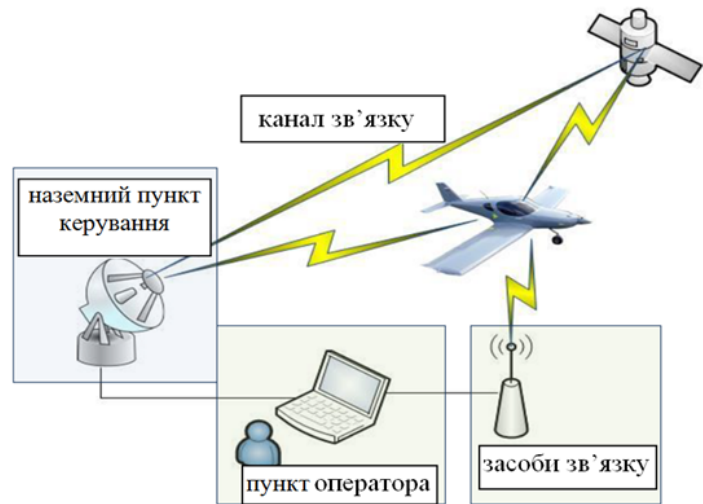
**Об'єктом дослідження** є механізми впливу надкороткого електромагнітного випромінювання на характеристики телекомунікаційної системи керування безпілотним літальним апаратом.

**Предмет дослідження** - телекомунікаційна система керування безпілотним літальним апаратом.



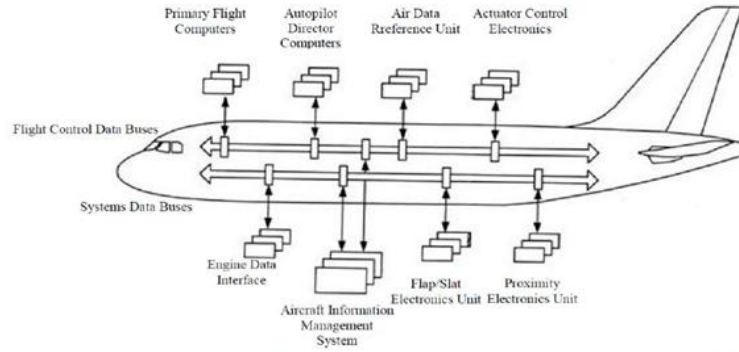
Зони повітряного простору (НКУ – наземний комплекс управління)

Оптимальний спосіб курування БПЛА

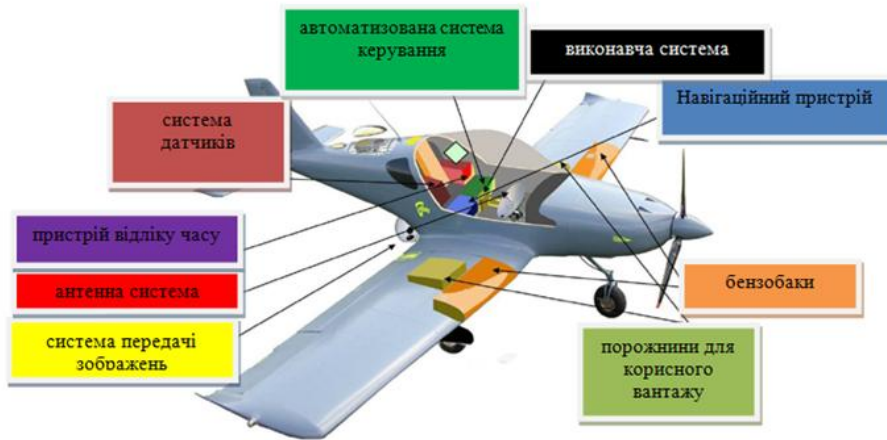




Процес розповсюдження електромагнітних завад у внутрішньому просторі БПЛА

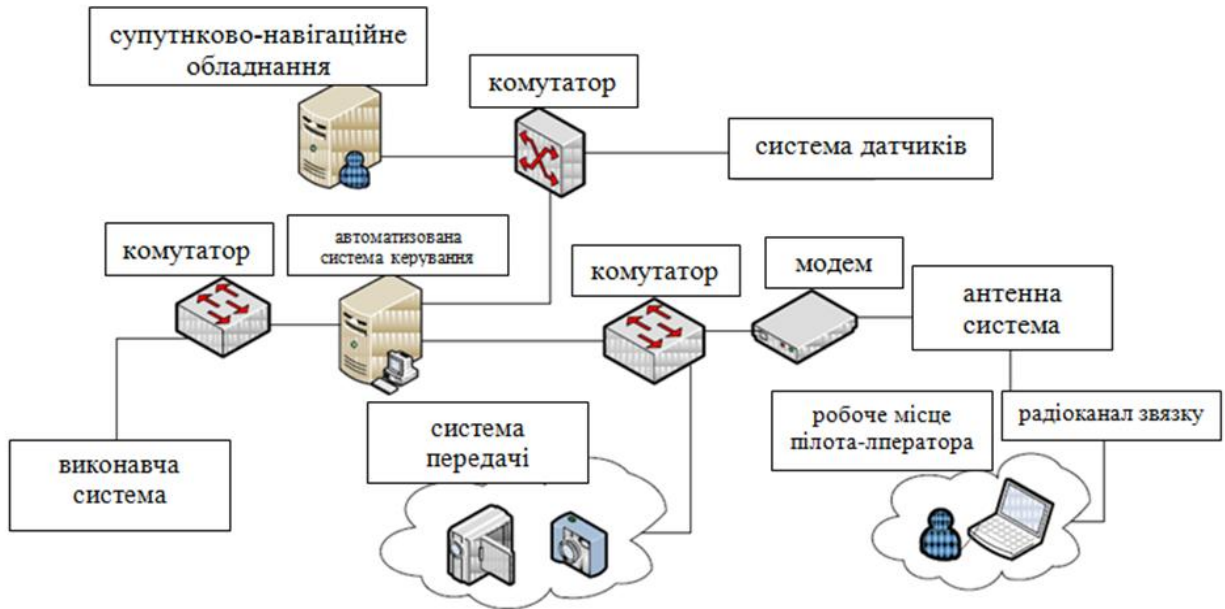


Розподіл телекомунікаційної системи в межах простору БПЛА



Розподіл телекомунікаційної системи в межах простору БПЛА

### Структурна схема телекомунікаційної системи керування БПЛА

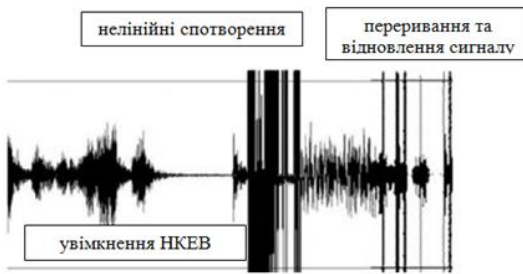




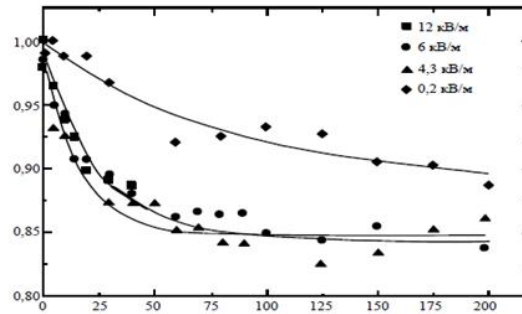
Зовнішній вигляд центральної плати навігаційного обладнання



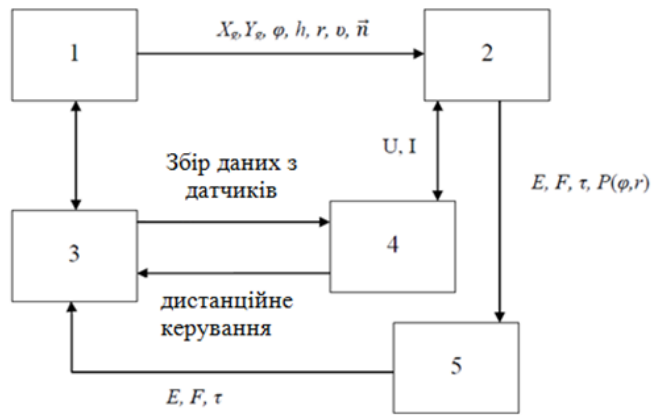
Осцилограма тестового імпульсу



Амплітудно-часова характеристика карти пам'яті після опромінення НКЕВ

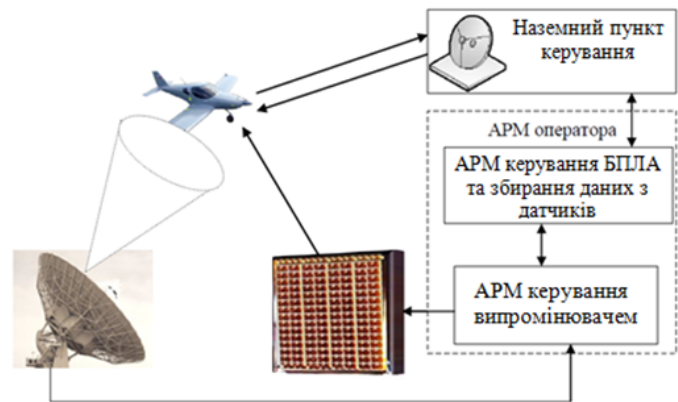


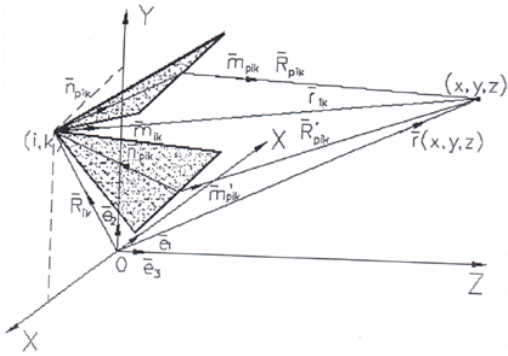
зниження готовності мережі зв'язку



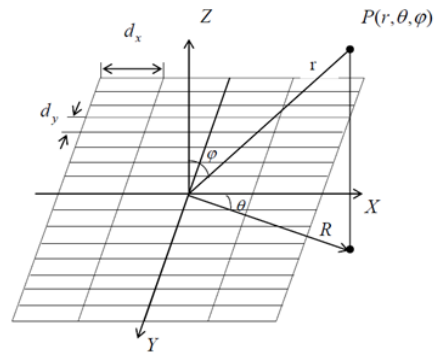
Блок-схема запропонованого методу. 1 - пристрій виявлення БПЛА; 2 – АРМ управління комплексом випромінювання; 3 – БПЛА; 4- АРМ керування БПЛА та збору даних з датчиків з наземним пунктом управління; 5- комплекс випромінювання

Структурна схема методу тестування стійкої роботи БПЛА





Геометрія V-подібного  
антенного елемента комплекса  
випромінювання



Багатоканальний комплекс в  
площині X-Y

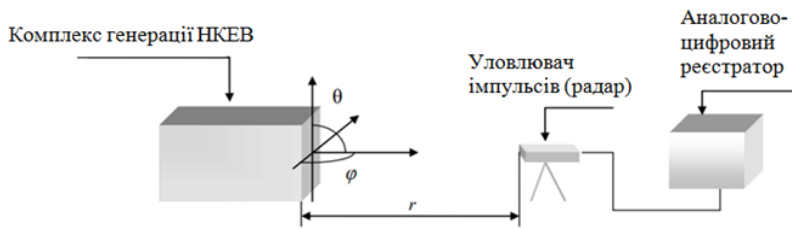
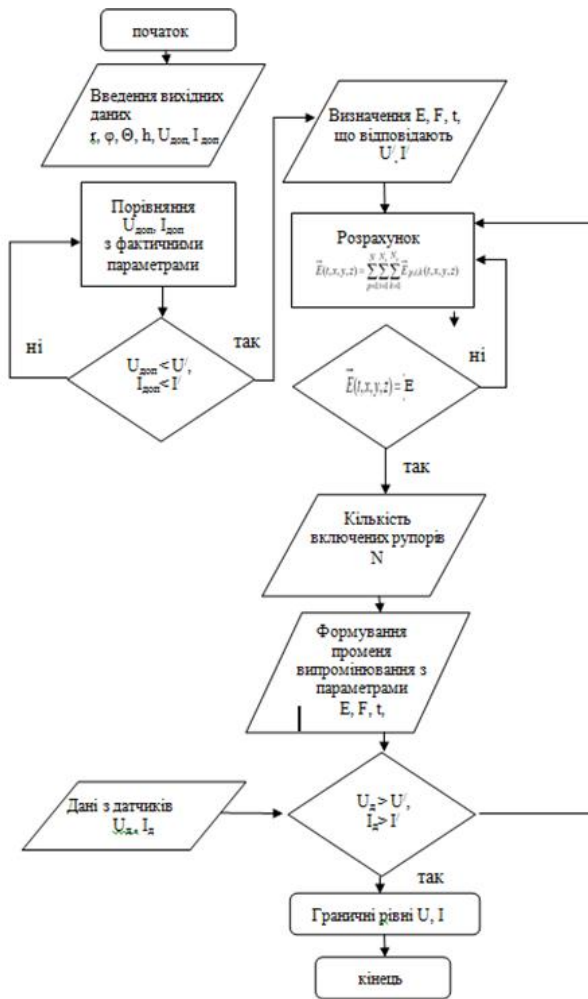
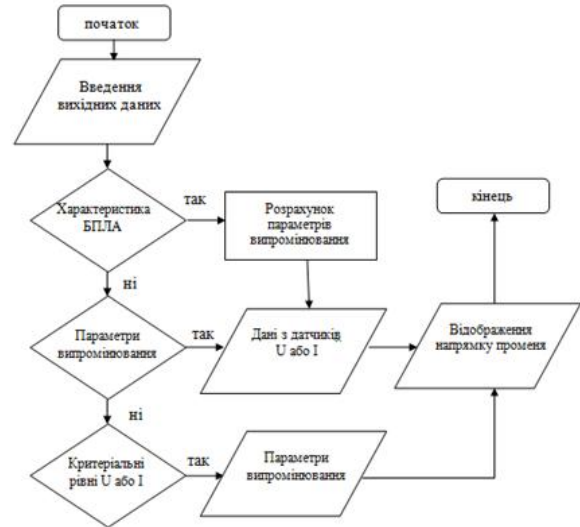


Схема  
вимірювання  
основних  
параметрів

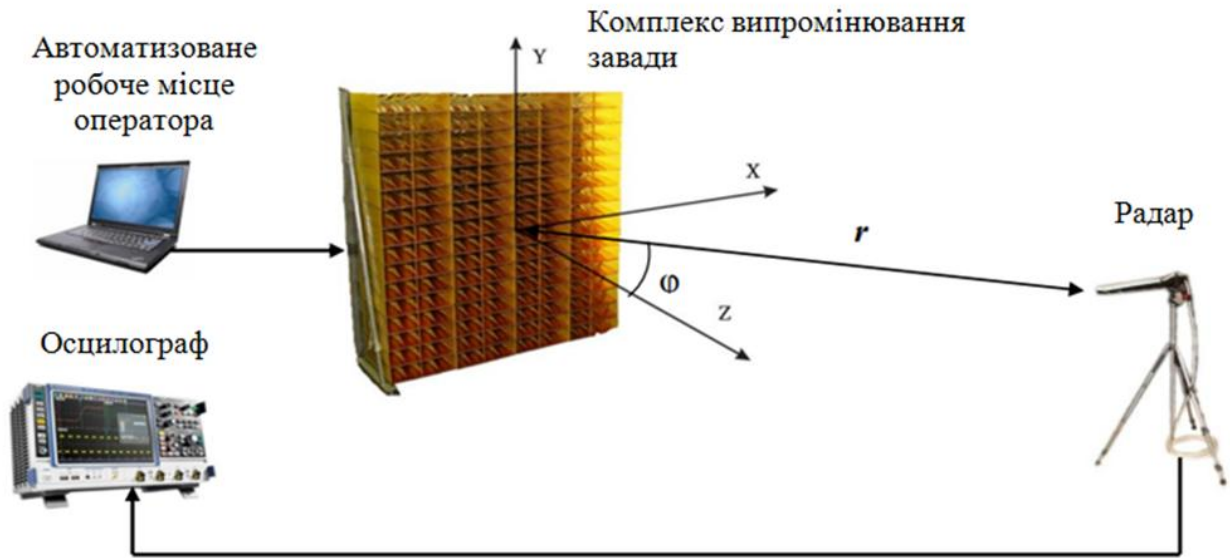


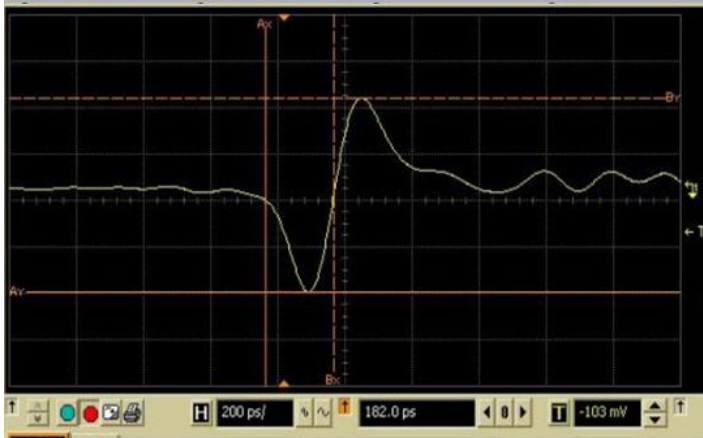
### Алгоритм тестування параметрів телекомунікаційної системи



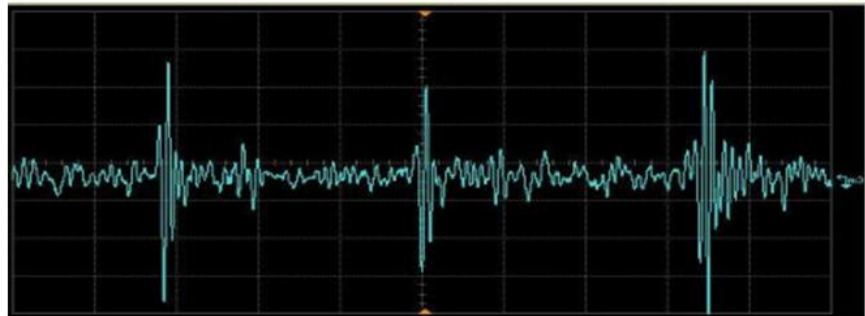
### Блок-схема алгоритму візуалізації тестової системи

Схема перевірки коректності  
визначення параметрів





Визначення тривалості імпульсів за рівнем 1/2 від напівперіоду



Осцилограма імпульсу з частотою повторення 30 МГц

## ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи автором було отримано такі результати:

1. Аналітичне дослідження особливостей впливу НКЕВ на систему керування БПЛА, показало, що найбільш уразливою ланкою в системі управління є телекомунікаційна система, а також встановлено, що основні параметрами якеї впливають на її функціонування є: амплітуда напруженості електричного поля, тривалість імпульсів, тривалість фронту імпульсів, частота проходження імпульсів.
  2. Розроблено критерії оцінки стійкого функціонування телекомунікаційної системи управління БПЛА в умовах впливу НКЕВ, які показали, що критерієм відмови працездатності БПЛА за умови даного впливу є відмова системи автоматичного керування.
  3. Визначено мінімально допустимі рівні НКЕВ, що дозволяють виявити закономірність впливу НКЕВ з різними параметрами на стійкість елементів бортового обладнання.
  4. Удосконалено метод тестування стійкості функціонування телекомунікаційної системи управління безпілотних літальних апаратів за умови впливу НКЕВ на етапі їх стендових та льотних випробувань, що дозволяє встановлювати поточні навігаційні параметри БПЛА в режимі реального часу та реєструвати перевищення допустимих критеріальних рівнів.
- Отже, результати виконання магістерської кваліфікаційної роботи, спрямовані на вирішення актуальної задачі забезпечення стійкого функціонування телекомунікаційної системи керування безпілотним літальним апаратом за умови впливу надкоротких електромагнітних випромінювань.