

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Кафедра радіоелектронних і біомедичних комп'ютеризованих засобів і
технологій

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи

магістра

(освітній ступінь)

на тему «Метод оцінювання показників надійності супутникового приймача за
малої вибірки даних експлуатаційних спостережень»

ХАІ.502.560М.22о.172.1705004 ПЗ

Виконала: студентка 6 курсу групи № 560м
напряму підготовки (спеціальності)
172-Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки (спеціальності))

освітньої програми: «Радіоелектронні
комп'ютеризовані засоби»

(шифр і назва освітньої програми)

Попова О. В.

(прізвище й ініціали студента)

Керівник: к.т.н., проф. Бабаков М. Ф.

(прізвище й ініціали)

Рецензент: д.т.н., проф. Невлюдов І. Ш.

(прізвище й ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Факультет радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій
(повне найменування)

Кафедра радіоелектронних та біомедичних комп'ютеризованих засобів і технологій
(повне найменування)

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код та найменування)

Освітня програма Радіоелектронні комп'ютеризовані засоби
(найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедри

О.В. Висоцька

(підпис) (ініціали та прізвище)

« » 2022 р.

ЗАВДАННЯ
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

Попова Олександра Валеріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Метод оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень

керівник роботи Бабаков М.Ф. к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету № 1496-уч від «27 жовтня» 2022 року.

2. Термін подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 15 грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: технічна документація до супутникового приймача, таблиці для обчислення показників надійності, дані про інтенсивність відмов елементів приладу.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Аналіз області використання супутникових приймачів та огляд задачі оцінювання показників їх надійності.

2. Аналіз об'єкту, його призначення та функції, склад та структура.

3. Розробка методу оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень.

4. Апробація методу оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень.

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Схема кодування сигналів GPS та ГЛОНАСС (плакат, арк. А4).
2. Структурна схема алгоритму проведення оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень (плакат, арк. А4).
3. Структурна схема супутникового приймача (плакат, арк. А4).
4. Схема вибору плану випробувань (плакат, арк. А4).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Усі розділи	к.т.н., проф. Бабаков М.Ф.	05.09.2022	

Нормоконтроль _____ В.М. Олійник «10» грудня 2022 р.
 (підпис) (ініціали та прізвище)

7. Дата видачі завдання 05.09.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опис загальної характеристики супутникових приймачів та аналіз питання дослідження показників надійності супутникових приймачів	01.11.22 – 07.11.22	
2	Аналіз об'єкту, його призначення та функції, склад та структура.	08.11.22 – 16.11.22	
3	Аналіз методів оцінювання показників надійності в загальному випадку	16.11.22 – 20.11.22	
4	Опис теоретичних основ дифузійного немонотонного та монотонного розподілів	21.11.22 – 25.11.22	
5	Оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень та оцінка отриманих результатів	26.11.22 – 05.12.22	
6	Оформлення пояснювальної записки	06.12.22 – 09.12.22	
9	Передзахист випускної роботи	12.12.22	
10	Захист випускної роботи	15.12.22	

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Попова О.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Бабаков М.Ф.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра: 91 с., 19 рис., 8 табл., 32 джерела, 5 додатків.

ВИРОГІДНІСТЬ БЕЗВІДМОВНОЇ РОБОТИ, ДОВІРЧИ МЕЖІ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ, НАПРАЦЮВАННЯ ДО ВІДМОВИ, СИГНАЛ, СУПУТНИКОВИЙ ПРИЙМАЧ, ТОЧКОВА ОЦІНКА

Об'єкт дослідження – процес визначення показників надійності супутникових приймачів в умовах малої вибірки даних.

Мета роботи – розробка методу оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень.

Методи дослідження – аналіз, порівняння, синтез, аналіз методів оцінки надійності супутникових приймачів на основі фізико-статистичного опису моделей їх відмов дифузійними розподілами.

Проведено аналіз області використання супутникових приймачів, їх загальної характеристики та класифікації. Проаналізовано питання оцінки надійності супутникових приймачів. Виконано аналіз об'єкту, його призначення, функцій та умов експлуатації, визначено основні процеси деградації супутникового приймача. Описані загальні положення оцінювання показників надійності, теоретичні основи дифузійних розподілів та обґрунтовано використання немонотонного дифузійного розподілу для визначення показників надійності супутникових приймачів. Розроблено метод оцінювання показників надійності супутникових приймачів за результатами експлуатації за відсутності відмов та при спостереженні відмов. Проведено апробацію методу оцінювання показників надійності супутникового приймача на основі малої вибірки даних експлуатаційних спостережень.

ABSTRACT

Explanatory note to the bachelor's qualification work: 91 p., 19 pic., 8 tab., 32 sources, 5 additions.

PROBABILITY OF FAILURE-FREE OPERATION, CONFIDENCE LIMITS, OPERATIONAL OBSERVATIONS, WORKING OUT TO FAILURE, SIGNAL, SATELLITE RECEIVER, POINT ESTIMATION

Object of study - the process of determining the reliability of satellite receivers in a small sample of data.

The task of the work - to develop a method for assessing the reliability of satellite receivers with a small sample of operational observations.

Research methods - analysis, comparison, synthesis, analysis of methods for assessing the reliability of satellite receivers based on physical and statistical description of their failure models by diffusion distributions.

The analysis of the field of use of satellite receivers, their general characteristics and classification. The issues of reliability assessment of satellite receivers are analyzed. The object, its purpose, functions and operating conditions are analyzed, the main processes of satellite receiver degradation are determined. The general provisions of reliability indicators estimation, theoretical bases of diffusion distributions are described and the use of non-monotonic diffusion distribution for determination of satellite receivers reliability indicators is substantiated. A method for estimating the reliability of satellite receivers based on the results of operation in the absence of failures and at the observation of failures has been developed. The method of estimating the reliability of satellite receivers based on a small sample of operational observations was tested.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ПРИЙМАЧІВ ТА ОГЛЯД ЗАДАЧІ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЇХ НАДІЙНОСТІ.....	11
1.1 Поняття глобальної навігаційної супутникової системи.....	11
1.2 Загальна характеристика, класифікація та принцип роботи GNSS- приймачів для супутникових навігаційних систем	16
1.3 Аналіз сучасних досліджень питання надійності супутникових приймачів та постановка задачі дослідження.....	23
2 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ, ЙОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ФУНКЦІЇ, СКЛАД ТА СТРУКТУРА.....	26
2.1 Супутниковий GNSS приймач Leica GR50, його призначення та функції.....	26
2.2 Склад та структура об'єкту.....	29
2.3 Умови експлуатації, кліматичні та механічні впливи, основні зовнішні діючі чинники.....	38
2.4 Практичне використання супутникового приймача G50 в ГНСС мережах України	42
3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СУПУТНИКОВОГО ПРИЙМАЧА ЗА МАЛОЇ ВИБІРКИ ДАНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ.....	46
3.1 Загальні положення оцінювання показників надійності.....	46
3.2 Методи моделювання надійності	49
3.3 Теоретичні основи дифузійного немонотонного та монотонного розподілів.....	53
3.3.1 Модель відмов механічних елементів.....	53
3.3.2 Модель відмов електронних елементів.....	55

3.4 Оцінювання показників надійності з використанням дифузійних розподілів в загальному випадку.....	58
3.5 Оцінювання показників надійності супутникових приймачів за результатами експлуатації.....	64
3.5.1 Аналіз основних процесів деградації супутникового приймача.....	65
3.5.2 Визначення очікуваного значення коефіцієнта варіації	67
3.5.3 Визначення обсягу випробувань	65
3.5.4 Оцінка показників надійності супутникового приймача за відсутності відмов при малій вибірці	69
3.5.5 Оцінка показників надійності при спостереженні відмов в процесі експлуатації відновлюваних об'єктів	72
4 АПРОБАЦІЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СУПУТНИКОВОГО ПРИЙМАЧА ЗА МАЛОЇ ВИБІРКИ ДАНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ.....	74
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	81
ДОДАТОК А «Схема кодування сигналів GPS та ГЛОНАСС».....	84
ДОДАТОК Б «Структурна схема алгоритму проведення оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень».....	85
ДОДАТОК В «Структурна схема супутникового приймача G50».....	86
ДОДАТОК Г «Схема вибору плану випробувань».....	87
ДОДАТОК Д «Таблиці для обчислення показників надійності».....	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

GPS – Global Positioning System;

ГНСС (GNSS) – Глобальна навігаційна супутникова система;

ГІС – Геоінформаційна система;

ЗДЧ – зовнішні діючі чинники;

DM-розподіл – Diffusive Monotonic, дифузійний монотонний розподіл;

DN-розподіл – Diffusive Nonmonotonic, дифузійний немонотонний розподіл;

ВБР – вірогідність безвідмовної роботи.

ВСТУП

Забезпечення необхідного рівня надійності електронної апаратури, має важливе значення, так як низька надійність призводить до зниження безпеки використання багатьох різних виробів, збільшення необхідної кількості ряду виробів, щоб уникнути простоїв та їх передчасного зняття з експлуатації, економічних простоїв через велику кількість рекламацій та витрат на гарантійне обслуговування, збільшення комплектів запасних частин, зниження ефективності застосування відповідальної техніки та багатьох інших небажаних наслідків. Відповідно до сучасних вимог надійність техніки повинна забезпечуватися системно, охоплюючи всі стадії життєвого циклу [1].

Супутникові приймачі широко використовуються у багатьох сферах. Вони створені для роботи з постійними та тимчасовими базовими станціями, в тому числі для отримання мережевого RTK рішення, одиночних базових станцій, вирішення завдань моніторингу та наукових проєктів. Супутникові приймачі збирають, зберігають та розповсюджують дані GNSS.

Метою роботи є розробка методу оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень.

Робоча гіпотеза – оцінювання показників надійності супутникових приймачів в умовах малої статистики відмов, або навіть у її відсутності, можливе з використанням методів розрахунку на основі двопараметричних моделей відмов.

Завдання роботи – розглянути та проаналізувати задачу оцінювання показників надійності супутникових приймачів, проаналізувати методи оцінювання показників надійності в загальному випадку, обґрунтувати можливість та ефективність оцінювання надійності супутникового приймача на основі фізико-статистичного опису моделей його відмов дифузійними розподілами.

Актуальність теми полягає у тому, що існуючі методики оцінки показників надійності за статистичними даними про відмови об'єктів вимагають значної статистики відмов, якої, як правило, не буває. А оскільки сфера застосування супутникових приймачів досить широка, а обсяг виробництва великий, дослідникам необхідно робити оцінки і прогнозувати показники надійності об'єктів в умовах обмеженої статистики відмов. Точніша оцінка надійності супутникових приймачів дозволяє забезпечити заданий рівень надійності, приймати ефективніші рішення про терміни подальшої експлуатації і вжиття заходів по забезпеченню експлуатаційної надійності.

Об'єктом дослідження є процес дослідження показників надійності супутникових приймачів в умовах малої вибірки даних.

Предметом дослідження є метод оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень.

Методи дослідження – аналіз, порівняння, синтез, аналіз методів оцінки надійності супутникових приймачів на основі фізико-статистичного опису моделей їх відмов дифузійними розподілами.

Наукова новизна полягає в оцінці та прогнозуванні показників надійності супутникових приймачів в умовах малої або навіть відсутності статистики відмов за рахунок використання апріорної інформації про фізичні процеси деградації, об'єктів, що обумовлюють відмови та з використанням найбільш адекватних імовірнісно-фізичних моделей відмов (дифузійних розподілів).

Практична цінність полягає в тому, що використання методів розрахунку на основі двохпараметричних моделей відмов призводить до підвищення точності оцінок показників надійності технічних систем; при експериментальній оцінці (чи в результаті спостережень в процесі експлуатації) може призводити до істотного скорочення об'єму випробувань або об'єму спостережень (зменшенню кількості випробовуваних (спостережуваних) зразків на 30-50% для заданої достовірності і точності), а також до підвищення точності оцінок показників надійності.

1 АНАЛІЗ ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ПРИЙМАЧІВ ТА ОГЛЯД ЗАДАЧІ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЇХ НАДІЙНОСТІ

1.1 Поняття глобальної навігаційної супутникової системи

Глобальна навігаційна супутникова система (Global Navigation Satellite System - GNSS) - це супутникові системи (найпоширеніші - GPS і ГЛОНАСС), які використовують для визначення місця розташування в будь-якій точці земної поверхні із застосуванням спеціальних навігаційних або геодезичних приймачів. GNSS-технологія знайшла широке застосування в геодезії, міському та земельному кадастрі, під час інвентаризації земель, будівництві інженерних споруд, у геології тощо [2].

Основні переваги:

- не потрібно прямої видимості між пунктами.
- завдяки автоматизації вимірювань зведені до мінімуму помилки спостерігачів.
- дозволяє цілодобово за будь-яких погодних умов визначати координати об'єктів у будь-якій точці Земної кулі.
- точність GNSS-визначень мало залежить від погодних умов (дощу, снігу, високої або низької температури, а також вологості).
- GNSS дає змогу значно скоротити терміни проведення робіт порівняно з традиційними методами.
- GNSS-результати представляються в цифровому вигляді і можуть бути легко експортовані в картографічні або географічні інформаційні системи (ГІС).

Основні елементи супутникової системи навігації:

- орбітальне угруповання (супутникове угруповання) супутників, що випромінюють спеціальні радіосигнали;
- наземна система управління і контролю (наземний сегмент), що включає блоки вимірювання поточного положення супутників і передачі на них отриманої інформації для коригування інформації про орбіти;

- апаратура споживача супутникових навігаційних систем ("супутникові навігатори"), що використовується для визначення координат;
- опціонально: наземна система радіомаяків, що дає змогу значно підвищити точність визначення координат;
- опціонально: інформаційна радіосистема для передавання користувачам поправок, що дають змогу підвищити точність визначення координат [3].

Принцип роботи для всіх супутникових навігаційних систем однаковий і ґрунтується на вимірюванні відстані від досліджуваного об'єкта до супутників, положення яких відоме з дуже великою точністю. Відстань обчислюється за часом затримки поширення сигналу від надсилання його супутником до отримання приймачем. У спрощеному варіанті, під час обчислення координат приймача на основі супутникових даних вирішується нескладна геометрична задача, в якій потрібно визначити параметри багатогранника, у вузлах якого розташовані супутники. Для визначення тривимірних координат і висоти приймача потрібно знати відстань, як мінімум, до чотирьох супутників, а також точний світовий час. Для визначення координат необхідно використовувати сигнали ще одного додаткового супутника. Що більше використовується супутників і що складніша геометрична фігура, утворена супутниками, то точніше можна визначити координати приймача. Ця ідея покладена в основу концепції глобальних навігаційних супутникових систем ГНСС. Тому поєднана система GPS/Galileo/GLONASS/COMPASS, у принципі, має бути кращою, ніж одна система GPS.

У загальному випадку процес визначення координат із використанням супутникових навігаційних систем має досить простий вигляд. У пам'яті приймача супутникових сигналів зберігаються дані про його координати - альманах (інформація про орбіти всього угруповання) і ефемериди (дані про конкретний супутник). Завдання приймача полягає в тому, щоб розшифрувати закодований сигнал і визначити, від якого саме конкретного супутника було прийнято цей сигнал. На практиці справа дещо складніша, і необхідно враховувати ефект Доплера, а також багатопроневі й атмосферні ефекти.

Найпоширеніші та основні системи GPS і ГЛОНАСС розроблялися з урахуванням використання в різних регіонах світу. Тому супутники цих двох супутникових навігаційних систем розташовані на різних орбітах. Повне угруповання системи ГЛОНАСС складається з 24 супутників, розміщених рівномірно в трьох площинах, нахилених на 63° до екваторіальної площини і рознесених по довготі на 120° , на кругових навколосинхронних орбітах. Висота орбіт ГЛОНАСС - 19 100 км. Супутники GPS розміщені рівномірно в шести площинах із нахилом 55° до екватора; площини рознесені за довготою на 60° . Висота орбіт GPS дорівнює 20 200 км.

Основні відмінності між супутниковими навігаційними системами ГЛОНАСС і GPS полягають у методах кодування і форматі переданого сигналу. У системі GPS використовуються дві частоти передавання сигналів, а в системі ГЛОНАСС - два діапазони частот. До суттєвих відмінностей потрібно віднести також різні математичні моделі та методи обробки сигналів супутників ГЛОНАСС і GPS.

У системі GPS використовується кодове розділення каналів (CDMA). Принцип кодування сигналів GPS проілюстровано на рис. 1.2.

Кожному супутнику присвоюється свій власний індивідуальний код. Усі супутники передають свою індивідуальну інформацію на одних і тих самих несучих частотах: $L1 = 1575,42$ МГц і $L2 = 1227,60$ МГц. Останні моделі супутників передають додаткову службову інформацію також на частоті $L5 = 1176,45$ МГц. Частота $L1$ отримується шляхом множення частоти задавального генератора на 154 і модулюється С/А- і Р-кодами. Частота $L2$ отримується множенням частоти задавального генератора на 120 і модулюється Р-кодом. Обидві несучі частоти додатково модулюються навігаційним повідомленням. У процесі модуляції точного далекомірною Р(Y) коду одночасно формуються мітки часу супутникового сигналу. Повністю відкритими для користувачів усього світу є сигнали супутників GPS з кодами С/А (Coarse/Acquisition, "коди грубого захоплення") [4].

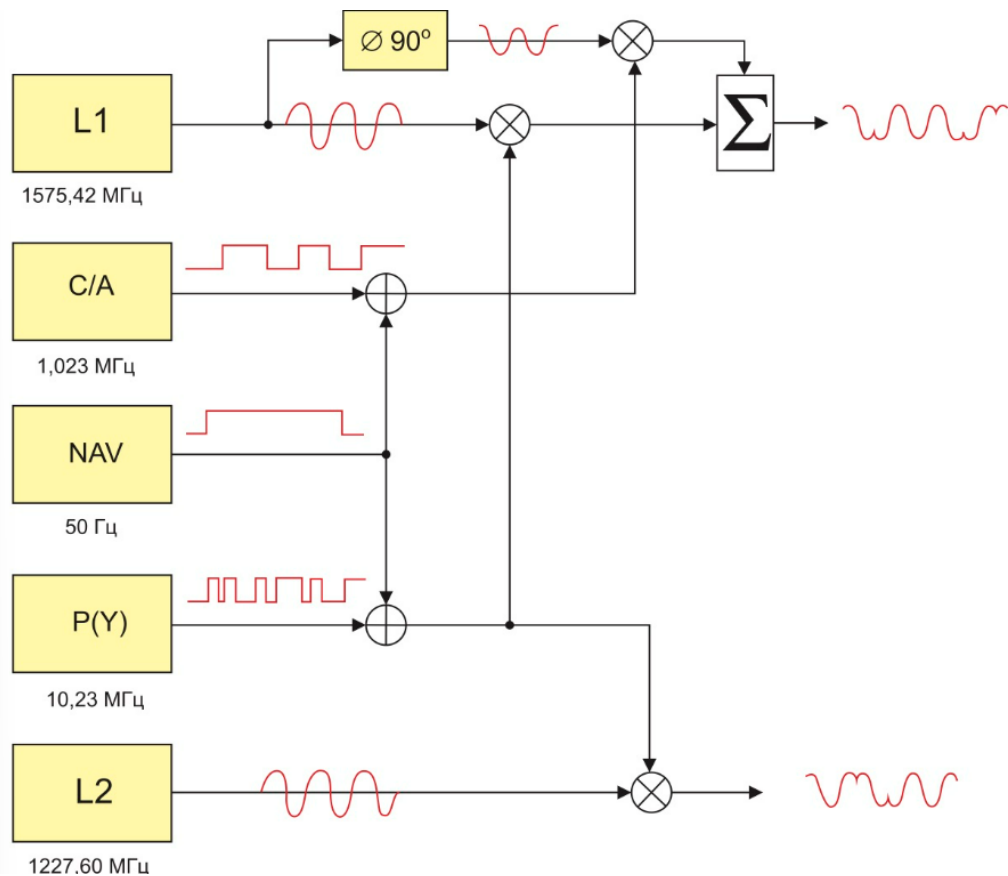


Рисунок 1.1 – Принцип кодування сигналів GPS

У системі GPS передбачено можливість навмисного зниження точності визначення координат за кодом C/A до рівня 100 м. Таке навмисне зниження точності може бути запроваджено тільки за спеціальним рішенням уряду США. Точний P-код є основним далекомірним псевдовипадковим кодом і унікальний для кожного супутника. Приймання та оброблення сигналів із цим кодом доступні не всім навігаційним GPS-приймачам. Для спеціальних і військових цілей у системі GPS замість P-коду використовується Y-код. Сигнали з цим кодом доступні для розшифровки тільки ліцензованими користувачами, які мають відповідний ключ [5].

На рис. 1.2 проілюстровано принцип кодування сигналів в ГЛОНАСС. У системі ГЛОНАСС використовується частотний поділ сигналів (FDMA). Це означає, що кожен супутник передає інформацію на своїй власній частоті у вигляді двох фазоманіпульованих сигналів. Іншими словами, корисна інформація накладається на несучу частоту шляхом інверсії фази на 180° .

Частота першого сигналу $L1 = 1602$ МГц, а частота другого - $L2 = 1246$ МГц. Ці частоти зазвичай називають "перша" і "друга" несучі. Крок за частотою $L1$ залишає $9/16 = 0,5625$ МГц, а за частотою $L2$ $7/16 = 0,4375$ МГц. Відношення другої і першої частот дорівнює $7/9$. Сигнал у діапазоні $L1$ аналогічний C/A-коду в GPS і доступний для всіх споживачів у зоні видимості угруповання супутників. Сигнал у діапазоні $L2$ призначений для військових і спеціальних застосувань, і його структура не розкривається. На супутниках ГЛОНАСС останніх моделей (серія К) запроваджено додаткове передавання сигналу з кодовим поділом (ПКР) у діапазоні $L3$ (1,2 ГГц) [6].

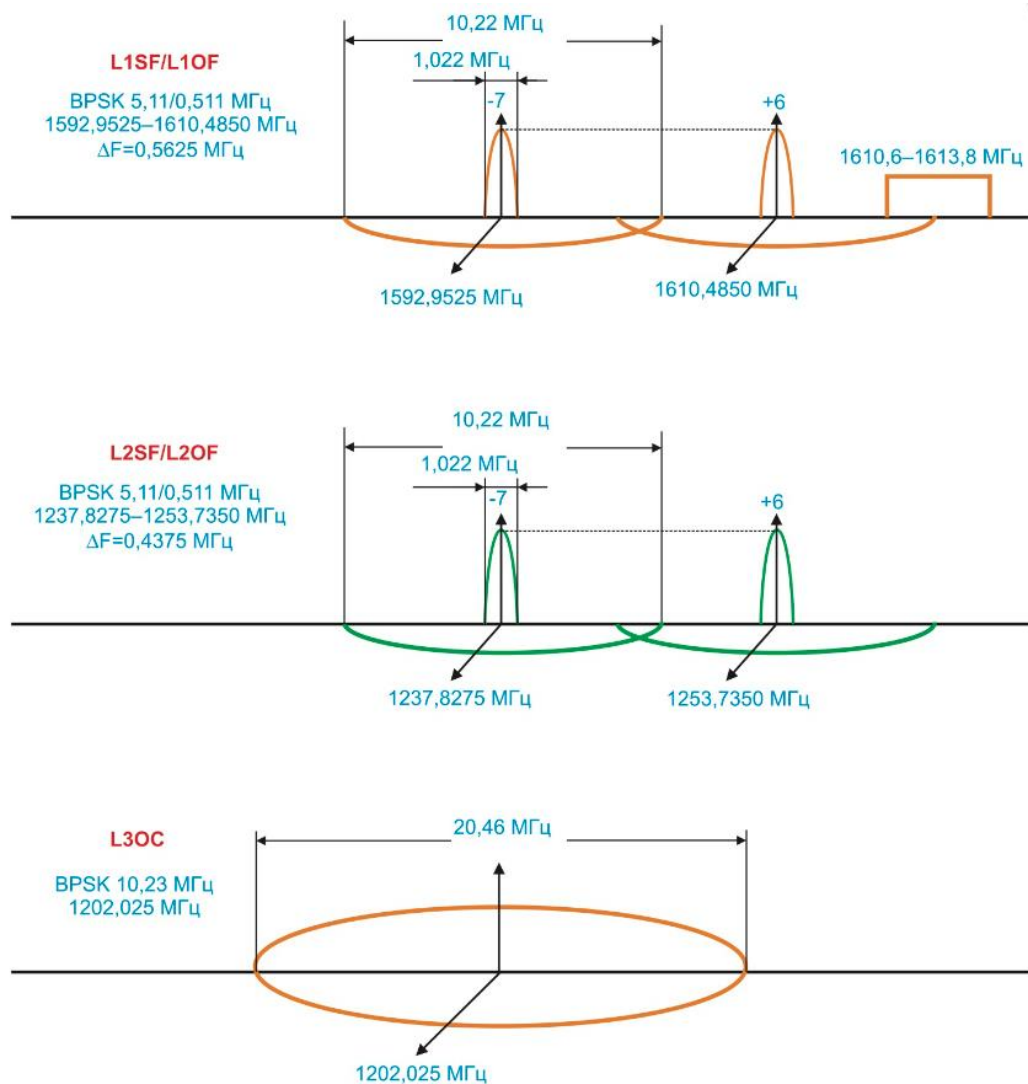


Рисунок 1.2 – Принцип кодування сигналів в ГЛОНАСС

Схему кодування сигналів GPS та ГЛОНАСС наведено у додатку А.

Ідею спільного використання різних супутникових систем було вперше реалізовано в 1992 р. у рамках створення міжнародної організації IGS (International GPS Service). Пізніше з'явився термін термін Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Організація IGS надає на відкритій основі високоякісні дані, продукти та послуги ГНСС для підтримки наземної референцної системи координат, спостереження та дослідження Землі, позиціонування, навігації та синхронізації, а також для інших застосувань, які приносять користь науці та суспільству [7].

Наразі International GNSS Service (IGS) є добровільним об'єднанням понад 200 організацій, що займаються збором даних від супутників різних супутникових навігаційних систем на постійно працюючих базових станціях, розташованих по всьому світу. Дані з цих станцій використовуються для формування поправок для роботи в режимі диференціальної корекції реального часу (DRTK-поправки).

Фундаментальними для IGS є ключові цінності, які поділяються всією організацією, а саме: пропаганда політики відкритих даних, з відкритим доступом до даних та продуктів, вітання внесків від усіх організацій та участь з ними, технічний розвиток за рахунок "дружньої конкуренції", цілеспрямована взаємодія з політичними структурами з метою підвищення взаємної обізнаності про IGS та геодезію в цілому.

Приймачі, що використовуються в IGS, здатні приймати й обробляти сигнали різних навігаційних супутникових систем, дістали назву GNSS-приймачів.

1.2 Загальна характеристика, класифікація та принцип роботи GNSS-приймачів для супутникових навігаційних систем

Супутниковий приймач (також ГНСС-приймач) — радіоприймальний пристрій для визначення географічних координат поточного місця розташування антени приймача, на основі даних про тимчасові затримки

приходу радіосигналів, що випромінюються супутниками навігаційних систем. Залежно від використовуваної системи навігації поділяються на GPS-приймачі, ГЛОНАСС-приймачі і так далі, проте в даний час більшість споживчих та професійних супутникових приймачів можуть працювати з кількома супутниковими системами навігації [8].

Пристрої, що використовують у своїй роботі сигнал із супутників GNSS, можна розділити на професійні, що мають високу точність позиціонування, і побутові. Перші переважно використовуються у військових цілях, для геодезії та картографії, а другі отримали широке застосування у різних сферах сучасного життя.

Професійне GNSS-обладнання відрізняється якістю виготовлення компонентів (особливо антен), використовуваним програмним забезпеченням (ПЗ), режимами роботи (наприклад RTK, binary data output), робочими частотами (L1 + L2), алгоритмами придушення інтерференційних залежностей, сонячної активності (вплив), підтримуваними системами навігації (наприклад, GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou), збільшеним запасом електроживлення і, зрозуміло, ціною.

Професійні GNSS-приймачі класифікуються як приймачі геодезичного класу та приймачі ГІС-класу:

- геодезичні приймачі - пристрої, що використовуються для геодезичних робіт;
- приймачі ГІС-класу - являють собою промисловий варіант кишенькового персонального комп'ютера, в який вбудовано приймально-передавальний пристрій та антена, з встановленим спеціалізованим програмним забезпеченням.

Схему, що відображає загальну класифікацію GNSS приймачів за складністю технічних рішень, типом, видом сигналів, що опрацьовуються та точністю представлено на рис. 1.3.

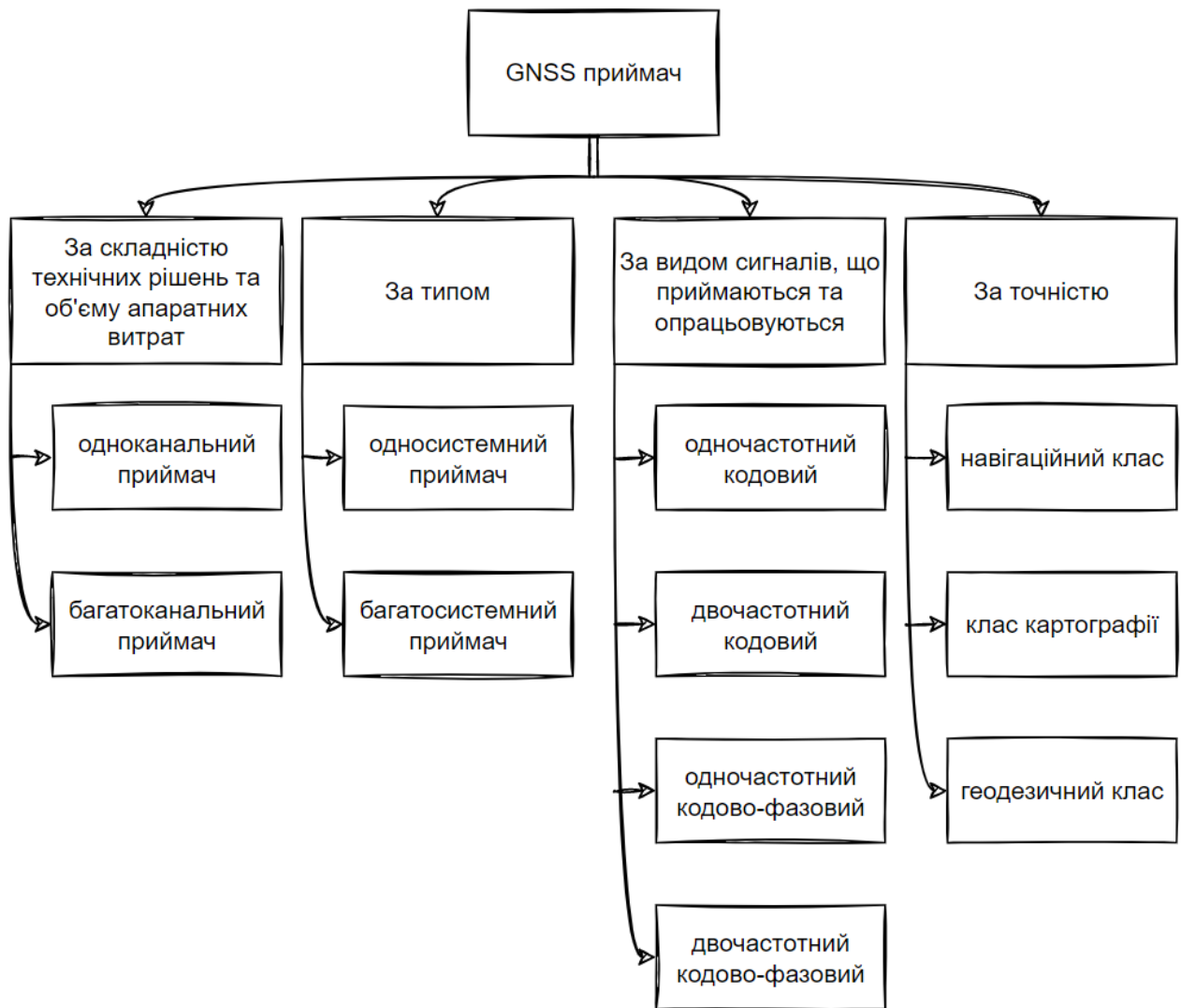


Рисунок 1.3 – Загальна класифікація GNSS приймачів

За складністю технічних рішень та об'ємом апаратних витрат супутникові приймачі поділяють на:

- одно канальні: дозволяють в кожний поточний момент часу вести прийом та опрацювання радіосигналів тільки одного супутника;
- багатоканальні: дозволяють одночасно приймати та опрацьовувати сигнали декількох супутників.

На сьогоднішній день випускаються переважно багатоканальні приймачі.

За типом приймачі діляться на:

- односистемні: приймачі, що приймають сигнали лише однієї супутникової системи навігації, а саме GPS;

- багатосистемні: приймачі, що крім GPS приймають сигнали ГЛОНАСС та інших систем.

Найсучасніші приймачі можуть приймати широкий спектр супутникових сигналів: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, та інші.

В залежності від виду сигналів, що приймаються та опрацьовуються приймачі поділяються на:

- одночастотні кодові;
- двочастотні кодові;
- одночастотні кодово-фазові;
- двочастотні кодово фазові.

Кодові приймачі призначені для визначення тривимірного положення точки, швидкості та напрямку руху. Вони дають змогу визначати планове положення точки, як правило, з точністю до одиниць м., а висотне положення визначають із точністю близько 10 м. Двочастотні кодові приймачі забезпечують субметрову точність. Для підвищення точності висотних вимірювань у них вбудовують баровисотомір. Ці приймачі зручні під час виконання польових географічних і геологічних робіт, оскільки на екрані можна відобразити карту маршруту, визначити своє місцеположення, відстань, напрямок і час прибуття до мети. Отримані результати можуть накопичуватися і зберігатися в пам'яті приладу, а навіщо вводиться в комп'ютер для подальшого опрацювання. Ці приймачі мають малі габарити і масу, працюють у широкому діапазоні температур і малоенергоємні.

За точністю супутникові приймачі поділяються на три класи:

- навігаційний клас – точність визначення координат 150-200 м;
- клас картографії та ГІС – 1-5 м;
- геодезичний клас – до 1 см (1-3 см в кінематичному режимі, до 1 см при статичних вимірюваннях).

Геодезичний GNSS-приймач – радіоприймальний пристрій для визначення географічних координат поточного місця розташування антени приймача, на основі даних про часові затримки приходу радіосигналів.

Сучасний геодезичний GNSS-приймач складається з трьох основних елементів:

- приймач - основний пристрій, який отримує інформацію від супутників, обробляє її, а також здійснює запис у пам'ять або на зовнішній пристрій;
- антена - приймальний елемент;
- контролер - пристрій, що дає змогу керувати роботою приймача.

Загалом геодезичні приймачі дають кращу точність визначення координат, проте розвиток технологій дозволяє деяким моделям ПС-класу успішно їх замінювати.

Основа будь-якого приймача GNSS - це чіпсет, на якому він працює. Довгий час усі приймачі випускалися з 12-канальними чіпсетами. Крім того, що 12 каналів недостатньо для швидкого «холодного старту» — початкового визначення свого місця розташування, такі приймачі потребували відкритого неба, оскільки працювали тільки з прямою видимістю супутників (мінімум 3; чим більше, тим точніше). На сьогоднішній день всі подібні приймачі вважаються застарілими та зняті з виробництва. На даний момент максимальна кількість каналів на професійному приймачі - 440 (два чіпсети по 220 каналів у приймачі). Оскільки навігаційні супутники ведуть мовлення на різних частотах, для підвищення точності, професійне обладнання визначає координати за допомогою всіх доступних каналів всіх видимих в даний момент часу супутників. Незважаючи на те, що теоретично, кількість каналів професійного геодезичного обладнання можна підвищувати за рахунок встановлення додаткових чіпсетів, найближчим десятиліттям це недоцільно, оскільки 440 каналів вистачить на одночасне стеження за всіма запущеними супутниками (що в принципі неможливо, оскільки приймач отримує сигнал від супутників, що у обмеженому секторі небесної сфери) [9].

Супутникові приймачі для широкого кола користувачів можна класифікувати так:

- портативні пристрої – автомобільні (окремий портативний пристрій або вбудований як бортовий комп'ютер), туристичні, спортивні;

- вбудовані як функціональний вузол в інші пристрої - КПК, ноутбук або мобільний телефон;
- GNSS-трекери, GNSS-логери, які ведуть запис та передачу координат на серверний центр та використовуються для супутникового моніторингу автомобілів, людей, інших об'єктів.

Перші мають власний процесор для виконання навігаційних функцій, а другі навіть будучи оснащеними власними GNSS-чіпсетами, використовують для своєї роботи навігаційні програми, призначені для конкретної операційної системи основного пристрою. Як правило GNSS-трекери і GNSS-логери не оснащуються власними дисплеями для відображення інформації, і служать виключно для збору, передачі та зберігання даних, які згодом можуть бути оброблені та використані в різних цілях, наприклад для супутникового моніторингу автомобілів.

Розрізняють два основних класичних типи апаратних приймачів ГНСС - паралельного і послідовного типу. У приймачі паралельного типу сигнали від супутників різних СНС обробляються незалежно, окремими блоками. Структурно обидва канали аналогічні. Однак антена, блок RF front-end, блоки обробки, фільтри та АЦП у паралельних каналів різні.

У приймачах ГНСС послідовного типу використовується один універсальний канал, у якому по черзі обробляються сигнали GPS і ГЛОНАСС. У таких приймачах використовуються спеціальні типи антен. Роботою приймачів ГНСС послідовного типу керує зовнішній контролер, який перемикає як апаратну, так і програмну частини системи. Контролер може бути запрограмований на два основні режими роботи. В одному випадку задається точність вимірювання. У цьому варіанті приймач набирає інформацію від максимально можливого числа супутників. У другому випадку основним критерієм є час обчислення координат. При цьому приймач працює з мінімально можливою кількістю супутників, але з меншою точністю [10].

Сучасні професійні ГНСС-приймачі являють собою складні технічні пристрої, до яких висуваються досить жорсткі вимоги. На рис. 1.4 наведено

схему роботи суміщеної системи супутникової навігації в класичному варіанті. Приймач приймає сигнали від будь-якої кількості супутників різних супутникових навігаційних систем, що знаходяться в зоні прямої видимості. Існують багатоканальні приймачі, з кількома десятками каналів. На першому етапі приймач обчислює відповідні кожному супутнику значення псевдовіддаленностей, PR_1 , PR_2 , PR_m . На наступному етапі обчислюються доплерівські, атмосферні, багатопроменеві та геометричні поправки [11].

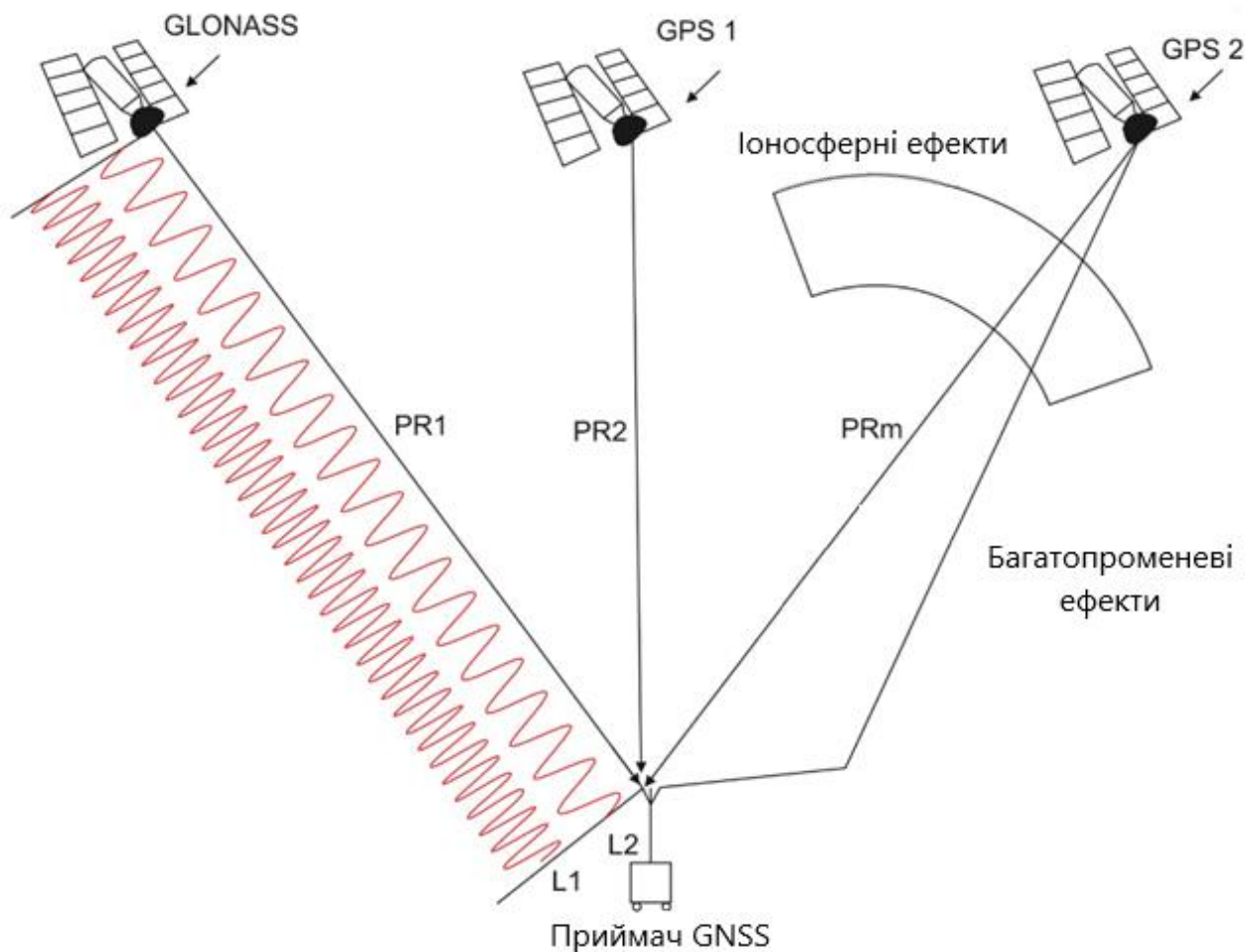


Рисунок 1.4 – Схема роботи суміщеної системи супутникової навігації в класичному варіанті

Без урахування ефекту Доплера, атмосферних і багатопромених ефектів точність визначення координат не перевищує сотень метрів. Щоб зменшити похибки визначення координат, зумовлені атмосферними та багатопроменими ефектами, використовують як інструментальні, так і

обчислювальні методи. Як основний інструментальний метод, що дає змогу збільшити точність обчислень координат, застосовується так званий диференціальний режим роботи GNSS. У диференціальному режимі використовують базові станції (БС), на яких встановлено високоточні приймачі GNSS. Координати цих БС відомі з високою точністю. Під час приймання сигналу супутника обчислюються поправки між обчисленими миттєвими значеннями координат і відомими координатами БС. Ці поправки каналами радіозв'язку (FM, GSM/GPRS, Wi-Fi, BT, ZigBee) передаються на віддалений робочий приймач GNSS.

1.3 Аналіз сучасних досліджень питання надійності супутникових приймачів та постановка задачі дослідження

Методичний запис і представлення просторових даних є центральними в різноманітних польових роботах і дослідженнях. Високоякісні вимірювання стають доступнішими завдяки швидко розвиваються технологіям. Ці нові інструменти разом із мобільними технологіями для ефективного запису польових даних відкривають можливість точного місцезнаходження будь-якого об'єкта [12]. Оскільки дані GNSS використовуються в широкому спектрі галузей та є важливою частиною функціонування сучасного світу, можуть ставатися навіть такі випадки, коли помилка у визначенні місцезнаходження призведе до серйозних наслідків. Тому отримання точних даних про місцезнаходження за допомогою GNSS-приймачів має першочергове значення.

В сучасній літературі частіше за все проводяться дослідження на перевірку точності визначення координат в межах поля різними типами приймачів, а визначення їх надійності досліджується шляхом включення тестів, спрямованих на вимірювання точності позиціонування в польових умовах. Тобто визначається ймовірність того, що приймачі можуть перебувати в тих чи інших станах. За результатами таких досліджень можуть бути розроблятися методики оцінки та відбору GPS-приймачів, виходячи з їх якості, перед

використанням. Але ця якість та надійність в першу чергу визначається саме дослідженням їх здатності точно визначати координати, а ніж фізичною характеристикою приладів та їх надійністю у сенсі безвідмовної роботи.

Популярні та комерційно доступні супутникові приймачі вважаються досить точними та надійними пристроями, проте, окрім довіри та репутації торгової марки, мало чим можна обґрунтувати цю думку.

Методики, засновані на моделюванні роботи супутникових приймачів у програмних забезпеченнях дозволяють проаналізувати та обрати користувачу приймачі за якістю, стабільністю та достовірністю інформаційних даних про місцезнаходження, які вони надають. Але реальні умови експлуатації можуть відрізнятися від змодельованих.

Більшість досліджень надійності супутникових приймачів вимагає великого числа випробувань та значної статистики відмов за достатньо великий проміжок часу, а також детальних розрахунків елементів принципів схем.

Окрім дослідження показників надійності на стадії проектування та випуску, необхідно досліджувати надійність системно, охоплюючи увесь життєвий цикл роботи пристрою та проводити дослідження шляхом цензурування та аналізуючи експлуатаційні дані про наявність чи відсутність відмов.

Для супутникових приймачів практично необхідне підвищення точності оцінок показників надійності технічних систем, яке при експериментальній оцінці (чи в результаті спостережень в процесі експлуатації) призводить до істотного скорочення об'єму випробувань або об'єму спостережень (зменшенню кількості випробовуваних (спостережуваних) зразків на 30-50% для заданої достовірності і точності), а також до підвищення точності оцінок показників надійності. Процес деградації виробів електронної техніки разом з монотонними реалізаціями (механічне руйнування, знос, старіння компонентів) внаслідок електричних явищ має і немонотонні реалізації, які доцільно було б враховувати та використовувати марківський немонотонний процес) і дифузійний немонотонний розподіл напрацювання до відмови (DN- розподіл).

Тому у роботі пропонується дослідити можливість оцінювання показників надійності супутникових приймачів в умовах малої статистики відмов, або навіть у її відсутності, з використанням методів розрахунку на основі двопараметричних моделей відмов.

Структурну схему алгоритму проведення оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень представлено на рис. 1.5 та у додатку Б.

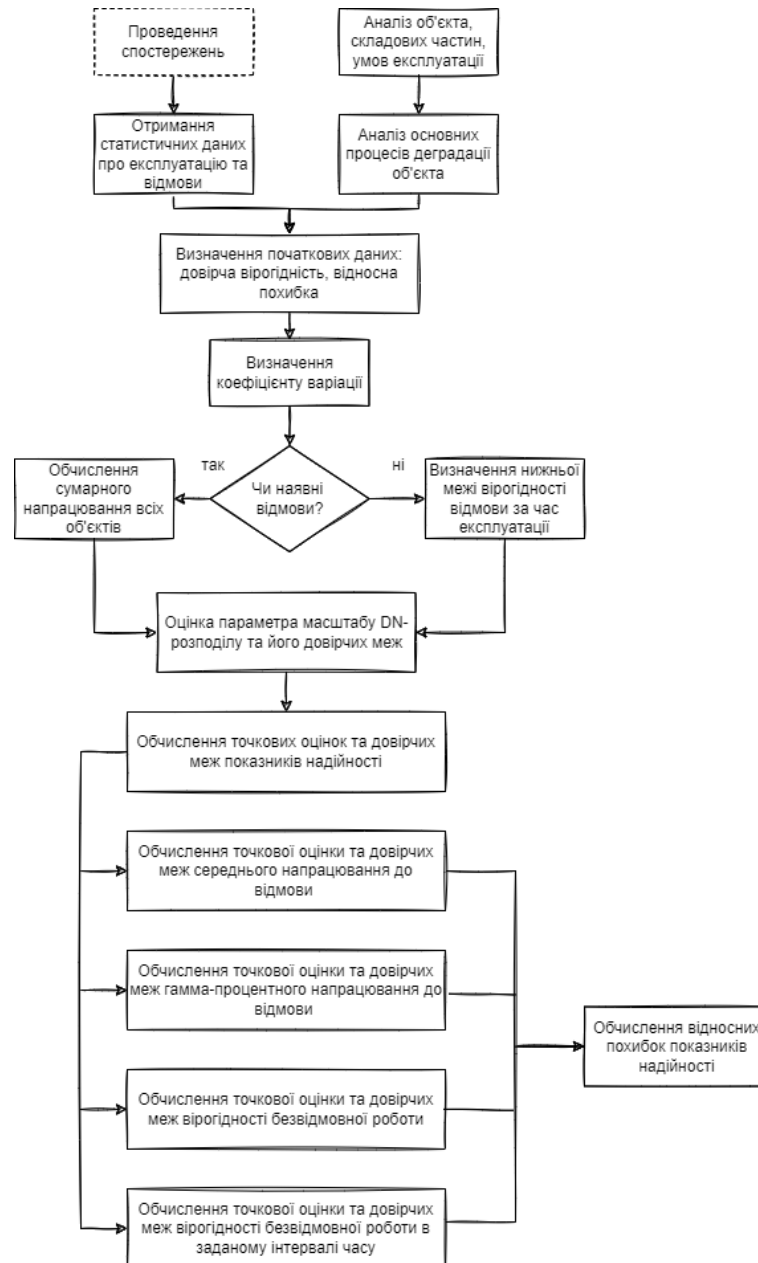


Рисунок 1.5 – Структурна схема процесу проведення оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень

2 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ, ЙОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ФУНКЦІЇ, СКЛАД ТА СТРУКТУРА

2.1 Супутниковий GNSS приймач Leica GR50, його призначення та функції

Leica GR50 – це приклад сучасного супутникового GNSS приймача, що використовується для роботи з постійними та тимчасовими базовими станціями, у тому числі для отримання мережевого RTK рішення, одиночних базових станцій, вирішення завдань моніторингу та наукових проектів. Також прилад збирає, зберігає та розповсюджує дані GNSS, підходить для інтегрованих рішень, підтримує різні допоміжні пристрої: засоби зв'язку, метеодатчики та нахиломіри.

Багатофункціональний GNSS приймач Leica GR50 дозволяє вирішувати широке коло завдань. Вони розроблені відповідно до високих вимог до надійності і працездатності та з перспективою на майбутнє і задає нові стандарти в області GNSS технологій. Внутрішнє програмне забезпечення, що постійно оновлюється дозволяє додати підтримку нових сигналів, як тільки вони стануть доступними. 555 каналів дозволяють одночасно відстежувати і приймати сигнали всіх існуючих і планованих навігаційних супутникових систем, таких як GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, QZSS і SBAS [13].

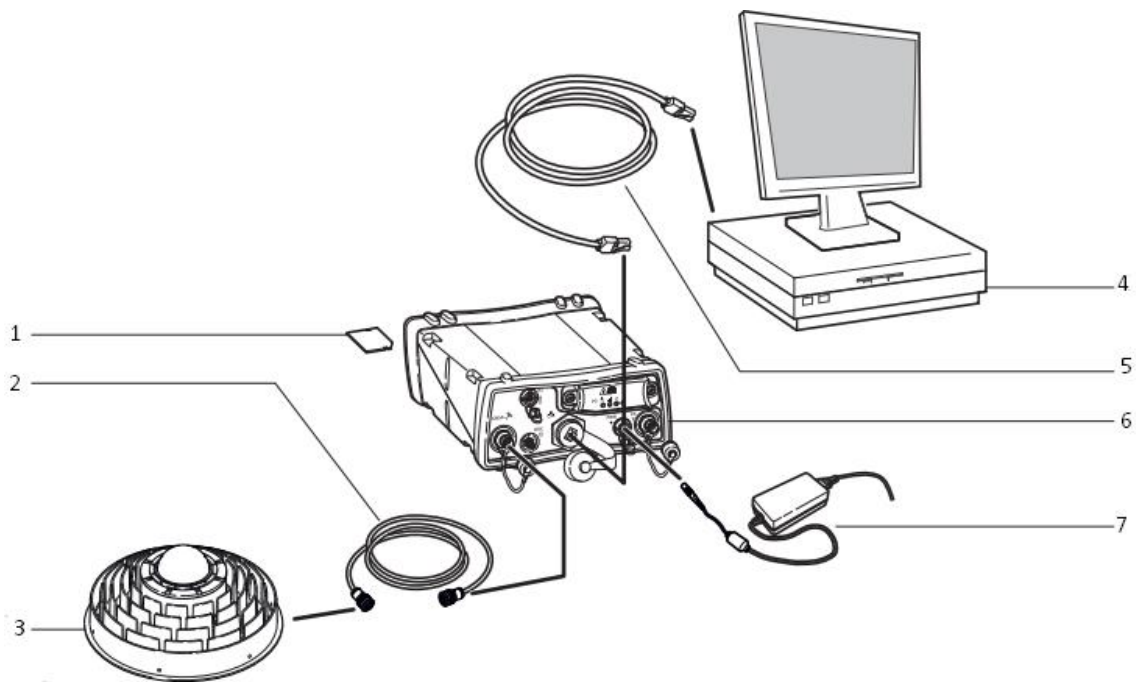
На рис 2.1 показано зовнішній вигляд супутникового приймача Leica GR50.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд супутникового приймача Leica GR50

За своїми технічними характеристиками і надійності роботи, приймачі GR50 відповідають повноцінному серверному обладнанню.

На рис. 2.2 наведено схему апаратного забезпечення базової станції у мінімальній комплектації, тобто мінімальний набір компонентів, необхідних для роботи GR50.



1 – SD-карта;

1 – Антенний кабель;

2 – GNSS антена;

3 – Комп'ютер, який запускає веб-інтерфейс або Leica GNSS Spider;

4 – Кабель Ethernet або USB;

5 – GR50;

6 – Блок живлення

Рисунок 2.2 – Мінімальний набір компонентів, необхідних для роботи GR50

Основні функції даного супутникового приймача:

- створений для роботи з постійними і тимчасовими базовими станціями, зокрема для отримання мережевого RTK рішення, одиночних базових станцій, вирішення завдань моніторингу та наукових проектів;

- збирає, зберігає і поширює дані GNSS;
- підходить для інтегрованих рішень;
- підтримує різні допоміжні пристрої: засоби зв'язку, метеодатчики та нахиломіри [14].

Прилад може приймати широкий спектр супутникових сигналів: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS, NavIC, SBAS.

Прилади даної серії мають багато характеристик та особливостей:

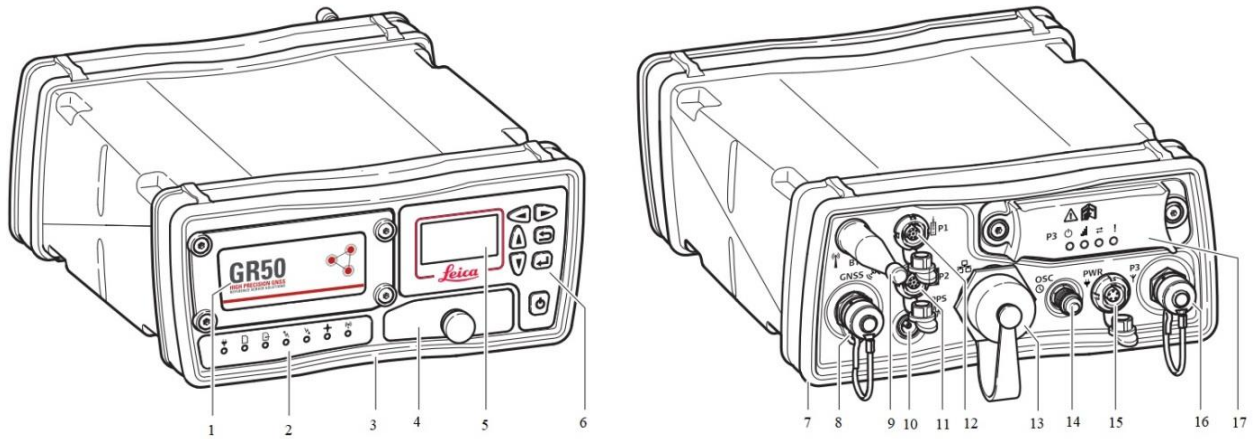
- запис і передача даних із частотою 50 Гц;
- SmartTrack + вимірювальне обладнання з опціями розширеного аналізу радіочастотного спектра і придушення перешкод для підвищення точності та доступності;
- до 12 сесій запису і 20 потоків даних;
- підтримує велику ємність пам'яті - на диску, до 32 ГБ;
- сучасний зручний веб-інтерфейс GUI з підтримкою багатьох мов;
- обчислює фіксовану позицію для додатків для структурного моніторингу та моніторингу цілісності опорних станцій;
- легкий і міцний металевий корпус;
- відповідність нормам міцності IP67, включаючи укріплений порт Ethernet;
- легко встановлюється на комп'ютерну стійку, у шафу, настінну полицю; також легко ставиться один на одний;
- вбудований слот для пристрою зв'язку.

Окрім основних характеристик, які виконують приймачі, прилади серії GR50 відрізняються від інших такими особливостями:

- вбудований дисплей та клавіатура;
- вбудований акумулятор та зарядний пристрій;
- USB хост порт;
- живлення по Ethernet;
- Bluetooth або WLAN;
- PPS та порт подій.

2.2 Склад та структура об'єкту

Складові компоненти супутникового приймача GR50 представлено на рис. 2.3.



- 1 – Кришка акумуляторного відсіку;
- 2 – Індикатори;
- 3 – Передній захисний бампер;
- 4 – Кришка слота для USB та SD-карти;
- 5 – Дисплей;
- 6 – Кнопки;
- 7 – Задній захисний бампер;
- 8 – Порт GNSS антени;
- 9 – Антена Bluetooth/WLAN;
- 10 – Порт виводу PPS;
- 11 – Серійний порт та порт подій (P2);
- 12 – Серійний порт (P1);
- 13 – Захищений порт Ethernet;
- 14 – Зовнішній порт осцилятора;
- 15 – Порт живлення;
- 16 – Комунікаційний слот-порт (P3);
- 17 – Комунікаційний слот-порт (P3)

Рисунок 2.3 – Складові компоненти супутникового приймача GR50

На рис. 2.4 представлено структурну схему супутникового приймача G50.

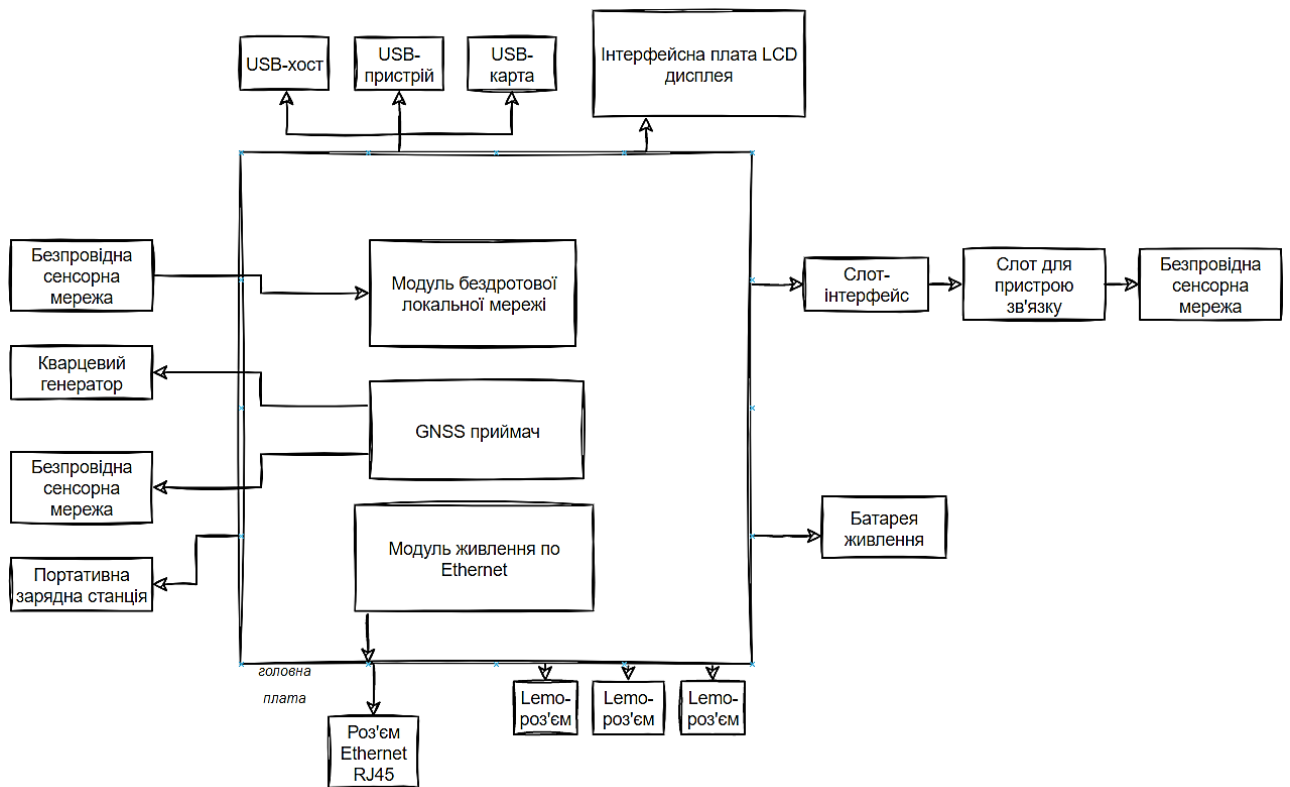


Рисунок 2.4 – Структурна схема супутникового приймача G50

Структурна схема супутникового приймача G50 також показана у додатку В.

Приладом можна керувати:

- натисканням на кнопки;
- через веб-інтерфейс;
- ПЗ Leica GNSS Spider;
- через зовнішній інтерфейс (OWI) .

Прилад постачається зі стандартним набором налаштувань, що задовольняє потреби стандартного користувача. Веб-інтерфейс або Leica GNSS Spider допоможуть скорегувати налаштування приладу.

Веб-інтерфейс основного компонента використовується для конфігурації та роботи з інструментом.

Операційні системи, що підтримують налаштування веб-інтерфейсу через USB:

- Windows 7 (32 bit і 64 bit);
- Windows 8 (32 bit і 64 bit);
- Windows 10 (32 bit і 64 bit).

Усі поточні версії таких браузерів перевірені та підтримуються:

- Internet Explorer;
- Firefox;
- Chrome.

Інші браузери, такі як Opera і Safari, також можуть підтримуватися, але регулярна перевірка їхньої сумісності не проводиться.

Веб-інтерфейс - це основний спосіб зв'язку користувача з приладом. Щоб правильно використовувати веб-інтерфейс браузер повинен підтримувати JavaScript.

Програмне забезпечення базової станції Leica GNSS Spider забезпечує повну функціональність приладу, як і веб-інтерфейс.

Деякі налаштування конфігурації доступні і в веб-інтерфейсі, і в Leica GNSS Spider. Якщо такі налаштування виконуються у веб-інтерфейсі, а потім з Leica GNSS Spider виконується Вивантаження налаштувань або Старт, то налаштування переписуються. У цьому випадку необхідно використовувати веб-інтерфейс виключно для тих налаштувань, які недоступні в Leica GNSS Spider.

Живлення приймача може забезпечуватися як від внутрішніх, так і від зовнішніх джерел живлення. Через Y-кабель можна під'єднати до двох зовнішніх джерел живлення одночасно. GR50 оснащується вбудованою батареєю і зарядним пристроєм, який може короткочасно працювати як джерело безперебійного живлення. Але для довготривалого захисту від перебоїв із живленням може використовуватися зовнішнє джерело безперебійного живлення. У таблиці 2.1 представлено можливі способи живлення приймача G50.

Таблиця 2.1 – Можливі способи живлення приймача G50

Модель	Блок живлення
Внутрішній	Акумулятори GEB242 в якості внутрішніх елементів живлення. Акумулятор можна зарядити від зовнішнього джерела живлення.
Зовнішній	GEV242 Блок живлення 110 /240 В змінного струму з вихідною напругою 24 В DC GEV270 Блок живлення 90-264 В змін. струму з вих. напругою 13,2 В пост. струму і потужністю 40 Вт з кабелем GEV97 Акумулятор GEB171/GEB373, що під'єднується через кабель Автомобільний акумулятор, під'єднаний за допомогою кабелю перетворювача Живлення через Ethernet під'єднується кабелем категорії 5 Ethernet для отримання потужності 13 Вт.
Y-кабель	Подвійний силовий Y-кабель GEV243 може використовуватися з одним блоком живлення GEV242 24 В і одним зовнішнім джерелом живлення. Чорний роз'єм Lemo на цьому кабелі підтримує тільки джерело живлення GEV242 Y-кабель GEV172 можна використовувати з будь-якою комбінацією блока живлення 90-264 В перем. струму на 13,2 В пост. струму 40 Вт GEV270 або акумулятором GEB171.

Прилад GR50 оснащений світлодіодними індикаторами (Light Emitting Diode - LED), які показують стан інструмента. Індикатор живлення показує чи включений прилад, який акумулятор до нього підключений, рівень заряду. Індикатор SD-карти висвітлює інформацію про стан правильності підключення SD-карти, інформацію щодо відсотків вільного місця на карті, та чи пишуться дані у пам'ять SD-карти. Індикатор запису первинних даних показує запис активних сесій, та доступність супутників. Індикатор позиціонування представляє таку інформацію: інструмент вимкнений; приймач бачить супутники, але ще не визначив координати; виконано ініціалізацію в

навігаційному режимі; немає видимих супутників, немає навігаційних координат. Також є індикатор виведення потоку RT даних та індикатор отримання цих даних.

Прилад має сучасну клавіатуру та дисплей з можливістю первинно керувати приладом та його базовими налаштуваннями навіть без використання веб-інтерфейсу та програмного забезпечення.

GR50 забезпечений хост-портом USB, портом USB і слотом для SD-карти.

Порт USB може використовуватися для:

- під'єднання GR50 до комп'ютера і доступу до веб-інтерфейсу і FTP сервера.
- під'єднання GR50 до CS10/CS15/CS20 польового контролера і доступу до веб-інтерфейсу.
- підключення накопичувача USB до GR50 і передавання MDB і RINEX файлів з карти SD.

Дані зберігаються на знімній SD карті.

Завдяки наявності достатньої кількості роз'ємів та серійного порту, до приймача можна під'єднати різні пристрої, зокрема GSM/Radio пристрої в корпусі GFU, різні необхідні слот-пристрої, зовнішні модеми, зовнішні радіо модеми.

Основною робочою технологією є Leica SmartTrack+:

- модернізоване програмне ядро обробки вимірювань 7-го покоління (555 універсальних каналів, з незалежним розподілом і можливістю одночасного приймання сигналів від щонайменше 140 супутників за кількома частотами);
- стійке відстеження сигналу і технологія зниження перешкод забезпечують надійні, безперервні, високоточні GNSS мультичастотні вимірювання навіть в ускладнених умовах, забезпечивши цілісність даних;

- один з лідируючих в даній індустрії, імпульсний корелятор багатопроменевості – технологія для забезпечення чудової якості вимірювань;
- відмінне відстеження низькорозташованих над горизонтом супутників;
- дуже низькі шуми GNSS під час вимірювання несучої частоти фазових вимірювань із точністю <math><0.5\text{ мм}</math>;
- мінімальний час ініціалізації.

Основа приладу – це мікросхема OEM719, яка є багаточастотним, зворотньо сумісним GNSS приймачем, що підтримує всі сучасні сигнали, тобто сигнали усіх супутникових навігаційних систем які наразі функціонують. Зовнішній вигляд GNSS-приймача OEM719 показано на рис. 2.5.

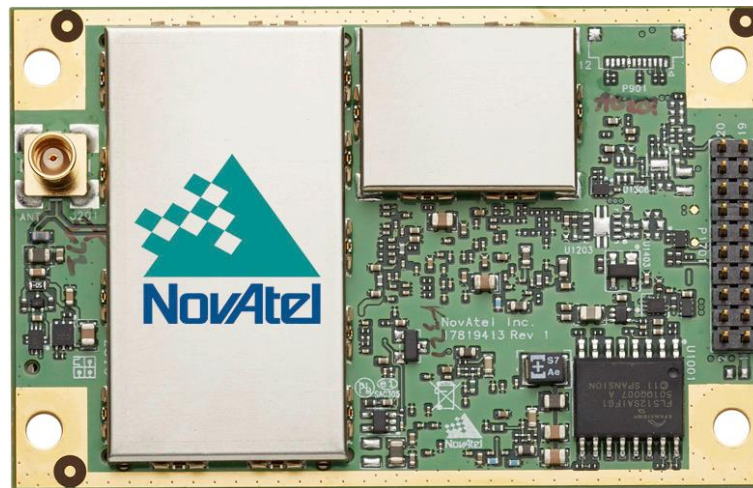


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд GNSS-приймача OEM719

Багаточастотний датчик OEM719 забезпечує точне позиціонування. Вдосконалені функції зменшення завад підтримують високу продуктивність у складних умовах. OEM719 забезпечує найефективніший спосіб швидкого виведення на ринок потужних продуктів з підтримкою Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS). Він сумісний по форм-фактору і роз'єму з популярними приймачами OEM615 і OEM617 від Hexagon | NovAtel. Завдяки сантиметровому позиціонуванню з використанням послуг корекції, що надаються супутником TerraStar, OEM719 забезпечує глобально доступне,

високопродуктивне позиціонування без необхідності в дорогій мережевій інфраструктурі [15].

OEM719 можна конфігурувати різними способами для максимальної гнучкості. OEM7 прошивка від NovAtel дозволяє користувачам конфігурувати OEM719 для своїх унікальних потреби додатків. OEM719 масштабується для забезпечення позиціонування від субметрового до сантиметрового рівня позиціонування і може бути оновлений в польових умовах до всіх варіантів програмного забезпечення сімейства OEM7.

Мікросхема OEM719 може відстежувати всі існуючі та майбутні сузір'я GNSS, включаючи GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, QZSS та NavIC. Програмне забезпечення можна оновити для відстеження модернізованих сигналів, коли вони стають доступними.

У даному приладі використовується модуль бездротової локальної мережі cB-OWL221ax. Модулі бездротової локальної мережі від connectBlue - це промислові модулі з низьким енергоспоживанням для мереж IEEE 802.11abgn, призначені для вбудованих, мобільних, охоронних і промислових додатків. Вони містять всі необхідні функції для повної та ефективної інтеграції бездротової локальної мережі: МАС/базовий діапазон, дводіапазонний радіоприймач, підсилювачі та антенні комутатори [16].

Модуль має схвалення типу радіозв'язку для Європи і неліцензійний дозвіл на використання модульних передавачів в США (FCC) і Канаді (ICANN). (FCC) та Канаді (IC). OEM-модулі IEEE 802.11abgn від connectBlue забезпечують сучасні функції низького енергоспоживання, сумісність, міцність і надійність. Модулі зводять до мінімуму роботу, необхідну для впровадження IEEE 802.11 в пристрої, оскільки разом з пакетом драйверів надають все програмне та апаратне забезпечення, затвердження типу, сертифікацію EMC тощо. Він розроблений для надійних, вимогливих промислових пристроїв і додатків та забезпечує високу продуктивність. Модулі бездротової локальної мережі connectBlue доступні в різних версіях. На рис. 2.6 показано блок схему модуля бездротової локальної мережі.

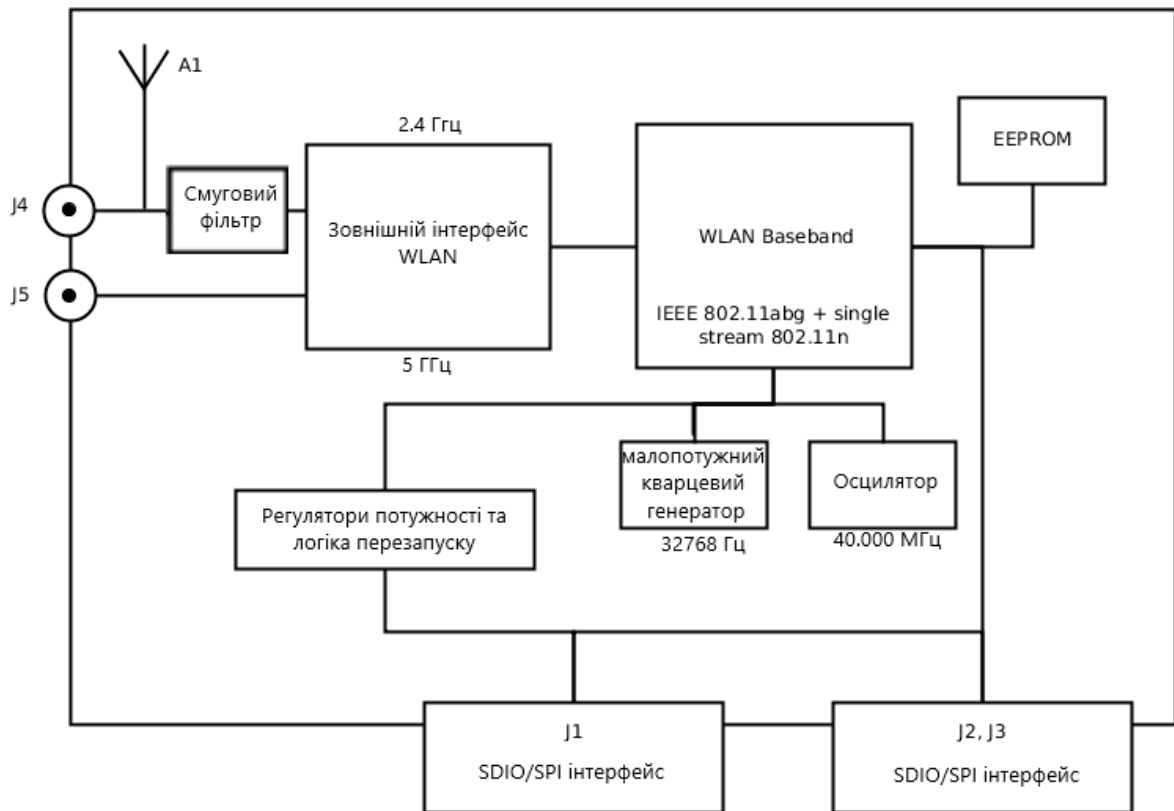


Рисунок 2.6 – Блок схема модуля бездротової локальної мережі

Основними характеристиками модуля є дводіпазонна робота, програмний драйвер доступний або адаптований для будь-якого пристрою, тип радіостанції схвалений для Європи, промисловий діапазон температур від -30 до $+85$ °C, підтримка режимів низького енергоспоживання. Модуль відповідає стандартам електромагнітної сумісності.

Завдяки використанню цього модуля передача даних здійснюється через радіоефір, а об'єднання пристроїв у мережу відбувається без використання кабельних з'єднань.

Прилад використовує PoE модуль. Power over Ethernet (PoE, живлення через Ethernet) - це мережева функція, що дає змогу подавати живлення на мережеві пристрої по кабелю Ethernet, який використовується для передавання даних [17].

Функція PoE дає змогу використовувати один кабель для передавання даних і подавання живлення, скорочуючи витрати на купівлю та прокладання кабелів для мережевого обладнання. Функція PoE значно спрощує та

здешевлює створення нових мереж або розширення наявних мереж у будівлях, де прокладання нових ліній електроживлення виявляється надто дорогим або складним.

Використання PoE скорочує кількість кабелів і електричних розеток.

У приладі використовуються сучасні надійні роз'єми LEMO, TNC, а також RJ45 підвищеної точності для Ethernet.

Загальні технічні характеристики супутникового приймача G50 представлені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Загальні технічні характеристики приймача G50

Точність 2D (RTK)	8 мм + 0.5 ppm
Точність 3D (RTK)	15 мм + 0.5 ppm
Час ініціалізації	10 с
Кількість каналів	555
Супутникові системи	GPS, Glonass, Galileo, Beidou, QZSS, SBAS
Відстежувані сигнали	GPS (L1, L2P(Y), L2C, L5); GLONASS (L1, L2P, L2C, L3); Galileo; BeiDou; QZSS NavIC L5; SBAS
Розміри	220мм x 200мм x 94мм
Вага	2.01 кг
Запис даних	Знімна карта пам'яті SD об'ємом до 32 Гб. Запис до 12 паралельних файлів вимірювань. Частота запису до 50 Гц.
Напруга	Номінальна 24 V DC, діапазон 10.5 - 28 V DC.
Стандарт захисту	IP67
Порти зв'язку	1 × RJ45, Ethernet; 2 × серійний порт RS232 Lemo; 1 × USB client; 1 × USB host; 1 × генератор зовнішньої частоти; 1 × порт живлення; Lemo(основна і резервна лінія живлення)
Передача даних	До 20 паралельних потоків даних. Частота передачі до 50 Гц. Передача даних через серійний, USB і TCP / IP порти.

2.3 Умови експлуатації, кліматичні та механічні впливи, основні зовнішні діючі чинники

Даний об'єкт за класифікацією відноситься до наземної професійної стаціонарної радіоелектронної апаратури (РЕА).

Серед норм кліматичних та механічних впливів можна виділити:

- міцність при транспортуванні (тривалість ударного імпульсу – 5-10 мс; пікове прискорення g – $10 \pm 20\%$; кількість ударів за хвилину – 40-80; загальна кількість ударів, не менше 13000.
- вологостійкість, температура – 25 ± 2 °С, вологість – 80%;
- теплостійкість, робоча температура – 40 ± 3 °С, гранична – 55 ± 3 °С;
- холодостійкість, робоча температура – 5 ± 3 °С, гранична – -40 ± 2 °С;
- відсутність резонансу в конструкції (діапазон частот – 10-30 Гц ± 1 ; амплітуда вібропереміщення 0,5-0,8 мм $\pm 15\%$)

У таблиці 2.2 приведені основні зовнішні діючі чинники, що можуть впливати на об'єкт, що відноситься до наземної професійної стаціонарної радіоелектронної апаратури [19].

Таблиця 2.3 – Зовнішні діючі чинники та їх можливий вплив на супутникові приймачі

Чинник	Причина виникнення та характеристика	Один. вимір.	Наслідки дії на прилад
Вібрація	Коливальний рух виробів, що викликається різними коливальними силами.	мм, Гц, $m \cdot c^{-2}$.	Механічні напруження і деформації, що викликають руйнування; явища резонансу.
Акустичний шум	Механічне коливання звукового діапазону з амплітудою і фазою, що змінюються за випадковим законом.	дБ.	Наслідки аналогічні вібраційним.
Удар	Механічний удар Короткочасний механічний вплив тіла і виробу. Одиночні і багаторазові.	$m \cdot c^{-2}$, с.	Деформація виробів і виникнення механік. напруги, що веде до руйнувань.

Продовження таблиці 2.3 – Зовнішні діючі чинники та їх можливий вплив на супутникові приймачі

Атмосферний тиск	Характеризується тривалістю, швидкістю зміни, градієнтом тиску, діапазоном зміни, тривалістю впливу дії на кордонах діапазону.	Па, мм рт. ст.	Погіршення умов теплообміну, виникнення перегріву і теплового пробою.
Температура середовища, нагрів	Характеризується тривалістю впливу, діб, швидкістю зміни $K^{\circ}C^{-1}$ ($^{\circ}C^{\circ}C^{-1}$) діапазоном зміни, числом циклів зміни температури середовища за заданий час, температурним градієнтом середовища. Буває підвищена, низька.	К, $^{\circ}C$	Погіршення механічних властивостей матеріалів, зміна електропровідності та діелектричних властивостей; зниження механічної міцності матеріалів, тріщини в ізоляції, порушення герметичності.
Вологість повітря	Характеризується відносною вологістю при даній температурі, абсолютною вологістю, тривалістю впливу год. діб.	$\%$, $г^*м^{-3}$	Нестабільність і деградація електричних параметрів, обриви і короткі замикання, зміна властивостей матеріалів
Сонячні випромінювання	Інтегральне і ультрафіолетове. Характеризується довжиною хвилі, кутом нахилу сонячних променів до опромінюваної поверхні числом циклів опромінення і тривалістю дії.	$Вт\cdot м^{-2}$ год. на добу.	Нагрівання елементів конструкції, ультрафіолетові промені являються каталізатором реакції окислення.
Рослини	Вологість, тепло. Бактерії, дріжджі, гриби плісняві і деревні, лишайники, вищі рослини.	$кг^* м^{-2}$, $кг^* м^{-3}$.	Корозія, зміна електрофіз. властивостей матеріалів, порушення адгезії металів.
Електричний струм	Постійний, змінний, електричний імпульс струму	А	Нагрів провідників та електр. та електромагнітне поле.
Електромагнітне поле	Породжується рухомими електричними зарядами. Імпульсне електромагнітне поле, магнітне поле, електромагнітне низькочастотне, високочастотне та надвисокочастотне випромінювання, лазерне випромінювання.	А/м, кВ/м.	Викликають наведення в електричних і магнітних колах, що призводять до збоїв, помилкових спрацьовувань, тепловим руйнувань елементів.

Дане обладнання підходить для використання в атмосфері, придатній для постійного проживання людей, не підходить для використання в агресивному або вибухонебезпечному навколишньому середовищі.

Джерело живлення придатне для експлуатації тільки в сухому середовищі та сприятливих умовах.

Робота в небезпечних зонах, поблизу від електричних силових агрегатів або в подібних умовах може призвести до небезпеки для життя.

У якості запобіжних заходів перед виконанням робіт у подібних місцях, особа, відповідальна за виріб, повинна звернутися до місцевих органів охорони праці та до експертів з безпеки.

Приймач підходить для тривалої безперервної роботи. У таблиці 2.4 наведено основні умови експлуатації приймача GR50.

Таблиця 2.4 – Умови експлуатації приймача GR50

Температура	Робоча температура від -40 до +65 °С Температура зберігання від -40 до +80 °С
Захист від вологи, піску та пилу	Рівень захисту IP67 (IEC 60529) Пилонепроникний Водонепроникність при короткочасному зануренні у воду на глибину до 1 м
Вологість	Рівень захисту до 100% Конденсована волога повинна періодично усуватися протиранням та просушуванням інструменту.

Необхідно дотримувати температурних умов для зберігання обладнання, особливо в літній час при його зберіганні в автомобілі. Перед тривалим зберіганням рекомендується витягти акумулятор із приладу або зарядного пристрою, обов'язково заряджати акумулятори після тривалого зберігання.

Необхідно берегти акумулятори від вологості та вогкості. Вологі акумулятори необхідно ретельно протерти перед зберіганням або експлуатацією.

Діапазон температур зберігання від 0 ° C до +30 ° C у сухому середовищі, рекомендується для мінімізації саморозряду акумуляторної батареї. При дотриманні цих умов акумулятори з рівнем заряду від 40% до 50%, можуть зберігатися терміном до 1 року. Після цього періоду зберігання акумуляторні батареї необхідно розрядити-зарядити.

Рекомендується інструмент встановлювати і закріплювати таким чином, щоб він був захищений від механічних впливів і потрапляння блискавки, знаходився не далі 70 м від антени, щоб не було необхідності додатково посилювати сигнал, знаходився на достатній відстані від джерел радіосигналів, щоб унеможливити інтерференцію сигналу. Потужні сигнали від радіостанцій, радарів або точок GSM/GPRS/UMTS можуть вплинути на роботу GNSS обладнання. Інтерференція не зашкодить інструменту, однак може призвести до втрати даних GNSS спостережень.

Для протирання використовувати тільки чисті, м'які та неволокнисті шматки тканини. За необхідності можна змочувати їх водою або чистим спиртом. У жодному разі не застосовувати будь-які інші рідини, оскільки вони можуть пошкодити полімерні компоненти.

Для протирання джерел живлення та зарядних пристроїв необхідно використовувати тільки чисту, м'яку і не волокнисту тканину.

Сушити прилад, його контейнер, ущільнювачі упаковки та аксесуари рекомендується за температури не вище 40 °C з обов'язковим подальшим протиранням. Під час роботи в польових умовах необхідно завжди тримати контейнер закритим.

Особливо важливо при експлуатації утримувати кабелі та штекери в сухому та чистому стані та перевіряти відсутність пилу та бруду на штекерах з'єднувальних кабелів.

2.4 Практичне використання супутникового приймача G50 в ГНСС мережах України

За своїми технічними характеристиками і надійності роботи, приймачі GR50 відповідають повноцінному серверному обладнанню. Маючи можливість резервування ліній комунікацій, джерел живлення, а також передачу і запис даних, приймачі GR-серії є більше ніж стандартними приймачами для референцних станцій.

Постійно діюча супутникова референсна (базова) станція - апаратно-програмний комплекс, призначений для забезпечення виконання вимірювань і визначення просторового розташування об'єктів шляхом надання інформації для корекції даних, одержуваних за допомогою супутникових навігаційних і геодезичних приймачів, що включає супутникове, комунікаційне, комп'ютерне та інше, обладнання, спеціалізоване програмне забезпечення, встановлене в районі виконання вимірювань і визначення місцеположення, частково зафіксоване в просторі на постійній основі і функціонує безперервно [20].

Постійно діюча супутникова базова станція може слугувати як для забезпечення точними координатами під час проведення геодезичних вимірювань, топографічних зйомок, виносу в натуру і розбивки під час будівництва об'єктів і споруд, інженерних зйомок, для контролю просторового положення конструкцій, що зводяться, так і для безперервного моніторингу всієї споруди під час її експлуатації.

Супутникові базові станції можуть служити основою геодезичної інфраструктури об'єкта, закріплюючи систему координат споруди, що будується. Водночас вони можуть забезпечувати точними диференціальними поправками супутникові геодезичні приймачі, які використовують під час виконання розбивки осей споруди, виносу в натуру і монтажу конструкцій. Постійно діюча супутникова базова станція містить GNSS приймач, супутникову антену, джерело безперебійного живлення, засоби зв'язку, які встановлюються стаціонарно на спеціально підготовлене місце. Базова станція

може керуватися автоматично з персонального комп'ютера (ПК) і спеціалізованого програмного забезпечення. Вона може працювати автономно, без участі оператора. На рис. 2.7 представлено різні способи налаштування базової станції з найпоширенішим додатковим обладнанням, сумісним із GR50.

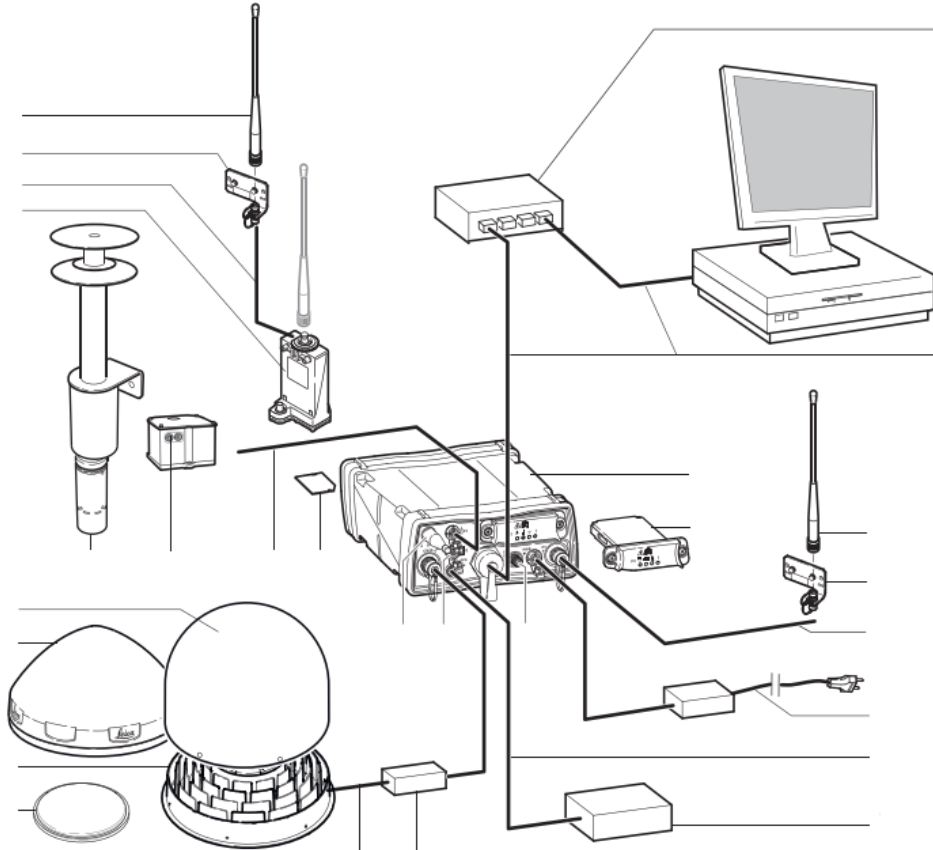


Рисунок 2.7 – Способи налаштування базової станції з найпоширенішим додатковим обладнанням, сумісним із GR50

Одним з прикладів мережі референцних станцій GNSS є геодезична GNSS мережа "System.NET", яка надає послуги RTK-корекції по території України. Мережа створена в 2014 р. в інтересах впровадження і розвитку в Україні технологій та сервісів точного позиціонування і навігації, які забезпечать високоточною диференціальною корегуючою інформацією користувачів GNSS державних установ у сфері оборони і національної безпеки, охорони правопорядку і надзвичайних ситуацій, а також при виконанні наукових досліджень [21].

Карту покриття базовими станціями мережі "System.NET" в Україні проілюстровано на рис. 2.8.

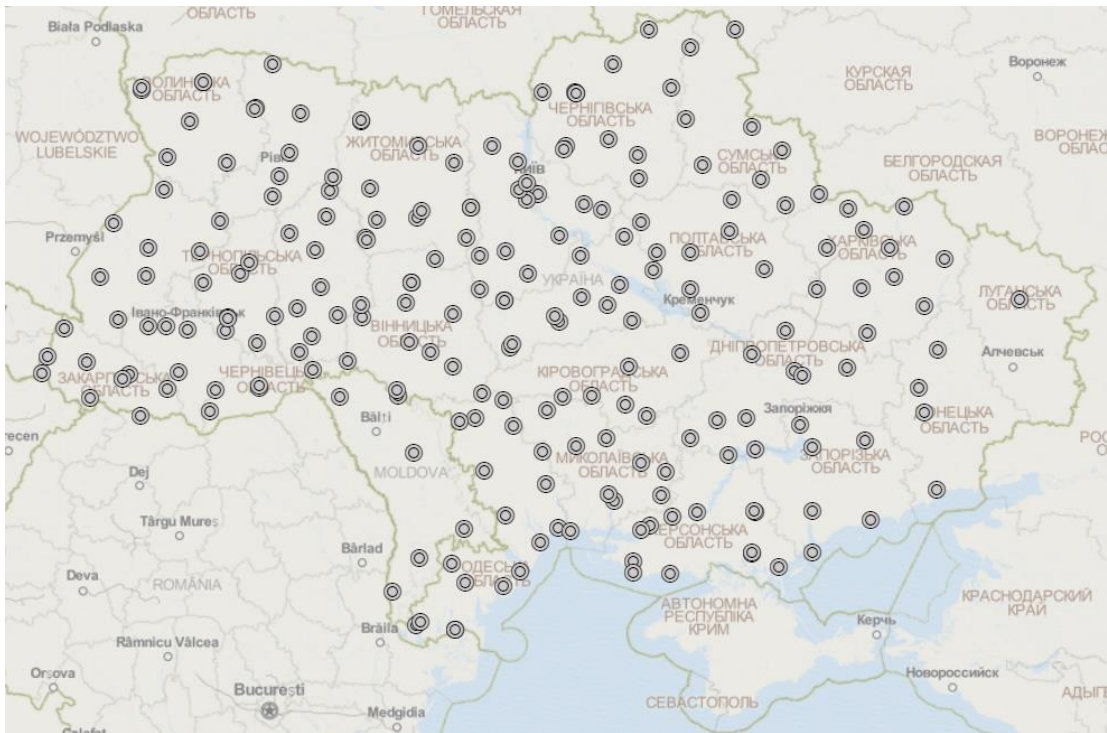


Рисунок 2.8 – Карта покриття мережі "System.NET"

Основний принцип роботи мережі базової станції RTK такий - усі базові станції в мережі постійно передають супутникові вимірювання на центральний пульт управління (сервер), на якому працює спеціальне програмне забезпечення, наприклад Leica GNSS Spider. Основна мета функціонування мережі - зменшити до мінімальних значень вплив помилок, що залежать від відстані між базовими станціями і ровером, на координати, які обчислюються ровером, що працює всередині мережі.

Програмне забезпечення базової станції Leica GNSS Spider забезпечує повну функціональність приладу, як і веб-інтерфейс. Leica GNSS Spider дозволяє переглядати і надавати дані ГНСС-мережі в будь-який час і в будь-якому місці. Leica SpiderWeb забезпечує ефективний і безпечний доступ до даних для постобробки. Додаткові сервіси допомагають надавати користувачам

через стандартний інтернет-браузер і використовувати ГНСС-дані, зібрані окремими станціями або всією мережею [22].

На рис. 2.9 показано вікно програми Leica GNSS Spider.

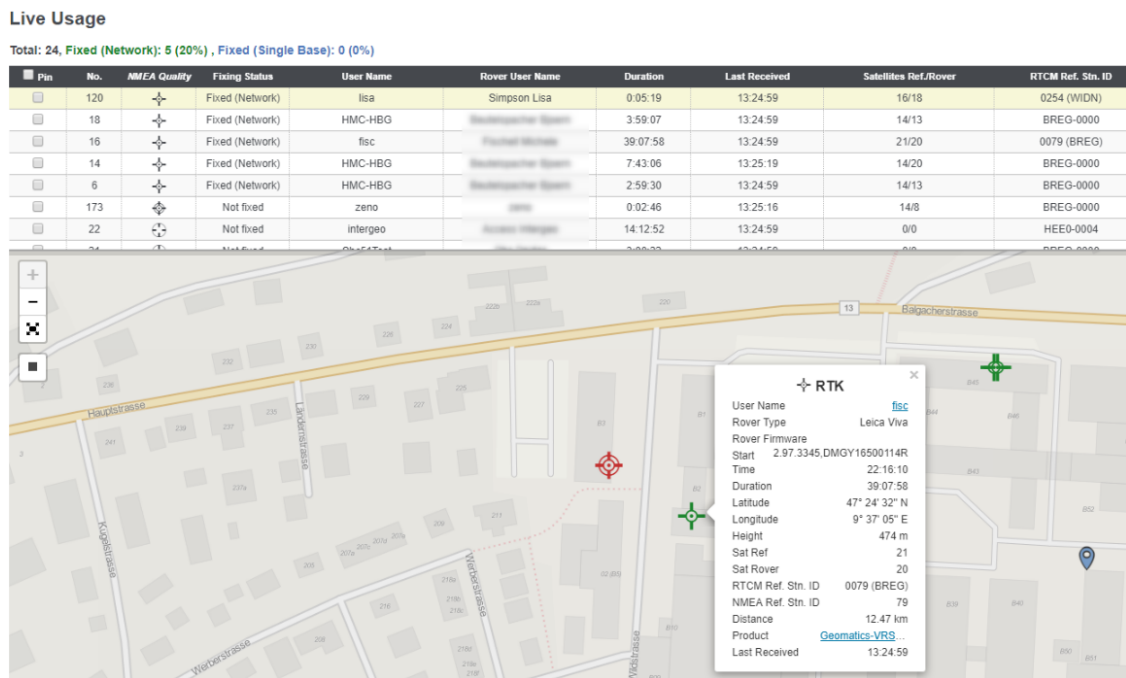


Рисунок 2.9 – Приклад роботи програми Leica GNSS Spider

Характеристики GNSS Spider: налаштування та підтримання зв'язку одночасно з кількома приладами; можливість налаштування моніторингу; візуалізація відстежуваних супутників; автоматичне передавання сирих даних із приладу в центр зберігання даних; управління цілою мережею базових станцій.

Можна зробити висновок, що використання у базових станціях є найчастішим призначенням приймачів GR50. Вони є стаціонарними приладами, що безперервно працюють, і за допомогою спеціального програмного забезпечення є можливість отримувати дані про експлуатацію, відмови, кількість годин які працює той чи інший приймач, оповіщення про зміну основних параметрів системи: напругу живлення, вільне місце для даних, зміну внутрішньої температури приладу. Це є важливою інформацією при розрахунках надійності за малої статистики відмов, яку можна отримувати одразу з певної кількості об'єктів і у веб-інтерфейсі, і у спеціальному ПЗ і не обов'язково потребує переривання та порушення роботи приладів.

3 РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СУПУТНИКОВОГО ПРИЙМАЧА ЗА МАЛОЇ ВИБІРКИ ДАНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

3.1 Загальні положення оцінювання показників надійності

Надійність техніки – властивість апарату в цілому і його частин виконувати задані функції, зберігаючи значення експлуатаційних показників у встановлених межах, що відповідають режимам та умовам використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування [23].

Рівень надійності робить істотний вплив на обсяг трудовитрат при технічному обслуговуванні і на ступінь готовності техніки. Це обумовлює підвищені вимоги до рівня надійності, контролепридатності, експлуатаційної технологічності та уніфікації окремих пристроїв, приладів і систем [24].

Забезпечення необхідного рівня надійності електронної апаратури, має важливе значення, так як низька надійність призводить до зниження безпеки використання багатьох різних виробів, збільшення необхідної кількості ряду виробів, щоб уникнути простоїв та їх передчасного зняття з експлуатації, економічних простоїв через велику кількість рекламацій та витрат на гарантійне обслуговування, збільшення комплектів запасних частин, зниження ефективності застосування відповідальної техніки та багатьох інших небажаних наслідків.

Відповідно до сучасних вимог надійність техніки повинна забезпечуватися системно, охоплюючи всі стадії життєвого циклу.

Під оцінкою показників надійності розуміють точкову чи інтервальну (границі довірчого інтервалу, в якому із заданою імовірністю знаходиться дійсне значення показника) оцінку показника.

Оцінки показників надійності використовують за кількісного аналізу надійності та (або) за контролю показників надійності за допомогою довірчих границь.

На рис. 3.1 наведено властивості та показники надійності об'єктів.

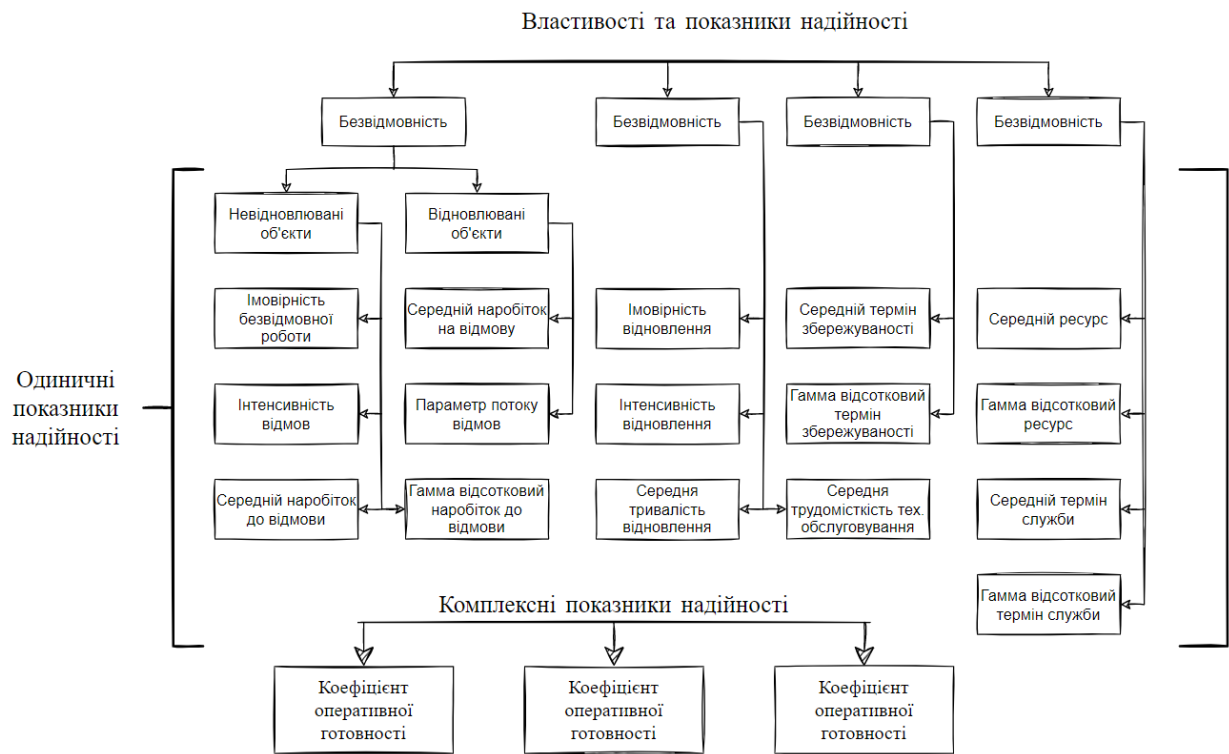


Рисунок 3.1 – Властивості та показники надійності об'єктів

Для визначення показників надійності використовують два методи:

- непараметричний — за невідомого виду закону розподілу випадкової величини (наробітку до відмови, ресурсу, терміну служби, терміну збережуваності, тривалості відновлення), який містить у собі безпосередню оцінку показників надійності за вибірковими даними;
- параметричний — за відомого виду закону розподілу випадкової величини, який містить у собі оцінку параметрів закону розподілу, що входять у розрахункову формулу показника надійності, що визначається, та оцінку показника надійності за розрахованими оцінками параметрів закону розподілу.

Для розрахунку оцінок показників надійності виконують такі роботи:

- вибір плану випробувань на надійність;
- планування випробувань (у технічно обґрунтованих випадках допускається не проводити);
- збирання необхідної інформації;
- статистичну обробку інформації [25].

План випробувань на надійність — сукупність правил, що встановлюють обсяг вибірки, порядок проведення випробувань, критерії їх завершення та прийняття рішень за результатами випробувань.

Об'єктами випробувань є зразки одного типу, які не мають конструктивних чи інших відмінностей, виготовлені за єдиною технологією та випробувані за ідентичних умов. Вибір планів випробувань залежить від типу об'єкта випробувань, мети випробувань, показників надійності, що оцінюються, умов випробувань та інших техніко-економічних чинників [26].

Статистичні випробування планують у залежності від типу об'єкта, усталених обмежень на тривалість та вартість випробувань. Є певна класифікація планів. Для кожного плану випробувань прийнятий символічний запис у вигляді трьох літер у дужках, наприклад [NUT], у якому:

Перший символ N визначає кількість випробуваних об'єктів.

Другий символ визначає режим відновлення об'єктів у випробуваннях і набуває таких значень: U — об'єкт після відмови не відновлюється та не замінюється; R — об'єкт не відновлюється, але після відмови замінюється; M — об'єкт відновлюється кожного разу після відмови.

Третій символ визначає критерій закінчення випробувань: T — випробування припиняється після досягнення наробітку у часі T; r — випробування припиняються після r відмов у випробуваннях або об'єктів, що відмовили.

План випробувань [NRT] — план випробувань, згідно з яким одночасно починають випробування N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань, замінюють новими, випробування припиняють після закінчення часу випробувань або наробітку T для кожної з N позицій.

План випробувань [NUr] — план випробувань, згідно з яким одночасно випробують N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань, не відновлюють і не замінюють, випробування припиняють, коли число об'єктів, що відмовили, досягає r.

План випробувань [NUT] — план випробувань, згідно з яким одночасно випробують N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань, не відновлюють і не замінюють, випробування припиняють після закінчення часу випробувань або наробітку T для кожного об'єкта, який не відмовив.

План випробувань [NRr] — план випробувань, згідно з яким одночасно починають випробування N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань, замінюють новими, випробування припиняють, коли сумарне число об'єктів, що відмовили за всіма позиціями, досягає r , або після закінчення часу випробувань або наробітку T .

План випробувань [NMT] — план випробувань, згідно з яким одночасно випробують N об'єктів, об'єкти, що відмовляли під час випробувань, відновлюють, але не замінюють, об'єкт випробують протягом наробітку T .

План випробувань [NMr] — план випробувань, згідно з яким одночасно випробують N об'єктів, після кожної відмови об'єкт відновлюють, випробування припиняють, коли сумарне за всіма об'єктами число відмов досягає r .

План випробувань [NUz] (— план випробувань, згідно з яким одночасно випробують N об'єктів, об'єкти, що відмовили під час випробувань, не відновлюють і не замінюють, коли кожен об'єкт випробують протягом виробітку z_i , де $z_i = \min(z_i, \tau_i)$. Тут $i = 1, 2, \dots, N$; τ_i — наробіток що відмови i -го об'єкта; τ_i — наробіток до зняття з випробувань працездатного i -го об'єкта[28].

Виходячи з даної класифікації можна скласти схему вибору плану випробувань, яку наведено у додатку Г.

3.2 Методи моделювання надійності

Математична модель надійності — аналітично чи статистично представлений об'єкт, який відображає основні властивості технічної системи з погляду надійності, і надає повну інформацію про її надійнісні характеристики

та параметри. Побудова моделі надійності передбачає визначення аналітичного виразу для імовірності безвідмовної роботи об'єкта.

Вибір моделей надійності здійснюють на основі аналізу фізики процесів, що призводять до відмов, досвіду експлуатації, законів розподілу наробітку виробів до відмови аналогічних виробів.

У ряді випадків наявні визначені залежності між механізмами відмов і видами функцій розподілу, які дозволяють зробити їхній обґрунтований вибір. При цьому важливо апроксимувати характеристики надійності відомими теоретичними функціями розподілу.

На рисунку 3.2 наведені головні закони розподілу часу безвідмовної роботи, що застосовуються як моделі надійності виробів, та їхні характеристики. Як додаткову інформацію використовують відомості про характер зміни $R_i(t)$, $\lambda_i(t)$, які визначають за формулами:

$$f_i(t) = \frac{\Delta n_i}{N_0 \Delta t}; \quad \lambda_i(t) = \frac{N(t) - N(t + \Delta t)}{N(t) \Delta t}; \quad R(t) = \frac{N(t)}{N_0},$$

де Δn_i - кількість відмов у i -му інтервалі;

N_0 - загальна кількість виробів;

Δt_i - інтервал наробітку;

N_t - кількість працездатних виробів до моменту часу t .

На ранніх стадіях життєвого циклу технічних виробів потрібна модель прогнозування надійності, оскільки немає відомостей про відмови. Моделі такого типу призначені для передбачення кількості помилок і зараховані до імовірносних моделей надійності. Модель зростання надійності потрібна для оцінки поточного рівня надійності, часу і ресурсів, необхідних для досягнення заданого рівня надійності. Моделі такого типу належать до імовірнісно-фізичних моделей надійності технічних об'єктів.

Незалежно від своєї складності, об'єкт (елемент, система, складна система з резервуванням) має певну функцію розподілу наробітку (модель

відмов), і вся проблема оцінки показників надійності об'єкта зводиться до оцінки параметрів цього розподілу.

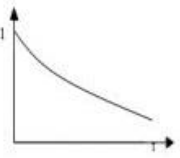
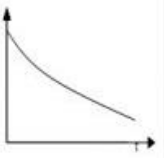
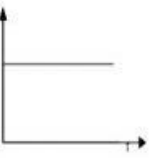
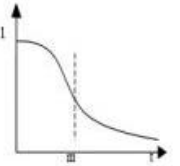
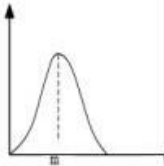
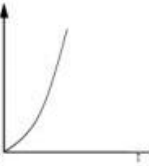
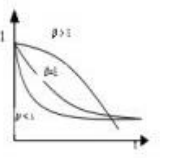
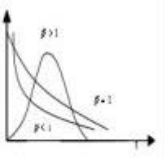
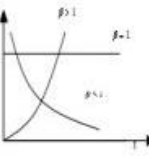
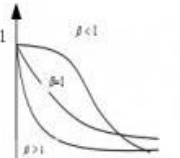
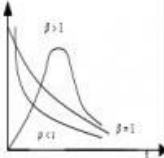
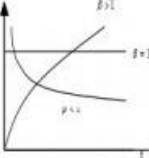
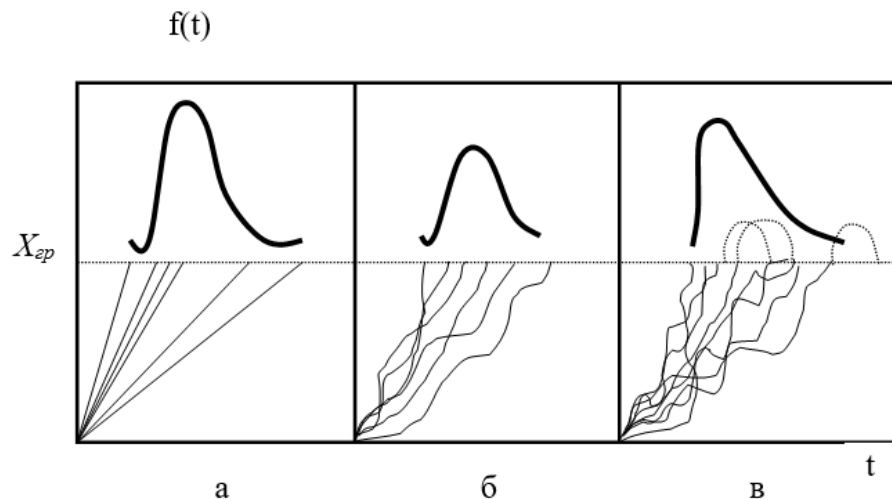
Закон розподілу	Характеристи			Застосування розподілу
	$P(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$	
<p>Експоненційний:</p> $P(t) = e^{-\lambda t},$ $f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$ $\lambda(t) = const$				<p>При аналізі складних систем, які пройшли період приробу; раптових відмовах, що виникли внаслідок дефектів технології, в теорії масового обслуговування.</p> <p>Цьому закону підпорядкований наробіток між послідовними відмовами, в режимі який установився.</p>
<p>Нормальний :</p> $P(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt,$ $f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}},$ $\lambda(t) = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{t-m}{\sigma}\right) \right)$				<p>При відмовах внаслідок зношення та старіння елементів</p> <p>При відмовах внаслідок впливу великої кількості факторів, рівнозначних за величиною</p>
<p>Вейбулла:</p> $P(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^\beta},$ $f(t) = \frac{\beta}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^\beta},$ $\lambda(t) = \frac{\beta}{a^\beta} t^{\beta-1}$				<p>При описі термінів служби підшипників, електронних ламп, характеристик міцності, втомлісної стійкості, а також характеристик довговічності механічних систем.</p>
<p>Гама-розподіл:</p> $P(t) = \int_0^t \frac{a^\beta t^{\beta-1} e^{-at}}{\Gamma(\beta)} dt,$ $f(t) = \frac{a^\beta}{\Gamma(\beta)} e^{-at} t^{\beta-1},$ $\lambda(t) = \frac{t^{\beta-1} e^{-at}}{\int_0^t t^{\beta-1} e^{-at} dt}$				<p>При описі наробітку до відмови внаслідок зношення чи накопичення пошкоджень, наробітку системи з резервними елементами, часу відновлення ($\Gamma(\beta)$-гама функція).</p>

Рисунок 3.2 – Головні закони розподілу часу безвідмовної роботи та їх характеристики

Імовірнісно-фізичні моделі (DM-, DN- і α - розподіл) спеціально побудовані для опису відмов об'єктів на підставі аналізу фізичних процесів

деградації, які зумовлюють відмови. На відміну від імовірносних моделей вони є фізично обґрунтованими моделями, які враховують фізичну природу відмов та дозволяють для оцінки надійності використовувати характеристики фізичних явищ, які формують відмови об'єктів. На рис.3.3 показано типові моделі випадкових фізичних процесів деградації та реалізації визначальних параметрів для сукупності однотипних об'єктів.



а) віяловий процес (α -розподіл);

б) марківський монотонний процес (DM-розподіл);

в) марківський немонотонний процес (DN-розподіл).

Рисунок 3.3 – Типові моделі випадкових фізичних процесів деградації та реалізації визначальних параметрів для сукупності однотипних об'єктів

Наведені моделі відповідають широкому класу фізичних процесів деградації (втоми, зношування, корозії, старіння тощо). Усі зовнішні чинники, які визначають надійність та пов'язані з конструкцією, властивостями використовуваних матеріалів, технологією виготовлення, рівнем виробництва й експлуатації, у кінцевому підсумку впливають на нахил (середню швидкість процесів деградації) і розсіяння реалізацій, не змінюючи схеми формалізації і типу розподілу. Тип розподілу у схемі формалізації, яка розглядається, визначається характером фізичного процесу деградації. Зокрема, детермінованим, монотонним чи немонотонним видом його реалізацій.

Параметри α -розподілу мають таку інтерпретацію:

- параметр масштабу β дорівнює величині, зворотній середній швидкості змінювання визначального параметра ;
- параметр форми α дорівнює зворотній величині коефіцієнта варіації швидкості змінювання визначального параметра.

Параметри двопараметричних дифузійних розподілів мають фізичну інтерпретацію:

- параметр масштабу μ дорівнює величині, зворотній середній швидкості змінювання визначального параметра (нормованого на граничне значення);
- параметр форми ν дорівнює коефіцієнту варіації швидкості змінювання визначального параметра.

3.3 Теоретичні основи дифузійного монотонного та немонотонного розподілів

3.3.1 Модель відмов механічних елементів

Для технічних систем, що містять електромеханічні і механічні елементи обмежуючими працездатність факторами є механічні процеси деградації (пластичні деформації, розвиток втомних тріщин, втомне викришування, механічний знос, старіння, корозія).

Процес деградації механічних об'єктів внаслідок необоротності процесів руйнування розглядається як процес з монотонними реалізаціями.

Прийнято апроксимувати процес деградації таких елементів марківським процесом дифузійного типу з монотонними реалізаціями. Строге визначення дифузійних процесів не передбачає строго монотонних реалізацій, але ефективність використання марківських процесів досягши поставленої мети виправдовує незначні допущення і некоректності [27].

На рис. 3.4 представлено модель випадкового процесу деградації (марківський монотонний процес) і схему формування розподілу напрацювання до відмови (DM- розподіл).

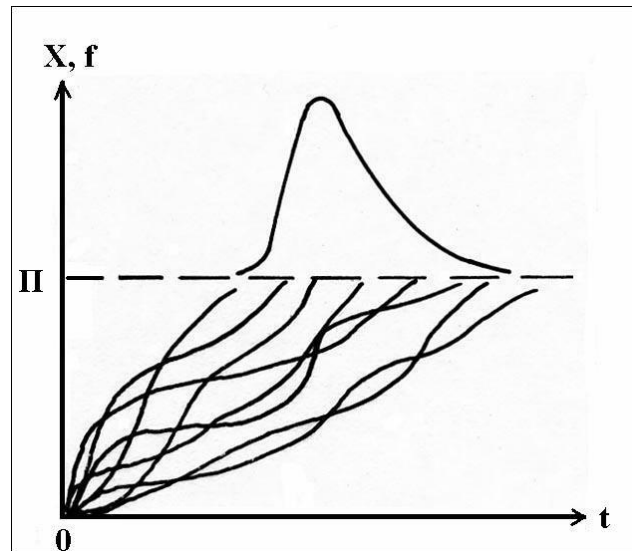


Рисунок 3.4 – Модель випадкового процесу деградації (марківський монотонний процес) і схема формування розподілу напрацювання до відмови (DM- розподіл).

Закон розподілу часу повністю стосується механічних елементів. Можна розглянути процес деградації механічних елементів у вигляді однорідного процесу з постійною середньою швидкістю і постійним коефіцієнтом варіації швидкості (чи процесу), тобто в якості кінетичного рівняння процесу деградації приймається стохастичне диференціальне рівняння.

Умовна перехідна щільність $\omega(t_0, x_0; t, x)$ процесу є розв'язком рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова.

Якщо процес деградації має монотонні реалізації, то перший перетин кордону будь-якою реалізацією буде одночасно і останнім, тобто реалізація в подальшому вже більше ніколи і ніяк не впливатиме на спостережуваний процес. Це означає, що немає необхідності у встановленні яких або умов на межі заданої області. У зв'язку з останнім в якості граничних умов приймаються:

$$\omega(t, x)|_{x=-\infty}=0; \quad (3.1)$$

$$\omega(t, x)|_{x=+\infty}=0. \quad (3.2)$$

Приведені межі є недосяжними для процесу, але це формальні граничні умови, необхідні для розв'язування рівняння.

Розв'язок рівняння з цими умовами відомий в літературі як фундаментальний розв'язок рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова.

Отримана перехідна щільність є першим доданком умовної перехідної щільності немонотонного процесу. У такому разі, вираз закону розподілу до відмови механічних об'єктів буде виглядати:

$$f(t) = \frac{1+at}{2vt\sqrt{2\pi at}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2v^2 at}\right]. \quad (3.3)$$

Дифузійний розподіл, що відповідає монотонному марківському процесу, називається DM-розподілом (дифузійним монотонним розподілом). Представленій щільності відповідає функція розподілу :

$$F(t) = \Phi\left(\frac{at-1}{v\sqrt{at}}\right). \quad (3.4)$$

3.3.2 Модель відмов електронних елементів

В загальному випадку прийнято розглядати деградацію виробів електронної техніки як процес з немонотонними реалізаціями, адже згідно імовірнісно-фізичної теорії надійності процес деградації цих виробів має не тільки монотонні реалізації, такі як старіння матеріалів або механічне руйнування, а також і немонотонні реалізації внаслідок впливу на прилади електричних явищ [27].

На рис. 3.5 представлено модель випадкового процесу деградації (марківський немонотонний процес) і схему формування розподілу напрацювання до відмови (DN- розподіл).

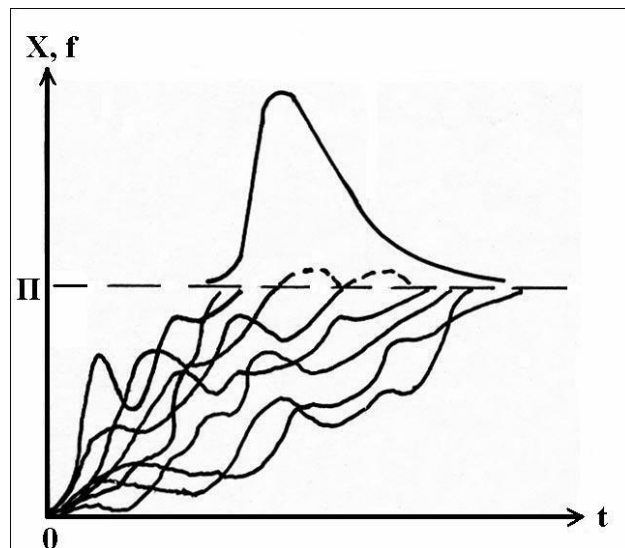


Рисунок 3.5 – Модель випадкового процесу деградації (марківський немонотонний процес) і схема формування розподілу напрацювання до відмови (DN- розподіл)

Розглядаючи процес деградації виробів для сукупності однотипних виробів як однорідний, тобто з постійною середньою швидкістю і постійним коефіцієнтом варіації швидкості, кінетичне рівняння процесу можна записати:

$$dx(t) = a dt + b d\eta(t), \quad (3.5)$$

де a – коефіцієнт зносу;

b – коефіцієнт дифузії.

Щоб визначити щільність вірогідності розподілу часу повністю $f(t)$ необхідно отримати вираз $\omega(t_0, x_0; t, x)$ розв'язавши рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова, потім знайти часткову похідну за часом від функції $\omega(t_0, x_0; t, x)$ і отриманий вираз проінтегрувати по параметру x . Така схема формалізації дифузійних розподілів. Назва "дифузійний" обумовлена тим, що вираз для закону розподілу витікає з розв'язку рівняння дифузії вірогідності.

Рівняння дифузії вірогідності – це рівняння, що є параболічним диференціальним рівнянням в часткових похідних. Для розв'язування

необхідне встановлення крайових умов, які визначаються із загальних фізичних міркувань про процес і шукану функцію.

Для визначення граничних умов необхідно оцінити характер реалізацій процесу $x(t)$. Маються на увазі реалізації - зміна визначальних параметрів невідновних об'єктів. Перше досягнення реалізацією межі заданої області відповідає відмові об'єкту та зняттю виробу зі спостереження. За характером зміни реалізації необхідно визначити, чи моделює відмову перше досягнення реалізацією межі заданої області і чи може реалізація вплинути на процес, що вивчається $x(t)$ і відповідно на шукану функцію $\omega(t, x)$ надалі, після першого досягнення межі [27].

Якщо реалізації мають немонотонний характер, то після першого досягнення межі заданої області немонотонна реалізація може знову повернутися в задану область і брати участь в спостережуваному процесі.

Тому, щоб перше досягнення межі немонотонною реалізацією моделювало відмову і подальша реалізація не брала участь в спостережуваному процесі і не впливала на $\omega(t, x)$, необхідно на межі заданої області поставити граничну умову типу "поглинальний екран". У такому разі будь-яка реалізація, уперше досягнувши його, назавжди залишається на межі, поза заданою областю.

Отже, оскільки реалізації процесу деградації виробів електронної техніки можуть мати немонотонний характер, в якості граничних умов при розв'язуванні рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова приймаються умови:

$$\omega(t, x)|_{x=-\infty}=0; \quad (3.6)$$

$$\omega(t, x)|_{x=1}=0. \quad (3.7)$$

Перша гранична умова формальна, оскільки процес не може набувати негативних значень, встановлена ліва межа є природно недосяжною і ніяк не впливає на процес в заданій області. Прийняття формальної умови потрібне для розв'язування рівняння.

Гранична умова відповідає значенню поглинальному екрану в точці $x = 1$.

Для однорідного процесу деградації дифузійного типу коефіцієнт дифузії має простий зв'язок із зазвичай використовуваними характеристиками процесу - середнім квадратичним відхиленням швидкості процесу (σ_a) і коефіцієнтом варіації процесу (ν).

Після розв'язання рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова для прийнятих крайових умов, визначений вираз для закону розподілу часу до відмови для виробів електронної техніки:

$$f(t) = \frac{1}{vt\sqrt{2\pi at}} \exp\left[-\frac{(1-at)^2}{2v^2 at}\right]. \quad (3.8)$$

Отриманий дифузійний розподіл, що відповідає немонотонному марківському процесу, по перших буквах визначальних слів називається дифузійним немонотонним розподілом (DN-розподілом). Отриманій щільності відповідає функція розподілу:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{at-1}{v\sqrt{at}}\right) + \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{at+1}{v\sqrt{at}}\right), \quad (3.9)$$

де $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$ – нормований нормальний розподіл.

3.4 Оцінювання показників надійності з використанням дифузійних розподілів в загальному випадку

У загальному випадку порядок оцінювання показників надійності полягає в таких діях:

- на підставі прийнятого плану спостережень і наявних статистичних даних визначають параметр масштабу $\tilde{\mu}$ розподілу напрацювання до відмови (на відмову);

- на підставі набутого значення довірчої вірогідності q статистичних даних визначають граничні оцінки параметра масштабу ($\underline{\mu}, \bar{\mu}$);

- на підставі апріорної інформації (при малій вибірці) про процеси деградації, використовуючи таблиці, що додаються, визначають значення параметра форми $\tilde{\nu}(\underline{\nu}, \bar{\nu})$ розподілу напрацювання до відмови (на відмову);

- далі, отримавши оцінки параметрів $(\underline{\mu}, \tilde{\mu}, \bar{\mu}, \underline{\nu}, \tilde{\nu}, \bar{\nu})$, по приведених формулах обчислюють усі необхідні показники надійності (точкові оцінки і довірчі межі) середнього напрацювання до відмови (на відмову), вірогідність безвідмовної роботи за заданий інтервал і так далі [27].

При плані випробувань [NUN] початковими даними для оцінки показників надійності служать:

- вибіркові значення напрацювання до відмови, ресурсу t_1, t_2, \dots, t_N ;
- об'єм вибірки N .

При плані випробувань [NUr] початковими даними для оцінки показників надійності служать:

- вибіркові значення напрацювання до відмови ресурсу t_1, t_2, \dots, t_r ;
- число відмов r ;
- об'єм вибірки N .

При плані випробувань [NUT] початковими даними для оцінки показників надійності служать:

- вибіркові значення напрацювання до відмови, ресурсу t_1, t_2, \dots, t_d ;
- тривалість випробувань T ;
- об'єм вибірки N .

При плані випробувань [NRz] початковими даними для оцінки показників надійності служать:

- вибіркові значення напрацювання до відмови, ресурсу t_1, t_2, \dots, t_r ;
- вибіркові значення напрацювання зразків (напрацювання до цензурування), що не відмовили $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$;
- число відмов r ;
- число цензуровань n ;
- об'єм вибірки N .

При плані випробувань [NMT] початковими даними для оцінки показників надійності служать:

- вибіркові значення напрацювання між відмовами t_1, t_2, \dots, t_d ;
- тривалість випробувань T ;
- об'єм вибірки N .

При плані випробувань [NMr] початковими даними для оцінки показників надійності служать:

- вибіркові значення напрацювання між відмовами t_1, t_2, \dots, t_r ;
- число відмов r ;
- об'єм вибірки N .

За результатами випробувань невідновних об'єктів обчислюють точкові оцінки параметрів DM- розподілу.

Найбільш ефективними оцінками параметрів будь-яких розподілів є максимально-правдоподібні оцінки. Але оскільки максимально-правдоподібні оцінки параметрів двопараметричних розподілів є достатньо складними при обчисленні, доцільно використовувати моментні оцінки, а також оцінки, що отримані методом квантилів, які успішно використовуються в інженерній практиці та обчислення яких значно простіше за обчислення максимально-правдоподібних оцінок.

При достатній статистиці ($r > 6$) точкові оцінки параметрів DM розподілу обчислюють одним з наступних методів [27].

При плані випробувань [NUN] (число об'єктів випробувань N або число відновлювань працездатного стану (під час випробувань з метою показника «середня тривалість відновлення»)) максимально-правдоподібні оцінки обчислюють по формулах:

$$\tilde{\mu} = G + Q - \sqrt{Q^2 - \tilde{s}G + G^2}; \quad (3.10)$$

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\tilde{\mu}/G + \tilde{s}/\tilde{\mu} - 2}, \quad (3.12)$$

де $\tilde{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$; $G = N(\sum_{i=1}^N t_i^{-1})^{-1}$; $Q = N[2 \sum_{i=1}^N (\tilde{\mu} + t_i)^{-1}]^{-1}$.

Моментні оцінки обчислюють по формулах:

$$\tilde{\mu} = \frac{5\tilde{s}^2 - D}{4\tilde{s}^2 + \sqrt{\tilde{s}^2 + 3D}} \quad (3.13)$$

$$\tilde{\nu} = \sqrt{\frac{2(\tilde{s}\sqrt{\tilde{s}^2 + 3D} + D - \tilde{s}^2)}{5\tilde{s}^2 - D}} \quad (3.14)$$

де $D = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - \tilde{s})^2$.

При планах випробувань [NRr] чи [NRT] (багаторазово цензурована вибірка) максимально-правдоподібні оцінки параметрів DM розподілу обчислюють, вирішуючи систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} v^2 - 2v^2 \mu K_r - \frac{m'_1}{\mu} + \mu m'_{-1} - \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{N-r} \left[\frac{-\frac{v^2}{2} DN(\tau_j; \mu, v) + \frac{v^2 \mu'_{1j}}{2\mu} + \mu \mu''_{-1j} - \frac{\mu''_{1j}}{\mu}}{1 - DM(\tau_j; \mu, v)} \right] = 0; \\ 2 + v^2 - \frac{m'_1}{\mu} - \mu m'_{-1} - \frac{1}{r} \sum_{j=1}^{N-r} \left[\frac{(2 + v^2) DM(\tau_j; \mu, v) - \mu \mu''_{-1j} - \frac{\mu''_{1j}}{\mu}}{1 - DM(\tau_j; \mu, v)} \right] = 0. \end{array} \right. \quad (3.15)$$

Максимально правдоподібні оцінки параметрів DM розподілу при планах випробувань [NUr] чи [NUT]) обчислюють, вирішуючи наступну систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} v^2 - 2v^2 \mu K_r - \frac{m'_1}{\mu} + \mu m'_{-1} - \frac{(N-m)}{m[1 - DM(t_r; \mu, v)]} \left[-\frac{v^2}{2} DN(t_r; \mu, v) + \frac{v^2 \mu'_1}{2\mu} + \mu \mu''_{-1} - \frac{\mu''_1}{\mu} \right] = 0; \\ 2 + v^2 - \frac{m'_1}{\mu} - \mu m'_{-1} - \frac{(N-m)}{m[1 - DM(t_r; \mu, v)]} \left[(2 + v^2) DM(t_r; \mu, v) - \mu \mu''_{-1} - \frac{\mu''_1}{\mu} \right] = 0. \end{array} \right. \quad (3.16)$$

де $m = r$ - число відмов до моменту усікання за час випробувань (спостережень) за планом [NUT] чи $m = d$ - число відмов при плані випробувань (спостережень) [NUr] (при цьому $t_r = t_d$).

При одиничних відмовах ($r \leq 6$) параметр форми ν DM розподілу визначають згідно з рекомендаціями, що на підставі результатів випробувань і експлуатації механічного, електромеханічного і тепломеханічного устаткування встановлено, що з довірчою вірогідністю не менше $q = 0,9$ коефіцієнти варіації напрацювання до відмови (ресурсу) об'єктів мають значення $0,3 \dots 0,9$. А точкову оцінку параметра масштабу μ обчислюють за формулою (метод квантилів):

$$\tilde{\mu} = \left[\sum_{j=1}^w k_j t_j \left(1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_{Fj}^2}{2} - \tilde{\nu} U_{Fj} \sqrt{1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_{Fj}^2}{4}} \right) \right] / \sum_{j=1}^w k_j, \quad (3.17)$$

де k_j - число співпадаючих напрацювань на j -му інтервалі;

F_j - емпірична функція вірогідності відмови на момент t_j (τ_j);

U_{Fj} - квантиль нормованого нормального розподілу рівня F_j ;

w - число прийнятих інтервалів.

Для планів випробувань [NMT] чи [NM r] відновлюваних об'єктів вибіркочну оцінку параметра масштабу $\tilde{\mu}$ DM- розподілу напрацювання на відмову обчислюють за формулою:

$$\tilde{\mu} = \frac{S}{m(1 + \tilde{\nu}^2/2)}, \quad (3.18)$$

де $S = \sum_{i=1}^N T_i$ - сумарне напрацювання усіх випробуваних зразків.

Далі обчислюють довірчі межі параметрів DM- розподілу та точкові оцінки і довірчі межі визначуваного показника надійності [27].

Точкові і довірчі межі показників надійності обчислюють на підставі точкових і граничних оцінок параметрів розподілів ($\underline{\mu}$, $\tilde{\mu}$, $\bar{\mu}$, $\underline{\nu}$, $\tilde{\nu}$, $\bar{\nu}$).

Точкову оцінку і довірчі межі середнього напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюють по формулах:

$$\tilde{T}_{cp} = \tilde{\mu}(1 + \tilde{\nu}^2/2); \quad (3.19)$$

$$\underline{T}_{cp} = \underline{\mu}(1 + \underline{\nu}^2/2); \quad (3.20)$$

$$\bar{T}_{\text{cp}} = \bar{\mu}(1 + \bar{v}^2/2). \quad (3.21)$$

Точкову оцінку і довірчі межі гамма-процентного напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюють по формулах:

$$\widetilde{T}_{\gamma} = \tilde{\mu}\left(1 + \frac{\tilde{v}^2 U_{\gamma}^2}{2} - \tilde{v} U_{\gamma} \sqrt{1 + \frac{\tilde{v}^2 U_{\gamma}^2}{4}}\right), \quad (3.22)$$

$$\underline{T}_{\gamma} = \underline{\mu}\left(1 + \frac{\underline{v}^2 U_{\gamma}^2}{2} - \underline{v} U_{\gamma} \sqrt{1 + \frac{\underline{v}^2 U_{\gamma}^2}{4}}\right), \quad (3.23)$$

$$\overline{T}_{\gamma} = \overline{\mu}\left(1 + \frac{\overline{v}^2 U_{\gamma}^2}{2} - \overline{v} U_{\gamma} \sqrt{1 + \frac{\overline{v}^2 U_{\gamma}^2}{4}}\right) \quad (3.24)$$

Точкову оцінку і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за напрацювання t обчислюють по формулах:

$$\tilde{P}(t) = \Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t}{\tilde{v}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right), \quad (3.25)$$

$$\underline{P}(t) = \Phi\left(\frac{\underline{\mu}-t}{\underline{v}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right), \quad (3.26)$$

$$\overline{P}(t) = \Phi\left(\frac{\overline{\mu}-t}{\overline{v}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right). \quad (3.27)$$

Точкову оцінку і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі напрацювання $(t, t + t_{\text{зад}})$ обчислюють по формулах:

$$\tilde{P}(t, t_{\text{зад}}) = \frac{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t-t_{\text{зад}}}{\tilde{v}\sqrt{\tilde{\mu}(t+t_{\text{зад}})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t}{\tilde{v}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right)}, \quad (3.28)$$

$$\underline{P}(t, t_{\text{зад}}) = \frac{\Phi\left(\frac{\underline{\mu}-t-t_{\text{зад}}}{\underline{v}\sqrt{\underline{\mu}(t+t_{\text{зад}})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\underline{\mu}-t}{\underline{v}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right)}, \quad (3.29)$$

$$\overline{P}(t, t_{\text{зад}}) = \frac{\Phi\left(\frac{\overline{\mu}-t-t_{\text{зад}}}{\overline{v}\sqrt{\overline{\mu}(t+t_{\text{зад}})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\overline{\mu}-t}{\overline{v}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right)}. \quad (3.30)$$

Граничну відносну помилку при оцінці середнього напрацювання до відмови (граничного стану) за результатами випробувань (експлуатації) обчислюють за формулою:

$$\xi = \max \left\{ \left(\frac{\bar{T}_{cp} - T_{cp}}{\bar{T}_{cp}} \right); \left(\frac{\bar{T}_{cp} - \tilde{T}_{cp}}{\bar{T}_{cp}} \right) \right\}. \quad (3.31)$$

Граничну відносну помилку при оцінці гамма-процентного напрацювання до відмови (граничного стану) за результатами випробувань (експлуатації) обчислюють за формулою:

$$\xi = \max \left\{ \left(\frac{\bar{T}_\gamma - T_\gamma}{\bar{T}_\gamma} \right); \left(\frac{\bar{T}_\gamma - \tilde{T}_\gamma}{\bar{T}_\gamma} \right) \right\}. \quad (3.32)$$

Граничну відносну помилку ξ оцінки вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за результатами обчислення точкових і граничних оцінок ВБР визначають по формулі:

$$\xi = \max \left\{ \left(\frac{\bar{F} - F}{\bar{F}} \right); \left(\frac{\bar{F} - \tilde{F}}{\bar{F}} \right) \right\}, \quad (3.33)$$

де $\bar{F} = 1 - \underline{P}(t)$, $\tilde{F} = 1 - \tilde{P}(t)$, $\underline{F} = 1 - \bar{P}(t)$.

Вичисливши спостережувані (експериментальні) оцінки відносної похибки ξ для прийнятої довірчої вірогідності q далі порівнюють їх з рекомендованими значеннями згідно відповідного стандарту і роблять укладення про достовірність отриманих оцінок [27].

3.5 Оцінювання показників надійності супутникових приймачів за результатами експлуатації

При параметричному підході для визначення показників надійності супутникових приймачів необхідно за результатами випробувань (спостережень) знайти оцінки параметрів закону розподілу, що входять в розрахункову формулу визначуваного показника надійності, далі вчислити

показники надійності на підставі отриманих оцінок параметрів закону розподілу.

Під оцінками показників надійності розуміється точкова та інтервальна (межі довірчого інтервалу, який із заданою вірогідністю містить істинне значення показника) оцінки показника.

У технічно обґрунтованих випадках допускається не проводити планування випробувань (спостережень). У разі фіксованого об'єму вибірки (N) планування випробувань зводиться до визначення необхідного напрацювання кожного зразка (напрацювання до відмови, до цензурування), відповідної заданої точності і довірчої вірогідності оцінки показника надійності.

При експлуатаційних спостереженнях роботи супутникових приймачів пропонується не планувати об'єм та вид спостережень, а обробляти конкретні спостережувані статистичні дані про відмови за певний період експлуатації. За результатами отриманих даних встановити точкові і граничні оцінки показників надійності, що відповідають спостережуваній відносній помилці і заданій довірчій вірогідності оцінки показників надійності (чи що відповідають спостережуваній довірчій вірогідності при заданій відносній помилці).

3.5.1 Аналіз основних процесів деградації супутникового приймача

Супутниковий приймач GR50 є сучасним приладом, у структурі якого знаходяться електронні та механічні елементи, що забезпечують сумісність, міцність і надійність приладу в цілому.

Контактна втома, старіння, механічний знос елементів присутні в будь-якому електронному та електротехнічному устаткуванні, зокрема і в супутникових приймачах, не дивлячись на сучасність та надійність структурних елементів.

Проводячи аналіз структурної схеми, її складових частин та умов експлуатації приймача GR50, визначено, що механічний знос та механічне

руйнування даному приладу менш властиві, адже він є стаціонарною професійною апаратурою та використовується в якості базової станції.

Також визначено, що окрім можливих монотонних процесів деградації, на супутниковий приймач діють також немонотонні процеси, а саме викликані електричними явищами та процесами.

Однією із проблем, яка може призвести до відмови супутникового приймача, є стрибок напруги в електромережі. Це може бути викликано особливостями приміщення в якому встановлений приймач, використанням електроінструментів поблизу, а також штормовою погодою.

Не існує реального захисту від електричних штормів, і перенапруги можуть піти одним з декількох шляхів. Помірний стрибок напруги в електромережі може бути витриманий наприклад мережевою вилкою, що встановлюється для придушення стрибків напруги, але великий стрибок не завжди може бути витриманий [29].

Через перепади напруги особливо може постраждати внутрішній акумулятор, що може призвести до відмови всього приладу.

Електричними процесами деградації можуть бути електроліз, міграція зарядів, електродифузія. Електроліз — розклад речовин (наприклад, води, розчинів кислот, лугів, розчинених або розплавлених солей тощо) постійним електричним струмом. Електроліз полягає в електрохімічних процесах окиснення та відновлення на електродах. Міграція зарядів – переміщення частинок під впливом поля(в напрямку дії поля). Призводить до збільшення статичної електрики. Електродифузія – перенесення заряджених частинок під дією зовнішнього електричного поля [29].

На основі цього аналізу, прийнято рішення використовувати в якості теоретичної моделі відмов саме дифузійний немонотонний розподіл.

Для супутникових приймачів при застосуванні в якості теоретичних моделей відмов DN-розподіл, розрахункові (прогнозовані) оцінки показників надійності на основі певних статистичних даних про відмови практично співпадають.

3.5.2 Визначення очікуваного значення коефіцієнта варіації

Коефіцієнт варіації (параметр форми) – параметр функції розподілу напрацювання повністю (на відмову), що характеризує вид і форму розподілу.

У загальному випадку, на підставі результатів випробувань і експлуатації механічного, електромеханічного і тепломеханічного устаткування встановлено, що з довірчою вірогідністю не менше $q = 0,9$ коефіцієнти варіації напрацювання до відмови (ресурсу) об'єктів мають значення $0,3 \dots 0,9$.

Оскільки для супутникових приймачів даного покоління та серії немає конкретних уточнювальних даних, очікуване значення коефіцієнтів варіації потрібно визначати аналізуючи існуючі статистичні дані та таблиці. У таблиці 3.1 приведено значення коефіцієнтів варіації напрацювань до відмови та види процесів руйнувань для типових об'єктів електронного устаткування.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів варіації напрацювань до відмови та види процесів руйнувань для типових об'єктів електронного устаткування

Найменування об'єктів	Основні види руйнувань	Коефіцієнт варіації
Електродвигуни	Знос і контактна втома, електричні процеси, втома внаслідок циклічного нагріву і вібрацій	0,5 – 1,0
Кабелі	Старіння ізоляції, втома матеріалів внаслідок циклічного перегрівання	0,6 – 1,0
Силові трансформатори	Старіння, знос, втома	0,4 – 0,7
Засоби контролю та управління	Знос, механічні руйнування, втома матеріалів внаслідок перегрівання, електричні процеси	0,5 – 1,0
Стаціонарне електронне обладнання	Знос, втома матеріалів внаслідок перегрівання, електричні процеси	0,5 – 1,0

Досвід експлуатації і аналіз відмов електронного і електротехнічного устаткування дозволяє встановити, що коефіцієнт варіації супутникових приймачів має значення 0,5...1,0. У таблиці 3.2 наведено значення коефіцієнтів варіації основних процесів деградації.

Таблиця 3.2 – Значення коефіцієнтів варіації основних процесів деградації

Вид руйнування	Коефіцієнт варіації
Малоциклова втома	0,15 – 0,4
Багатоциклова втома	0,4 – 1,0
Контактна втома	0,4 – 1,2
Механо-хімічний знос	0,2 – 0,5
Абразивний знос	0,4 – 0,7
Старіння	0,4 – 1,0
Електричні процеси	0,7 – 1,5

Довірча вірогідність вказаних інтервалів істотно вище 0,9, адже діапазони коефіцієнтів варіації визначені з великого об'єму та числа розглянутих вибірок, згідно ДСТУ 3433 [32].

Оскільки причинами відмов супутникових приймачів є втома матеріалів внаслідок перегрівання, електричні процеси, старіння, тоді користуючись таблицями 3.2-3.3, можна визначити, що середній коефіцієнт варіації напрацювання на відмову супутникових приймачів GR50 приблизно дорівнює $\tilde{\nu} = 0,8$.

3.5.3 Визначення обсягу випробувань

Число зразків N , яке необхідно використати у випробуваннях відповідно до значень достовірності оцінки (q, ξ) , визначається за формулою:

$$N = \left(\frac{\nu U_q}{\xi}\right)^2 (1 + \sqrt{1 + \xi^2})/2. \quad (3.34)$$

У таблиці 3.3 приведені значення N для типових початкових даних, необхідних для подальшої оцінки параметра масштабу розподілу.

Таблиця 3.3 – Значення N, необхідні для оцінки параметра масштабу розподілу

ξ	q	Значення N при v						
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,2	0,95	6	11	17	25	33	44	55
	0,9	4	7	10	15	20	27	34
0,3	0,95	3	5	8	11	15	20	25
	0,9	2	3	6	7	9	12	15
0,4	0,95	2	3	4	6	9	11	14
	0,9	1	2	3	4	5	7	9

3.5.4 Оцінка показників надійності супутникового приймача за відсутності відмов при малій вибірці

При відсутності відмов під час експлуатації, знаючи кількість зразків (при цьому $N \geq 4$) та визначивши параметр форми, визначається нижня межа вірогідності відмови за час експлуатації t_u за формулою:

$$\underline{P}(t_u) = \left(\frac{1-q}{2}\right)^{1/N}. \quad (3.35)$$

У таблиці 3.4 приведено розраховані значення $\underline{P}(t_u)$ залежно від N та q.

Таблиця 3.4 - Розраховані значення $\underline{P}(t_u)$ залежно від N та q

q	Значення $\underline{P}(t_u)$ для N						
	4	5	6	7	8	9	10
0,8	0,5623	0,6310	0,6812	0,7198	0,7499	0,7745	0,7943
0,9	0,4729	0,5493	0,6070	0,6519	0,6876	0,7169	0,7411
0,95	0,3976	0,4782	0,5407	0,5905	0,6306	0,6640	0,6915
0,99	0,2659	0,3466	0,4134	0,4692	0,5157	0,5554	0,5887

Нижня довірча межа параметра масштабу μ DN-розподілу обчислюється за формулою:

$$\underline{\mu} = \frac{t_U}{x_{[1-P(t_U); \bar{\nu}]}} = t_U * K_1^*(P, \bar{\nu}), \quad (3.36)$$

де $K_1^*(P, \nu)$ – поправковий коефіцієнт, що визначається з таблиці Д.4, приведеної у додатку Д. Він враховує емпіричну вірогідність відсутності відмови.

Вибіркова середня оцінка параметра $\tilde{\mu}$ розраховується використовуючи оцінку нижньої довірчої межі параметра масштабу $\underline{\mu}$, що відповідає довірчій вірогідності q :

$$\tilde{\mu} = \frac{\underline{\mu}}{x_{[1-q; \tilde{\nu}]}} = t_U * K_2^*(q, \tilde{\nu}) \quad (3.37)$$

де $K_2^*(q, \tilde{\nu})$ - поправковий коефіцієнт, що враховує вид розподілу та довірчу вірогідність оцінки параметра. Визначається з таблиці Д.5, приведеної у додатку Д.

Оцінка верхньої довірчої межі параметра масштабу розподілу обчислюється за формулою:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} * x(q; \tilde{\nu}) = \tilde{\mu} * \bar{K}_2^*(q, \tilde{\nu}) \quad (3.38)$$

де $\bar{K}_2^*(q, \tilde{\nu})$ – поправковий коефіцієнт, що визначається з таблиці Д.6, приведеної у додатку Д.

Значення усіх поправкових коефіцієнтів в залежності від коефіцієнтів варіації та довірчої вірогідності наведені у таблицях в додатку Д.

Точкові оцінки і довірчі межі визначуваних показників надійності розраховуються на основі знайдених вище оцінок параметра масштабу.

Точкова оцінка і довірчі межі середнього напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюється за формулами:

$$\tilde{T}_{\text{cp}} = \tilde{\mu}, \quad (3.39)$$

$$\underline{T}_{\text{cp}} = \underline{\mu}, \quad (3.40)$$

$$\overline{T}_{\text{cp}} = \overline{\mu}. \quad (3.41)$$

Гамма-процентне напрацювання до відмови (гамма-процентний ресурс) загально розраховується за формулою:

$$T_{\gamma} = \mu * x(1 - \gamma, \nu), \quad (3.42)$$

де значення $x(1 - \gamma, \nu)$ рівне відносному напрацюванню $x = \frac{t}{\mu}$ визначають з таблиці Д.7 функції DN - розподілу по значеннях $F = 1 - \gamma$ та ν , яку наведено у додатку Д.

Тобто, точкова оцінка і довірчі межі гамма-процентного напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюються за формулами:

$$\widetilde{T}_{\gamma} = \tilde{\mu} * x(1 - \gamma, \tilde{\nu}), \quad (3.43)$$

$$\underline{T}_{\gamma} = \underline{\mu} * x(1 - \gamma, \underline{\nu}), \quad (3.44)$$

$$\overline{T}_{\gamma} = \overline{\mu} * x(1 - \gamma, \overline{\nu}). \quad (3.45)$$

Точкова оцінка і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за напрацювання t обчислюється за формулами:

$$\tilde{P}(t) = \Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu}+t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right), \quad (3.46)$$

$$\underline{P}(t) = \Phi\left(\frac{\underline{\mu}-t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) \Phi\left(-\frac{\underline{\mu}+t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right), \quad (3.47)$$

$$\overline{P}(t) = \Phi\left(\frac{\overline{\mu}-t}{\overline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\overline{\nu}^2}\right) \Phi\left(-\frac{\overline{\mu}+t}{\overline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right). \quad (3.48)$$

Точкова оцінка і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі $(t, t + t_{зад})$ обчислюється за формулами:

$$\tilde{P}(t, t_{зад}) = \frac{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t-t_{зад}}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}(t+t_{зад})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu}+t+t_{зад}}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}(t+t_{зад})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu}+t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right)} \quad (3.49)$$

$$\underline{P}(t, t_{зад}) = \frac{\Phi\left(\frac{\underline{\mu}-t-t_{зад}}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}(t+t_{зад})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\underline{\mu}+t+t_{зад}}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}(t+t_{зад})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\underline{\mu}-t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\underline{\mu}+t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right)} \quad (3.50)$$

$$\overline{P}(t, t_{зад}) = \frac{\Phi\left(\frac{\overline{\mu}-t-t_{зад}}{\overline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}(t+t_{зад})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\overline{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\overline{\mu}+t+t_{зад}}{\overline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}(t+t_{зад})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\overline{\mu}-t}{\overline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\overline{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\overline{\mu}+t}{\overline{\nu}\sqrt{\overline{\mu}t}}\right)} \quad (3.51)$$

Гранична відносна помилка ξ кожного визначуваного показника надійності обчислюється згідно з методикою, описаною у пункті 3.3 даної роботи.

3.5.5 Оцінка показників надійності при спостереженні відмов в процесі експлуатації відновлюваних об'єктів

При наявності відмов під час експлуатації, в першу чергу обчислюється сумарне напрацювання усіх об'єктів по формулі:

$$S = \sum_{i=1}^N T_i, \quad (3.52)$$

де T_i – загальне напрацювання i -го зразка за час спостережень (експлуатації).

Оцінка параметра масштабу DN – розподілу напрацювання на відмову обчислюється по формулі:

$$\tilde{\mu} = \frac{S}{m}; \quad (3.53)$$

де $m=r$ – число відмов (граничних станів) об'єктів під час експлуатації.

Довірчі межі параметра масштабу ($\underline{\mu}, \bar{\mu}$) обчислюються по формулах (3.36), (3.38) з пункту 3.5.4.

Точкові оцінки і довірчі межі визначуваних показників надійності (Точкова оцінка і довірчі межі середнього напрацювання до відмови (ресурсу), Точкова оцінка і довірчі межі гамма-процентного напрацювання до відмови (ресурсу), точкова оцінка і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за напрацювання t , точкова оцінка і довірчі межі вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі ($t, t + t_{зад}$)) розраховуються на основі знайдених оцінок параметра масштабу у відповідності з формулами з пункту 3.5.4.

Гранична відносна помилка ξ кожного визначуваного показника надійності обчислюється згідно з методикою, описаною у пункті 3.3 даної роботи.

4 АПРОБАЦІЯ МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СУПУТНИКОВОГО ПРИЙМАЧА ЗА МАЛОЇ ВИБІРКИ ДАНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

При експлуатаційних спостереженнях роботи супутникових приймачів пропонується не планувати об'єм спостережень, вид цензурування, а обробляти конкретні спостережувані статистичні дані про відмови за певний період експлуатації. За результатами отриманих даних встановлюються точкові і граничні оцінки показників надійності, що відповідають спостережуваній відносній помилці і заданій довірчій вірогідності оцінки показників надійності.

В експлуатації знаходилося $N=8$ зразків супутникового приймача GR50 впродовж напрацювання, рівного $t_u = 4320$ годин, при цьому не було зафіксовано жодної відмови. Необхідно визначити середнє напрацювання до відмови, гамма-процентний ресурс для $\gamma = 0,9$, вірогідність безвідмовної роботи за $t = 5000$ годин, вірогідність безвідмовної роботи в інтервалі від 4320 до 5000 годин.

Схема розрахунку відповідає методиці оцінки показників надійності, що представлена в розділі 3 пункті 3.4.4.

Початковими даними для розрахунку служать:

- довірча вірогідність q інтервальної оцінки показників надійності;
- відносна помилка ξ оцінки показників надійності;
- коефіцієнт варіації ν розподілу випадкової величини (напрацювання, ресурсу).

Довірча вірогідність q обирається з ряду: 0,90; 0,95; 0,98; 0,99 та дорівнює $q=0,9$. Гранична відносна помилка (відносна помилка) ξ обирається з ряду: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4. Зважаючи на специфіку супутникових приймачів як об'єктів, ξ набуває значення $\xi=0,4$.

У результаті аналізу процесів деградації супутникових приймачів даного типу, проведеному у розділі 3, визначено, що причинами відмов супутникових приймачів є втома матеріалів внаслідок перегрівання, електричні процеси,

старіння, тоді користуючись таблицями 3.1-3.2, можна визначити, що середній коефіцієнт варіації напрацювання на відмову супутникових приймачів GR50 дорівнює $\tilde{v} = 0,8$. Очікуване середнє значення коефіцієнта варіації також можна визначити по формулі:

$$\tilde{v} = \sqrt{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2 / \sum_{i=1}^k p_i^2}, \quad (3.54)$$

де v_i, p_i - відповідно середнє значення коефіцієнта варіації і пайовий вклад i -го процесу руйнування.

Виходячи з такого пайового розподілу відмов:

- втома матеріалів внаслідок перегрівання – $p_1 = 0.4, v_1 = 0.75$;
- старіння – $p_2 = 0.2, v_2 = 0.5$;
- електричні процеси – $p_3 = 0.4, v_3 = 1$.

Тоді:

$$\tilde{v} = \sqrt{\sum_{i=1}^k v_i^2 p_i^2 / \sum_{i=1}^k p_i^2} = \sqrt{\frac{0,75^2 * 0,4^2 + 0,5^2 * 0,2^2 + 1^2 * 0,4^2}{0,4^2 + 0,2^2 + 0,4^2}} = \sqrt{\frac{0,2296}{0,36}} \approx 0,8.$$

Верхня межа значення коефіцієнта варіації згідно з рекомендаціями ДСТУ 3433 та таблицею 3.1 набуває значення $\bar{v} = 1,0$.

Нижня межа вірогідності відмови за час експлуатації t_u визначається за формулою:

$$\underline{P}(t_u) = \left(\frac{1-q}{2}\right)^{1/N} = \left(\frac{1-0,9}{2}\right)^{1/8} = 0,6876.$$

Нижня довірча межа параметра масштабу μ DN-розподілу обчислюється за формулою:

$$\underline{\mu} = \frac{t_u}{x_{[1-\underline{P}(t_u); \bar{v}]}} = t_U * K_1^*(\underline{P}, \bar{v}) = 4320 * 2,326 = 10048 \text{ годин.}$$

де $K_1^*(\underline{P}, \bar{v})$ – поправковий коефіцієнт, що визначається з таблиці Д.4, приведеної у додатку Д. Він враховує емпіричну вірогідність відсутності відмови.

Вибіркова середня оцінка параметра $\tilde{\mu}$ розраховується використовуючи оцінку нижньої довірчої межі параметра масштабу $\underline{\mu}$, що відповідає довірчій вірогідності q :

$$\tilde{\mu} = \frac{\underline{\mu}}{x_{[1-q; \tilde{\nu}]}} = t_U * K_2^*(q, \tilde{\nu}) = 4320 * 3,205 = 13845 \text{ годин.}$$

де $K_2^*(q, \tilde{\nu})$ – поправковий коефіцієнт, що враховує вид розподілу та довірчу вірогідність оцінки параметра. Визначається з таблиці Д.5, приведеної у додатку Д.

Оцінка верхньої довірчої межі параметра масштабу розподілу обчислюється за формулою:

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} * x(q; \tilde{\nu}) = \tilde{\mu} * \overline{K_2^*}(q, \tilde{\nu}) = 13845 * 1,978 = 27385 \text{ годин.}$$

де $\overline{K_2^*}(q, \tilde{\nu})$ – поправковий коефіцієнт, що визначається з таблиці Д.6, приведеної у додатку Д.

Значення усіх поправкових коефіцієнтів в залежності від коефіцієнтів варіації та довірчої вірогідності наведені у таблицях в додатку Д.

Точкові оцінки і довірчі межі визначуваних показників надійності розраховуються на основі знайдених вище оцінок параметра масштабу.

Точкова оцінка і довірчі межі середнього напрацювання до відмови (ресурсу) обчислюється за формулами:

$$\begin{aligned} \tilde{T}_{\text{cp}} &= \tilde{\mu} = 13845 \text{ години;} \\ T_{\text{cp}} &= \underline{\mu} = 10048 \text{ годин;} \\ \overline{T}_{\text{cp}} &= \bar{\mu} = 27385 \text{ години.} \end{aligned}$$

З урахуванням значення $\gamma = 0.9$, та використовуючи таблицю Д.7, що наведена в додатку Д, точкова оцінка гамма-процентного напрацювання до відмови (ресурсу) дорівнює:

$$\widetilde{T}_{\gamma} = \tilde{\mu} * x(1 - \gamma, \tilde{\nu}) = 13845 * 0.2491 = 3448 \text{ годин.}$$

З використанням отриманих раніше оцінок параметра масштабу та форми, а також значень функції нормального розподілу, що наведені у таблиці Д.8 додатку Д обчислюється точкова оцінка вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за час напрацювання $t = 5000$ годин, а також довірчі межі показника:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(t) &= \Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu}+t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right) = \Phi\left(\frac{13845-5000}{0,8\sqrt{13845*5000}}\right) - \exp\left(\frac{2}{0,8^2}\right) \\ &\Phi\left(-\frac{13845+5000}{0,8\sqrt{13845*5000}}\right) = \Phi(1,32) - \exp(3,125) * \Phi(-2,63) = 0,9066 - 22,75 * 0,0032 = \\ &0,9066 - 0,0728 = 0,833. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{P}(t) &= \Phi\left(\frac{\underline{\mu}-t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\underline{\nu}^2}\right) \Phi\left(-\frac{\underline{\mu}+t}{\underline{\nu}\sqrt{\underline{\mu}t}}\right) = \Phi\left(\frac{10048-5000}{0,9\sqrt{10048*5000}}\right) - \exp\left(\frac{2}{1^2}\right) \\ &\Phi\left(-\frac{10048+5000}{0,9\sqrt{10048*5000}}\right) = \Phi(0,79) - \exp(2) * \Phi(-2,12) = 0,7881 - 7,389 * 0,0091 = 0,7881 - \\ &0,067 = 0,7211. \end{aligned}$$

$$\bar{P}(t) = \Phi\left(\frac{\bar{\mu}-t}{\bar{\nu}\sqrt{\bar{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\bar{\nu}^2}\right) \Phi\left(-\frac{\bar{\mu}+t}{\bar{\nu}\sqrt{\bar{\mu}t}}\right) = \Phi\left(\frac{27385-5000}{0,8\sqrt{27385*5000}}\right) = \Phi(2,73) = 0,9968.$$

Розраховується точкова оцінка вірогідності безвідмовної роботи в заданому інтервалі $(t, t + t_{\text{зад}})$, де $t = t + t_{\text{зад}} = 5000$, звідки $t_{\text{зад}} = 680$. Таким чином:

$$\begin{aligned} \tilde{P}(t, t_{\text{зад}}) &= \frac{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t-t_{\text{зад}}}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}(t+t_{\text{зад}})}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu}+t+t_{\text{зад}}}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}(t+t_{\text{зад}})}}\right)}{\Phi\left(\frac{\tilde{\mu}-t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{\tilde{\nu}^2}\right) * \Phi\left(-\frac{\tilde{\mu}+t}{\tilde{\nu}\sqrt{\tilde{\mu}t}}\right)} = \\ &\frac{\Phi\left(\frac{32204-4320-680}{0,8\sqrt{32204(4320+680)}}\right) - 22,75 * \Phi\left(-\frac{32204+4320+680}{0,8\sqrt{32204(4320+680)}}\right)}{\Phi\left(\frac{32204-4320}{0,8\sqrt{32204*4320}}\right) - 22,75 * \Phi\left(-\frac{32204+4320}{0,8\sqrt{32204*4320}}\right)} = \\ &\frac{\Phi(2,6798) - 22,75 * \Phi(-3,6648)}{\Phi(2,955) - 22,75 * \Phi(-3,87)} = \frac{0,994}{0,996} = 0,9979. \end{aligned}$$

Визначається гранична відносна помилка ξ оцінки вірогідності безвідмовної роботи (ВБР) за результатами обчислення точкових і граничних оцінок, при цьому $\bar{F} = 1 - \underline{P}(t)$, $\tilde{F} = 1 - \tilde{P}(t)$:

$$\xi = \frac{\bar{F} - \tilde{F}}{\bar{F}} = 0.381.$$

Значення граничної похибки оцінки вірогідності безвідмовної роботи відповідає прийнятому значенню вірогідності $q=0.9$ та заданому допустимому значенню похибки $\xi=0.4$.

Визначається гранична відносна похибка при оцінці середнього напрацювання до відмови (граничного стану) за результатами експлуатації:

$$\xi = \frac{\bar{T}_{\text{cp}} - T_{\text{cp}}}{\bar{T}_{\text{cp}}} = 0.27.$$

Значення граничної похибки оцінки середнього напрацювання на відмову відповідає прийнятому значенню вірогідності $q=0.9$ та не перевищує допустиме значення похибки $\xi=0.4$.

Можна зробити висновок, що проаналізувавши механізми відмов супутникового приймача, та маючи дані про напрацювання та відмови, можна визначити основні показники надійності з допустимою похибкою, в тому числі при малій вибірці даних та навіть відсутності фактичних відмов у роботі певної кількості зразків.

Практичне використання даного методу полягає в тому, що при експлуатаційних спостереженнях роботи супутникових приймачів можна досліджувати такі показники надійності як середнє напрацювання до відмови, гамма-процентний ресурс, вірогідність безвідмовної роботи за певний час, вірогідність безвідмовної роботи в інтервалі часу, при цьому можливо не планувати об'єм спостережень, вид цензурування, а обробляти конкретні спостережувані статистичні дані про відмови за певний період експлуатації, та виконувати розрахунки навіть у відсутності відмов за певний проміжок часу. За результатами отриманих даних можна встановити точкові і граничні оцінки показників надійності, що відповідають спостережуваній відносній помилці і заданій довірчій вірогідності оцінки показників надійності.

ВИСНОВКИ

Для досягнення мети дослідження було проведено аналіз області використання супутникових приймачів, їх загальної характеристики та класифікації. Проаналізовано питання оцінки надійності супутникових приймачів, виконано аналіз конкретного об'єкту, його призначення, функцій та умов експлуатації, визначено основні процеси деградації супутникового приймача. У роботі описані загальні положення оцінювання показників надійності, теоретичні основи дифузійних розподілів та обґрунтовано використання немонотонного дифузійного розподілу для визначення показників надійності супутникових приймачів.

Розроблено метод оцінювання показників надійності супутникових приймачів за результатами експлуатації за відсутності відмов та при спостереженні відмов. Проведено апробацію методу оцінювання показників надійності супутникового приймача на основі малої вибірки даних експлуатаційних спостережень.

Після проведення розрахунків можна зробити висновок, що проаналізувавши механізми відмов супутникового приймача, та маючи дані про напрацювання та відмови, можна визначити основні показники надійності з допустимою похибкою, в тому числі при малій вибірці даних та навіть відсутності фактичних відмов у роботі певної кількості зразків за певний час експлуатації.

Оцінка та прогнозування показників надійності супутникових приймачів в умовах малої або навіть відсутності статистики відмов за рахунок використання апріорної інформації про фізичні процеси деградації, об'єктів, що обумовлюють відмови та з використанням найбільш адекватних імовірнісно-фізичних моделей відмов (дифузійних розподілів) викликана практичною потребою організацій, що займаються реалізацією супутникових приймачів, або використовують дані супутникові приймачі у цілях побудови власних локальних та навіть всеукраїнських мереж базових станцій, а також щоб

приймати ефективніші рішення про терміни подальшої експлуатації і вжиття заходів по забезпеченню експлуатаційної надійності. А оскільки сфера застосування супутникових приймачів досить широка, необхідно робити оцінки і прогнозувати показники надійності об'єктів в умовах обмеженої статистики відмов.

Також практичне використання даного методу полягає в тому, що при експлуатаційних спостереженнях роботи супутникових приймачів можна досліджувати такі показники надійності як середнє напрацювання до відмови, гамма-процентний ресурс, вірогідність безвідмовної роботи за певний час, вірогідність безвідмовної роботи в інтервалі часу, при цьому можливо не планувати об'єм спостережень, вид цензурування, а обробляти конкретні спостережувані статистичні дані про відмови за певний період експлуатації, та виконувати розрахунки навіть у відсутності відмов за певний проміжок часу. За результатами отриманих даних можна встановити точкові і граничні оцінки показників надійності, що відповідають спостережуваній відносній помилці і заданій довірчій вірогідності оцінки показників надійності. Також використання методів розрахунку на основі двохпараметричних моделей відмов при експериментальній оцінці чи в результаті спостережень в процесі експлуатації може призводити до істотного скорочення об'єму випробувань або об'єму спостережень, тобто зменшенню кількості випробовуваних спостережуваних зразків на 30-50% для заданої достовірності і точності.

За результатами дослідження опубліковано тези на II Міжнародній науково-практичній конференції "Recent Advances in Science", яка відбулася у місті Рейк'явік (Ісландія) за підтримки ГО "Університет лідерства та інновацій" за напрямом «Технічні науки». Отримано сертифікат участі у конференції [33].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Аналіз і забезпечення надійності електронної апаратури при проектуванні / М.Ф.Бабаков – навч. Посібник. – Харків: Нац. Аерокосмічний ун-т «Харк. Авіація. Ін-т. », 2002. – 90 с.
2. Серапинас Б.Б. Глобальні системи позиціонування. — М. : ИКФ "Каталог", 2002. — 106 с.
3. Навігація. Основи визначення місцеположення та скеровування / Б. Гофманн-Велленгоф, К. Легат, М. Візер ; пер. з англ. за ред. : Я. С. Яцківа ; літ. ред. : О. Є. Смолінська. — Л.: ЛНУ ім. І. Франка, 2006. — 449 с.
4. Guochang Xu. Gps: Theory, Algorithms and Applications // Springer. 2003.
5. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: theory and practice // Springer-Verlag.
6. ГЛОНАСС. Принципи побудови та функціонування. Вид. 4 / Під ред. А. І. Перова, В. К. Харісова. М.: Радіотехніка. 2010.
7. About the International GNSS Service (IGS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://igs.org/about/#mission-vision-values> (10.11.2022)
8. Ямбаєв Х.К. Геодезичне інструментознавство: Підручник для вузів. - М.: Академічний Проект; Гаудеамус, 2011. - 583 с. - (Gaudeamus).
9. Gong, Xuewen; Guo, Lei; Wang, Fuhong; Zhang, Wanwei; Sang, Jizhang; Ge, Maorong; Schuh, Harald (11 June 2019). "Precise Onboard Real-Time Orbit Determination with a Low-Cost Single-Frequency GPS/BDS Receiver". Remote Sensing. 11 (11): 1391. Bibcode:2019RemS...11.1391G.
10. Multiband Antennas for SDR Applications // International Journal of Digital Multimedia Broadcasting. 2009.
11. Основні технології в області позиціонування, моделювання, зв'язку та аналізу даних [Електронний ресурс]. – Режим доступу: trimble.com/gps_tutorial/dgps-how.aspx (18.11.2022).

12. Cobb, Peter J.; Earley-Spadoni, Tiffany; Dames, Philip (2019). "Centimeter-Level Recording for All: Field Experimentation with New, Affordable Geolocation Technology". *Advances in Archaeological Practice*. 7 (4): 353–365.
13. Базова станція leica GR50 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ngc.com.ua/ua/p/809-leica-gr50.html> (20.11.2022)
14. Технічна документація до Leica GR50 Data sheet 842731 _Leica_GR30_GM30_GR50_UM_v2-3-0_ru.
15. Технічна документація до OEM719 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hexagondownloads.blob.core.windows.net/public/Novatel/assets/Documents/Papers/OEM719-Product-Sheet/OEM719-Product-Sheet.pdf> (22.11.2022)
16. СВ-OWL22X Electrical and mechanical data sheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.spezial.cz/pdf/EM_Datasheet_OWL221_222.pdf (23.11.2022)
17. PoE (Power over Ethernet) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://silvertel.com/poe-power-over-ethernet-html/> (25.11.2022)
18. ДСТУ 2506-94 Засоби обчислювальної техніки. Відмовостійкість і живучість. Загальні технічні вимоги
19. ДСТУ ГОСТ 21964:2009 Зовнішні фактори впливу. Класифікація, номенклатура та характеристики
20. Мережа базових станцій NGC.NET [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ngc.com.ua/info/ngcnet.html> (25.11.2022)
21. Геодезична NRTK мережа System.net [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://systemnet.com.ua/> (01.12.2022)
22. Програмне забезпечення Leica GNSS Spider [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://leica-geosystems.com/en-us/products/gnss-reference-networks/software/leica-gnss-spider> (01.12.2022)
23. Аналіз і забезпечення надійності електронної апаратури при проектуванні / М.Ф.Бабаков – навч. Посібник. – Харків: Нац. Аерокосмічний ун-т «Харк. Авіація. Ін-т. », 2002. – 90 с.

24. Бабаков М.Ф. Нормування і розрахунок надійності радіоелектронної апаратури: навч. Посібник / М.Ф. Бабаков, І.К.Васильєва, І.І. Дерюга. – Х .: Нац.аерокосм. ун-т «Харк. Авіація. Ін-т », 2008. – 77С.

25. ДСТУ 3004-95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними.

26. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення.

27. ДСТУ 8647:2016 Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування надійності за результатами випробувань і/або експлуатації в умовах малої кількості відмов.

28. Васілевський О. М., Поджаренко В. О. Нормування показників надійності технічних засобів: посібник, 2021.

29. Martin Pickering. Reliability of satellite receivers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.your-book.co.uk/reliable.htm> (03.12.2022)

30. Глосарій термінів з хімії / уклад. Й. Опейда, О. Швайка ; Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. — Дон. : Вебер, 2008. — 738 с. — ISBN 978-966-335-206-0.

31. ДСТУ 3433-96 Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення (ГОСТ 27.005-97)

32. Моделі надійності радіоелектронної апаратури/ М.Ф. Бабаков – методич. Посібник. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харк. авіац. ін-т", 2016. – 100 с.

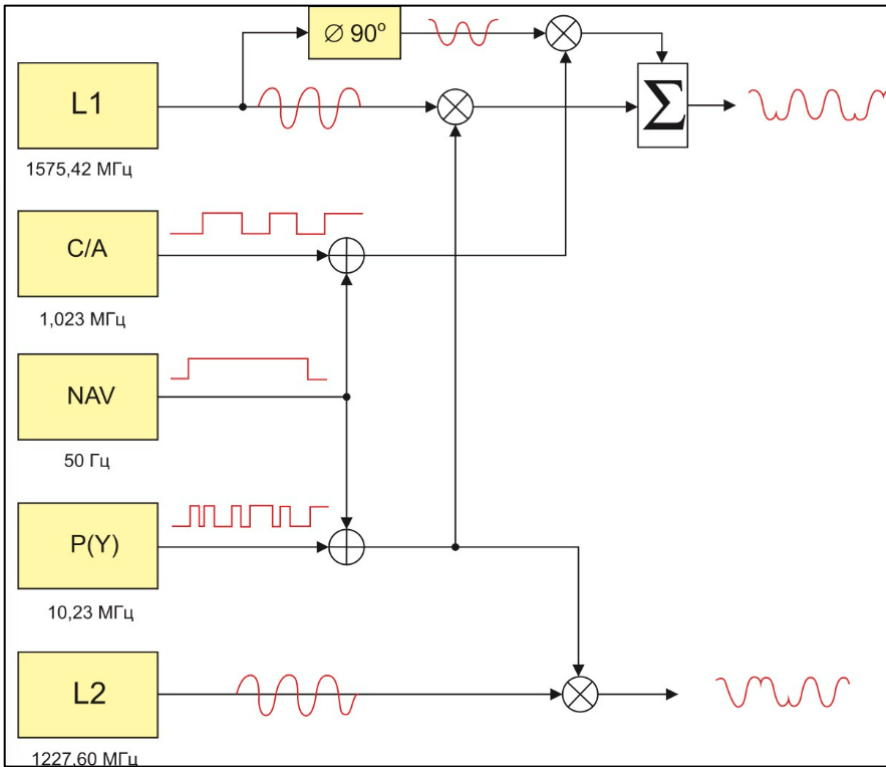
33. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання.

34. Babakov M.F., Popova O.V. Method of estimation of satellite receiver reliability indicators for a small sample of operational observation data. (2022)

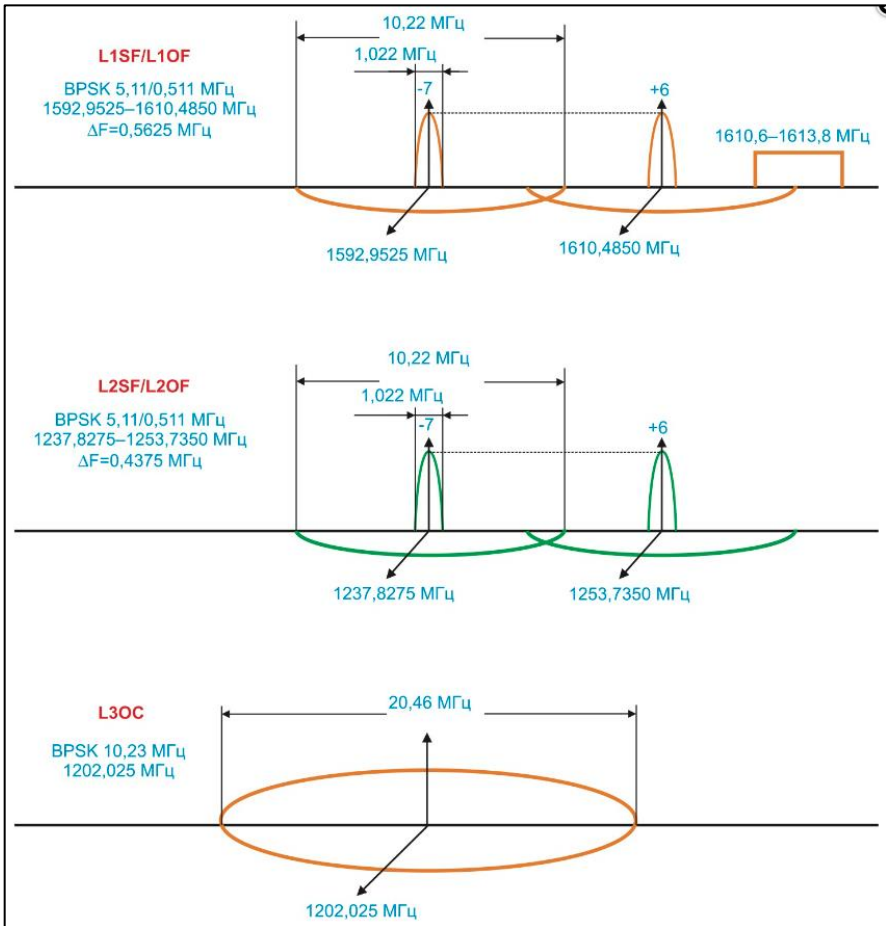
Recent advances in science – Proceedings of the 2nd international scientific and Practical conference.

ДОДАТОК А

«Схема кодування сигналів GPS та ГЛОНАСС»



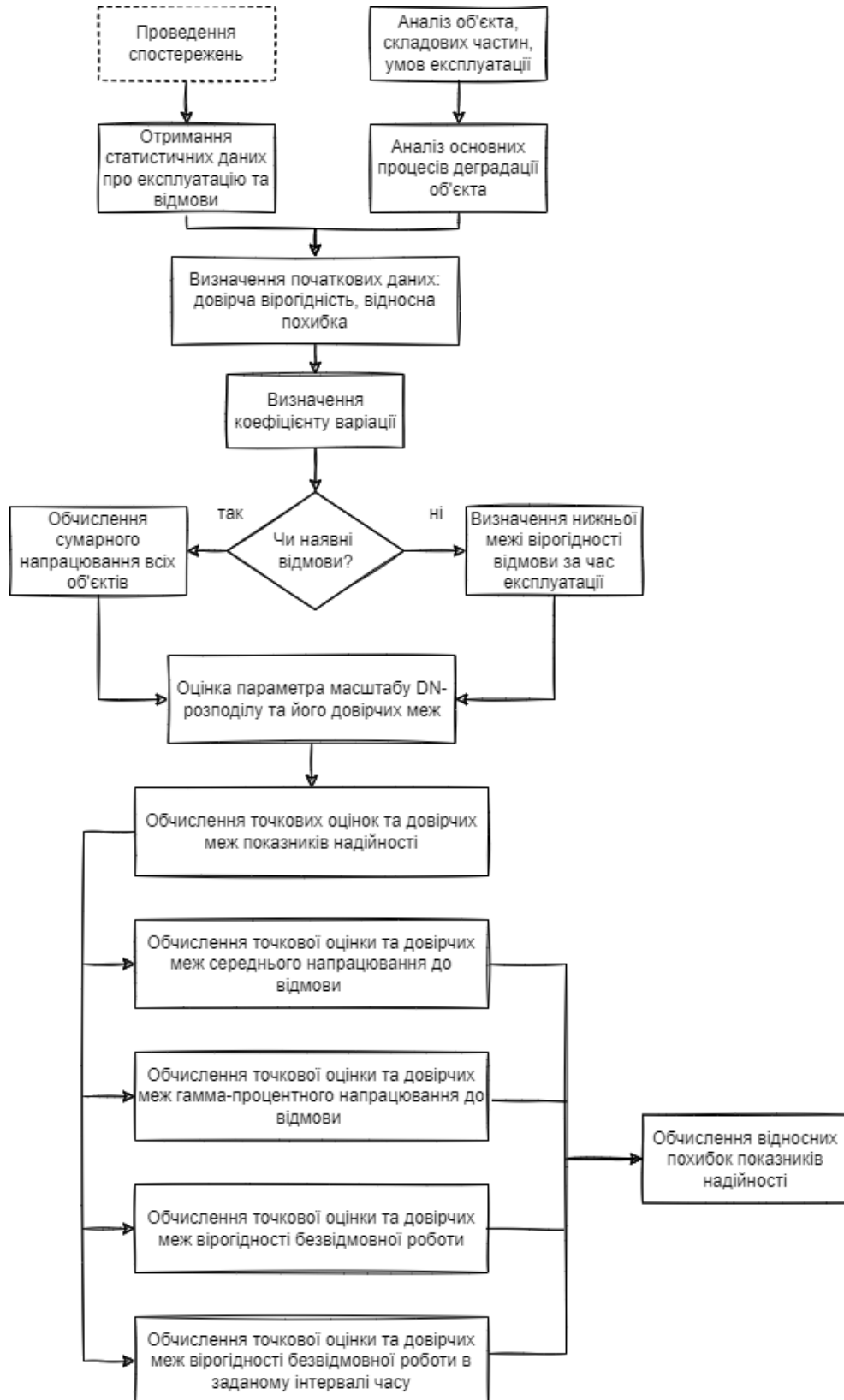
Принцип кодування сигналів GPS



Принцип кодування сигналів ГЛОНАСС

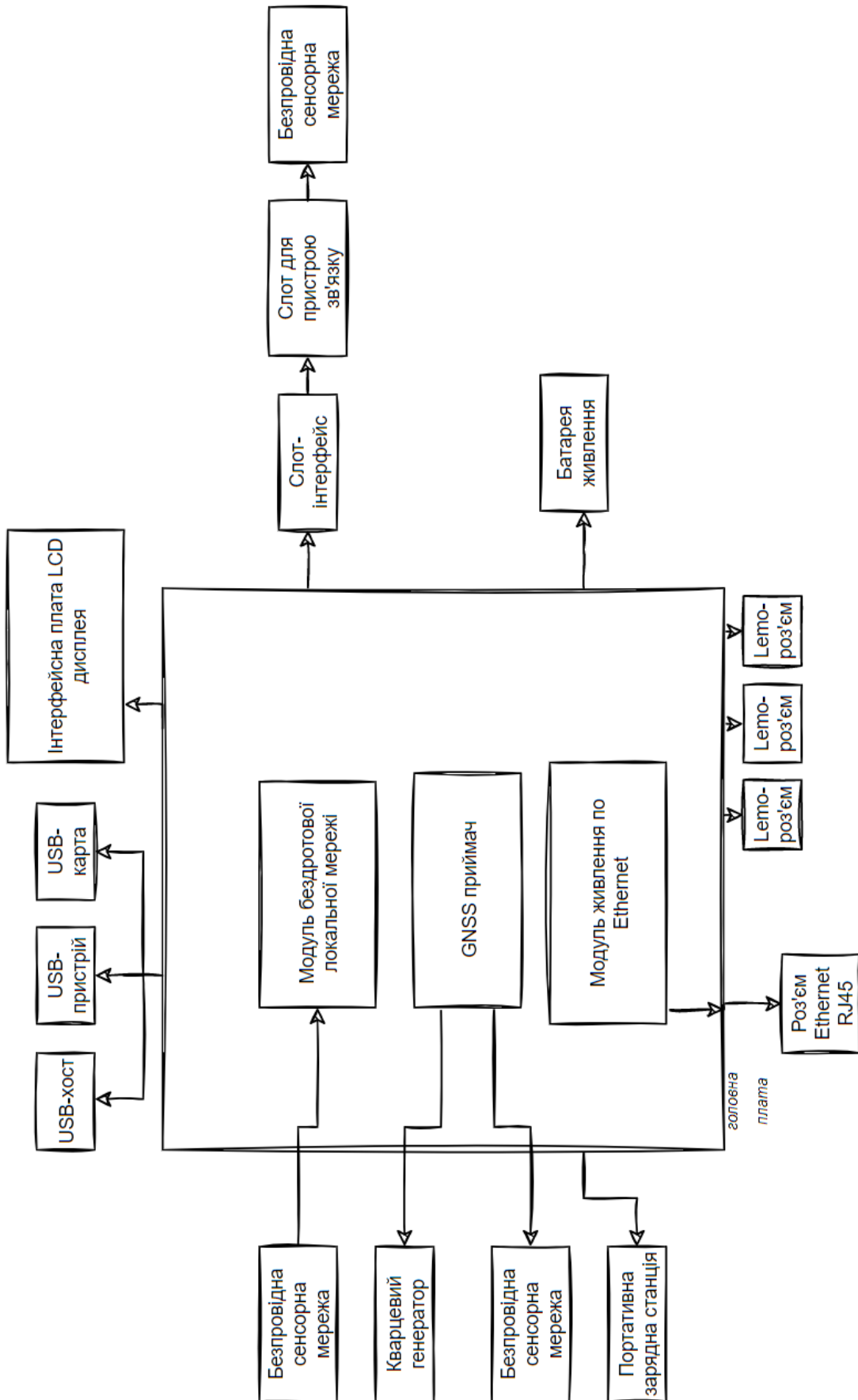
ДОДАТОК Б

«Структурна схема алгоритму проведення оцінювання показників надійності супутникового приймача за малої вибірки даних експлуатаційних спостережень»



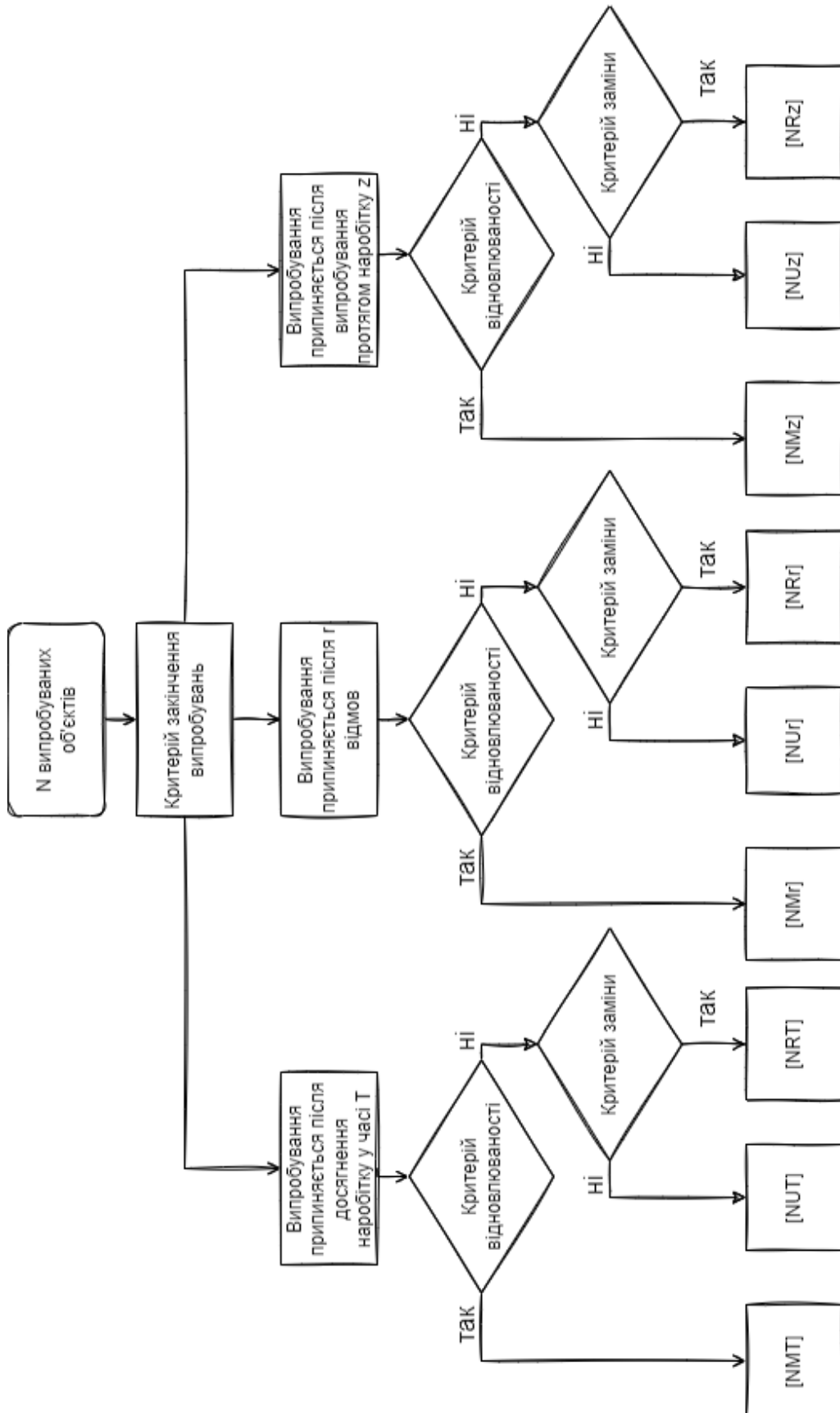
ДОДАТОК В

«Структурна схема супутникового приймача»



ДОДАТОК Г

Схема вибору плану випробувань



ДОДАТОК Д

Таблиці для обчислення показників надійності

Таблиця Д.1 – Значення квантилів нормованого нормального розподілу

Вірогідність p	Квантиль U_p	Вірогідність p	Квантиль U_p
0.0000001	- 5,125	0.5	0
0.000001	- 4.767	0.6	0,253
0.00001	- 4.267	0.7	0,524
0.00005	- 3,899	0.8	0,842
0.0001	- 3,719	0.9	1,282
0.001	- 3,090	0.95	1,645
0.005	- 2,576	0.975	1,960
0.01	- 2,326	0.990	2,326
0.025	- 1,960	0.995	2,576
0.05	- 1,645	0.999	3,090
0.1	- 1,282	0.9999	3,719
0.2	- 0,842	0.99999	4.267
0.3	- 0,524	0.999999	4.767
0.4	- 0,253	0.9999999	5.125

Таблиця Д.2 – Значення поправкового коефіцієнта $K_1(\underline{P}, \bar{v})$

\underline{P}	Значення $K_1(\underline{P}, \bar{v})$ при \bar{v}				
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,30	0,850	0,810	0,770	0,731	0,694
0,40	0,927	0,904	0,881	0,849	0,838
0,50	1	1	1	1	1
0,60	1,079	1,106	1,135	1,164	1,194
0,70	1,170	1,233	1,298	1,368	1,440
0,80	1,286	1,398	1,519	1,648	1,788
0,90	1,466	1,661	1,878	2,120	2,386
0,95	1,630	1,909	2,228	2,588	2,992
0,96	1,681	1,987	2,338	2,737	3,187
0,97	1,746	2,087	2,482	2,933	3,443
0,98	1,835	2,226	2,681	3,207	3,804
0,99	1,982	2,459	3,022	3,676	4,425
0,995	2,127	2,689	3,361	4,148	5,054
0,999	2,451	3,217	4,146	5,248	6,525
0,9995	2,588	3,442	4,487	5,724	7,165

Таблиця Д.3 – Значення поправкового коефіцієнта $K_2(q, \tilde{\nu})$

q	Значення $K_2(q, \tilde{\nu})$ при $\tilde{\nu}$				
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,9	1,466	1,661	1,878	2,120	2,386
0,95	1,630	1,909	2,228	2,588	2,992

Таблиця Д.4 – Значення поправкового коефіцієнта $K_1^*(P, \bar{\nu})$

\underline{P}	Значення $K_1^*(P, \bar{\nu})$ при $\bar{\nu}$					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,30	0,869	0,870	0,875	0,886	0,902	0,962
0,40	0,994	1,016	1,047	1,084	1,129	1,178
0,50	1,124	1,176	1,239	1,311	1,391	1,479
0,60	1,271	1,359	1,462	1,577	1,706	1,848
0,70	1,445	1,582	1,742	1,916	2,114	2,326
0,80	1,678	1,887	2,128	2,381	2,681	3,003
0,90	2,045	2,398	2,740	3,155	3,623	4,202
0,95	2,415	2,890	3,413	4,000	4,695	5,435
0,96	2,538	3,049	3,623	4,274	4,950	5,814
0,97	2,681	3,257	3,891	4,630	5,435	6,369
0,98	2,890	3,534	4,273	5,102	6,061	7,092
0,99	3,257	4,000	4,950	5,917	6,849	8,333
0,995	3,676	4,484	5,555	6,803	8,130	9,709
0,999	4,367	5,618	7,092	8,696	10,64	12,63
0,9995	4,739	6,135	7,692	9,615	11,63	13,93

Таблиця Д.5 – Значення поправкового коефіцієнта $K_2^*(q, \tilde{\nu})$

q	Значення $K_2^*(q, \tilde{\nu})$ при $\tilde{\nu}$				
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,9	2,058	2,392	2,770	3,205	3,584
0,95	2,427	2,882	3,413	4,032	4,695

Таблиця Д.6 – Значення поправкового коефіцієнта $\overline{K_2^*}(q, \tilde{\nu})$

q	Значення $\overline{K_2^*}(q, \tilde{\nu})$ при $\tilde{\nu}$					
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,9	1,655	1,771	1,873	1,978	2,066	2,143
0,95	1,961	2,164	2,364	2,557	2,744	2,922

Таблиця Д.7 – значення функції DN - розподілу по значеннях $F = 1 - \gamma$ та ν

F	Значення $x(F, \nu)$ для ν									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.0005	0.7207	0.5237	0.3753	0.2784	0.2112	0.1638	0.1298	0.1048	0.0861	0.0718
0.0010	0.7351	0.5441	0.3958	0.2973	0.2277	0.1779	0.1417	0.1149	0.0947	0.0792
0.0050	0.7735	0.6007	0.4551	0.3537	0.2784	0.2223	0.1801	0.1480	0.1233	0.1039
0.0100	0.7929	0.6305	0.4876	0.3859	0.3083	0.2491	0.2038	0.1688	0.1414	0.1198
0.0500	0.8485	0.7207	0.5913	0.4934	0.4127	0.3466	0.2928	0.2491	0.2134	0.1841
0.1000	0.8798	0.7744	0.6566	0.5650	0.4857	0.4180	0.3607	0.3124	0.2718	0.2376
0.2000	0.9193	0.8452	0.7465	0.6680	0.5954	0.5294	0.4704	0.4182	0.3722	0.3320
0.3000	0.9489	0.9005	0.8196	0.7551	0.6918	0.6312	0.5743	0.5216	0.4734	0.4297
0.4000	0.9750	0.9506	0.8880	0.8392	0.7879	0.7356	0.6839	0.6338	0.5861	0.5411
0.5000	1.0000	1.0000	0.9572	0.9267	0.8905	0.8502	0.8074	0.7634	0.7193	0.6758
0.6000	1.0257	1.0520	1.0320	1.0236	1.0070	0.9837	0.9548	0.9219	0.8860	0.8483
0.7000	1.0538	1.1105	1.1184	1.1384	1.1488	1.1501	1.1433	1.1294	1.1097	1.0851
0.8000	1.0878	1.1831	1.2284	1.2888	1.3395	1.3800	1.4106	1.4316	1.4438	1.4479
0.9000	1.1366	1.2913	1.3983	1.5287	1.6533	1.7705	1.8787	1.9771	2.0653	2.1430
0.9500	1.1786	1.3875	1.5546	1.7565	1.9606	2.1638	2.3634	2.5574	2.7440	2.9221
0.9900	1.2613	1.5859	1.8905	2.2641	2.6682	3.0978	3.5482	4.0152	4.4950	4.9841
0.9950	1.2929	1.6647	2.0282	2.4779	2.9735	3.5093	4.0802	4.6812	5.3079	5.9563
0.9990	1.3604	1.8379	2.3386	2.9695	3.6866	4.4839	5.3551	6.2943	7.2959	8.3549
0.9995	1.3876	1.9094	2.4694	3.1800	3.9959	4.9108	5.9184	7.0124	8.1867	9.4362

