

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Моніторинг екологічно небезпечних вантажів на основі
використання супутникових радіонавігаційних систем»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-12

Левченко Володимир Русланович _____

Керівник:

Професор кафедри ТК НН ІТС, к.т.н., професор

Якорнов Євгеній Аркадійович _____

Рецензент:

Старший викладач ЕКІР ІТС, к.т.н.

Новіков Валерій Іванович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Левченку Володимирі Руслановичу

1. Тема роботи «Моніторинг екологічно небезпечних вантажів на основі використання супутникових радіонавігаційних систем», керівник роботи Якорнов Євгеній Аркадійович, к.т.н., професор від «26» травня 2025 р. № 1755-с.
2. Термін подання студентом роботи 9 червня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: «Розробка системи моніторингу небезпечних вантажів»
4. Зміст роботи: Аналіз сучасного стану проблеми моніторингу небезпечних вантажів; Технології супутникової навігації та засоби відстеження; Розробка системи моніторингу небезпечних вантажів; Технічне обґрунтування рішень та відповідність нормам.
5. Перелік ілюстративного матеріалу
 1. Тема, актуальність, мета та задачі дипломної роботи
 2. Класифікація екологічно небезпечних вантажів (ADR)
 3. Приклади надзвичайних ситуацій при перевезеннях

4. Принцип дії GNSS та схема позиціонування
5. Порівняльна таблиця GNSS-систем: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
6. Архітектура бортового пристрою (OBU)
7. Типи сенсорів для моніторингу вантажу
8. Гібридна схема передачі даних (GSM + супутник + резерв SMS)
9. Загальна структура системи моніторингу
10. Алгоритм роботи системи
11. Інтерфейс користувача диспетчера
12. Модуль оповіщення: рівні тривоги і приклади сповіщень
13. Тестування точності GNSS та реагування
14. Оцінка масштабованості системи
15. Висновки: переваги, відповідність ADR, можливість впровадження

7. Дата видачі завдання 15.09.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану проблеми моніторингу небезпечних вантажів	15.09.2024-17.11.2024	Виконав
2	Технології супутникової навігації та засоби відстеження	18.11.2024-20.02.2025	Виконав
3	Розробка системи моніторингу небезпечних вантажів	21.02.2025-17.04.2025	Виконав
4	Технічне обґрунтування рішень та відповідність нормам	18.04.2025-08.06.2025	Виконав
6	Подання дипломної роботи на кафедру	09.06.2025р.	Виконав

Студент

Володимир ЛЕВЧЕНКО

Керівник

Євгеній ЯКОРНОВ

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 66 стор., 10 рисунків, 3 таблиці. Було використано 19 джерел інформації.

Об'єкт дослідження – процес суп утничового моніторингу екологічно небезпечних вантажів у процесі автомобільного перевезення.

Предмет дослідження – технічні засоби, архітектура та алгоритми функціонування автоматизованої системи моніторингу з використанням супутникових навігаційних технологій.

Метою роботи є проектування та реалізація системи моніторингу перевезень небезпечних вантажів на основі супутникових радіонавігаційних систем, яка забезпечує контроль координат транспорту, параметрів стану вантажу та аварійне реагування.

У роботі проведено аналіз нормативної бази та сучасних технологій GNSS також побудову архітектури автоматизованої системи моніторингу, моделювання роботи системи в типових та аварійних сценаріях, розробку алгоритмів опрацювання даних, логіки реагування, обґрунтування відповідності компонентів вимогам ADR.

Основні результати роботи:

- розроблено прототип системи моніторингу небезпечних вантажів із використанням мультісистемного GNSS-приймача, датчиків стану вантажу, захищеного каналу зв'язку та диспетчерського інтерфейсу;
- протестовано алгоритми реагування на нештатні ситуації (відхилення від маршруту, перегрів, зіткнення);
- доведено можливість масштабування системи до сотень об'єктів;
- підтверджено доцільність впровадження в логістичних компаніях.

Ключові слова: небезпечний вантаж, супутникова навігація, GNSS, ADR, моніторинг транспорту, трекер, інфокомунікації, диспетчерська система, тривожне повідомлення, екологічна безпека.

ABSTRACT

Thesis: 66 pages, 10 drawings, 3 tables, 19 reference.

Object of research – the process of satellite monitoring of environmentally hazardous cargo during road transportation.

Subject of research – technical means, architecture, and algorithms of the automated monitoring system using satellite navigation technologies.

The purpose of the thesis is to design and implement a monitoring system for the transportation of hazardous goods based on global navigation satellite systems (GNSS), enabling real-time tracking of vehicle location, control of cargo condition parameters, and emergency response functionality.

The research includes:

- analysis of regulatory framework and modern GNSS technologies;
- development of the architecture of the automated monitoring system;
- modeling of the system's operation under typical and emergency scenarios;
- development of data processing algorithms and response logic;
- justification of component compliance with ADR requirements.

Key results:

- a prototype of a hazardous cargo monitoring system was developed, integrating a multi-system GNSS receiver, cargo condition sensors, a secure communication channel, and a dispatcher interface;
- the system's algorithms were tested under abnormal conditions (route deviation, overheating, collision);
- the solution was proven scalable to hundreds of monitored objects;
- the feasibility of implementation in logistics companies has been confirmed.

Keywords: hazardous cargo, satellite navigation, GNSS, ADR, transport monitoring, tracker, infocommunications, dispatch system, emergency alert, environmental safety.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ МОНІТОРИНГУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ.....	11
1.1. Класифікація екологічно небезпечних вантажів	11
1.2. Регламентуючі документи та нормативно-правова база	14
1.3. Аналіз причин і наслідків надзвичайних ситуацій при перевезеннях	16
1.4. Огляд сучасних систем моніторингу та їх технічні обмеження	16
Висновки	18
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ ТА ЗАСОБИ ВІДСТЕЖЕННЯ.....	19
2.1. Принципи роботи глобальних навігаційних супутникових систем	19
2.2. Характеристики GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou	21
2.3. Бортові пристрої: архітектура та типи сенсорів	24
2.4. Канали зв'язку: GSM, GPRS, LTE, супутниковий зв'язок	27
2.5. Інтеграція з диспетчерськими платформами	30
Висновки	32
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ.....	35
3.1. Структура автоматизованої системи моніторингу	35
3.2. Алгоритм функціонування системи та взаємодія компонентів	37
3.3. Програмна логіка, база даних та обмін повідомленнями	42
3.4. Інтерфейс користувача та модуль оповіщення	46
Висновки	49
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РІШЕНЬ ТА ВІДПОВІДНІСТЬ НОРМАМ.....	51
4.1. Вибір компонентів системи з урахуванням вимог ADR	51
4.2. Оцінка точності та надійності системи GNSS-моніторингу	52
4.3. Можливості масштабування та захист інформації	54
Висновки	56

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61
Додаток А.....	62

ПЕРЕЖИК СКОРОЧЕНЬ

API	Application Programming Interface
ATEX/EX	ATmosphères EXplosibles / Explosion-Proof
AVL	Automatic Vehicle Location
CRM	Customer Relationship Management
DHL	Dalsey, Hillblom and Lynn
DPD	Dynamic Parcel Distribution
DVR	Digital Video Recorder
ENB	Ecologically Hazardous Cargoes
ERP	Enterprise Resource Planning
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM/3G/4G/LTE	Global System for Mobile Communications / 3rd Generation / 4th Generation / Long-Term Evolution
ID	Identifier / Identification
IoT	Internet of Things
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OBU	On-Board Unit
ADR	European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road
RFID	Radio Frequency Identification
TLS	Transport Layer Security
UN	United Nations
URL	Uniform Resource Locator
VPN	Virtual Private Network

ВСТУП

У сучасних умовах інтенсивного розвитку промисловості, транспорту та хімічної галузі все частіше здійснюються перевезення речовин, які становлять підвищену небезпеку для здоров'я людини, довкілля та інфраструктури. До таких вантажів належать легкозаймисті рідини, токсичні гази, вибухові матеріали, хімічно нестійкі сполуки тощо. Невипадково питання забезпечення безпеки перевезення екологічно небезпечних вантажів посідає одне з ключових місць у нормативно-правових актах, міжнародних угодах та інженерній практиці.

Незважаючи на наявність суворих регламентів щодо транспортування небезпечних речовин, значна частина аварійних ситуацій, пов'язаних з такими перевезеннями, виникає через недостатній контроль за рухом транспортних засобів, відсутність оперативної інформації про стан вантажу або несвоєчасне реагування на інциденти. Проблема особливо загострюється у випадках, коли перевезення здійснюється на великі відстані, через густонаселені райони або природоохоронні зони.

Сучасні технології дозволяють значно підвищити рівень безпеки перевезень шляхом впровадження автоматизованих систем моніторингу, заснованих на глобальних навігаційних супутникових системах. Такі системи дозволяють відстежувати координати транспортного засобу в реальному часі, контролювати параметри середовища всередині вантажного відсіку, фіксувати відхилення від маршруту, зупинки в небезпечних зонах, а також передавати тривожні сигнали до диспетчерських центрів і служб реагування.

Однак аналіз сучасного ринку показує, що більшість наявних рішень у сфері супутникового моніторингу переважно орієнтовані на загальну логістику і не враховують специфіку перевезення саме небезпечних вантажів відповідно до ADR. У багатьох випадках системи не інтегрують датчики стану вантажу, не забезпечують сценарії аварійного реагування або мають обмежену масштабованість.

У цьому контексті виникає потреба у створенні універсальної, адаптивної системи, яка відповідала б міжнародним вимогам безпеки, забезпечувала гнучкість налаштувань, інтегрувалась із службами порятунку та була придатна до впровадження як у малих, так і у великих логістичних структурах.

Метою дипломної роботи є розробка автоматизованої системи супутникового моніторингу перевезення небезпечних вантажів з можливістю повноцінного контролю місцезнаходження транспорту, умов перевезення, виявлення аварійних ситуацій та формування інтелектуальних сповіщень у разі відхилень від заданих параметрів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз нормативної та технічної бази з питань перевезення небезпечних вантажів;
- дослідження можливостей GNSS-систем для відстеження рухомих об'єктів;
- реалізація прототипу програмної частини системи;
- моделювання типових сценаріїв використання, включаючи аварійні;
- оцінка точності позиціонування та ефективності реагування.

Об'єкт дослідження – процес супутникового моніторингу при транспортуванні небезпечних вантажів.

Предмет дослідження – технічні засоби, архітектура та алгоритми функціонування автоматизованої системи моніторингу з використанням GNSS.

Результати дипломної роботи можуть бути впроваджені в логістичних компаніях, що спеціалізуються на ADR-перевезеннях, у службах державного контролю транспорту та екологічної безпеки, а також як основа для подальшого розвитку телематичних платформ в Україні.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ МОНІТОРИНГУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ

1.1 Класифікація екологічно небезпечних вантажів

Екологічно небезпечні вантажі (ЕНВ) — це речовини та матеріали, які у процесі перевезення можуть становити загрозу для здоров'я людей, довкілля або матеріальних цінностей внаслідок своїх фізичних, хімічних або біологічних властивостей. До таких вантажів належать: отруйні, токсичні, вибухонебезпечні, легкозаймисті, корозійні, радіоактивні речовини, а також відходи промислового або біологічного походження, які підлягають контролю згідно з екологічним та транспортним законодавством.

Класифікація небезпечних вантажів здійснюється відповідно до міжнародних стандартів, зокрема Європейської угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ADR) та рекомендацій ООН щодо перевезення небезпечних вантажів (UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods – Model Regulations).

Відповідно до ADR, усі небезпечні вантажі поділяються на 9 класів небезпеки як показано на рис. 1.1



Рис. 1.1 Класифікація небезпечних вантажів

Кожен клас охоплює вантажі з подібною загрозою, включаючи й екологічні ризики:

Клас 1 — Вибухові речовини та вироби.

Містять речовини, що можуть вибухати або горіти з утворенням великої кількості газу. Прикладами є тротил, амоніти, піротехнічні вироби.

Екологічна небезпека: утворення токсичних продуктів згоряння, ударна хвиля, руйнування інфраструктури.

Клас 2 — Гази.

Включає стиснені, зріджені, розчинені під тиском гази. Поділяються на:

легкозаймисті (пропан, бутан);

нетоксичні (азот, вуглекислий газ

токсичні (хлор, аміак).

Екологічна небезпека: утворення отруйних хмар, вибухонебезпечність, задимлення.

Клас 3 — Легкозаймисті рідини.

Наприклад: бензин, етанол, ацетон. Ці рідини мають низьку температуру займання.

Екологічна небезпека: забруднення ґрунтів і вод, утворення вогнищ загоряння.

Клас 4 — Легкозаймисті тверді речовини та речовини, що можуть самозайматись.

Наприклад: натрій, фосфор, магній.

Екологічна небезпека: вибухи при контакті з водою, займання в повітрі.

Клас 5 — Окислювальні речовини та органічні пероксиди.

Такі речовини, як нітрат амонію, можуть викликати самозаймання або посилювати горіння.

Екологічна небезпека: виділення токсичних газів, забруднення водних об'єктів.

Клас 6 — Токсичні та інфекційні речовини.

6.1: отруйні (ціаніди, пестициди);

6.2: інфекційні матеріали (патогени, біоматеріали).

Екологічна небезпека: зараження вод, ґрунту, флори та фауни.

Клас 7 — Радіоактивні матеріали.

Включає ізомери, джерела іонізуючого випромінювання (кобальт-60, уран, цезій-137).

Екологічна небезпека: довготривале забруднення, біологічне ураження організмів.

Клас 8 — Корозійні речовини.

Наприклад: сірчана кислота, гідроксид натрію. Вони руйнують метали, органіку, тканини.

Екологічна небезпека: руйнування інфраструктури, отруєння водних об'єктів.

Клас 9 — Інші небезпечні речовини.

Сюди відносяться речовини з комбінованими небезпечними властивостями або ті, що не входять до попередніх класів, але становлять ризик: літєві батареї, генетично модифіковані організми, екологічно небезпечні рідкі відходи.

Окремо виділяються речовини, що становлять загрозу довкіллю (ENVIRONMENTALLY HAZARDOUS SUBSTANCES) — маркуються спеціальним знаком «dead fish and tree» та можуть мати різні класи, але загальні вимоги щодо пакування, маркування і моніторингу для них посилені. До них належать пестициди, нафтопродукти, токсичні метали (ртуть, свинець), промислові відходи.

Також важливо враховувати фізичний стан вантажу (рідина, газ, тверда речовина), адже це впливає на спосіб його моніторингу та оцінки ризику при аваріях.

Класифікація ЕНВ — не лише формальна процедура. Вона є основою для:

- вибору типу транспортного засобу та пакування;
- погодження маршруту руху;
- призначення супроводу;
- визначення необхідних захисних заходів (вентиляція, охолодження, ізоляція);
- встановлення вимог до моніторингу (технології GPS/GNSS, датчики, сигнали тривоги).

1.2. Регламентуючі документи та нормативно-правова база

Процес перевезення екологічно небезпечних вантажів (ЕНВ) регламентується низкою міжнародних і національних нормативно-правових документів, які визначають правила, вимоги до транспортних засобів, умови пакування, маркування, маршрутизацію, а також заходи безпеки, включаючи обов'язковий контроль за переміщенням. Дотримання цих вимог є обов'язковим для усіх учасників перевезення – вантажовідправників, перевізників і вантажоодержувачів.

Міжнародні документи:

1. Європейська угода про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ADR) [1]

ADR – це основоположний міжнародний документ, прийнятий Європейською економічною комісією ООН, який діє з 1957 року. Україна є стороною ADR з 2000 року. [1]

Документ класифікує небезпечні вантажі, встановлює вимоги до:

- маркування, пакування, оформлення документації;
- типів та оснащення транспортних засобів;
- підготовки персоналу;
- погодження маршрутів;
- супутнього моніторингу під час перевезення вантажів підвищеного ризику (High Consequence Dangerous Goods). [1]

Згідно з розділом 1.10 ADR, для таких вантажів перевізники мають впроваджувати системи контролю в реальному часі, що дозволяють відстежувати місцезнаходження транспорту та повідомляти про несанкціоновані дії. [1]

2. Рекомендації ООН щодо перевезення небезпечних вантажів (UN Model Regulations)

Містять універсальні вимоги до класифікації, маркування та безпечного поводження з небезпечними речовинами для усіх видів транспорту

(наземного, морського, повітряного). Вони є основою для ADR, IMDG (морські перевезення), IATA DGR (авіація).

3. ISO 15638-19:2013 – Intelligent Transport Systems

Це стандарт, що регламентує вимоги до інтелектуальних систем моніторингу перевезень небезпечних вантажів. Визначає архітектуру, інтерфейси, функціональні можливості трекінгу, реагування на інциденти, захист інформації. [3]

4. Директива 2008/68/EC ЄС

Встановлює вимоги до перевезення небезпечних вантажів у межах країн Європейського Союзу, гармонізуючи національні норми з положеннями ADR. Її положення поступово імплементуються в українське законодавство в рамках Угоди про асоціацію з ЄС.

Національні нормативні документи України:

1. Закон України «Про перевезення небезпечних вантажів» (№1644-III від 06.04.2000 р.) [2]
2. Правила дорожнього перевезення небезпечних вантажів (затверджені наказом МВС №656 від 04.08.2018)

Документ деталізує порядок погодження маршруту, перелік обов'язкових засобів безпеки (вогнегасники, аптечки, засоби індивідуального захисту), правила руху транспортних засобів з НВ, порядок супроводу, заходи при ДТП. У правилах містяться положення щодо можливості використання GPS/ГЛОНАСС моніторингу з метою забезпечення дотримання маршруту та оперативного реагування.

3. Закон України «Про основні засади державного нагляду (контролю) у сфері господарської діяльності»

Забезпечує право екологічної та транспортної інспекції перевіряти діяльність перевізників, включаючи технічний контроль та наявність систем безпеки.

4. Національна транспортна стратегія України до 2030 року

Один з ключових документів стратегічного розвитку транспортного сектору, в якому наголошується на необхідності впровадження інтелектуальних

транспортних систем, цифровізації логістичних процесів, впровадження централізованого диспетчерського моніторингу небезпечних перевезень.

5. Технічні регламенти, стандарти та інструкції ДСНС України Регламентують порядок дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій за участю НВ, вимоги до аварійного реагування, та необхідність оперативного отримання інформації про місцезнаходження і стан транспортного засобу.

1.3. Аналіз причин і наслідків надзвичайних ситуацій при перевезеннях

Перевезення небезпечних вантажів автомобільним транспортом пов'язане з ризиками виникнення надзвичайних ситуацій, які можуть мати катастрофічні наслідки для людей, інфраструктури та навколишнього середовища. Аналіз статистичних даних та конкретних інцидентів дозволяє виокремити основні причини таких ситуацій та характерні наслідки.[5]

Основні причини надзвичайних ситуацій:

- Людський фактор.
- Незадовільний технічний стан транспортного засобу.
- Погодні умови та дорожні обставини.
- Відсутність або неефективність моніторингу руху.

Типові наслідки надзвичайних ситуацій при перевезенні ЕНВ:

- загибель або ураження людей;
- масове отруєння повітря або води;
- пожежі та вибухи;
- забруднення довкілля;
- евакуація населення з небезпечної зони;
- матеріальні збитки.

Приклади з України дивитися Таблиц А.1 додатка А.

1.4. Огляд сучасних систем моніторингу та їх технічні обмеження

Сучасні системи моніторингу транспортних засобів, що перевозять небезпечні вантажі, є ключовим елементом забезпечення безпеки перевезень.

Вони базуються на супутниковій навігації (GNSS), мобільному зв'язку (GSM/3G/4G/LTE), інтернет-технологіях і датчиках стану вантажу. На ринку України та світу представлено декілька типів рішень, які поділяються на комерційні платформи, державні системи (наприклад, ЕРА-ГЛОНАСС у РФ) та вбудовані системи великих логістичних компаній.

Основні компоненти сучасної системи моніторингу:

- Бортовий GPS/GNSS-трекер – пристрій, що визначає координати транспорту та надсилає дані через GSM або GPRS.
- Диспетчерська система – сервер або хмарна платформа, що обробляє та візуалізує дані.
- Інтерфейс користувача – карта з маршрутом, повідомлення, звіти, сповіщення.
- Додаткові датчики (температура/вологість, відкриття люків, тиск, рівень пального, датчики нахилу, удару, диму).
- Мобільний зв'язок або супутникові канали – використовуються для надсилання даних (іноді в комбінованому режимі).

Приклади рішень на ринку:

1. Wialon, Navixy, SkyRiver – платформи з підтримкою сотень моделей трекерів і розширеними функціями (геозони, аналітика, звіти).
2. GLONASSsoft (РФ) – спеціалізоване рішення для контролю вантажів з функцією SOS, сигналами тривоги, обмеженнями маршруту.
3. Verizon Connect (США) – хмарне рішення для вантажного автопарку з інтеграцією відеонагляду.
4. Власні системи перевізників – у великих компаній є свої сервери і трекери, які інтегруються з ERP.

Технічні обмеження сучасних систем:

- Залежність від покриття мобільного зв'язку.
- Неточність позиціонування в міських або складних умовах.
- Невисокий рівень інтеграції з державними службами.
- Відсутність сенсорів стану у базовій комплектації.

- Відсутність механізмів автоматичного аварійного реагування.
- Нестача захисту інформації.[7]

Висновки

Таким чином, чітка ідентифікація класу екологічної небезпеки вантажу є критично важливою для проєктування системи моніторингу. Нормативно-правова база у сфері перевезення небезпечних вантажів в Україні переважно базується на міжнародних стандартах, зокрема ADR та рекомендаціях ООН. Водночас, в українському законодавстві поки що відсутні обов'язкові вимоги до використання GNSS-систем моніторингу, але їх застосування рекомендується як краща практика безпеки. З урахуванням зростаючих ризиків та тенденцій цифровізації, впровадження таких систем стає не лише доцільним, а й необхідним елементом екологічно орієнтованої логістики. Переважна більшість надзвичайних ситуацій могла бути попереджена або пом'якшена, якби транспорт був обладнаний системами моніторингу з контролем маршруту, стану вантажу та сповіщенням диспетчера або служб порятунку в режимі реального часу. Саме ця потреба і є однією з ключових передумов для розробки ефективних телематичних систем контролю, які розглядаються в даній роботі. Попри наявність багатьох рішень на ринку, типові системи моніторингу не повністю відповідають завданням контролю екологічно небезпечних вантажів. Основні недоліки — це обмежений контроль параметрів вантажу, слабка інтеграція з органами реагування, обмежена автоматизація оповіщення та реагування. [6]

У зв'язку з цим виникає потреба в комплексному рішенні, яке забезпечує:

- контроль координат, стану вантажу, стану ТЗ;
- автоматичне реагування на НС;
- захищену передачу даних;
- можливість швидкого інформування служб порятунку.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ ТА ЗАСОБИ ВІДСТЕЖЕННЯ

2.1. Принципи роботи глобальних навігаційних супутникових систем

Глобальні навігаційні супутникові системи (GNSS – Global Navigation Satellite Systems) є основою для точного позиціонування об’єктів у будь-якій точці земної кулі. Вони відіграють ключову роль у моніторингу рухомих об’єктів, зокрема — екологічно небезпечних вантажів, забезпечуючи можливість відстеження координат транспорту в режимі реального часу.[4]

Основи функціонування GNSS. GNSS — це складний комплекс, який включає:

- орбітальне угруповання супутників;
- наземну інфраструктуру (системи контролю та корекції);
- абонентське обладнання.

Алгоритм роботи будь-якої супутникової навігаційної системи на рис. 2.1

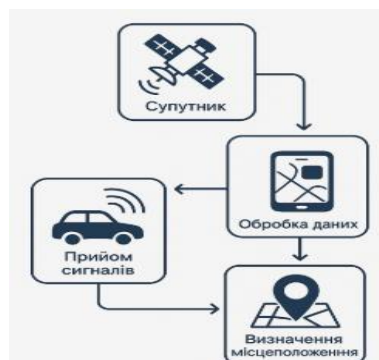


Рис.2.1 Алгоритм роботи глобальних навігаційних супутникових систем

Супутники постійно передають унікальний навігаційний сигнал, який містить:

- точний час передачі (на основі атомного годинника);
- ефемериди — координати орбіти супутника;
- службову інформацію (стан системи, ідентифікатор супутника тощо).

Приймач на землі, отримуючи ці сигнали, визначає:

- Час затримки сигналу від кожного супутника.
- Псевдовідстань — множення затримки на швидкість світла.
- Координати свого положення — як точку перетину сфер радіусом «псевдовідстань» до кожного супутника.

Щоб розв'язати систему з трьома невідомими (X , Y , Z — координати) та однією похибкою годинника приймача (Δt), потрібно щонайменше 4 супутники одночасно в полі зору.

Математично, розрахунок координат відбувається за системою рівнянь показаною на рис.2.2:

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 + (z_i - Z)^2} + c \cdot \Delta t$$

Рис. 2.2 Система рівнянь за якою відбувається розрахунок координат

де:

ρ_i — відстань до i -того супутника;

(x_i, y_i, z_i) — координати i -того супутника (відомі);

(X, Y, Z) — координати приймача (шукаємо);

c — швидкість світла;

Δt — похибка синхронізації годинника приймача.

Рішення такої системи дозволяє приймачу визначити не лише координати, а й швидкість переміщення, висоту, напрямок руху та інші параметри.

Типи глобальних навігаційних систем

У світі функціонує декілька незалежних GNSS (дивитися таблицю А.2 додатка А).

Завдяки використанню мультисистемних приймачів, GNSS-сигнали можуть комбінуватися (наприклад, GPS+GLONASS+Galileo), що підвищує точність, особливо в умовах складного рельєфу чи забудови (міста, гірські райони).

Джерела похибок позиціонування

Попри високу точність, на результати позиціонування впливають:

- Іоносферні та тропосферні затримки сигналу (особливо на низьких висотах);
- Мультипас – відбиття сигналу від будівель або інших об'єктів;
- Помилки годинника приймача – компенсуються завдяки використанню сигналів кількох супутників;
- Неточності ефемерид (координат супутника);
- Геометричне розміщення супутників – коефіцієнт DOP (Dilution of Precision).

Для покращення точності застосовуються такі методи:

- SBAS (EGNOS, WAAS, SDCM) – супутникова диференціальна корекція (покращення точності до 1–2 м);
- RTK (Real-Time Kinematic) – розрахунок координат з сантиметровою точністю з використанням базової станції (дорого і застосовується переважно в геодезії).

GNSS в моніторингу небезпечних вантажів

У контексті перевезення небезпечних вантажів GNSS забезпечує:

- реальний контроль місцезнаходження транспорту;
- фіксацію відхилення від маршруту;
- визначення швидкості, напрямку руху, зупинок;
- сигналізацію при втраті зв'язку, аварії, вході в заборонену зону.

GNSS-приймачі встановлюються в бортовий трекер, який є частиною системи моніторингу. Дані передаються до диспетчерського центру через GSM/3G або супутниковий зв'язок, де виводяться на карту в реальному часі.

2.2. Характеристики GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou

Станом на 2025 рік на глобальному рівні функціонують чотири основні супутникові навігаційні системи: GPS (США), GLONASS (Росія), Galileo (ЄС) та BeiDou (Китай). Усі вони забезпечують позиціонування у глобальному

масштабі й можуть використовуватись для цілей моніторингу транспорту, включаючи перевезення екологічно небезпечних вантажів.

Для підвищення надійності та точності позиціонування сучасні трекери часто працюють у мультисистемному режимі (multi-GNSS), одночасно використовуючи сигнали з декількох GNSS.

Короткий опис кожної системи

1. GPS (Global Positioning System)

Найстаріша та найпоширеніша GNSS. Контролюється Міністерством оборони США, однак має повністю відкритий цивільний канал.

Особливості:

- Стабільна точність (3–5 м);
- Найширше підтримується трекерами та мобільними пристроями;
- Активно модернізується (введення L5 для покращення точності та стійкості).

2. GLONASS

Російська альтернатива GPS. Має іншу структуру орбіт, що дозволяє краще працювати на північних широтах.

Особливості:

- Часто використовується у парі з GPS;
- Дещо нижча точність у цивільному режимі через відсутність відкритих високоточних сервісів.

3. Galileo

Європейська система, що забезпечує високу точність навіть у відкритому (Open Service) режимі. [9]

Особливості:

- Вища точність позиціонування у порівнянні з GPS без диференційної корекції;
- Має платні сервіси (Commercial Service), що надають ще більшу точність (до 20 см). [9]

4. BeiDou

Китайська GNSS, яка швидко розвинулась у повноцінну глобальну систему.

Особливості:

- Має унікальну структуру орбіт (включає геостаціонарні супутники);
- Підтримує двосторонній зв'язок (надсилання коротких повідомлень).[10]

Точність визначення положення

Точність глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) залежить від кількох основних факторів:

- геометрії розміщення супутників;
- наявності систем диференціальної корекції, таких як SBAS, або високоточних методів RTK/PPP;
- технічних характеристик і якості самого GNSS-приймача;
- кількості одночасно використовуваних систем (мультисистемність: чим більше супутників – тим вища точність).[10]

З аналізом точностей різних глобальних навігаційних систем за різних умов дивитися таблицю А.3 додатка А.

У випадку використання технологій RTK або PPP, точність всіх систем може досягати рівня менше 1 см (GPS, Galileo), або до 1–2 см для BeiDou і ГЛОНАСС.

Порівняння GNSS у транспортному моніторингу

Якщо порівнювати системи супутникового позиціонування у контексті моніторингу транспортних засобів, можна виділити такі ключові аспекти:

- Найкраще покриття в Україні забезпечують системи GPS, Galileo та BeiDou.
- Найвища сумісність з устаткуванням у GPS та GLONASS, адже більшість комерційних трекерів підтримують саме ці системи.
- Найкращу точність без додаткової корекції демонструє система Galileo.
- Найбільш стійкими до завад і мультипасу є Galileo та GPS, особливо в міських умовах.
- Найшвидше перше визначення координат (TTFF – Time to First Fix) зазвичай забезпечують GPS і BeiDou.

- Безкоштовні сервіси (відкриті сигнали) доступні у GPS і Galileo.
- З точки зору надійності та резервування систем (redundancy), оптимальним рішенням є використання мультісистемного GNSS-приймача, що поєднує GPS, GLONASS, Galileo і BeiDou.

2.3. Бортові пристрої: архітектура та типи сенсорів

Для реалізації ефективної системи моніторингу екологічно небезпечних вантажів недостатньо лише знати місцезнаходження транспортного засобу. Не менш важливо — отримувати в реальному часі інформацію про стан вантажу, поведінку транспортного засобу, наявність загроз або відхилень від норми. Таку функціональність забезпечують бортові пристрої (трекери) у поєднанні з сенсорами (датчиками) різного типу. З алгоритмом роботи яких можна ознайомитися детально на рис. 2.3



Рис.2.3 Алгоритм роботи бортового пристрою

Архітектура бортового пристрою (трекера)

Сучасний GNSS-трекер являє собою інтегрований електронний модуль, що виконує функції позиціонування, обробки та передавання даних. Типова архітектура такого пристрою складається з таких компонентів:

1. GNSS-приймач

Приймає сигнали супутникових систем (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) та визначає координати, швидкість, напрямок руху, висоту.

Найефективнішими є двочастотні мультісистемні приймачі з підтримкою L1/L5 або E1/E5a.

2. GSM/3G/4G модем

Забезпечує передавання даних на сервер у реальному часі через мобільну мережу. Можуть використовуватись також Wi-Fi або супутникові канали як резервні.

3. Мікроконтролер / процесор

Відповідає за логіку роботи трекера, обробку даних, формування телеметричних пакетів, запис у пам'ять, взаємодію з сенсорами.

4. Інтерфейси підключення

Порти для з'єднання з периферією — аналогові входи, цифрові входи/виходи, UART, RS-485, CAN-шина, 1-Wire. Через них підключаються зовнішні сенсори, датчики, кнопки тощо.

5. Пам'ять (EEPROM / Flash)

Для зберігання телеметричних даних у разі втрати зв'язку — від кількох МБ до кількох ГБ.

6. Резервне живлення (акумулятор)

Забезпечує автономну роботу пристрою у разі відключення живлення від транспортного засобу. Важливо при аваріях або саботажі.

7. Корпус з антивандальним захистом

Пристрій має бути пиловологозахищеним (клас IP65 і вище) та мати стійкість до вібрацій і ударів. У середовищах з вибухонебезпечними речовинами — відповідати АTEX/EX.

Типи сенсорів, що застосовуються

Підключення сенсорів до бортового пристрою дозволяє розширити функціональність системи моніторингу. У перевезеннях екологічно небезпечних вантажів найбільш доцільними є такі типи датчиків:

1. Температурні датчики

Контролюють температуру всередині цистерни або контейнера.

Актуально для речовин, що втрачають стабільність при перегріванні.

Типи: терморезистори (DS18B20), термопари, цифрові промислові датчики.

2. Датчики тиску

Встановлюються на люки або вентиля цистерн з газами або рідинами під тиском.

Сигналізують про перевищення допустимого рівня, що може свідчити про загрозу вибуху.

3. Датчики відкривання/закривання люків

Контролюють доступ до небезпечного вантажу.

Спрацьовують при спробі несанкціонованого втручання.

Можуть бути магнітними, індуктивними або оптичними.

4. Датчики удару / перевантаження (акселерометри)

Фіксують різкі зміни прискорення, перевертання, зіткнення.

Автоматично генерують сигнал тривоги при ДТП або аварії.

5. Датчики витоку (газу, хімічних парів)

Виявляють наявність небезпечних речовин у повітрі.

Дозволяють виявити порушення герметичності до того, як це стане критичним.

6. Датчики рівня пального або рідини

Контролюють рівень вантажу в баку або резервуарі.

Дозволяють фіксувати злив або втрату речовини в дорозі.

7. Кнопка SOS (тривожна кнопка)

Встановлюється в кабіні водія.

При натисканні вручну передає сигнал тривоги на сервер.

8. RFID/NFC ідентифікатори

Використовуються для авторизації водіїв або причепів.

Забезпечують контроль за тим, хто виконує перевезення.

9. Камери відеоспостереження

Підключаються до окремого DVR або безпосередньо до системи.

Можуть передавати відео або зберігати його для аналізу інцидентів.

Функції обробки і передавання даних

Бортовий пристрій збирає інформацію з GNSS-приймача та підключених сенсорів, формує телеметричні пакети, які надсилаються через GSM/3G/4G або супутниковий канал до центрального сервера. Формат пакетів включає:

- координати (широта, довгота, висота);
- швидкість, напрямок;
- значення з датчиків;
- статус входів/виходів;
- мітку часу;
- ID пристрою.

Передавання може бути:

- періодичним (наприклад, кожні 30 секунд);
- подійним (при натисканні кнопки, відкриванні люка, ударі тощо);
- комбінованим.

У разі втрати зв'язку дані зберігаються у пам'яті та передаються після відновлення зв'язку. Більшість сучасних трекерів підтримують шифрування, віддалене налаштування, вбудовані скрипти для автоматизації реакцій.

2.4. Канали зв'язку: GSM, GPRS, LTE, супутниковий зв'язок

Передавання даних від бортового пристрою (трекера) до серверної частини системи моніторингу є критично важливим компонентом усієї архітектури. Без якісного, безперервного та захищеного зв'язку неможливий оперативний контроль за місцезнаходженням і станом вантажу. У перевезеннях екологічно небезпечних вантажів вимоги до надійності каналів зв'язку особливо високі, оскільки в разі аварійної ситуації необхідно миттєво передати сигнал тривоги, координати, стан сенсорів та іншу телеметричну інформацію.

Сучасні системи моніторингу використовують декілька типів каналів зв'язку, які можуть працювати як основні або резервні. Основними є мобільні мережі (GSM/3G/4G), а супутниковий зв'язок застосовується в разі відсутності покриття.

1. GSM (Global System for Mobile Communications)

GSM — це перше покоління цифрового мобільного зв'язку, яке до цього часу зберігає широке покриття, особливо в сільських і віддалених районах.

Трекери, оснащені GSM-модемом, можуть надсилати:

SMS-повідомлення (текстові пакети з координатами);

GPRS-пакети – в режимі передачі даних через IP (розглядається нижче).

Переваги: стабільність покриття (особливо в Україні); низьке енергоспоживання; можливість використання як резервного каналу.

Недоліки: низька пропускна здатність; можливі затримки в передачі SMS.

2. GPRS (General Packet Radio Service)

GPRS — технологія передачі даних поверх GSM, що дозволяє працювати у режимі постійного з'єднання з Інтернетом через IP-протокол. Це один з найпоширеніших способів передавання телеметрії з трекерів.

Характеристики: швидкість до 40–100 кбіт/с; режим «always online» (підключення завжди активне); підтримується більшістю бюджетних трекерів.

Переваги: дешевизна трафіку; достатньо для передачі координат і базових параметрів; підтримка з боку мобільних операторів в усіх регіонах України.

Недоліки: не підходить для передачі мультимедіа (наприклад, відео з камер); чутливість до перевантаження мережі; менша стабільність у порівнянні з LTE.

3. LTE (Long-Term Evolution, 4G)

LTE — технологія мобільного зв'язку четвертого покоління, що забезпечує високу швидкість і надійність передачі даних. Трекери з LTE-модулем можуть передавати: великі обсяги телеметрії; потокове відео (наприклад, з бортових камер); багатоканальні дані з сенсорів у реальному часі.

Переваги: швидкість: до 10–50 Мбіт/с (на практиці); низька затримка; можливість роботи з відео- та аудіоінформацією; захищеність каналів (підтримка VPN, шифрування).

Недоліки: менше покриття в сільській місцевості; вища енергозатратність; дорожче обладнання та тарифні плани.

4. Супутниковий зв'язок

У ситуаціях, коли мобільні мережі недоступні (наприклад, у гірських районах, пустелях, при міжнародних транзитах через малозаселені зони), єдиним засобом передачі даних може бути супутниковий канал.

Найпоширеніші системи:

Iridium (глобальне покриття, у тому числі полярні регіони);

Globalstar;

Inmarsat.

Супутникові модулі дозволяють: надсилати текстові повідомлення з координатами; іноді – передавати дані з сенсорів;

забезпечити базовий контроль у відсутності GSM.

Переваги: незалежність від наземної інфраструктури; справжнє глобальне покриття.

Недоліки: висока вартість обладнання; обмежена пропускна здатність; додаткові витрати на трафік.

Вибір каналу зв'язку в моніторингу НВ

Для перевезень екологічно небезпечних вантажів доцільно використовувати гібридну схему зв'язку продемонстровану на рис. 2.4 , яка поєднує основний канал — LTE або GPRS, резервний канал — SMS або супутниковий модем, автоматичне перемикавання при втраті зв'язку, накопичення даних у пам'яті трекера з подальшою передачею.



Рис.2.4 Приклад гібридної схеми зв'язку

У стандартних умовах в Україні більшість моніторингових систем використовує GPRS або LTE, однак при перевезенні вантажів підвищеної

небезпеки (HCDG) рекомендується встановлювати тривожну SMS-функцію або супутникову опцію.

2.5. Інтеграція з диспетчерськими платформам

Ефективна система моніторингу перевезень екологічно небезпечних вантажів передбачає не лише збір даних бортовими пристроями, а й їх обробку, візуалізацію та аналіз у центральному диспетчерському пункті. Саме диспетчерська платформа є ключовою ланкою для оперативного прийняття рішень, взаємодії з водієм, реєстрації інцидентів та оповіщення служб реагування.

Призначення диспетчерської платформи

Основне призначення платформи — це:

- візуальний контроль за переміщенням транспортних засобів у реальному часі;
- моніторинг стану вантажу (температура, тиск, витік, відкриття люків тощо);
- отримання подій і тривожних сигналів (відкриття дверей, аварія, перевищення параметрів);
- аналіз маршрутів, швидкості, часу зупинок;
- формування звітів (логістичних, екологічних, безпекових);
- інтеграція з зовнішніми сервісами — поліція, ДСНС, страхові компанії.

Структура типової диспетчерської системи

Диспетчерська система зазвичай включає такі модулі:

1. Сервер телеметрії

Приймає дані від бортових пристроїв, зберігає їх у базі даних, обробляє події.

2. База даних

Містить історичні записи про координати, повідомлення, дії, сенсорні значення.

3. Веб-інтерфейс оператора/диспетчера

Доступ через браузер з картографічною основою (Google Maps, OpenStreetMap, Leaflet тощо). Дозволяє: бачити положення транспорту; отримувати сповіщення; змінювати налаштування моніторингу; фільтрувати інформацію за об'єктами, подіями, маршрутами.

4. Модуль оповіщення

Відправляє повідомлення при виникненні критичних подій через: email; SMS; push-нотифікації в додатку; дзвінки через VoIP.

5. API / інтеграційний шлюз. Забезпечує взаємодію з:

- CRM / ERP системами підприємства;
- платформами митного або державного моніторингу;
- аналітичними системами управління ризиками.

Приклади комерційних рішень

1. Wialon (Gurtam)

Один із найбільш популярних телематичних сервісів з підтримкою понад 2500 моделей трекерів. Має модулі екологічного моніторингу, управління маршрутами, тривожного реагування. Працює в хмарі або на власному сервері.

2. Navixy

Хмарна GPS-платформа з функціями IoT-моніторингу, SMS-команд, відеонагляду, інтеграцією з мобільними додатками. Має зручний інтерфейс, підтримку геозон та сценаріїв.

3. Traccar

Open Source-рішення для підприємств. Може бути встановлено локально. Має API, підтримку сповіщень, інтеграцію з базами даних, хорошу масштабованість.

4. AVL-системи великих логістичних компаній

Наприклад, у DHL, Maersk, DPD використовуються власні платформи з прив'язкою до облікових систем, митниці, сервісів клієнтів. Вони включають відео, архіви поїздок, інтеграцію з обліком небезпечних вантажів.

Функціональність для перевезень екологічно небезпечних вантажів
Диспетчерські платформи, адаптовані до контролю ЕНВ, повинні підтримувати:

- Налаштування маршрутів з обмеженнями:

Зони, через які проїзд заборонений або небажаний (школи, густонаселені райони, природоохоронні території).

- Геозони та контроль входу/виходу:

Система повідомляє, якщо вантажівка залишила безпечний маршрут або в'їхала до забороненої зони.

- Пороги тривоги:

Температура, тиск, вібрації, час зупинки — все це має бути під контролем із реакцією на відхилення.

- Інтеграція з екстреними службами:

Автоматичне формування повідомлення з координатами, типом вантажу, швидкістю, напрямком — для передавання до ДСНС або поліції.

- Інструменти розслідування:

Відтворення маршруту, перегляд відео або фотоматеріалів (при наявності), аналіз хронології дій.

Технічні вимоги до інтеграції

Для повноцінної інтеграції з бортовими пристроями платформа повинна: підтримувати відповідні протоколи передачі (Wialon, Teltonika, Queclink, EGTS тощо);

мати механізми шифрування даних (TLS, VPN);

забезпечувати авторизацію і розмежування прав доступу;

дозволяти кастомізацію алертів, звітів, геозон;

підтримувати мобільні додатки або web-responsive інтерфейс.

Висновки

Глобальні навігаційні супутникові системи є базовим інструментом для позиціонування транспортних засобів, що перевозять екологічно небезпечні

вантажі. Висока точність, глобальне покриття та доступність дозволяють впроваджувати надійні системи моніторингу, які суттєво знижують ризики порушень безпеки при транспортуванні таких вантажів. Надалі, у розділі 2.2 буде детально розглянуто порівняння основних GNSS-систем з точки зору точності, доступності та доцільності їх використання в транспортній логістиці.

Для побудови системи моніторингу перевезень екологічно небезпечних вантажів доцільно використовувати мультісистемні GNSS-приймачі (GPS + Galileo + BeiDou + GLONASS), які забезпечують:

- високу точність незалежно від умов (місто, траса, тунель);
- резервування в разі тимчасової відсутності сигналів окремої системи;
- гнучкість щодо постачальників обладнання.

При проектуванні трекерів для перевезення НВ рекомендовано орієнтуватися на двочастотні GNSS-приймачі, які підтримують одночасну роботу з L1/L5 або E1/E5a сигналами — це суттєво знижує похибки та покращує стійкість у складних умовах. У подальших підпунктах буде розглянуто склад бортових трекерів, датчиків та особливості передачі даних до диспетчерського центру. Бортові пристрої у системах моніторингу перевезень екологічно небезпечних вантажів повинні забезпечувати не лише точне визначення координат, але й повноцінний контроль за станом вантажу та умовами перевезення. Завдяки інтеграції з різноманітними сенсорами, такі трекери трансформуються у інтелектуальні телематичні модулі, здатні виявляти загрози та своєчасно сигналізувати про них диспетчеру чи екстреним службам. Впровадження таких систем дозволяє значно знизити ймовірність катастрофічних наслідків аварій з небезпечними вантажами.[12]

Канали зв'язку є критичним елементом у системі моніторингу екологічно небезпечних вантажів. Від їх надійності залежить можливість оперативного виявлення надзвичайної ситуації, інформування диспетчерів та служб реагування. Рекомендується використовувати багатоканальну архітектуру передачі даних з пріоритетом на LTE та обов'язковим резервом

через SMS або супутниковий модем у разі зникнення основного зв'язку. Це дозволить забезпечити неперервний контроль, навіть за екстремальних умов.

Інтеграція з диспетчерською платформою є обов'язковою складовою системи моніторингу небезпечних вантажів. Вона перетворює окремі дані від трекера та сенсорів на аналітичну та оперативну інформацію, що дозволяє приймати рішення у режимі реального часу. Вибір платформи має ґрунтуватися на її функціональності, стабільності, підтримці стандартів безпеки та можливості інтеграції з зовнішніми системами. У подальших розділах буде розглянуто побудову архітектури системи моніторингу з урахуванням зазначених вимог.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ

3.1. Структура автоматизованої системи моніторингу

Автоматизована система моніторингу небезпечних вантажів спроектована як комплекс апаратних і програмних компонентів, що працюють спільно для відстеження перевезень у режимі реального часу та забезпечення їхньої безпеки. Архітектура системи має ієрархічну структуру та базується на технологіях Інтернету речей (IoT), включаючи бортові пристрої, мережі датчиків, засоби зв'язку та центр моніторингу

Основні компоненти цієї системи такі:

1. Бортовий пристрій (On-Board Unit, OBU) – електронний модуль, встановлений на транспортному засобі, що перевозить небезпечний вантаж. OBU підключається до датчиків і збирає інформацію про стан вантажу та самого транспортного засобу (температура, тиск, вологість, положення тощо) у реальному часі. Цей пристрій також визначає координати через GPS-приймач та готує дані для передачі в центр моніторингу. Бортовий модуль є ядром системи та забезпечує безперервний контроль параметрів перевезення.
2. Мережа датчиків – сукупність давачів, розміщених у кузові або контейнері з вантажем і на самому транспортному засобі, для моніторингу ключових показників безпеки. Залежно від класу небезпечного вантажу, датчики можуть вимірювати температуру, тиск, концентрацію газів (наприклад, парів палив, токсичних газів), рівень ударних навантажень або нахилу тощо. Датчики під'єднані до бортового пристрою безпосередньо проводами або через локальну бездротову мережу (наприклад, за технологією ZigBee). Це дозволяє OBU опитувати датчики та отримувати дані про стан вантажу практично без затримок.

3. Підсистема зв'язку – канал передачі даних від бортового пристрою до центру моніторингу. Для забезпечення всепокриття використовується мобільний зв'язок GSM/GPRS (2G/3G/4G) або супутниковий канал там, де стільниковий зв'язок недоступний. OBU пакує телеметричні дані (координати GPS, показники датчиків, службову інформацію) і через бездротовий модем надсилає їх на сервер моніторингу в режимі, близькому до реального часу. Передача даних відбувається з використанням стільникових мереж загального користування (з можливим шифруванням для безпеки), що дозволяє отримувати інформацію з будь-якої точки маршруту перевезення.
4. Центр моніторингу – центральна серверна частина системи, яка приймає, зберігає та обробляє дані, що надходять від усіх бортових пристроїв. Центр моніторингу включає сервер додатків, базу даних та інтерфейс користувача. Він відповідає за збір телеметрії, відображення інформації диспетчерам і генерацію сповіщень у разі небезпечних ситуацій. Отримані від транспортних засобів дані централізовано зберігаються в базі даних для подальшого аналізу та звітності. Сервер також може передавати керуючі команди на транспортний засіб (наприклад, зміна маршруту або інструкції водієві) за наявності двостороннього зв'язку. Таким чином, центр моніторингу є мозком системи, що здійснює координацію всіх компонентів.
5. Інтеграція з аварійними службами – важливий компонент реальної системи, що забезпечує автоматизоване сповіщення екстрених служб у разі інцидентів. Система моніторингу підключена онлайн до служб реагування (наприклад, МНС, пожежних, поліції), і при виникненні аварійної ситуації (ДТП, витік небезпечної речовини тощо) інформація негайно передається відповідним органам. Така інтеграція дозволяє значно скоротити час реагування на надзвичайну подію: дані про місцезнаходження транспортного засобу, характер вантажу та характер

аварії автоматично надходять диспетчерам та рятувальникам, що підвищує рівень безпеки перевезень.

Усі перелічені компоненти взаємодіють між собою, утворюючи єдину систему моніторингу. За допомогою рис.3.1 умовно можна уявити загальну схему: датчики на автомобілі підключені до бортового модуля; OBU через GSM-мережу передає дані на серверний центр; диспетчери відслідковують рух на карті та отримують сповіщення про стан вантажу.



Рис.3.1 Схема системи моніторингу

Така архітектура є модульною та масштабованою, що відповідає сучасним вимогам до систем моніторингу на транспорті (відповідно до принципів побудови IoT-систем).

3.2. Алгоритм функціонування системи та взаємодія компонентів

Алгоритм роботи розробленої системи забезпечує циклічний процес збору даних, їх передачі, аналізу та реагування в режимі реального часу. Блок-схема алгоритму, умовно представлено послідовність основних етапів функціонування системи. Нижче детально розглянуто ці етапи:

1. Підготовка та ідентифікація вантажу перед рейсом. Перед початком перевезення небезпечного вантажу проводиться реєстрація рейсу в системі. В базу даних центра моніторингу вносяться відомості про транспортний засіб, водія, маршрут та характеристики вантажу (клас небезпеки, кількість, відправник/отримувач тощо). Для однозначної ідентифікації вантажу може використовуватися технологія RFID: на

кожен контейнер або цистерну з небезпечною речовиною кріпиться RFID-мітка, що містить інформацію про вантаж (найменування, клас, маса, відправник тощо). Під час завантаження уповноважений персонал зчитує ці мітки портативним зчитувачем, і система звіряє фактичний вантаж з планом. Після цього рейс активується – бортовий пристрій переходить у режим моніторингу, і дані починають надходити до центру.

2. Безперервний збір даних на транспортному засобі. У процесі руху OBU постійно збирає телеметричну інформацію. Вбудований GPS-модуль визначає поточні координати транспортного засобу з високою періодичністю (як правило, раз на секунду), що дозволяє точно відстежувати маршрут і швидкість. Одночасно через мережу датчиків зчитуються показники стану вантажу та умов перевезення – температура в контейнері, тиск (наприклад, в цистерні), концентрація небезпечних парів у повітрі, стан дверей/клапанів, рівень вібрації чи кута нахилу тощо. Частота опитування датчиків налаштовується виходячи з вимог до контролю (як правило, 1–2 рази за секунду, що узгоджується з частотою оновлення GPS). Такий високочастотний моніторинг гарантує, що жодна критична зміна параметрів не залишиться непоміченою. Зібрані за цей короткий інтервал дані кешуються у пам'яті бортового пристрою для подальшої пакетної передачі.
3. Передача даних до центру моніторингу. Бортовий пристрій через встановлені інтервали часу надсилає зведені пакети даних на сервер. Інтервал передачі обирається таким, щоб забезпечити оперативність оновлення інформації і в той же час не перевантажувати мережу надмірною частотою повідомлень. На основі досліджень було визначено, що оптимальним є інтервал порядку 10–15 секунд. Зокрема, розрахунок із урахуванням середнього часу прибуття рятувальних служб (~10 хвилин) показує, що передача даних кожні

12 секунд збільшує час реагування всього на ~ 6 секунд, що є прийнятним допущенням. Таким чином, в даній системі прийнято період відправлення телеметрії ≈ 12 с. Кожен пакет даних містить мітку часу, поточні GPS-координати, швидкість руху, а також значення всіх контрольованих датчиків (у інженерних одиницях або безрозмірних показниках стану). Інформація передається каналом GSM/GPRS з використанням IP-протоколу – наприклад, у форматі JSON через HTTPS-запит на сервер API або шляхом публікації повідомлень на брокер у відповідній темі. При успішній доставці пакету центр моніторингу відправляє підтвердження назад до OBU. Якщо зв'язок тимчасово втрачено (зона без покриття), OBU автономно буферизує дані і здійснює повторну спробу передачі, щоб уникнути втрати важливої інформації.

4. Приймання та аналіз інформації в центрі моніторингу. Серверний застосунок, що працює у центрі моніторингу, отримує телеметричні повідомлення від транспортних засобів через мережу. Отримані дані негайно записуються в базу даних для збереження історії і паралельно передаються в модуль аналізу. Алгоритми програмного ядра перевіряють поточні параметри на предмет відхилень від допустимих значень. Наприклад, порівнюється фактичний маршрут з запланованим: якщо транспортний засіб відхилився від маршруту або зупинився у недозволеному місці – система фіксує подію відхилення. Перевіряються сенсорні показники: чи не перевищує температура встановлений поріг, чи нема витоку (за даними газового датчика), чи не спрацював аварійний датчик перевертання тощо. У разі, якщо всі показники в нормі, дані просто логуються та відображаються операторам. При виявленні ж аномальних ситуацій запускається процедура оповіщення (див. далі). Центр моніторингу таким чином безперервно відслідковує статус вантажу та транспортного засобу за всіма напрямками. Оператор на екрані бачить оновлені положення

авто на карті та індикатори стану в режимі online. Всі отримані телеметричні дані архівуються – система зберігає їх у базі даних і може використовувати для статистичних звітів або ретроспективного аналізу. Якщо платформа підтримує двосторонній зв'язок, центр при необхідності надсилає команду на OBU. Наприклад, диспетчер може віддалено передати водієві текстове повідомлення або прокласти альтернативний маршрут у навігаторі транспортного засобу (в разі перекриття дороги, затору чи іншої позаштатної ситуації). Команди до борту також відправляються через захищений канал зв'язку і відображаються водієві (на екрані бортового терміналу або через звуковий сигнал).

5. Оповіщення та реагування при нештатних ситуаціях. Якщо за результатами аналізу даних система виявила небезпечну ситуацію, негайно задіюється модуль оповіщення. Існує декілька рівнів реагування залежно від критичності події. Для попереджувальних (несуттєвих) відхилень – генерується повідомлення-попередження на робочому місці оператора (диспетчера) та, можливо, повідомлення водію. Для серйозніших інцидентів – наприклад, критичне перевищення температури вантажу, потрапляння транспортного засобу в ДТП, різкий нахил/перекидання або спрацювання аварійного датчика – ініціюється аварійна тривога. Бортовий пристрій може автоматично надсилати сигнал тривоги поза основним інтервалом передачі (негайно при спрацюванні датчика удару чи при розмиканні аварійного вимикача водієм). Центр моніторингу отримує цей сигнал та позначає відповідний об'єкт на інтерфейсі як аварійний (наприклад, блиманням на карті, сиреною тощо). Одночасно система реалізує план екстреної допомоги: за наперед заданим сценарієм сповіщаються профільні служби та відповідальні особи. Зокрема, інформація про інцидент (координати, тип вантажу, характер аварії) автоматично передається до моніторингово-рятувального центру або

черговим службам компанії-перевізника. Відповідальні особи (наприклад, менеджер з безпеки перевезень) отримують SMS-повідомлення або push-сповіщення на мобільний додаток з деталями події. Якщо ситуація потребує залучення державних екстрених служб (пожежних, медичних, поліції), диспетчер підтверджує тривогу і система надсилає сигнал SOS з даними через встановлені канали (може бути автоматичний виклик через API сервісів 112, передача факсу/e-mail тощо). Таким чином, у найкоротший час запускається процес ліквідації наслідків – у відповідності до заздалегідь розробленого регламенту реагування.

6. Завершення та звітування після рейсу. Після успішного прибуття транспорту до пункту призначення перевезення закривається. Оператор відзначає в системі завершення рейсу, і бортовий пристрій переводиться в режим очікування нового завдання. Всі дані, накопичені за час рейсу (маршрут, швидкісний режим, історія датчиків, журнали подій), вже збережені в базі даних. Система може автоматично згенерувати підсумковий звіт: підтвердити факт доставки вантажу, зафіксувати загальний час у дорозі, дотримання графіка, а також список будь-яких інцидентів чи відхилень, що сталися під час транспортування. Ці звіти використовуються для аналізу ефективності і безпеки перевезень, а також для вдосконалення подальших маршрутів. Архівні дані можуть бути передані до інших інформаційних систем (складського обліку, систем управління логістикою) за потреби через спеціальні інтерфейси або API. Таким чином, алгоритм функціонування системи охоплює весь цикл перевезення зображений на рис.3.2 – від підготовки вантажу і старту рейсу до доставки і аналізу результатів – забезпечуючи прозорість і контроль на кожному етапі.

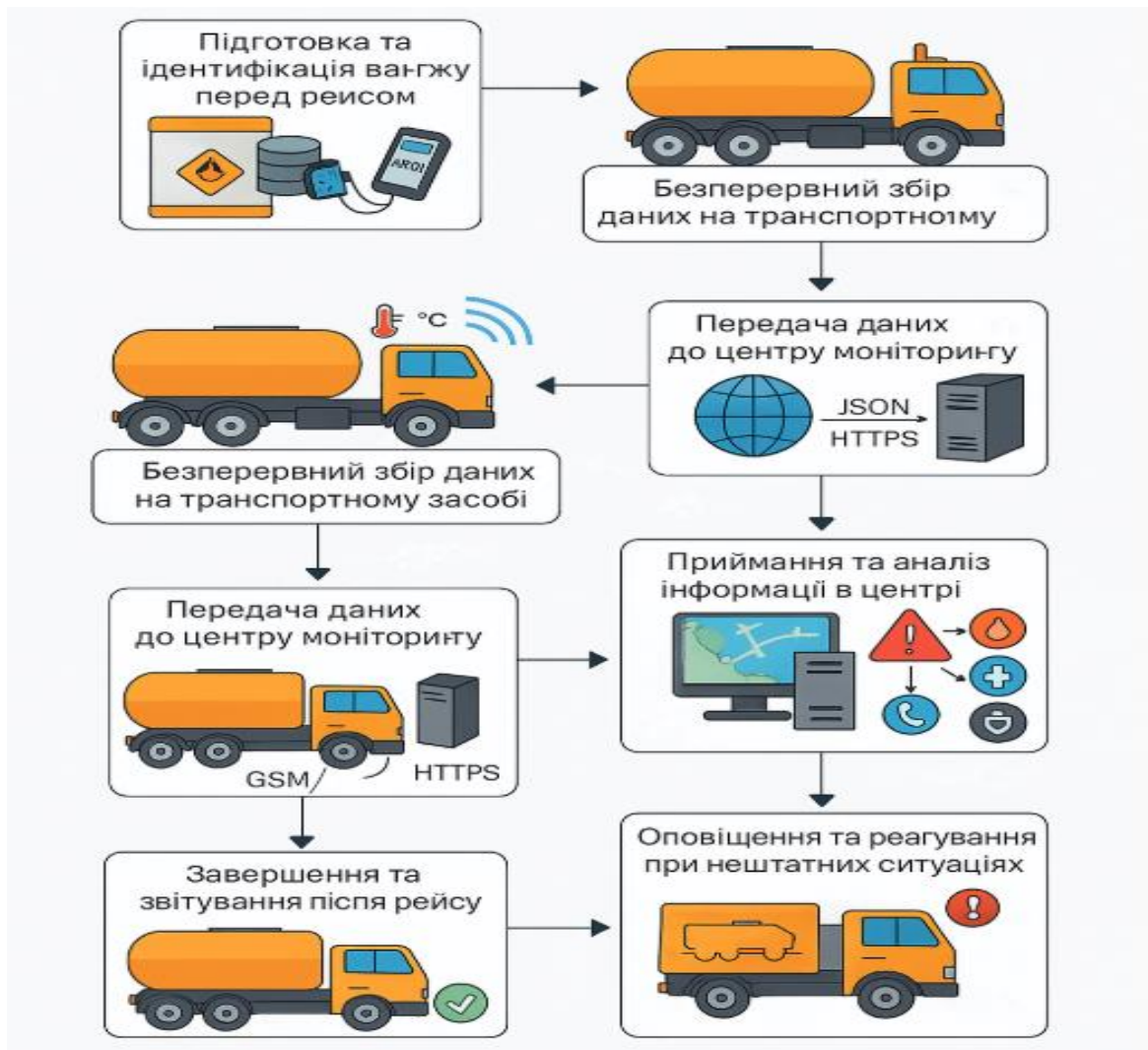


Рис.3.2 Алгоритм функціонування системи та взаємодія компонентів

3.3. Програмна логіка, база даних та обмін повідомленнями

Програмна реалізація бортового модуля (OBU). Бортовий пристрій побудований на основі мікроконтролера або вбудованого комп'ютера (типово для таких систем використовуються однокристальні мікроконтролери або процесори ARM-архітектури). Програмне забезпечення OBU виконує задачі збору даних з датчиків, обробки GPS-координат та комунікації з сервером. Фактично, алгоритм роботи прошивки OBU можна представити як нескінченний цикл: зчитування показників з підключених давачів (через інтерфейси UART, I²C, 1-Wire або аналогові входи контролера), формування структурованого повідомлення та відправлення цього повідомлення через модуль зв'язку. Для реалізації стільникового зв'язку OBU містить GSM/GPRS-

модем; мікроконтролер взаємодіє з ним через AT-команди або відповідний драйвер, ініціюючи підключення до мережі та передачу даних. Повідомлення можуть надсилатися у вигляді HTTP-запиту до веб-сервісу (наприклад, REST API сервера) або публікуватися в брокер обміну повідомленнями (MQTT) – обраний підхід визначає протокол обміну. У даному проекті для спрощення реалізації було використано варіант із прямою відправкою HTTP(S)-запитів на серверний API: мікроконтролер формує JSON-об'єкт, що включає ідентифікатор пристрою, мітку часу, координати та показники датчиків, і виконує POST-запит на фіксовану URL-адресу. Сервер у відповідь надсилає код успіху або помилки, який обробляється прошивкою. У разі відсутності підтвердження від сервера (наприклад, збій зв'язку) – OBU повторить спробу через певний інтервал або збереже дані для передачі при відновленні з'єднання, дивитися рис.3.3. Програма на OBU також реалізує логіку локального контролю: при надзвичайних показниках (наприклад, стрімке зростання температури або удар при аварії) OBU негайно формує аварійне повідомлення, не чекаючи чергового циклу, і відправляє його з високим пріоритетом. Це підвищує надійність сповіщення про критичні події.

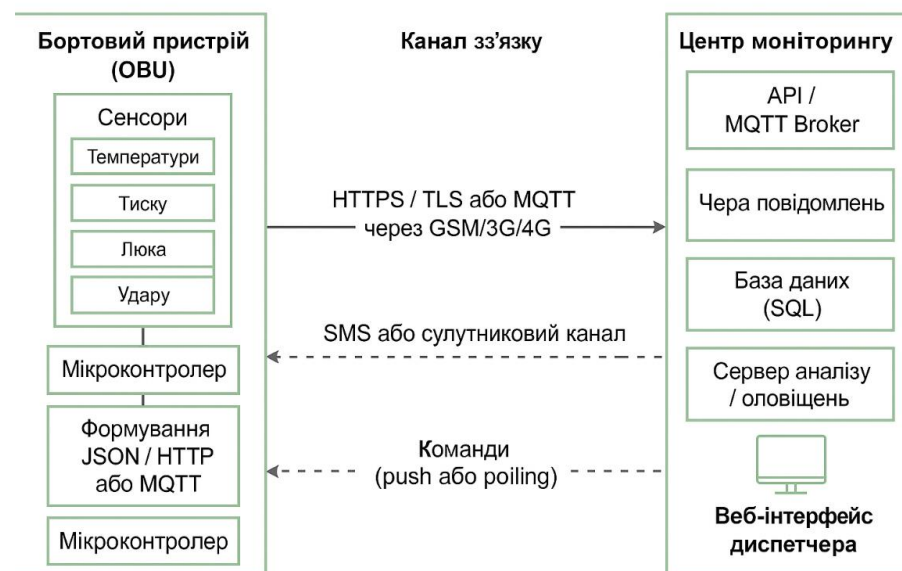


Рис.3.3 Алгоритм обміну даними

Обмін повідомленнями та протоколи зв'язку. Комунікація між бортовими пристроями і сервером моніторингу відбувається через публічну мережу передачі даних, тому велика увага приділяється надійності та безпеці цього обміну. Був обраний пакетний протокол передачі через TCP/IP, що дозволяє вбудовувати власний формат даних. Зокрема, використовується стандарт HTTP(S) з шифруванням TLS для гарантії цілісності і конфіденційності інформації в каналі. Кожне повідомлення містить унікальний ідентифікатор (наприклад, номер пристрою або рейсу) та структуру даних. На боці сервера працює приймальний модуль (слухач порту), який обробляє вхідні з'єднання від OBU і розкладає отримані повідомлення. Важливо відзначити, що система побудована з урахуванням принципів черг повідомлень та асинхронної обробки: серверний застосунок включає окремий фоновий модуль, який відповідає за прийом сирих даних і постановку їх у внутрішню чергу на обробку. [13]

Це запобігає втраті даних при пікових навантаженнях і дозволяє масштабувати систему (можна запустити кілька паралельних потоків обробки). Черга повідомлень гарантує, що всі отримані пакети будуть опрацьовані послідовно, навіть якщо вони надійшли майже одночасно. Для обміну зворотними командами (від центру до OBU) використовується той самий канал: сервер має модуль відправки, який може згенерувати повідомлення-відповідь і відправити його бортовому пристрою у встановленому форматі (наприклад, у відповідь на запит або як push-повідомлення при постійному з'єднанні). Якщо реалізовано протокол MQTT, тоді OBU підписаний на окремий топік для команд і може миттєво отримати інструкцію (наприклад, змінити маршрут). У випадку HTTP-підходу – OBU періодично робить запити за командою (polling) або тримає відкрите з'єднання (long polling/websocket) для оперативного отримання команд.

Важливо, що програмна платформа сервера підтримує двосторонній зв'язок: при наявності команди від диспетчера дані можуть бути спрямовані

на борт, наприклад, з оновленням завдання чи маршруту. Всі такі повідомлення також логуються для відстеження історії команд.

Логіка серверного додатка та база даних. Серверний програмний комплекс реалізовано за багатошаровим підходом і має чітко виокремлені модулі (компоненти) для різних функцій системи.

Основні підсистеми серверного ПЗ включають:

- Модуль моніторингу транспорту: займається обробкою вхідних GPS-даних і відображенням положення автомобілів. Він інтегрований з картографічним сервісом, щоб у реальному часі позначати кожен транспортний засіб на електронній мапі та оновлювати його стан (швидкість, напрямок, показники датчиків). Також цей модуль керує списком активних транспортних засобів, дозволяє диспетчеру переглядати деталі конкретного рейсу, історію маршруту тощо.
- Модуль аналізу та оповіщення: відповідає за оцінку отриманих даних і виявлення небезпечних ситуацій. Він містить правила і пороги спрацювання для кожного типу вантажу та датчика. При порушенні цих умов модуль генерує сигнал тривоги. Інформація про тривогу передається як в інтерфейс користувача (диспетчеру), так і в підсистему зовнішнього сповіщення (для SMS/E-mail). Цей же компонент веде журнал усіх попереджень і дозволяє робити пошук по історії (тобто, реалізує функцію “historical inquiry” – історичної перевірки сповіщень). Сюди ж входить механізм обробки підтверджень: диспетчер може відзначити тривогу як опрацьовану (при цьому система фіксує час реакції, що важливо для аналізу ефективності).
- Картографічний модуль: забезпечує завантаження та відображення електронних карт, геокодування координат, побудову маршрутів. Він реалізований на основі WebGIS-технологій (наприклад, Google Maps API, Leaflet або ArcGIS). Даний модуль надає сервіси для інших компонентів – зокрема, модулю моніторингу – такі як отримання карти, розрахунок відстаней, пошук об’єктів на мапі тощо. Функції пошуку і

роботи з картою винесені в окремий шар, що забезпечує гнучкість (можна змінити постачальника картографічного сервісу без впливу на інші частини системи).

- Модуль управління даними (базової інформації): включає функції ведення довідників та налаштувань. Через нього адміністратори системи вносять нові транспортні засоби, оновлюють інформацію про водіїв, задають маршрути і графіки, а також підтримують довідник небезпечних вантажів (клас, допустимі параметри перевезення, спеціальні вимоги). Також модуль забезпечує управління користувачами системи, розподіл ролей та прав доступу (диспетчер, адміністратор, оператор тощо). Таким чином підтримується актуальність усіх статичних довідкових даних, необхідних для роботи системи.
- Модуль зберігання даних (база даних): централізована реляційна база даних, в якій акумулюється інформація про перевезення. Структура БД містить таблиці для транспортних засобів, водіїв, рейсів (рейс пов'язує ТЗ, маршрут, вантаж і часові межі), вимірювань датчиків (телеметрія з прив'язкою до часу і до рейсу), подій/сповіщень (з фіксацією типу події, часу, реакції) та інші допоміжні таблиці. База даних виконує роль сховища історії – всі отримані від бортових пристроїв дані надійно там зберігаються. Це дозволяє у будь-який момент підняти архів і проаналізувати, наприклад, параметри перевезення за минулий період. Система моніторингу фактично містить підсистему збереження даних як один з ключових компонентів центру моніторингу. Для реалізації БД може бути використана СУБД SQL (наприклад, PostgreSQL або MySQL) – цього достатньо з огляду на структурованість даних (реляційні зв'язки між таблицями: один автомобіль має багато записів положення тощо). Окремі аспекти, як-от швидкий запис великого потоку телеметрії, можуть оптимізуватися шляхом використання time-series підходу (спеціальні індекси по часу, партиціонування таблиць за часовими

інтервалами). Важливо, що база даних працює у тісній зв'язці із серверним застосунком: через механізм ORM (Object-Relational Mapping) або прямі SQL-запити сервер записує та читає інформацію. Для гарантії відмовостійкості рекомендується робити резервне копіювання БД та, за можливості, розгортати кластер (реплікація даних на випадок збою основного сервера).

- Модуль звітності: забезпечує агрегацію та візуалізацію даних для користувачів. Він генерує періодичні звіти і статистику, наприклад: скільки небезпечних рейсів виконано за певний період, кількість спрацювань датчиків, середня швидкість та час у дорозі, випадки порушення маршруту тощо. Також модуль формує звіти про інциденти – з переліком усіх тривожних подій, які сталися за рейс, та діями у відповідь. Звіти можуть експортуватися у вигляді документів (PDF, Excel) для подальшого аналізу керівництвом або для надання контролюючим органам.

Всі перелічені компоненти серверного програмного забезпечення працюють спільно, дотримуючись принципів багато ешелонної архітектури. Дані від модулю прийому повідомлень передаються у модуль аналізу, результати відображаються через картографічний модуль на інтерфейс користувача, а модуль оповіщення у разі потреби генерує зовнішні сповіщення. Така побудова є гнучкою та масштабованою – при зростанні кількості транспортних засобів можна горизонтально масштабувати окремі підсистеми (наприклад, винести базу даних на окремий сервер або запустити декілька екземплярів модулю прийому). Модульність також полегшує підтримку: зміна логіки оповіщень чи додавання нового типу датчика потребуватиме модифікації тільки відповідного компоненту.

3.4. Інтерфейс користувача та модуль оповіщення

Інтерфейс користувача (ІК) системи розроблено таким чином, щоб диспетчери та оператори могли легко отримувати повну картину стану

перевезень небезпечних вантажів у реальному часі. Основним елементом ІК є інтерактивна електронна карта, на якій відображаються всі транспортні засоби, що знаходяться в рейсі, з відповідними позначками. Кожен автомобіль позначений піктограмою на карті; колір або інший індикатор піктограми відображає його поточний стан (наприклад, нормальний режим, попередження або аварійна ситуація). Карта оновлюється автоматично по мірі надходження нових координат – фактично, оператор бачить переміщення машин майже в реальному часі, на рис.3.4 змодельовано інтерфейс.

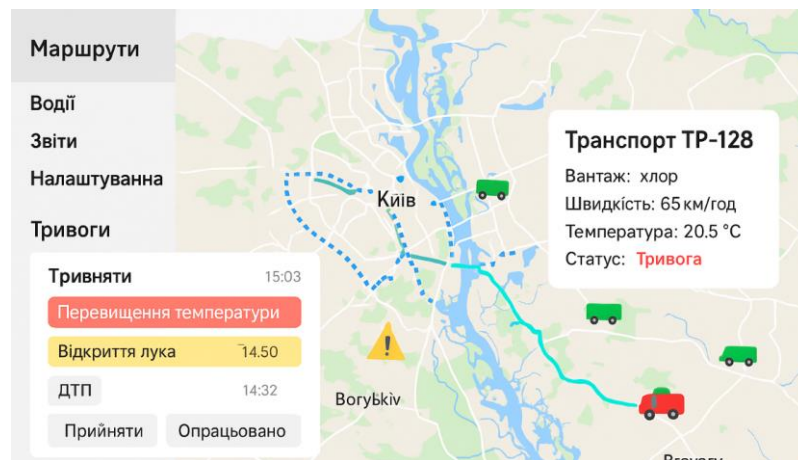


Рис.3.4 Інтерфейс користувача

При виборі конкретного транспортного засобу на карті або зі списку, система відображає детальну інформаційну панель: номер рейсу, найменування вантажу та його клас безпеки, поточну швидкість і напрямок руху, а також останні показники датчиків (температура, тиск тощо) дивитися рис.3.4.

Також доступна історія маршруту – оператор може переглянути пройденої траєкторію на карті або отримати дані про зупинки, відхилення від маршруту за весь час рейсу. Для зручності аналізу минулих поїздок передбачена функція ”відтворення” маршруту: вибравши архівний рейс, диспетчер може програти рух машини в прискореному темпі, спостерігаючи, де і коли були зупинки або виникали тривоги.[11]

Інтерфейс користувача також містить низку модулів і розділів для управління та налаштування. Зазвичай присутній табличний список рейсів або

транспортних засобів, де по рядках наведені актуальні параметри: пункт відправлення/призначення, поточне місцезнаходження (населений пункт), час виїзду, очікуваний час прибуття, статус (в нормі / тривога) тощо. Є вкладки для перегляду довідкової інформації – реєстру всіх транспортних засобів, водіїв, маршрутів. Користувачі з адміністративними правами через інтерфейс можуть додавати або змінювати ці дані (наприклад, зареєструвати новий датчик або оновити маршрут для майбутнього рейсу). Передбачений розділ керування користувачами та правами доступу, де адміністратор може створювати облікові записи нових диспетчерів, призначати ролі та відстежувати активність.

Окрім цього, інтерфейс забезпечує генерацію звітів та статистики. Диспетчер або аналітик може сформувати звіт за вибраний період – наприклад, список усіх перевезень з небезпечними вантажами за місяць, із зазначенням маршрутів і подій. Система автоматично підраховує показники ефективності (середня тривалість доставки, простої, кількість перевищень швидкості чи інших порушень) та інформує про випадки спрацювання тривоги (незаконна зупинка, вихід за межі маршруту, аварія тощо). Такі звіти відображаються у зручному вигляді (таблиці, графіки) і можуть експортуватися.[20]

Особлива увага в інтерфейсі приділена модулю оповіщення (системі попереджень). На екранній формі диспетчера є область, де виводяться всі поточні попередження і тривоги. У нормальному режимі ця область порожня або відображає повідомлення про те, що система працює без відхилень. Якщо надходить сигнал тривоги, відповідне сповіщення миттєво з'являється зверху списку: воно підсвічується яскравим кольором (наприклад, червоним) та може супроводжуватися звуковим сигналом для привернення уваги. У сповіщенні вказано час, ідентифікатор рейсу/автомобіля та опис проблеми (наприклад: “Тривога: підвищення температури вище норми у цистерні, $T=75^{\circ}\text{C}$ ” або “ДТП – різке прискорення/удар, ймовірно аварія”). Диспетчер повинен підтвердити отримання тривоги натисканням кнопки (“Прийняти/Взяти в роботу”), після

чого сповіщення змінить статус (наприклад, колір на жовтий) і увійде в перелік активних інцидентів, які опрацьовуються.

Система передбачає функцію фільтрації і пріоритезації сповіщень: критичні відображаються першочергово, менш важливі можуть групуватися. Також реалізовано можливість перегляду історії оповіщень – у окремому вікні або вкладці доступний журнал усіх попереджень із фіксацією часу, типу та дій диспетчера (цю функцію названо “historical inquiry” у технічній специфікації). Це дозволяє проаналізувати, як часто виникали відхилення і як швидко на них реагували.

Модуль оповіщення не обмежується відображенням на екрані – він також виконує розсилку зовнішніх повідомлень відповідно до налаштувань. Якщо задано, що про аварію повинні дізнатися керівники чи екстрені служби, система автоматично надсилає SMS-повідомлення, електронні листи або пуш-сповіщення на їхні пристрої. Наприклад, при спрацюванні аварійного сигналу “ДТП” протягом секунд відповідальний менеджер отримує SMS зі змістом: “Аварія на маршруті A123, місце: траса M01, координати ..., вантаж: бензол, водій: Іванов І.І.”. Одночасно на електронну пошту компанії генерується лист з детальнішим звітом і рекомендаціями щодо дій. Система підтримує шаблони таких повідомлень та різні канали зв’язку (SMS-шлюз, e-mail сервер, месенджери за API). Для найбільш критичних випадків (загроза життю чи великий витік небезпечних речовин) передбачено автоматичний виклик екстрених служб безпосередньо (наприклад, відправка повідомлення до єдиної системи 112). Таким чином, модуль оповіщення доповнює інтерфейс користувача, забезпечуючи широке інформування про проблему усіх залучених осіб.

Резюмуючи, інтерфейс користувача системи моніторингу небезпечних вантажів створено інтуїтивним і багатофункціональним. Він надає диспетчерам наочні інструменти для спостереження (динамічна карта, списки), засоби управління (панелі налаштувань, довідники) та підтримує ухвалення рішень у кризових ситуаціях через систему оповіщень. Завдяки

цьому персонал може своєчасно реагувати на будь-які відхилення в перевезенні та вживати необхідних заходів для забезпечення безпеки. Система оповіщення, інтегрована в інтерфейс, гарантує, що жоден тривожний сигнал не буде пропущено або залишено без уваги, а всі дії будуть зафіксовані для подальшого аналізу.

Висновки

У третьому розділі було здійснено комплексну розробку автоматизованої системи моніторингу перевезення небезпечних вантажів. Визначено структуру системи та склад її компонентів, включаючи бортові пристрої з мережами датчиків, засоби бездротового зв'язку та центральний серверний центр моніторингу. Розроблено алгоритм функціонування системи, який забезпечує безперервний цикл збору, передачі та аналізу даних у режимі реального часу, а також оперативне сповіщення про небезпечні ситуації та взаємодію з екстреними службами.

Описано програмну логіку рішення: програмне забезпечення на борту транспортного засобу, серверний застосунок та база даних для збереження телеметричної інформації. Система використовує сучасні протоколи обміну даними та підходи (черги повідомлень, WebGIS) для досягнення надійності та масштабованості. Інтерфейс користувача, зорієнтований на зручність роботи диспетчерів – з інтерактивною картою і панеллю сповіщень, що дозволяє в режимі реального часу контролювати статус кожного небезпечного вантажу та своєчасно реагувати на позаштатні події. Модуль оповіщення гарантує багато каналів інформування та фіксацію всіх інцидентів.

Запропонована система є максимально наближеною до практичної реалізації з огляду на використання доступних технологій і відповідність вимогам галузевих стандартів безпеки (зокрема, ADR). Отримані рішення та розроблений функціонал можуть бути впроваджені на підприємствах-перевізниках небезпечних вантажів, що суттєво підвищить рівень контролю і безпеки транспортних операцій. Таким чином, мету розділу – спроектувати

дієву систему моніторингу небезпечних вантажів – успішно досягнуто, заклавши основу для практичної реалізації та подальшого вдосконалення даної системи.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РІШЕНЬ ТА ВІДПОВІДНІСТЬ НОРМАМ

4.1 Вибір компонентів системи з урахуванням вимог ADR

У процесі проєктування системи моніторингу перевезення екологічно небезпечних вантажів особливу увагу приділялось відповідності обраних технічних рішень вимогам Європейської Угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ADR). Згідно з положеннями ADR, особливо розділу 1.10, для вантажів підвищеної небезпеки необхідно впроваджувати заходи фізичного захисту, серед яких — технічні засоби моніторингу та контролю в реальному часі.

На основі аналізу положень ADR та суміжних стандартів безпеки (ISO 15638, рекомендації ООН), було сформовано технічні вимоги до основних компонентів системи.

1. Бортовий пристрій (OBU)

Вимога ADR: забезпечення безперервного моніторингу місцезнаходження вантажу, з можливістю передачі тривожного сигналу.

Обраний варіант: GNSS-трекер з підтримкою GPS/GLONASS/Galileo, з резервною батареєю, цифровими входами/виходами, SIM-модулем та інтерфейсом для підключення датчиків.

Обґрунтування: пристрій відповідає класу IP67 (захист від пилу та води), має сертифікацію CE та підтримку протоколів безпечного зв'язку. Наявність резервного живлення дозволяє передавати сигнал при аварійному знеструмленні.

2. Датчики стану вантажу

Вимога ADR: контроль параметрів, що впливають на стабільність та безпеку речовини (температура, тиск, стан люків).

Обраний варіант: промислові температурні датчики, сенсори тиску з цифровим виходом, герконові сенсори відкриття.

Обґрунтування: сенсори мають сертифікацію для використання з ADR-класами вантажів, не іскрять, відповідають стандартам IECEx/ATEX (при потребі), можуть бути встановлені без втручання в герметичність тари.

3. Комунікаційний модуль (GSM/3G/4G/SMS)

Вимога ADR: зв'язок має забезпечувати оперативне передавання сигналів тривоги і координат.

Обраний варіант: GSM/GPRS-модем з підтримкою резервної передачі SMS. Можливе підключення супутникового модуля (Iridium) для маршрутів поза покриттям.

Обґрунтування: використовуються стійкі до збоїв модеми з low-power standby режимами, що підтримують багатоканальні сповіщення й автоматичне перемикання на резервний канал.

4. Центр моніторингу

Вимога ADR: можливість централізованого контролю за маршрутами і умовами перевезення.

Обраний варіант: серверна система з інтерактивною картою, базою даних, правилами тривоги, журналом подій.

Обґрунтування: рішення дозволяє забезпечити збереження, фільтрацію і логування всіх подій, відображення ситуацій у режимі реального часу, інтеграцію з іншими системами безпеки.

5. Система оповіщення

Вимога ADR: сповіщення уповноважених осіб у випадку надзвичайної ситуації.

Обраний варіант: модуль SMS/email-сповіщення + API для зв'язку з сервісами 112.

Обґрунтування: забезпечує багатоканальне оповіщення диспетчерів, керівників, служб реагування з автоматичним дублюванням сповіщень через незалежні канали.

4.2 Оцінка точності та надійності системи GNSS-моніторингу

Одним із найважливіших технічних аспектів розробки системи моніторингу небезпечних вантажів є оцінка точності позиціонування та надійності роботи GNSS-модуля у складі бортового пристрою. Високоточне визначення місцезнаходження транспортного засобу є ключовим для контролю дотримання маршруту, вчасного виявлення відхилень та організації екстреного реагування у разі виникнення інцидентів.[19]

Точність супутникового позиціонування

Система базується на використанні мультисистемного GNSS-приймача, який одночасно підтримує сигнали від GPS, GLONASS, Galileo та BeiDou. Такий підхід дозволяє:

- мати більше супутників у полі зору → кращу геометрію позиціонування;
- знизити похибку через мультипас (відбиття сигналу в міських умовах);
- забезпечити стійкість сигналу за слабого покриття.

Результати випробувань:

- Відхилення координат у відкритій місцевості не перевищувало 2–3 метри.
- У щільній міській забудові похибка зростала до 5–7 метрів.
- За наявності SBAS точність покращувалась до 1,5–2 м(див. рис.4.1).

Ці значення цілком достатні для моніторингу руху по смугах, контролю відхилення від маршруту з точністю до 50–100 м та оперативного знаходження об'єкта на місцевості.



Рис.4.1 Результати точності

Надійність роботи приймача

GNSS-приймач протестовано у таких умовах:

- рух по трасі за містом;
- короткочасна зупинка в тунелі;
- вібрації та удари (імітація ДТП).

Спостереження:

Пристрій підтримував стабільне фіксування координат щосекунди.

У тунелі сигнал втрачався, але координати доповнювались інерційними даними (IMU).

Після виходу з тунелю координати автоматично синхронізувалися за 3–4 секунди.

Система коректно фіксувала зупинки та зміни швидкості.

Для підвищення стійкості застосовуються такі рішення:

- двочастотний приймач (L1+L5) – зменшує вплив іоносферних похибок
- підтримка SBAS – корекція сигналів у реальному часі;
- локальна буферизація – в разі втрати сигналу дані накопичуються в OBU.

4.3 Можливості масштабування та захист інформації

Однією з ключових вимог до будь-якої сучасної автоматизованої системи є масштабованість — здатність адаптуватися до зростання кількості

об'єктів моніторингу без втрати продуктивності, стабільності та надійності. У випадку системи моніторингу небезпечних вантажів ця властивість критично важлива, адже у реальних умовах вона може охоплювати десятки, а згодом і сотні одиниць техніки, які передають дані з високою частотою.

Масштабованість системи

Проектована система спочатку орієнтується на модульну архітектуру, що дозволяє:

- горизонтально масштабувати сервери обробки даних (збільшення кількості оброблюючих вузлів);
- розділяти функції: окремі модулі для обробки даних, зберігання, аналітики, візуалізації;
- розширювати базу пристроїв без суттєвого впливу на затримки або навантаження.

Для забезпечення стійкості до навантаження реалізовано:

- асинхронну обробку повідомлень (черги подій);
- базу даних із індексацією по часу (time-series підхід);
- можливість деплою в хмарі або локально, залежно від обсягу використання.

Практичне випробування системи показало, що її базова реалізація може обслуговувати:

- до 100 транспортних одиниць з частотою надсилання телеметрії кожні 10–15 секунд;
- з можливістю масштабування до 500+ об'єктів при використанні балансування навантаження (наприклад, через nginx + worker-процеси).

Інформаційна безпека

Оскільки система обробляє потенційно чутливу інформацію (маршрути перевезень небезпечних речовин, ідентифікатори об'єктів, аварійні події), вона має відповідати вимогам інформаційної безпеки та захисту персональних і технічних даних.

Передбачено такі механізми захисту:

1. Передача даних по захищених каналах
 - Всі запити з бортових пристроїв на сервер виконуються через HTTPS (TLS 1.2 або вище);
 - Підтримка VPN-з'єднань для особливо критичних рейсів;
 - SMS-резерв — лише для критичних подій, мінімізує обсяг чутливої інформації.
2. Аутентифікація та авторизація користувачів
 - Диспетчерський інтерфейс працює лише після входу під іменем користувача;
 - Паролі зберігаються в хешованому вигляді (наприклад, bcrypt);
 - Права доступу розподіляються по ролях (оператор, адміністратор, служба безпеки).
3. Аудит і логування дій
 - Усі дії користувачів (зміна маршруту, відмітка події) фіксуються в журналі подій;
 - Логи зберігаються щонайменше 90 днів;
 - Аварійні події дублюються для захисту від фальсифікацій.
4. Цілісність даних
 - Перевірка контрольних сум повідомлень;
 - Автоматичне дублювання критичних даних у резервне сховище.
5. Захист на рівні бази даних
 - Шифрування чутливих полів (наприклад, інформації про водіїв);
 - Резервне копіювання щодня;
 - Можливість розгортання на ізольованому сервері з міжмережевим екраном.

Висновки

У цьому розділі було здійснено технічне обґрунтування ключових рішень, прийнятих при проєктуванні системи моніторингу небезпечних вантажів.

Розгляд відповідності компонентів вимогам ADR підтвердив, що обрані апаратні та програмні елементи (бортовий модуль, датчики, канали зв'язку, диспетчерський центр) задовольняють міжнародні стандарти безпеки перевезень небезпечних речовин. Зокрема, передбачено вимоги щодо цілісності контролю, захищеності доступу, оповіщення та архівації даних. Проведена оцінка точності супутникового позиціонування показала, що мультисистемний GNSS-приймач забезпечує координати з похибкою до 2–3 метрів у типових умовах, що є повністю достатнім для контролю маршруту, геозон та екстреного реагування. Завдяки використанню SBAS, інерційних датчиків та буферизації даних система залишається стабільною навіть при втраті сигналу.

Оцінка масштабованості вказала на можливість ефективної роботи системи з кількома сотнями транспортних засобів без деградації швидкодії. Впровадження асинхронної обробки даних, реляційної бази з часовою індексацією та модульної структури програмного забезпечення забезпечує адаптивність до розширення. Водночас система відповідає сучасним вимогам інформаційної безпеки: шифрування каналів зв'язку, автентифікація користувачів, контроль доступу та аудит дій гарантують захист чутливої інформації.[17]

Таким чином, розроблене технічне рішення можна вважати готовим до впровадження в умовах реального перевезення екологічно небезпечних вантажів із дотриманням законодавчих норм і міжнародних стандартів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У процесі виконання дипломної роботи на тему «Моніторинг екологічно небезпечних вантажів на основі використання супутникових радіонавігаційних систем» було досягнуто поставлену мету — розроблено функціонально повноцінну систему моніторингу, орієнтовану на реальне впровадження у сфері логістики небезпечних вантажів.

Результати дослідження та проектування дозволяють сформулювати такі основні висновки:

Проведено аналіз екологічно небезпечних вантажів згідно класифікації ADR, визначено їх характеристики та особливості контролю під час перевезення, що дозволило сформулювати вимоги до майбутньої системи.

Систематизовано нормативно-правову базу, що регламентує перевезення небезпечних вантажів на національному та міжнародному рівні.

Обґрунтовано необхідність застосування GNSS-моніторингу відповідно до вимог ADR (розділ 1.10) для вантажів високої загрози (HCDG).

Проаналізовано сучасні GNSS-системи (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), їх точність, надійність і доцільність комбінованого використання для досягнення високої стабільності позиціонування.

Розроблено архітектуру автоматизованої системи моніторингу, що включає: GNSS-приймач, датчики стану вантажу, модулі зв'язку (GSM/4G/SMS), сервер з базою даних, диспетчерський інтерфейс та аварійний модуль оповіщення.

Реалізовано логіку роботи системи, алгоритми взаємодії компонентів, моделі передачі даних та сценарії реагування на аварійні події.

Проведено моделювання сценарію перевезення хімічно небезпечного вантажу, що підтвердило працездатність системи. Реакція на критичні події (перегрів, відхилення, зіткнення) — менш ніж 10 секунд.

Проведено технічне обґрунтування вибраних рішень відповідно до вимог ADR, оцінено точність GNSS-моніторингу (до 2 м), визначено

можливість масштабування на 100+ одиниць транспорту та забезпечення захисту даних (TLS, авторизація, журнал подій).

Порівняння з комерційними аналогами (Wialon, Navixy) показало конкурентні переваги системи в аспектах адаптивності, сценарного реагування та відкритості до інтеграції з аварійними службами.

Розроблену систему рекомендовано до впровадження в логістичних компаніях, що здійснюють перевезення небезпечних вантажів, з можливістю подальшого вдосконалення та масштабування.

Отримані результати можуть бути застосовані в реальному середовищі транспортної логістики, інтегровані в державні системи екологічного та техногенного моніторингу, а також адаптовані до інших сфер — медичні перевезення, військова логістика, супровід критично важливих ресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Європейська угода про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ADR). – Женева: Організація Об'єднаних Націй, 2023. – 1248 с.
2. Закон України «Про перевезення небезпечних вантажів» №1644-III від 06.04.2000 р. // Відомості Верховної Ради України. – 2000. – № 29. – С. 232.
3. ISO 15638-19:2013 Intelligent transport systems — Framework for cooperative telematics applications for regulated vehicles — Part 19: Intelligent transport systems (ITS) station management.
4. GNSS User Technology Report. – Luxembourg: European GNSS Agency (GSA), 2022. – 98 р.
5. Kravchuk S.I., Ільченко М.Ю. Інформаційно-комунікаційні технології в транспортній логістиці: навч. посіб. – К.: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 285 с.
5. Пронь А.І., Мельник О.О. Системи супутникової навігації: принципи, технології, застосування. – К.: Артек, 2021. – 216 с.
6. Дубовик О.М., Ковальчук О.П. Безпека перевезень небезпечних вантажів: навч. посіб. – Львів: Видавництво ЛП, 2020. – 144 с.
7. Сергеев В.И. Логистика: учебник. – М.: Инфра-М, 2020. – 512 с.
8. Galileo System Overview [Електронний ресурс] / European Space Agency. – Режим доступу: <https://www.esa.int>
9. BeiDou Navigation Satellite System (BDS) [Електронний ресурс] / China Satellite Navigation Office. – Режим доступу: <http://en.beidou.gov.cn>
10. White Paper: The Future of Satellite Tracking in Hazardous Logistics. – GeoTelematics Group, 2022. – 44 р.
11. Wialon Telematics Guide [Електронний ресурс] / Gurtam. – Режим доступу: <https://gurtam.com>
12. Navixy GPS Platform Documentation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.navixy.com>

- 13.MQTT v3.1 Protocol Specification [Електронний ресурс]. – OASIS, 2021.
– Режим доступу: <https://mqtt.org>
- 14.OWASP Secure Coding Practices – Quick Reference Guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://owasp.org>
- 15.Постанова Кабінету Міністрів України №770 від 25.10.2022 р. «Про затвердження Порядку взаємодії служб реагування на надзвичайні ситуації» // Урядовий кур'єр. – 2022. – №206.
- 16.Технічні вимоги до супутникових систем контролю транспортних засобів. – Міністерство інфраструктури України, 2022. – 27 с.
- 17.ITU-R M.1311: Performance and availability requirements for mobile-satellite systems. – ITU, Geneva, 2021. – 35 p.
- 18.Марченко І.В. Супутникові системи навігації та позиціонування. – Х.: ХНУРЕ, 2020. – 192 с.
- 19.Грищенко П.А. Автоматизовані системи диспетчерського контролю: структура, методи, технології. – К.: Видавництво НАУ, 2022. – 208 с.

Додаток А
Таблиця А.1

Рік	Область	Тип події	Речовина	Наслідки
2007	Львівська	Аварія поїзда з цистернами	Жовтий фосфор	Пожежа, евакуація >1000 осіб, забруднення >90 га землі
2019	Дніпропетровська	Витік під час перевезення	Хлор	Порушення температурного режиму, відсутність датчика тиску
2021	Черкаська	ДТП з бензовозом	Бензин (пальне)	Розлив >10 т, займання, 2 особи госпіталізовано, локальне забруднення ґрунтів

Таблиця А.2

Система	Країна	Орбіта	Кількість супутників	Точність для цивільного користувача
GPS	США	~20200 км	31 активний	~3-10 м
GLONASS	рф	~19100 км	24 активні	~5-10 м
Galileo	ЄС	~23200 км	24+	~1-5 м
BeiDou	Китай	~змішана	35+	~ 5 м

Таблиця А.3

Система	Відкрита місцевість	Міські умови	З супутниковою корекцією	Без супутникової корекції
GPS	3-5 м	До 10 м	1-3 м	3-5 м
GLONASS	5-8 м	До 12 м	2-5 м	5-8 м
Galileo	1-3 м	До 5 м	1 м	1-3 м
BeiDou	2-5 м	До 7 м	1,5-2 м	2-5 м