

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Класифікаційна наукова
праця на правах рукопису

КЛОЧАН АРСЕН ЄВГЕНІЙОВИЧ

УДК 656.052.484: 629.3.054.4

ДИСЕРТАЦІЯ
ПОЛЯРИМЕТРИЧНИЙ МЕТОД ПОЗИЦІОНУВАННЯ ТА
МОНІТОРИНГУ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

Спеціальність 275 «Транспортні технології (за видами)»
Спеціалізація 275.03 «Транспортні технології на автомобільному транспорті»
Галузь знань: 27 «Транспорт»

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів
мають посилання на відповідне джерело
_____ Арсен КЛОЧАН

Науковий керівник:
доктор технічних наук, професор

Алі АЛЬ-АММОРИ

АНОТАЦІЯ

Клочан А. Є. Поляриметричний метод позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 275 Транспортні технології (за видами), спеціалізацією 275.03 Транспортні технології на автомобільному транспорті. – Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання підвищення ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті з метою підвищення безпеки руху, шляхом розробки поляриметричного методу позиціонування та моніторингу автотранспортних засобів, який на відміну від більшості існуючих дозволяє визначати їх не лише позиційне, але й орієнтаційне положення.

Встановлено, що основними причинами виникнення дорожньо-транспортних пригод на автомобільному транспорті є недотримання безпечної дистанції та інтервалів руху, перевищення безпечної швидкості руху та порушення правил маневрування. Відповідно, основними типами дорожньо-транспортних пригод – попутне та бокове зіткнення, що є наслідком просторово-часового перетину траєкторій руху автотранспортних засобів, які зумовлені похибками в визначенні відносного просторового положення та відносних параметрів руху автотранспортних засобів. Визначено, що одним з сучасних напрямків підвищення безпеки дорожнього руху є розробка, створення та впровадження автоматизованих систем попередження та уникнення зіткнень. Розробка таких систем передбачає розробку нових або вдосконалення існуючих підходів до визначення в режимі реального часу з високою точністю та достовірністю відносного просторового положення автотранспортних засобів та параметрів їх відносного руху, а також моніторинг відстані та часу їх руху до точки потенційного перетину траєкторій руху з метою попередження зіткнень. Крім того, розробка систем попередження та уникнення зіткнень передбачає вдосконалення існуючих алгоритмів прогнозування траєкторії руху

автотранспортного засобу та визначення оптимальної траєкторії його руху з метою просторово-часового розведення траєкторій руху автотранспортних засобів для уникнення виникнення дорожньо-транспортних пригод. Запропонований поляриметричний метод позиціонування автотранспортних засобів може бути застосованим в інтелектуальних транспортних системах для забезпечення визначення взаємного просторового положення автотранспортних засобів, особливо в умовах синхронізованого руху при здійсненні вантажних та пасажирських перевезень.

Мета дисертаційної роботи полягає у розробці та застосуванні поляриметричного методу позиціонування і моніторингу автотранспортних засобів для підвищення безпеки дорожнього руху при перевезенні вантажів та пасажирів. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання:

1. Визначити основні напрямки підвищення безпеки дорожнього руху в сучасних умовах та проаналізувати існуючі підходи, методи та засоби позиціонування і моніторингу на автомобільному транспорті.

2. Обґрунтувати перспективність розробки та використання поляриметричного методу вимірювання орієнтаційних та позиційних параметрів відносного положення автотранспортних засобів.

3. Розробити поляриметричний спосіб визначення напрямку на джерело випромінювання лінійно поляризованого когерентного світла та систему, що його реалізує.

4. Розробити поляриметричний метод позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті, що базується на розробленому поляриметричному способі та запропонованих поляриметричних моделях визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення автотранспортних засобів на вулично-дорожній мережі.

5. Визначити напрямки підвищення ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті на основі запропонованого поляриметричного методу.

6. Розробити інтелектуальну систему управління автотранспортним засобом щодо попередження виникнення дорожньо-транспортної пригоди, що базується на розробленому методі позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті.

Об'єктом дослідження є процеси визначення взаємного позиційного та орієнтаційного положення автотранспортних засобів.

Предметом досліджень є методи та моделі визначення позиційного та орієнтаційного положення автотранспортних засобів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в вирішенні науково-практичного завдання, яке пов'язане з підвищенням ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті за рахунок визначення відносного позиційного та орієнтаційного положення автотранспортних засобів за допомогою розробленого поляриметричного методу. При цьому, *вперше*:

- запропоновано поляриметричний метод позиціонування на автомобільному транспорті, який на відміну від більшості існуючих дозволяє визначити, не лише, відносне позиційне, але й взаємне орієнтаційне положення автотранспортних засобів;

удосконалено:

- поляриметричний метод визначення напрямку на джерело лінійно поляризованого випромінювання шляхом використання модулятора в блоці випромінювання, що дозволяє скоротити кількість каналів вимірювання та зменшити похибку вимірювання параметрів руху автотранспортних засобів, спричинену середовищем розповсюдження;

- способи оцінки достовірності інформації систем паралельного інформаційного резервування шляхом дослідження чотирьох-параметричного графу станів системи визначення контрольованого параметру, що дозволяє визначити ймовірності коректного визначення наявності та відсутності контрольованої події;

набула подальшого розвитку:

- система критеріїв та показників оцінки ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті, шляхом розгляду схеми управління досліджуваним параметром, на основі якої показано, що ефективність позиціонування та моніторингу залежить від ефективності системи управління рухом транспортного засобу.

Практична значимість отриманих результатів полягає в розробці поляриметричного методу визначення позиційних та орієнтаційних параметрів відносного положення автотransпортних засобів, в розробці інтелектуальної системи управління автотransпортним засобом щодо попередження виникнення дорожньо-транспортної пригоди, а також у вдосконаленні способів оцінки достовірності інформації систем паралельного інформаційного резервування, що дозволяє визначити ймовірності коректного визначення наявності та відсутності контрольованої події. Основні науково-практичні результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету МОН України, отримано патент на корисну модель «Поляриметричний спосіб визначення напрямку на джерело поляризованого оптичного випромінювання» та свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму.

Результати дисертаційної роботи щодо способу визначення відхилення руху транспортного засобу від оптимальної траєкторії руху були впроваджені у науково-дослідну діяльність Науково-методологічного центру процесного аналізу та у науково-дослідну роботу Центрі безпеки дорожнього руху ДП «ДерждорНДІ» щодо критеріїв та показників оцінки ефективності моніторингу ДТП з метою прогнозування та попередження їх виникнення.

У *вступі* обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи; показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; формулюються мета та завдання дисертаційного дослідження. Визначені об'єкт, предмет, гіпотеза та методи дослідження, викладена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. У вступі також розкривається

особистий внесок здобувача, публікації та апробація результатів досліджень за темою дисертації, її структура та обсяг.

У *першому розділі* проведений статистичний аналіз безпеки руху на автомобільному транспорті, за результатами якого та на підставі запропонованої схеми дорожньо-транспортної системи визначені основні напрямки підвищення безпеки руху на автомобільному транспорті, основними з яких є підвищення безпеки доріг та дорожньої інфраструктури, підвищення безпеки автотранспортних засобів та зменшення психіко-фізіологічного навантаження на водія. Крім того показано, що однією з основних передумов до виникнення дорожньо-транспортних пригод є помилки у визначенні відносного просторового положення автотранспортних засобів та параметрів їх відносного руху. Під час аналізу сучасного стану застосування існуючих навігаційних систем позиціонування і моніторингу на автомобільному транспорті розглянуті основні поняття позиціонування та моніторингу, методи визначення відносного положення автотранспортних засобів в просторі, а також типи інформаційних систем моніторингу. За результатами проведеного аналізу існуючих систем та підходів щодо позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті показано, що більшість таких систем не забезпечують одночасне визначення відносного позиційного та орієнтаційного положення автотранспортних засобів в просторі та відносних параметрів їх руху.

У *другому розділі* розглядається питання застосування поляриметричних методів вимірювання для визначення відносного положення автотранспортних засобів в просторі. У розділі розглянуті фізичні основи поляриметричних вимірювань та на основі результатів дослідження питання розподілу інтенсивності лінійно поляризованого променю після його падіння на ізотропну діелектричну пластину показано, що для переважної кількості кутів падіння вищу інтенсивність має двічізаломлений промінь. А на основі результатів дослідження зв'язку між азимутами площини поляризації падаючого та двічізаломленого променів показано, що азимут площини поляризації двічізаломленого променю залежить від азимуту площини поляризації

падаючого променю, його просторового кута падіння та показника заломлення матеріалу діелектричної пластини. При цьому, чутливість вимірювання азимуту площини поляризації двічізаломленого променю зростає зі зростанням кута падіння і азимуту площини поляризації падаючого променю та зі зростанням показника заломлення матеріалу діелектричної пластини. Для забезпечення визначення відносного положення автотранспортних засобів в просторі з використанням поляриметричних методів вимірювання, запропоновано поляриметричний метод визначення напрямку на джерело лінійно поляризованого випромінювання та алгоритм проведення вимірювань. Також в розділі приведені результати розгляду питання впливу середовища розповсюдження на характеристики лінійно поляризованого променю. В результаті розгляду якого було показано, що для зменшення поглинання та розсіювання випромінювання, а також зміни поляризаційних властивостей випромінювання необхідно проводити підбір довжини хвилі випромінювання з урахуванням фізико-хімічного складу середовища розповсюдження та запропоноване використання Nd:YAG – лазеру на довжині хвиль 1,064 мкм.

У *третьому розділі* розглядаються поляриметричні моделі визначення відносного положення автотранспортних засобів. При цьому, у розділі запропоновані поляриметричні моделі визначення лінійних, кутових, лінійно-кутових параметрів відносного положення. Для кожної з запропонованих поляриметричних моделей запропонований пристрій вимірювання, який її реалізує. Для запропонованих пристроїв вимірювання побудована блок-схема каналу вимірювання та визначені формули перерахунку виміряних параметрів в лінійно-кутові параметри відносного положення автотранспортних засобів. При цьому, було показано, що запропоновані моделі дозволяють визначати відносне положення автотранспортних засобів, як матеріальних точок, та відносне положення їх зв'язаних систем координат, що, в свою чергу, визначає відносне просторове положення автотранспортних засобів.

В *четвертому розділі* розглядаються прикладні аспекти реалізації результатів наукових досліджень. Зокрема, у розділі запропоновані методи та

засоби підвищення ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті. Ефективність позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті розглядається з точки зору ефективності цілеспрямованого процесу функціонування системи позиціонування та моніторингу. В якості основних критеріїв оцінки ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті запропоновані наступні критерії: точність витримування параметрів відносного положення в допустимих межах, достовірність інформації про відносне положення та вихід його параметрів за допустимі межі, своєчасність формування попереджувальних сигналів та сигналів доуправління. Для кожного з запропонованих критеріїв визначені відповідні показники ефективності. Для підвищенні достовірності інформації в системах позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті запропоноване застосування паралельного інформаційного резервування. При цьому, в розділі досліджуються характеристики систем паралельного інформаційного резервування, з метою підвищення ймовірності коректного визначення наявності та відсутності контрольованої події. Загальною реалізацією результатів наукових досліджень є розробка інтелектуальної системи управління автотранспортним засобом щодо попередження виникнення дорожньо-транспортної пригоди, яка приведена в четвертому розділі.

Додатки містять матеріали щодо патенту на корисну модель, свідоцтва про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму, актів впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес та виробництво, а також наведений перелік публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи.

Ключові слова: автомобільний транспорт; безпека дорожнього руху; вантажні перевезення; відносне положення та параметри руху; вулично-дорожня мережа; інтелектуальна транспортна система; критерії та показники ефективності; оптимізація; позиціонування та моніторинг; поляриметричний метод вимірювання; точність, достовірність та своєчасність інформації; транспортний потік.

Список публікацій здобувача.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Аль-Амморі А., Клочан А. Застосування поляриметричного методу вимірювання для визначення взаємного просторового положення транспортних засобів. *Актуальні напрямки розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки* : монографія / ред.: В. Пінчук, Г. Прокудін. Дніпро, 2021. С. 219–233. ISBN 978-617-518-399-1. URL: <https://drive.google.com/file/d/12zFHpMg33GRegRJS5woGi8FSPOVQT5tI/view> (дата звернення: 19.09.2023).

Публікації у наукових періодичних виданнях, які включені до наукометричних баз Scopus або Web of Science:

2. Aviation Navigation with Use of Polarimetric Technologies / A. Klochan et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2017. Vol. 2, no. 3. P. 67–72. URL: <https://doi.org/10.25046/aj020310> (date of access: 01.10.2023).

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

3. Probabilistic models reliability of information and control systems / A. Al-Ammouri et al. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2018. Vol. 3, no. 1. P. 60–69. URL: <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2018.3-1.6> (date of access: 01.10.2023).

Публікації в наукових фахових виданнях України:

4. Methods for improving the data reliability in information and control systems / A. Al-Ammouri et al. *Electronics and control systems*. 2018. Vol. 4, no. 58. P. 107–114. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.58.13506> (date of access: 01.10.2023).

5. Клочан А. Математична модель поляриметричної системи посадки повітряних суден. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2020. Vol.

3, no. 2.1. P. 128–141. URL: <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2020.3.2-1.12> (date of access: 02.10.2023).

6. Малиш М., Куліш М., Ключан А. Віддалене керування транспортом. *Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки"*. 2022. Т. 1, № 51. С. 275–280. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-275-280> (дата звернення: 02.10.2023).

Наукові праці апробаційного характеру, які включені до наукометричних баз Scopus або Web of Science

7. Klochan A., Al-Ammouri A., Dmytrychenko A. Polarimetric Technologies for Object's Attitude Sensing. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference*, Kyiv, 16–18 April 2019. Kyiv, 2019. P. 712–717.

8. Fundamentals of the Polarimetric UAV Landing System / A. Klochan et al. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD): Proceedings of 2019 IEEE 5th International Conference*, Kyiv, 22–24 October 2019. Kyiv, 2019. P. 712–717. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8943830> (date of access: 02.10.2023).

Наукові праці апробаційного характеру

9. Способи підвищення достовірності інформації в системах управління/ А. Аль-Амморі та ін. *Інформаційні технології та взаємодії* : V МНПК, м. Київ, 20–21 листоп. 2018 р. Київ, 2018. С. 25–26.

10. Аль-Амморі А., Ключан А. Поляриметрична система вимірювання пілотажно-навігаційних параметрів. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM* : Науково-техн. конф., м. Київ, 21–23 листоп. 2018 р. Київ, 2018. С. 60.

11. Ключан А., Тимченко О., Суботіна В. Поляриметричний метод визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання. *73-я науково-практична конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів*, м. Одеса, 12 груд. 2018 р. – 14 груд. 2018 р. Одеса, 2018. С. 44–46.

12. Ключан А., Абдулсалам Х. І., Верховецька І. Поляриметричні технології в інтелектуальних робототехнічних комплексах. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018)* : Одинадцята міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 22–23 трав. 2018 р. Київ, 2018. С. 79–80.

13. Ключан А. Математична модель розподілу інтенсивності лінійно поляризованого випромінювання при падінні на діелектричну пластину. *LXXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 15–17 трав. 2019 р. Київ, 2019. С. 94. URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view> (дата звернення: 02.10.2023).

14. Klochan A., Al-Ammouri A., Tronko V. Polarimetric Technologies for Determination the Moving Objects Relative Position. *Electronics and Applied Physics* : XV International Conference, Kyiv, 22–26 October 2019. Kyiv, 2019. P. 132–133.

15. Ключан А., Аль-Амморі А. Підвищення безпеки безпілотного транспорту з використанням поляриметричних методів вимірювання. *Сучасний стан та перспективи розвитку IoT* : Всеукр. науково-техн. конф., м. Київ, 3 квіт. 2020 р. Київ, 2020. С. 135–137. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/l_2028_80879534.pdf (дата звернення: 02.10.2023).

16. Ключан А., Верховецька І. Алгоритм визначення взаємного просторового положення двох об'єктів з використанням поляриметричних технологій. *LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 13–15 трав. 2020 р. Київ, 2020. С. 94. URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWIV/view> (дата звернення: 02.10.2023).

17. Ключан А. Дистанційне визначення взаємного просторового положення елементів транспортної системи з використанням поляриметричних методів вимірювання. *LXXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних*

підрозділів університету, м. Київ, 12–14 трав. 2021 р. Київ, 2021. С. 68-69. URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view (дата звернення: 02.10.2023).

18. Ключан А. Поляриметричні методи визначення пілотажно-навігаційних параметрів відносного положення об'єктів. *LXXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 02–04 листоп. 2022 р. Київ, 2022. С. 66. URL: <https://drive.google.com/file/d/1yhVlySe-r3EHbJt98UoRZEW94NhXOzk7/view> (дата звернення: 02.10.2023).

19. Ключан А., Заварзіна В., Гончар П. Місце позиціонування та моніторингу у підвищенні безпеки дорожнього руху. Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт : Міжнар. наук. конф., м. Київ, 29–30 листоп. 2022 р. Київ, 2022. С. 169–172. URL: <https://sites.google.com/ntu.edu.ua/its-esqc-ua/матеріали-конференції> (дата звернення: 02.10.2023).

20. Ключан А. Поляриметричний метод визначення взаємного просторового положення транспортних засобів. *Сучасний стан та перспективи розвитку IoT* : Всеукр. науково-техн. конф., м. Київ, 7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 157–159. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2626_10735028.pdf?file=p_2626_10735028.pdf (дата звернення: 02.10.2023).

21. Ключан А., Заварзіна В. Показники оцінки ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті. *LXXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 17–19 трав. 2023 р. Київ, 2023. С. 99-100. URL: <https://drive.google.com/file/d/1ZP8ANZsGcZTzASczTixpto6w2MKfDwt5/view> (дата звернення: 02.10.2023).

Патенти та свідоцтва авторського права

22. Поляриметричний спосіб визначення напрямку на джерело поляризованого оптичного випромінювання : пат. 118499 Україна : G01S 17/00, G01S 17/06. № u201702129 ; заявл. 06.03.2017 ; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 4 с. URL: <https://uapatents.com/6-118499-polyarimetrichnijj-sposib-viznachennya-napryamku-na-dzherelo-polyarizovanogo-optichnogo-viprominyuvannya.html> (дата звернення: 12.10.2023).

23. Комп'ютерна програма «Розрахунок просторового положення повітряного судна в процесі посадки за допомогою поляриметричної системи посадки» (“CAPLS”)) : а. с. 96562 Україна / А. Клочан., Аль-Амморі Алі.

SUMMARY

Klochan A. Ye. Polarimetric Method for Positioning and Monitoring in the Road Transport. – Qualification scientific work on the right of a manuscript

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 275 Transport technologies (by type), specialization 275.03 Transport technologies in road transport. – National Transport University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation work is devoted to solving an important scientific and practical problem of increasing the efficiency of positioning and monitoring in road transport in order to improve traffic safety by developing a polarimetric method for positioning and monitoring vehicles, which, unlike most existing ones, makes it possible to determine not only their positional, but also orientational position.

It has been established that the main causes of accidents in road transport are failure to maintain safe distances and traffic intervals, exceeding safe speeds and violation of maneuvering rules. Accordingly, the main types of road accidents are passing and side collisions, which are a consequence of the spatio-temporal intersection of vehicle trajectories, caused by errors in determining the relative spatial position and relative parameters of the movement of vehicles. It has been determined that one of the modern directions for improving road safety is the development, creation and implementation of automated systems for warning and avoiding collisions. The development of such systems involves the development of new or improvement of existing approaches to determining in real time with high accuracy and reliability the relative spatial position of vehicles and the parameters of their relative movement, as well as monitoring the distance and time of their movement to the point of potential intersection of movement trajectories in order to prevent collisions . . In addition, the development of collision warning and avoidance systems involves improving existing algorithms for predicting the trajectory of a vehicle and determining the optimal trajectory of its movement for the purpose of spatiotemporally dividing the trajectories of vehicles in order to avoid the occurrence of road accidents. The proposed polarimetric method for positioning vehicles can be used in intelligent transport

systems to ensure the determination of the spatial relative position of vehicles, especially in conditions of synchronized movement during freight and passenger transportation.

The purpose of the dissertation work is to develop and apply a polarimetric method for positioning and monitoring vehicles to improve road safety when transporting goods and passengers. To achieve the set goals, the following tasks are solved:

1. Determine the main directions for improving road safety in modern conditions and analyze existing approaches, methods and means of positioning and monitoring of road transport.
2. Justify the prospects of developing and using a polarimetric method for measuring orientation and positional parameters relative to the position of vehicles.
3. Develop a polarimetric method for determining the direction of a radiation source of linearly polarized coherent light and the system that implements it.
4. Develop a polarimetric method for positioning and monitoring in road transport, based on the developed polarimetric method and proposed polarimetric models for determining the linear-angular parameters of the relative position of vehicles on the road network.
5. Determine directions for increasing the efficiency of positioning and monitoring in road transport based on the proposed polarimetric method.
6. Develop an intelligent vehicle control system to prevent accidents, based on the developed method of positioning and monitoring in road transport.

The object of the study is the processes of determining the relative positional and orientational position of vehicles.

The subject of research is methods and models for determining the positional and orientational position of vehicles.

The scientific novelty of the results obtained lies in the solution of a scientific and practical problem related to increasing the efficiency of positioning and monitoring in road transport by determining the relative positional and orientational position of vehicles using the developed polarimetric method. *For the first time:*

- a polarimetric method of positioning in road transport has been proposed, which, unlike most existing ones, makes it possible to determine not only the relative positional, but also the mutual orientation position of vehicles;

improved:

- a polarimetric method for determining the direction to a source of linearly polarized radiation by using a modulator in the radiation unit, which makes it possible to reduce the number of measurement channels and reduce the error in measuring vehicle movement parameters caused by the propagation medium;

- methods for assessing the reliability of information from parallel information backup systems by examining the four-parameter state graph of the system for determining the controlled parameter, which allows one to determine the probability of correctly determining the presence and absence of a controlled event;

was further developed:

- a system of criteria and indicators for assessing the effectiveness of positioning and monitoring in road transport by considering the control scheme of the parameter under study, on the basis of which it is shown that the effectiveness of positioning and monitoring depends on the effectiveness of the vehicle traffic control system.

The practical significance of the results obtained lies in the development of a polarimetric method for determining the positional and orientation parameters of the relative position of vehicles, in the development of an intelligent vehicle control system to prevent accidents, as well as in improving methods for assessing the reliability of information from parallel information backup systems, the probability of correctly determining the presence and absence controlled event The main scientific and practical results of the dissertation work were introduced into the educational process of the department of information and analytical activities and information security of the National Transport University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, a patent for the utility model “Polarimetric method for determining the direction to a source of polarized optical radiation” and a certificate of registration of copyright for computer computer program.

The results of the dissertation work on the method of determining the deviation of a vehicle from the optimal trajectory were introduced into the research activities of the Scientific Methodological Center for Process Analysis and into the research work of the Road Safety Center of the State Enterprise "GosdorNII" on criteria and indicators for assessing the effectiveness of monitoring for the purpose of forecasting and prevention of occurrence.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation work; the connection between the work and scientific programs, plans, and topics is shown; the purpose and objectives of the dissertation research are formulated. The object, subject, hypothesis and research methods are defined, the scientific novelty and practical significance of the results obtained are outlined. The introduction also reveals the personal contribution of the applicant, the publication and testing of research results on the topic of the dissertation, its structure and volume.

In the first chapter, a statistical analysis of traffic safety in road transport was carried out, based on the results of which and on the basis of the proposed scheme of the road transport system, the main directions for increasing traffic safety in road transport were identified, the main ones being improving the safety of roads and road infrastructure, increasing the safety of vehicles and reduction of the psychological and physiological load on the driver. In addition, it is shown that one of the main prerequisites for the occurrence of road accidents is errors in determining the relative spatial position of vehicles and the parameters of their relative movement. When analyzing the current state of application of existing navigation positioning and monitoring systems in road transport, the basic concepts of positioning and monitoring, methods for determining the relative position of vehicles in space, as well as types of information monitoring systems are considered. Based on the results of the analysis of existing systems and approaches to positioning and monitoring in road transport, it is shown that most of these systems do not provide simultaneous determination of the relative positional and orientational position of vehicles in space and the relative parameters of their movement.

The second chapter discusses the use of polarimetric measurement methods to determine the relative position of vehicles in space. The section examines the physical foundations of polarimetric measurements and, based on the results of a study of the intensity distribution of a linearly polarized beam after its incidence on an isotropic dielectric plate, it is shown that for the vast majority of angles of incidence, the doubly refracted beam has the highest intensity. And based on the results of a study of the relationship between the azimuths of the polarization plane of the incident and doubly refracted beam, it is shown that the azimuth of the polarization plane of the doubly refracted beam depends on the azimuth of the polarization plane of the incident beam, its spatial angle of incidence and the refractive index of the dielectric plate material. In this case, the sensitivity of measuring the azimuth of the plane of polarization of a doubly refracted beam increases with increasing angle of incidence and azimuth of the plane of polarization of the incident beam and with increasing refractive index of the dielectric plate material. To ensure the determination of the relative position of vehicles in space using polarimetric measurement methods, a polarimetric method for determining the direction to a source of linearly polarized radiation and a measurement algorithm are proposed. The section also presents the results of consideration of the influence of the propagation medium on the characteristics of a linearly polarized beam. As a result of the consideration, it was shown that in order to reduce the absorption and scattering of radiation, as well as change the polarization properties of radiation, it is necessary to select the radiation wavelength taking into account the physicochemical composition of the propagation medium, and the use of an Nd:YAG laser at a wavelength of $1.064\text{ }\mu\text{m}$ was proposed.

The third chapter discusses polarimetric models for determining the relative position of vehicles. At the same time, the section proposes polarimetric models for determining linear, angular, linear-angular parameters of relative position. For each of the proposed polarimetric models, a measurement device that implements it is proposed. For the proposed measurement devices, a block diagram of the measurement channel was constructed and formulas were determined for recalculating the measured parameters into linear-angular parameters of the relative position of vehicles. At the same time, it was

shown that the proposed models make it possible to determine the relative position of vehicles as material points, and the relative position of their associated coordinate systems, which, in turn, determines the relative spatial position of vehicles.

The fourth chapter discusses the applied aspects of implementing the results of scientific research. In particular, the section proposes methods and means to improve the efficiency of positioning and monitoring of road transport. The effectiveness of positioning and monitoring in road transport is considered from the point of view of the effectiveness of the targeted process of functioning of the positioning and monitoring system. The following criteria are proposed as the main criteria for assessing the effectiveness of positioning and monitoring in road transport: the accuracy of maintaining relative position parameters within acceptable limits, the reliability of information about the relative position and the excess of its parameters beyond acceptable limits, the timeliness of the formation of warning signals and control signals. For each of the proposed criteria, the corresponding performance characteristics are determined. To increase the reliability of information in positioning and monitoring systems in road transport, the use of parallel information backup is proposed. At the same time, the section examines the characteristics of parallel information backup systems in order to increase the likelihood of correctly determining the presence and absence of a controlled event. The general implementation of the result of scientific research is the development of an intelligent vehicle control system to prevent the occurrence of a traffic accident, given in the fourth section

The appendices contain materials about a patent for a utility model, certificates of registration of copyright for a computer program, acts of introducing the results of dissertation work into the educational process and production, and also provides a list of the applicant's publications on the topic of the dissertation work.

Keywords: road transport; road traffic safety; freight transportation; relative position and parameters of movement; street and road network; intelligent transport system; criteria and indicators of efficiency; optimization; positioning and monitoring; polarimetric measurement method; accuracy, reliability and timeliness of the information; traffic flow.

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published:

Monographs:

1. Al-Ammouri A., Klochan A. Application of the polarimetric measurement method to determine the relative spatial position of vehicles. Actual directions of development of technical and production potential of the national economy : monograph / ed. by V. Pinchuk, G. Prokudin. Dnipro, 2021. P. 219–233. URL: <https://drive.google.com/file/d/12zFHpMg33GRegRJS5woGi8FSPOVQT5tI/view> (date of access: 19.09.2023).

Publications in scientific periodicals that are included in the Scopus or Web of Science scientometric databases:

2. Aviation Navigation with Use of Polarimetric Technologies / A. Klochan et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2017. Vol. 2, no. 3. P. 67–72. URL: <https://doi.org/10.25046/aj020310> (date of access: 01.10.2023).

Publications in scientific periodicals of foreign countries:

3. Probabilistic models reliability of information and control systems / A. Al-Ammouri et al. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2018. Vol. 3, no. 1. P. 60–69. URL: <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2018.3-1.6> (date of access: 01.10.2023).

Publications in scientific professional publications of Ukraine:

4. Methods for improving the data reliability in information and control systems / A. Al-Ammouri et al. *Electronics and control systems*. 2018. Vol. 4, no. 58. P. 107–114. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.58.13506> (date of access: 01.10.2023).

5. Klochan A. Ye. Mathematical Model of Polarimetric Aircraft Landing System. *Applied Questions of Mathematical Modelling*. 2020. Vol. 2.1, no. 3. P. 128–

141. URL: <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.12>. (date of access: 12.09.2023).

6. Malysh M., Kulish M., Klochan A. Remote Control of Transport. The National Transport University Bulletin. Series «Technical sciences». 2022. Vol. 1, no. 51. P. 275–280. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-275-280> (date of access: 02.10.2023).

Scientific works of approbation character:

7. Klochan A., Al-Ammouri A., Dmytrychenko A. Polarimetric Technologies for Object's Attitude Sensing. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*: Proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference, Kyiv, 16–18 April 2019. Kyiv, 2019. P. 712–717.

8. Fundamentals of the Polarimetric UAV Landing System / A. Klochan et al. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*: Proceedings of 2019 IEEE 5th International Conference, Kyiv, 22–24 October 2019. Kyiv, 2019. P. 712–717. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8943830> (date of access: 02.10.2023).

9. Methods for Increasing the Reliability of Information in Control Systems / A. Al-Ammouri et al. *Information technologies and interactions: V International scientific and practical conference*, Kyiv, 20–21 November 2018. Kyiv, 2018. P. 25–26.

10. Al-Ammouri A., Klochan A. Polarimetric System for Measuring Piloting and Navigation Parameters. *Problems of Development the Global System of Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management CNS/ATM* : Scientific and Technical Conference, Kyiv, 21–23 November 2016. Kyiv, 2016. P. 60.

11. Klochan A.Ye., Tymchenko O.P., Subbotyna V.K., Polarimetric Method for Determining the Direction on a Source of Polarized Radiation. *Conference of Professors and Teaching Staff, Scientists, Graduate Students and Students: 73-rd Scientific-Practical Conference*, Odesa, 12-14 December 2018. Odesa, 2018. P. 44-46.

12. Klochan A.Ye., Abdulsalam Hafed I.S., Verkhovetska I.M. Polarimetric Technologies in Intelligent Robotic Complexes. *Integrated Intelligent Robotic Complexes (IIRTK-2018)*: 11-th International Scientific and Technical Conference, Kyiv, 22-23 May 2018. Kyiv, 2018. P. 79-80

13. Klochan A. Ye. Mathematical Model of Intensity Distribution of Linearly Polarized Radiation after Falling on a Dielectric Plate. *Conference of Professors and Teaching Staff, Graduate Students, Students and Employees of Separate Structural Units of the University : LXXV Scientific Conference*, Kyiv, 15-17 May 2019. Kyiv, 2019. P. 94. URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view> (date of access: 02.10.2023).

14. Klochan A., Al-Ammouri A., Tronko V. Polarimetric Technologies for Determination the Moving Objects Relative Position. *Electronics and Applied Physics: XV International Conference*, Kyiv, 22-26 October 2019. Kuiv, 2019. P. 132-133.

15. Klochan A. Ye., Al-Ammouri A.N. Improving the Safety of Unmanned Vehicles by using Polarimetric Measurement Methods. *Current State and Prospects of IoT Development: All-Ukrainian Scientific and Technical Conference*, Kyiv, 3 April 2020. Kyiv. 2020. P. 135-137. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/l_2028_80879534.pdf (date of access: 02.10.2023).

16. Klochan A. Ye., Verhovetska I.M. Algorithm for Determining the Relative Spatial Position of Two Objects with Using Polarimetric Technologies. *LXXVI Scientific Conference of Professors and Teaching Staff, Graduate Students, Students and Employees of Separate Structural Units of the University, 15-17 May 2020 / National Transport University*. Kyiv. 2020. P. 94. URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWiv/view> (date of access: 02.10.2023).

17. Klochan A. Ye. Remote Determination of the Relative Spatial Position of the Transport System Elements with using Polarimetric Measurement Methods.

Conference of Professors and Teaching Staff, Graduate Students, Students and Employees of Separate Structural Units of the University : LXXVII Scientific Conference, Kyiv, 12-14 May 2021. Kyiv. 2021. P. 68-69. URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view (date of access: 02.10.2023).

18. Klochan A. Ye. Polarimetric Methods for Determining the Piloting and Navigation Parameters of the Objects' Relative Position. *Conference of Professors and Teaching Staff, Graduate Students, Students and Employees of Separate Structural Units of the University : LXXVIII Scientific Conference*, Kyiv, 2-4 November 2022. Kyiv. 2022. P. 66. URL: <https://drive.google.com/file/d/1yhVlySe-r3EHbJt98UoRZEW94NhxOzk7/view> (date of access: 02.10.2023).

19. Klochan A. Ye., Zavarzina V. V., Honchar P. O. Place of Positioning and Monitoring in Increasing Road Safety. *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort : International Scientific Conference*, Kyiv, 29-30 November 2022. Kyiv. 2022. P. 169 – 172. URL: <https://sites.google.com/ntu.edu.ua/its-esqc-ua/матеріали-конференції> (date of access: 02.10.2023).

20. Klochan A. Ye. Polarimetric Method for Determining the Vehicles' Relative Spatial Position. *Current State and Prospects of IoT Development : All-Ukrainian Scientific and Technical Conference*, Kyiv, 7 April 2023. Kyiv. 2023. P. 157-159. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2626_10735028.pdf?file=p_2626_10735028.pdf (date of access: 02.10.2023).

21. Klochan A. Ye., Zavarzina V. V. Indicators for Assessing the Effectiveness of Positioning and Monitoring on Road Transport. *Conference of Professors and Teaching Staff, Graduate Students, Students and Employees of Separate Structural Units of the University : LXXIX Scientific Conference*, 17-19 May 2023. Kyiv. 2023. P. 99-100. URL: <https://drive.google.com/file/d/1ZP8ANZsGcZTzASczTixpto6w2MKfDwt5/view> (date of access: 02.10.2023).

Patents and copyright certificates:

22. Polarimetric Method for Determining the Direction on Source of Polarized Optical Radiation : patent 118499 Ukraine : G01S 17/00, G01S 17/06. No. u201702129; applied on 06.03.2017; published on 10.08.2017, Bulletin no. 15. 4 p. URL: <https://uapatents.com/6-118499-polyarimetrichnijj-sposib-viznachennya-napryamku-na-dzherelo-polyarizovanogo-optichnogo-viprominyuvannya.html> (date of access: 12.10.2023).

23. Computer program "Calculation of the Spatial Position of the Aircraft during Landing Using the Polarimetric Landing System" ("CAPLS"): copyright certificate 96562 Ukraine / A. Ye. Klochan, A. Al-Ammouri. 2020 p.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	27
ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ I АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ	37
1.1. Статистичний аналіз безпеки дорожнього руху на автомобільному транспорті.	42
1.2. Напрямки підвищення безпеки дорожнього руху на автомобільному транспорті.	46
1.3. Поняття та методи позиціонування і моніторингу на автомобільному транспорті.	52
1.4. Системи та підходи до позиціонування і моніторингу на автомобільному транспорті.	61
Висновки по розділу 1.	67
РОЗДІЛ II ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ	69
2.1. Фізичні основи поляриметричних вимірювань.	70
2.2. Розподіл інтенсивності лінійно поляризованого променя після його падіння на діелектричну пластину	74
2.3. Зв'язок між азимутами площини поляризації падаючого та двічізаломленого променів.....	84
2.4. Поляриметричний метод визначення напрямку на джерело лінійно поляризованого випромінювання.....	89
2.5. Вплив середовища розповсюдження на характеристики лінійно поляризованого променя	98
Висновки по розділу 2	103
РОЗДІЛ III ПОЛЯРИМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДНОСНОГО ПОЛОЖЕННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ.....	106
3.1. Поляриметрична модель визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ на вулично-дорожній мережі.....	109
3.2. Поляриметрична модель визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ на вулично-дорожній мережі.....	120

3.3. Поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на вулично-дорожній мережі.	125
3.4. Вдосконалена поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ.	132
Висновки по розділу 3	142
РОЗДІЛ IV ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	144
4.1. Поляриметричний метод позиціонування та моніторингу АТЗ	144
4.2. Підвищення ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті за допомогою поляриметричного методу	150
4.2.1 Критерії та показники оцінки ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті.	151
4.2.2. Підвищення достовірності інформації в системі позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті	159
4.3. Інтелектуальна система управління автотранспортним засобом щодо попередження виникнення дорожньо-транспортної пригоди.....	175
Висновки по розділу 4	183
ВИСНОВКИ.....	185
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	188
ДОДАТОК А Список основних праць здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	204
ДОДАТОК Б Патент на корисну модель та свідоцтво авторського права на комп'ютерну програму	209
ДОДАТОК В Акти та довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи	211

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АПП – азимут площини поляризації;
АТЗ – автотransпортний засіб;
АТ – автомобільний транспорт;
БДР – безпека дорожнього руху;
ВДМ – вулично-дорожня мережа;
ДІ – джерело інформації;
ДТП – дорожньо-транспортна пригода;
ДТС – дорожньо-транспортна система;
ІНС – інерційна навігаційна система;
ІДПП – ізотропна діелектрична плоскопаралельна пластина;
ІР – інформаційне резервування;
ІТС – інтелектуальна транспортна система;
ІУС – інформаційно-управляюча система;
КПП – кута падіння променю;
ЛПП – лінійно поляризований промінь;
ПМ – позиціонування та моніторинг;
ПМВ – поляриметричний метод вимірювання;
ПДР – правила дорожнього руху;
СНС – супутникова навігаційна система;
ТЗ – транспортний засіб;

ВСТУП

Одними з важливих аспектів подальшого розвитку автотранспортної галузі в напрямку підвищення безпеки дорожнього руху є вдосконалення інформаційного забезпечення учасників дорожнього руху та автоматизація процесів попередження та запобігання виникнення дорожньо-транспортних пригод. Цього можна досягнути шляхом розробки та впровадження комплексної системи підтримки прийняття рішення, яка б дозволила забезпечити завчасне попередження про можливість виникнення зіткнення в режимі реального часу. При цьому, важливими параметрами, які потребують визначення є положення автотранспортного засобу відносно інших учасників дорожнього руху та елементів дорожньо-транспортної інфраструктури, а також параметри їх відносного руху. До таких параметрів можна віднести повздовжній та боковий інтервал руху, швидкість та прискорення зближення, проміжок часу до потенційної точки зіткнення, напрямок та відносне положення векторів руху автотранспортних засобів та інші.

Актуальність теми. Незважаючи на вдосконалення дорожньо-транспортної мережі, підвищення надійності автотранспортних засобів (АТЗ), впровадження систем підтримки прийняття рішень та автоматизації процесів керування АТЗ, щороку в результаті дорожньо-транспортних пригод (ДТП) лише в Європейському регіоні гине понад 80 тисяч людей та понад 1 мільйон людей в світі. Таким чином, питання дослідження напрямків підвищення безпеки дорожнього руху є актуальним.

Дослідженню питань підвищення безпеки дорожнього руху та оптимізації маршруту руху автотранспортних засобів, зокрема при виконанні вантажних перевезень, присвячені роботи Данчука В.Д., Бакуліч О.О., Прокудіна Г.С., Давідіча Ю.О., Кисельова В.Б., Поліщука В.П., Аль-Амморі Алі, Оліскевича М.С., Гульчак О.Д., Askaah W., Dalai B., Liu Z., Rundmo T., Zhao F. та інших.

Серед основних напрямків підвищення безпеки дорожнього руху можна виділити наступні – підвищення безпеки доріг та дорожньої інфраструктури, підвищення безпеки АТЗ, забезпечення безпечної поведінки учасників

дорожнього руху та інші. Визначення просторового положення АТЗ відносно інших елементів дорожньо-транспортної системи та відносних параметрів їх руху складають окремий напрямок підвищення безпеки дорожнього руху, який на даний момент не має широкого застосування. До існуючих систем, які реалізують даний напрямок можна віднести застосування GPS-систем та далекомірів в поєднанні з бортовими комп'ютерами. При цьому відбувається визначення лише положення АТЗ без врахування напрямку вектору його руху та не забезпечується формування сигналів доуправління для попередження та уникнення ДТП. Таким чином, невирішеним залишається питання визначення взаємного просторового положення учасників дорожнього руху та здійснення процесів позиціонування та моніторингу на АТ для забезпечення підвищення безпеки дорожнього руху (БДР), вирішенню яких і присвячуються дана робота.

Актуальність розгляду питання дослідження місця позиціонування та моніторингу у підвищенні безпеки дорожнього руху та підвищення ефективності позиціонування та моніторингу обґрунтовується необхідністю вирішення проблеми визначення відносного просторового положення учасників дорожнього руху та відносних параметрів їх руху з метою попередження виникнення ситуації просторово-часового перетину траєкторій їх руху та надання відповідних рекомендацій щодо уникнення таких ситуацій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до «Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року», яка була схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 430-р від 30 травня 2018 року, планами науково-дослідних робіт НТУ в рамках наукової теми кафедри «Інформаційно-аналітична діяльність та фізико-математичні методи інформаційної безпеки на транспорті» (№ держреєстрації 0122U114614), «Методи та інформаційні технології оптимізації процесів транспортно-логістичного управління доставкою вантажів в інтелектуальних транспортних системах», (№ держреєстрації 0122U000966), проекту Національного фонду досліджень України за напрямом «Наука для відбудови України в воєнний та повоєнний період» на тему «Розробка моделі навантаження

за фактичними параметрами великовагового рухомого складу для визначення вантажно-пропускної здатності автодорожніх мостів при їх відновленні та експлуатації у воєнний і повоєнний стан» (Реєстраційний номер заявки 2022.01/0142).

Мета дисертаційної роботи полягає у розробці та застосуванні поляриметричного методу позиціонування і моніторингу автотransпортних засобів для підвищення безпеки дорожнього руху при перевезенні вантажів та пасажирів. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні **завдання**:

1. Визначити основні напрямки підвищення безпеки дорожнього руху в сучасних умовах та проаналізувати існуючі підходи, методи та засоби позиціонування і моніторингу на автомобільному транспорті.

2. Обґрунтувати перспективність розробки та використання поляриметричного методу вимірювання орієнтаційних та позиційних параметрів відносного положення автотransпортних засобів.

3. Розробити поляриметричний спосіб визначення напрямку на джерело випромінювання лінійно поляризованого когерентного світла та систему, що його реалізує.

4. Розробити поляриметричний метод позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті, що базується на розробленому поляриметричному способі та запропонованих поляриметричних моделях визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення автотransпортних засобів на вулично-дорожній мережі.

5. Визначити напрямки підвищення ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті на основі запропонованого поляриметричного методу.

6. Розробити інтелектуальну систему управління автотransпортним засобом щодо попередження виникнення дорожньо-транспортної пригоди, що базується на розробленому методі позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті.

Об'єктом дослідження є процеси визначення взаємного позиційного та орієнтаційного положення автотранспортних засобів.

Предметом дослідження є методи та моделі визначення позиційного та орієнтаційного положення автотранспортних засобів.

Гіпотеза. Підвищення ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті: підвищення показників точності, достовірності та своєчасності інформації про взаємне просторове положення елементів дорожньо-транспортної системи та параметрів їх відносного руху, дозволить визначити оптимальні траєкторії руху автотранспортних засобів з метою попередження виникнення передумов до дорожньо-транспортних пригод.

Методи дослідження. У роботі застосовуються поляриметричний метод вимірювання, методи засновані на апараті теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії інформації, методах оптимізації. Реалізація цих підходів проведена через математичне моделювання процесу розповсюдження лінійно поляризованого променя після падіння на діелектричну пластину, при розробці поляриметричних моделей визначення лінійних, кутових та лінійно-кутових параметрів відносного положення автотранспортних засобів та для розробки показників ефективності системи позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті

Наукова новизна отриманих результатів полягає в вирішенні науково-практичного завдання, яке пов'язане з підвищенням ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті за рахунок визначення відносного позиційного та орієнтаційного положення автотранспортних засобів за допомогою розробленого поляриметричного методу. При цьому, **вперше:**

- запропоновано поляриметричний метод позиціонування на автомобільному транспорті, який на відміну від більшості існуючих дозволяє визначити, не лише, відносне позиційне, але й взаємне орієнтаційне положення автотранспортних засобів;

удосконалено:

- поляриметричний метод визначення напрямку на джерело лінійно поляризованого випромінювання шляхом використання модулятора в блоці випромінювання, що дозволяє скоротити кількість каналів вимірювання та зменшити відносну похибку вимірювання азимуту на АТЗ з блоком випромінювання в горизонтальній та вертикальній площинах, спричинену середовищем розповсюдження.

- способи оцінки достовірності інформації систем паралельного інформаційного резервування шляхом дослідження чотирьох-параметричного графу станів системи визначення контрольованого параметру, що дозволяє знаходити ймовірності коректного визначення наявності та відсутності контрольованої події;

набула подальшого розвитку:

- система критеріїв та показників оцінки ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті, шляхом розгляду схеми управління досліджуваним параметром, на основі якої показано, що ефективність позиціонування та моніторингу залежить від ефективності системи управління рухом транспортного засобу.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці поляриметричного методу визначення позиційних та орієнтаційних параметрів відносного положення автотransпортних засобів, а також у вдосконаленні способів оцінки достовірності інформації систем паралельного інформаційного резервування, що дозволяє визначити ймовірності коректного визначення наявності та відсутності контрольованої події. Основні науково-практичні результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету МОН України (Додаток В), отримано патент на корисну модель «Поляриметричний спосіб визначення напрямку на джерело поляризованого оптичного випромінювання» та свідоцтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму (Додаток Б).

Результати дисертаційної роботи щодо способу визначення відхилення положення транспортного засобу від оптимальної траєкторії руху були впроваджені у науково-дослідну діяльність Науково-методологічного центру процесного аналізу та у науково-дослідну роботу Центру безпеки дорожнього руху ДП «ДерждорНДІ» щодо критеріїв та показників оцінки ефективності моніторингу ДТП з метою прогнозування та попередження їх виникнення (Додаток В).

Особистий внесок здобувача. Теоретичні положення, розробки та висновки, які виносяться на захист, є результатом самостійного наукового дослідження автора. Теоретичні, методологічні і концептуальні розробки, які зазначені в розділі «Наукова новизна одержаних результатів» отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає в наступному:

- в [1] автором запропоновано принцип визначення взаємного просторового положення об'єктів на автомобільному транспорті, систему, що його реалізує та алгоритм її роботи;
- в [2] автором запропоновано поляриметричний навігаційний метод визначення координат та систему, що його реалізує;
- в [3] автором проведене математичне моделювання процесу функціонування інформаційно-управляючої системи, яка описується Марковським випадковим процесом;
- в [4] автором проведе математичне моделювання роботи пристрою послідовно-паралельного інформаційного резервування;
- в [5] автору належить дослідження впливу основних характеристик атмосфери на якість віддаленого контролю параметрів роботи транспорту;
- в [6] автором запропоновано поляриметричний принцип визначення взаємного просторового положення об'єктів та систему, що його реалізує, а також автором проведене математичне моделювання роботи запропонованої системи і розраховані параметрів її роботи;

- в [7] автором запропоновано поляриметричну навігаційну систему та алгоритм проведення вимірювань;
- в [8] автору належить дослідження переваг та недоліків послідовного, паралельного та комбінованого інформаційного резервування;
- в [9] автором запропонована поляриметрична пілотажно-навігаційна система;
- в [10] автором запропоноване застосування поляриметричного методу вимірювання для визначення відносного просторового положення між антеною передавача та антеною приймача в системах управління і зв'язку;
- в [11] автором запропоноване застосування поляриметричних технологій в робототехнічних комплексах для визначення положення робота чи його маніпулятора в три-координатному просторі;
- в [12] автору належить розробка оптичного каналу вимірювання з модулятором та алгоритму проведення вимірювань;
- в [13] автором визначені основні стримуючі фактори для розвитку та впровадження безпілотного транспорту;
- в [14] автором запропоновано використання оптичного каналу вимірювання з модулятором в блоці випромінювання та двома блоками вимірювання для однозначного визначення взаємного кутового просторового положення двох об'єктів, зокрема автотранспортних засобів;
- в [15] автором обґрунтована необхідність визначення взаємного просторового положення учасників дорожнього руху з метою підвищення безпеки дорожнього руху;
- в [16] автором визначені показники оцінки ефективності позиціонування та моніторингу з точки зору безпеки дорожнього руху;
- в [17] автору належить формула та опис корисної моделі;
- в [18] автору належить реалізація запропонованої комп'ютерної програми на мові програмування Java;
- роботи [19], [20], [21], [22], [23] виконані автором одноосібно.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи та результати наукових розробок доповідались та обговорювались на:

- LXXIII, LXXIV, LXXV LXXVI, LXXVII, LXXVIII, LXXIX науковій конференції професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 роки, м. Київ;
- Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT», 2020, 2023 роки, м. Київ;
- Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт», 2022 рік, м. Київ;
- XXI Міжнародній конференції з математичного моделювання, 2020 рік, м. Херсон ;
- IEEE 4th, 5th, 6th International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)», 2016, 2018, 2020 роки, м. Київ;
- IEEE 4th, 5th International Conference «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)», 2017, 2019 роки, м. Київ;
- IEEE 2nd International Conference «Data Stream Mining & Processing (DSMP)», 2018 рік, м. Львів;
- IEEE 39th International Conference «Electronics and Nanotechnology (ELNANO)», 2019 рік, м. Київ;
- XII, XIII, XIV, XV International Conference «Electronics and Applied Physics» 2016, 2017, 2018, 2019 роки, м. Київ;
- Науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM, 2016, 2018 роки, м. Київ;
- Четвертій Всеукраїнській науково-практичній конференції «ІТ-Перспективи», 2017 рік, м. Кременчук;
- V Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології та взаємодії», 2018 рік, м. Київ;

- 73-й науково-практичній конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів, 2018 рік, м. Одеса;
- Десятій міжнародній науково-практичній конференції «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2018)», 2018 рік, м. Київ.

Публікації. Основні результати по темі дисертаційної роботи опубліковано в 23 наукових працях (додаток А): 1 розділ монографії, 5 статей, з яких 1 стаття у виданні, цитованому у науково-метричній базі Scopus, 15 праць апробаційного характеру, з яких 2 у виданнях, цитованих у науково-метричній базі Scopus, 1 патент на корисну модель, 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається з анотації, переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 112 найменувань, додатків на 10 сторінках, разом з якими її обсяг складає 213 сторінок, робота ілюструється 56 рисунками.

РОЗДІЛ І

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ДОРОЖНЬОГО РУХУ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

Рух автомобільного транспорту (АТ) – це процес переміщення автотранспортних засобів (АТЗ) по дорожньо-транспортній мережі з метою виконання функцій автотранспорту та забезпечення високого рівня БДР. Під БДР на АТ розуміють стан дорожнього руху, який спрямований на збереження та захист здоров'я і життя активних та пасивних учасників дорожнього руху, а також збереження та захист майна і довкілля. Безпека дорожнього руху досягається завдяки використанню комплексу заходів та засобів, а також завдяки дотриманню системи правил дорожнього руху (ПДР). На рівень безпеки дорожнього руху впливає стан динамічної дорожньо-транспортної системи (ДТС), схема якої зображено на рис. 1.1.

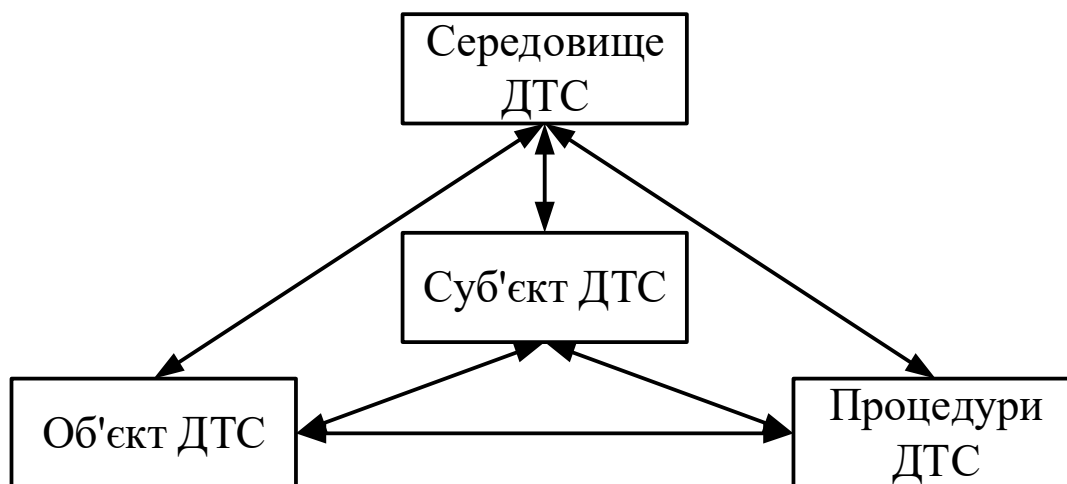


Рисунок 1.1 – Схема дорожньо-транспортної системи

На стан ДТС впливає стан її компонентів та інтерфейсів їх взаємодії [24]. Виділяють наступні компоненти ДТС: суб'єкт, об'єкт, процедури, середовище. Виділяють шість основних двосторонніх інтерфейсів взаємодії компонентів ДТС: «Суб'єкт – Об'єкт», «Суб'єкт – Середовище», «Процедури – Суб'єкт», «Об'єкт – Середовище», «Об'єкт – Процедури», «Середовище – Процедури».

До суб'єктів ДТС відносяться особи, які беруть участь в дорожньому русі: пішоходи та водії різного роду транспортних засобів (ТЗ) – автомобілів, автобусів, велосипедів, самокатів, мотоциклів, моноколів, тощо. До об'єктів ДТС відносяться ТЗ, які застосовуються суб'єктами ДТС та які безпосередньо беруть участь в дорожньому русі. До процедур ДТС відносяться правила та інтерфейси взаємодії суб'єктів та об'єктів ДТС: правила дорожнього руху, технології створення та надання транспортної послуги, процедури управління ТЗ; процедури попередження і ліквідації дорожньо-транспортних пригод (ДТП); процедури надання суб'єкту ДТС інформації про стан та параметри роботи об'єкту ДТС і його систем, тощо. Середовище ДТС ділиться на зовнішнє та внутрішнє. Зовнішнє середовище включає зовнішнє по відношенню до об'єкта ДТС середовище, а внутрішнє - зовнішнє по відношенню до суб'єкта ДТС та внутрішнє по відношенню до об'єкта ДТС середовище. Зовнішнє середовище ділиться на природне та антропогенне. Природне зовнішнє середовище включає метеорологічні умови, час доби, тощо. Антропогенне зовнішнє середовище включає стан дорожнього покриття; завантаженість дорожньої мережі; стан облаштованості доріг системою попереджувальних та сигнальних знаків, тощо. До внутрішнього середовища відносяться мікроклімат, освітленість, ергономічність ТЗ, тощо.

Інтерфейс «Суб'єкт – Об'єкт» визначає яким чином суб'єкт ДТС здійснює управління об'єктом ДТС та процес отримання суб'єктом ДТС інформації про параметри роботи об'єкту ДТС. Прикладами управління об'єктом ДТС є виконання процедур управління ТЗ, вмикання та налаштування систем ТЗ, тощо. Прикладами отримання суб'єктом ДТС інформації про параметри роботи об'єкту ДТС є визначення швидкості та прискорення руху ТЗ, визначення параметрів роботи систем ТЗ, тощо.

Інтерфейс «Суб'єкт – Середовище» визначає яким чином суб'єкти ДТС впливають на середовище ДТС та процес отримання суб'єктом ДТС інформації про середовище ДТС. Прикладами впливу суб'єкту ДТС на середовище ДТС є зміна щільності ТЗ на смузі руху при зміні смуги руху ТЗ, зниження безпеки

середовища ДТС при порушенні Правил дорожнього руху, тощо. Прикладами отримання суб'єктом ДТС інформації про середовище ДТС є зчитування дорожніх знаків, оцінка можливості здійснення обгону, тощо.

Інтерфейс «Процедури – Суб'єкт» визначає яким чином суб'єкти ДТС впливають на процедури ДТС та процедури представлення інформації суб'єкту ДТС і процедури виконання суб'єктом ДТС своїх функцій. Прикладами впливу суб'єктів ДТС на процедури ДТС є вплив індивідуальної техніки водіння суб'єкту ДТС на процедуру витримування інтервалів та дистанцій руху, зміна процедур управління ТЗ в випадку порушення суб'єктом ДТС правил дорожнього руху, тощо. Прикладами впливу процедур ДТС на суб'єкта ДТС є процедури управління ТЗ, процедури надання суб'єкту ДТС інформації про параметри роботи об'єкту ДТС та про стан зовнішнього середовища, тощо.

Інтерфейс «Об'єкт – Середовище» визначає яким чином об'єкти ДТС впливають на середовище ДТС та процес впливу середовища ДТС на стан та характеристики об'єктів ДТС. Прикладами впливу об'єкту на середовище ДТС є утворення заторів за умови, що кількість ТЗ більша за пропускну здатність дороги, зниження пропускну здатності дороги за умови аварійної зупинки ТЗ, тощо. Прикладами впливу середовища ДТС на стан та характеристики об'єктів ДТС є зниження коефіцієнту зчеплення на мокрій дорозі, підвищення зносу деталей конструкції ТЗ при русі по дорозі з вибоїнами, тощо.

Інтерфейс «Об'єкт – Процедури» визначає яким чином стан та характеристики об'єкту ДТС впливають на процедури ДТС та процедури управління об'єктом ДТС. Прикладами впливу стану та характеристик об'єкту ДТС на процедури ДТС є необхідність проведення обгону ТЗ, що рухається з нижчою швидкістю, зліва; збільшення радіусу розвороту для кілька-осьового АТЗ порівняно з одно-осьовим АТЗ, тощо. Прикладами впливу процедур ДТС на об'єкт ДТС є Правила дорожнього руху та процедури управління ТЗ.

Інтерфейс «Середовище – Процедури» визначає яким чином середовище ДТС впливає на процедури ДТС та вплив процедур ДТС на зовнішнє антропогенне середовище. Прикладами впливу середовища ДТС на процедури

ДТС є зниження швидкості руху при поганій видимості або при наявності опадів, перелаштування з двох-смугової на одно-смугову схему руху при наявності ДТП, тощо. Прикладами впливу процедур ДТС на середовище ДТС є формування заторів в одній смузі руху при перелаштуванні ТЗ на поворот, перекриття смуги руху при оформленні ДТП, тощо.

На стан суб'єкту ДТС впливають наступні фактори: фізичні, фізіологічні, психологічні та психосоціальні. Фізичні фактори включають фізичні можливості особи виконувати необхідні задачі. Наприклад, фізична сила, зір, слух та інші. Фізіологічні фактори включають внутрішні фізичні процеси в організмі особи, які впливають на його когнітивні та фізичні характеристики. Наприклад, загальний стан здоров'я, стресовий стан, втома та інші. Психологічні фактори включають психологічний стан особи. Наприклад, впевненість, стрес, мотивація, вміння оцінювати ситуацію та інші. Психосоціальні фактори включають зовнішні до особи соціальні фактори. Наприклад, особисті фінансові проблеми, трудові та особисті конфлікти, політичні, релігійні, культурні процеси, тощо.

На стан об'єкту ДТС впливає технічний стан його систем та компонентів; рівень облаштованості сучасними системами контролю параметрів роботи, системою підтримки прийняття рішень, пілотажно-навігаційними та іншими системами; пристосованість ТЗ до умов експлуатації та інші фактори.

На стан процедур ДТС впливає рівень досконалості та доступності правил дорожнього руху; інтуїтивність, несуперечність та відпрацьованість процедур управління ТЗ та процедур попередження і ліквідації ДТП; актуальність, точність та доступність інформації про стан та параметри роботи систем ТЗ, а також про стан зовнішнього середовища.

На стан внутрішнього середовища ДТС впливає рівень облаштованості та ергономічності ТЗ. На стан антропогенного зовнішнього середовища ДТС впливає стан та облаштованість дорожньо-транспортної мережі. На стан природного зовнішнього середовища впливати неможливо. Для зменшення негативного впливу зовнішнього природного середовища ТЗ та дорожньо-транспортна мережа облаштовується спеціальними системами. Наприклад,

системою освітлення дорожньо-транспортної мережі та фарами ТЗ – для зменшення впливу низької освітленості в темний час доби, склоочисником – для зменшення впливу опадів на видимість, тощо.

На стан інтерфейсів взаємодії компонентів ДТС впливають характеристики процесів їх взаємодії. На стан інтерфейсу «Суб'єкт - Об'єкт» впливають ергономічні характеристики об'єкту ДТС та його органів управління. Інтерфейс «Суб'єкт – Середовище» реалізується через інтерфейс «Суб'єкт – Об'єкт – Середовище», а на його стан впливають ергономічні та експлуатаційно-технічні характеристики об'єкту ДТС. На стан інтерфейсу «Процедури – Суб'єкт» впливають ергономічні характеристики об'єкту ДТС та доступність процедур управління ТЗ. На стан інтерфейсу «Об'єкт – Середовище» впливають експлуатаційно-технічні характеристики об'єкту та середовища ДТС. Інтерфейс «Об'єкт – Процедури» реалізується через інтерфейс «Об'єкт – Суб'єкт – Процедури», а на його стан впливають ергономічні та експлуатаційно-технічні характеристики об'єкту ДТС. Інтерфейс «Середовище – Процедури» реалізується через інтерфейс «Середовище – Об'єкт – Суб'єкт – Процедури», а на його стан впливають ергономічні та експлуатаційно-технічні характеристики об'єкту та середовища ДТС.

Підвищення безпеки руху на автомобільних дорогах є однією із світових пріоритетних задач. Незважаючи на вдосконалення дорожньо-транспортного комплексу та підвищення безпеки руху на автомобільних дорогах, внаслідок дорожньо-транспортних пригод в Європейському регіоні у 2016 загинуло близько 80 тисяч людей, що складає 6% від світової дорожньо-транспортної смертності [25] і її рівень незначно зменшився за останні роки. Основними напрямками забезпечення безпеки дорожнього руху є побудова та обслуговування безпечних доріг та придорожніх смуг; дотримання безпечного швидкісного режиму руху АТЗ; конструювання, побудова та експлуатація безпечних та екологічних АТЗ; стандартизація та нормування правил дорожнього руху; забезпечення безпеки всіх учасників дорожнього руху, тощо.

1.1. Статистичний аналіз безпеки дорожнього руху на автомобільному транспорті.

У відповідності до статистичної інформації Державної служби статистики України, щодо обсягу вантажних [26] та пасажирських [27] перевезень автомобільні перевезення є одними з переважаючих. Переважаючий вклад автомобільних перевезень в загальний обсяг перевезень характерний і для інших країн світу. Це обумовлено наступними причинами: підвищена різноманітність технічних характеристик АТЗ; високий рівень розвиненості термінальної, дорожньо-мережевої та сервісно-технічної інфраструктури; високий рівень різноманітності ринку технічних, енергетичних та трудових ресурсів для АТ порівняно з іншими видами транспорту та інші. При цьому, основними перевагами використання АТ є гнучкість, маневреність, прохідність та швидкість доставки, раціональність перевезення на різні відстані та інші, а недоліками – залежність продуктивності перевезень від стану дорожньої мережі та погодних умов, низький рівень екологічності, відносно висока собівартість та низька вантажопідйомність, висока енерго- і ресурсоемність та інші.

Дослідження питання забезпечення БДР на АТ відбувається на глобальному та регіональному рівні. У відповідності до щорічних звітів по аналізу аварійності Директорату з безпеки на транспорті Міністерства інфраструктури України [28], [29], [30], [31], [32] за останні роки спостерігається переважання кількості аварійних подій на АТ над аварійністю на інших видах транспорту, як це показано на рис. 1.2. Також за останні роки спостерігається значне переважання кількості травмованих під час аварійних подій на автотранспорті порівняно з іншими видами транспорту, як показано на рис. 1.3. Кількість загиблих в результаті аварійних подій на АТ за останні роки незначно поступається кількості загиблих на залізничному транспорті, як це показано на рис. 1.4. Проаналізувавши рис. 1.2. – 1.4. можна зробити наступні висновки: АТ характеризується найвищим рівнем аварійності серед всіх видів транспорту; за останні роки спостерігається незначне зменшення кількості аварійних подій, а також кількості загиблих та травмованих на АТ.

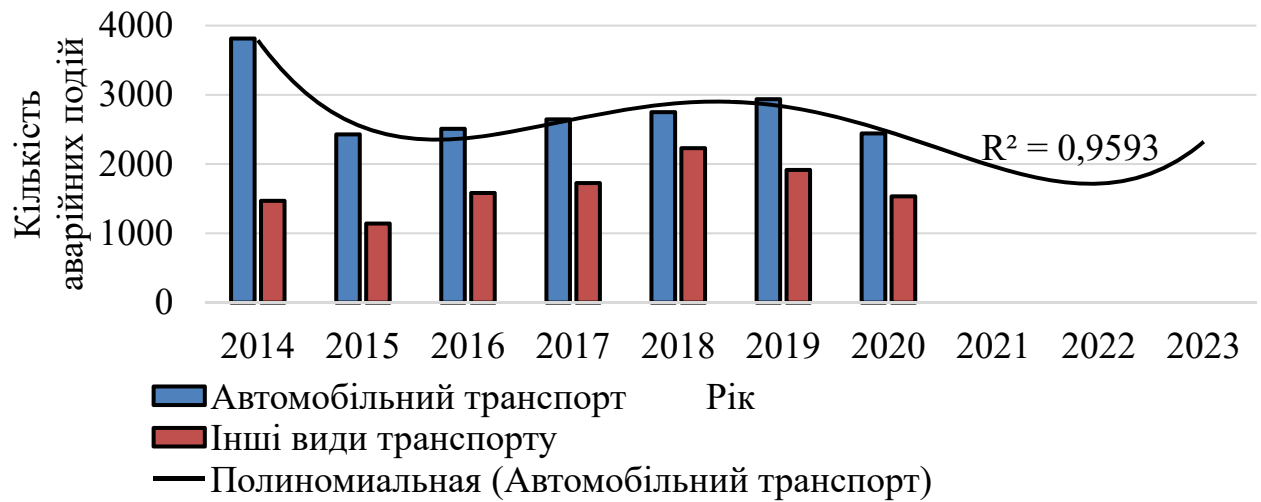


Рисунок 1.2 – Кількість аварійних подій на транспорті в Україні

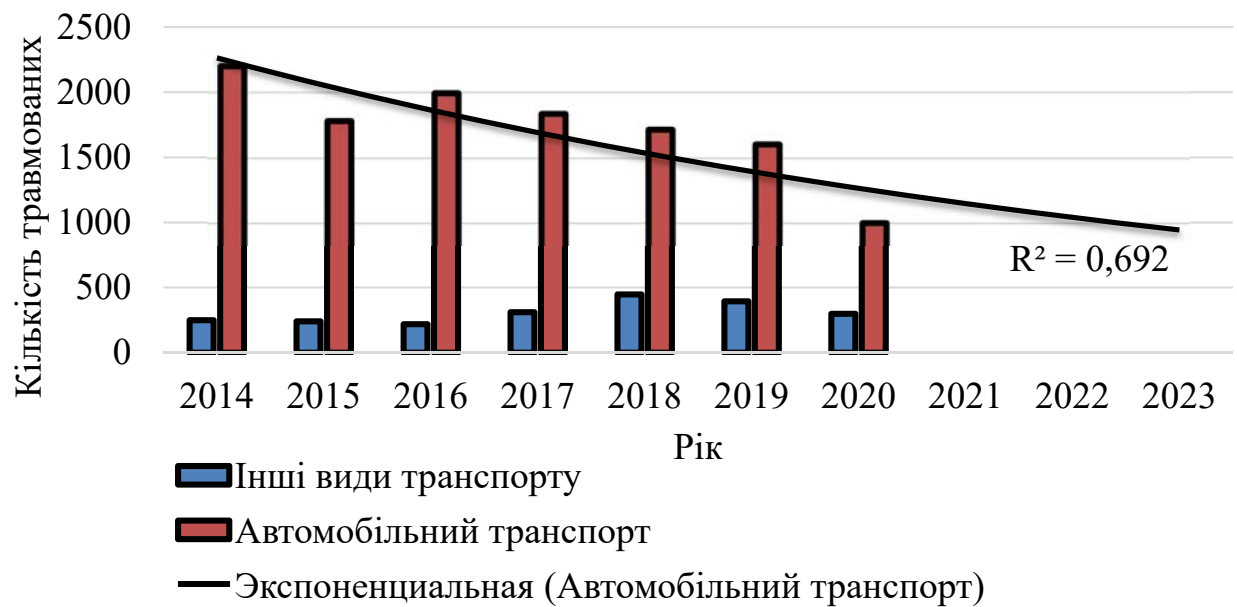


Рисунок 1.3 – Кількість травмованих під час аварійних подій на транспорті в Україні

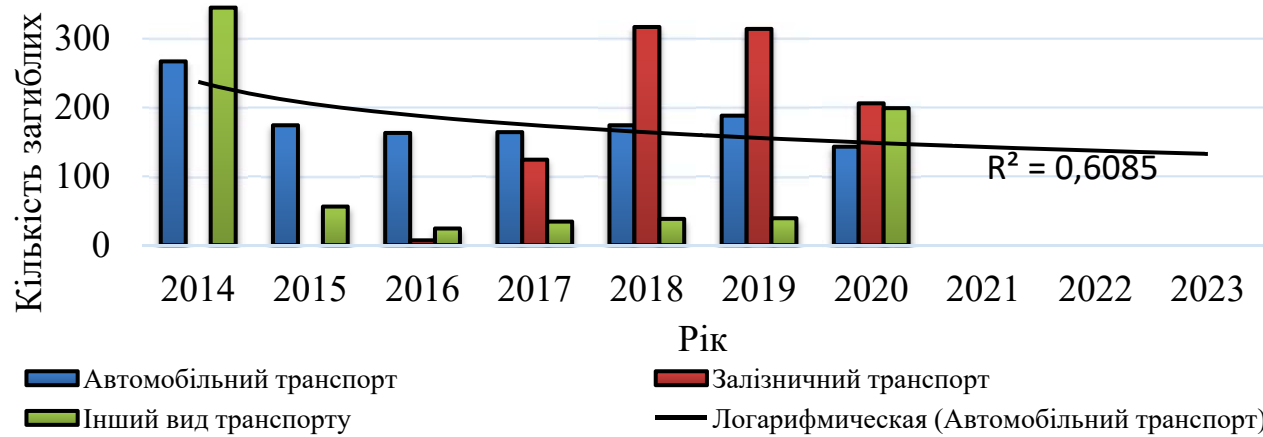


Рисунок 1.4 – Кількість загиблих під час аварійних подій на транспорті в Україні

Серед основних причин виникнення ДТП на АТ можна виділити наступні: недотримання безпечних дистанцій та інтервалів руху; порушення правил маневрування; перевищення безпечної швидкості руху; порушення правил проїзду залізничних переїздів, зупинок громадського транспорту, перехресть; порушення правил обгону; виїзд на смугу зустрічного руху; експлуатація технічно несправного ТЗ та інші. Розподіл ДТП в Україні за 2022 рік по причині їх виникнення отриманий на основі звіту по аналізу стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні [33] Державної служби України з безпеки на транспорті приведений на рис. 1.5. Серед основних видів ДТП на АТ можна виділити наступні: попутне зіткнення, зустрічне зіткнення, бокове зіткнення, наїзд на нерухомий АТЗ, наїзд на пішохода, наїзд на перешкоду та інші види ДТП. Розподіл ДТП за видами в Україні за 2022 рік отриманий на основі звіту по аналізу стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні Державної служби України з безпеки на транспорті приведений на рис. 1.6.

Проаналізувавши діаграму, зображену на рис. 1.5, можна зробити наступні висновки. Основними причинами виникнення ДТП в Україні за 2022 рік було недотримання безпечної дистанції та інтервалів руху, порушення правил маневрування та перевищення безпечної швидкості руху.

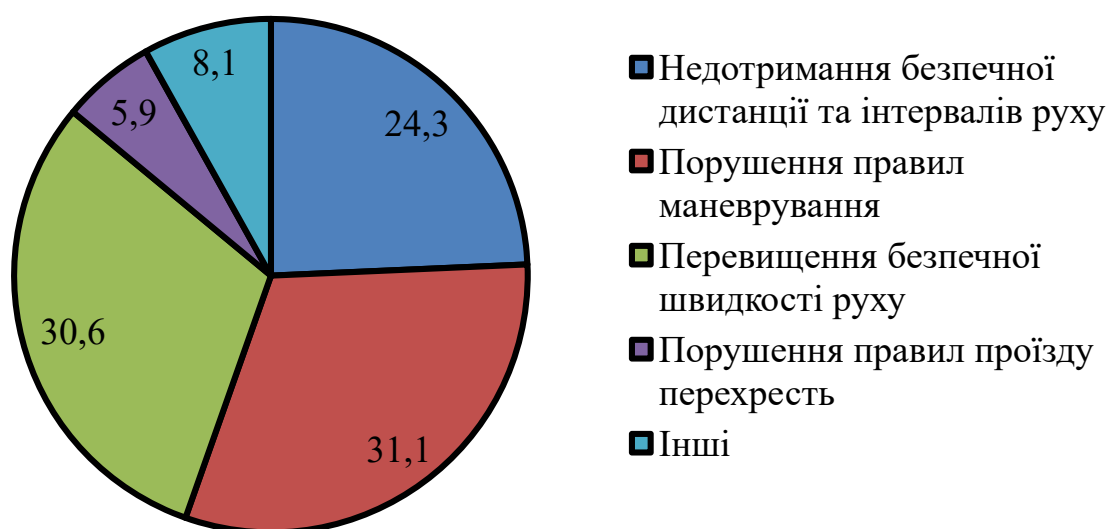


Рисунок 1.5 – Розподіл ДТП на АТ по причині їх виникнення за 2022 рік

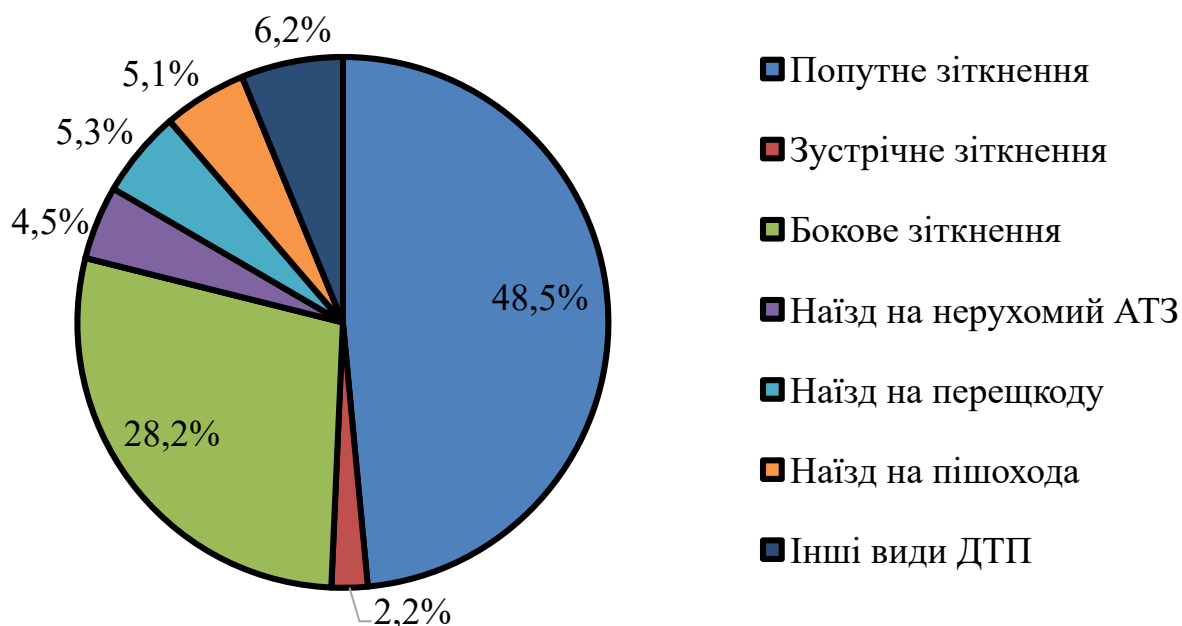


Рисунок 1.6 – Розподіл ДТП на АТ по типу ДТП за 2022 рік

Проаналізувавши діаграму, зображену на рис. 1.6 можна зробити наступні висновки. Основними видами ДТП на АТ в Україні за 2022 рік були попутне та бокове зіткнення, які складають понад 75% ДТП.

Зазначений розподіл видів ДТП та основних причин виникнення ДТП на АТ носить глобальний характер та притаманний і для попередніх років, як відмічено в [34], [35], [36], [37]. Основною передумовою виникнення зазначених причин виникнення ДТП є неправильне визначення взаємного просторового положення ТЗ один відносно одного та відносно елементів дорожньо-транспортної інфраструктури, а також неврахування параметрів їх взаємного руху. Однією з основних причин бокового, зустрічного та попутного зіткнення, які характеризуються найбільшою аварійністю є просторово-часовий перетин траєкторій руху АТЗ. Це в свою чергу зумовлене недостатньою точністю визначення взаємного просторового положення ТЗ та параметрів їх взаємного руху, а також відсутністю автоматичної системи уникнення зіткнень або системи попередження про можливість зіткнення. А однією з основних причин наїзду АТЗ на пішохода, перешкоду або нерухомий АТЗ є відсутність широкого застосування систем попередження про зіткнення або систем визначення наявності сторонніх об'єктів на шляху руху АТЗ.

1.2. Напрямки підвищення безпеки дорожнього руху на автомобільному транспорті.

В результаті статистичного аналізу безпеки руху на транспорті було показано, що автомобільні перевезення забезпечують значну частину обсягу вантажних та пасажирських перевезень. При цьому, автомобільні перевезення характеризуються найбільшою кількістю аварійних подій та кількістю травмованих і загиблих в ДТП, порівняно з іншими видами транспорту. Основними видами ДТП на АТ є попутне та бокове зіткнення з іншим АТЗ, а основними причинами їх виникнення – недотримання безпечної дистанції та інтервалів руху, порушення правил маневрування та перевищення безпечної швидкості руху АТЗ. Основні напрямки підвищення рівня БДР в Україні, у відповідності до [38] приведені на рис. 1.7.



Рисунок 1.7 – Напрямки підвищення рівня безпеки дорожнього руху на АТ

Державне управління в сфері БДР передбачає аналіз, вдосконалення, розробку та реалізацію нормативно-правової актів в галузі БДР: розмежування повноважень центральних органів влади; запровадження системи управління БДР; аналіз та вдосконалення законодавства [39]; проведення наукових та науково-технічних досліджень; вдосконалення системи страхування; впровадження ризико-орієнтованого підходу управління БДР; підвищення вимог до перевізників; навчання співробітників, щодо практики підвищення БДР; впровадження сучасних технологій проектування та будівництва об'єктів дорожньо-транспортної інфраструктури та проведення інших заходів.

Проведення обліку та аналізу даних стосовно ДТП передбачає вдосконалення підходів до оцінки даних щодо ДТП: вдосконалення та впровадження систем збору та обробки даних щодо ДТП з подальшим їх науковим аналізом, проведення комплексного аудиту з БДР, розробка порядку проведення технічного розслідування ДТП, створення системи реєстрації та інформування про місця концентрації ДТП та проведення інших заходів.

Підвищення безпеки доріг та дорожньої інфраструктури передбачає приведення дорожньої інфраструктури та нормативно-правових актів в галузі будівництва і реконструкції доріг та дорожньої інфраструктури до вимог БДР: гармонізацію стандартів проектування та будівництва доріг та дорожньої інфраструктури; проведення аудиту БДР та її оцінки з точки зору розвитку міст [40], [41]; інтеграцію засобів автоматизації та інформаційно-комунікаційних технологій з ТЗ, транспортною інфраструктурою та учасниками дорожнього руху [42]; розвиток велосипедної інфраструктури; визначення інфраструктурних факторів в місцях концентрації ДТП [43], [44]; ліквідацію місць концентрації ДТП та аварійно-небезпечних ділянок; створення мережі зон відпочинку водіїв та проведення інших заходів.

Підвищення безпеки АТЗ передбачає вдосконалення процедури допуску АТЗ до участі в дорожньому русі та підвищення безпеки АТЗ: спрощення процедур допуску АТЗ до участі у дорожньому русі; вдосконалення процедур сертифікації АТЗ, в тому числі з точки зору екологічної безпеки; реформування системи контролю за технічним станом АТЗ; впровадження механізмів контролю технічного стану АТЗ під час їх експлуатації; використання новітніх технологій для підвищення безпеки на АТ [45] та проведення інших заходів.

Покращення медичного забезпечення БДР передбачає приведення нормативно-правових актів в галузі медичного забезпечення БДР до міжнародних стандартів та їх реалізацію: приведення нормативно-правових актів в галузі медичного огляду та психофізіологічної експертизи до європейських стандартів; приведення стандартів навчання навичкам надавання домедичної допомоги до програм Міністерства охорони здоров'я; забезпечення

доступності та високої якості проведення профілактичних та періодичних оглядів кандидатів у водії та водіїв АТЗ; створення єдиного інформаційного простору у сфері медичного забезпечення БДР та проведення інших заходів.

Підвищення безпеки перевезення пасажирів та вантажів комерційним АТ передбачає вдосконалення та реалізацію нормативно-правових актів в сфері надання транспортних послуг: вдосконалення законодавства в галузі БДР під час надання транспортних послуг; проектування інфраструктури міського та міжміського транспорту з точки зору розвитку міст [46], [47]; врахування стану та режиму роботи працівників [48], [49]; здійснення державного нагляду та контролю за дотриманням вимог БДР під час надання транспортних послуг; реалізацію контролю за габаритно-вагомими параметрами АТЗ; забезпечення контролю відповідності АТЗ міжнародним вимогам; впровадження дистанційного моніторингу руху АТЗ; запровадження програм тренування щодо покращення навичок безпечного водіння; впровадження системи управління БДР компаніями, що надають транспортні послуги та проведення інших заходів.

Забезпечення безпечної поведінки учасників дорожнього руху передбачає популяризацію безпечної поведінки на дорозі: включення до навчальних програм питань з БДР; проведення соціальних компаній з популяризації дотримання ПДР [50]; перегляд навчальних програм з вивчення правил безпечної поведінки на дорозі та проведення роз'яснювальних робіт; розробка та видання посібників з питань БДР та проведення інших заходів.

Проведення заходів регулювання та управління наслідками ДТП передбачає вдосконалення системи виклику та реагування у разі ДТП та підвищення професійної кваліфікації та підготовки працівників відповідних рятувальних служб: впровадження єдиної системи екстреної допомоги населенню; обладнання ТЗ приладами автоматичного подання сигналу про екстрену допомогу; впровадження системи цифрового радіозв'язку в підрозділах ДСНС; удосконалення матеріально-технічної бази підготовки підрозділів рятувальних служб; розробку інтерактивної карти доріг; створення системи управління подолання наслідків ДТП [51] та проведення інших заходів.

Забезпечення дотримання чинних ПДР передбачає вдосконалення системи контролю за їх дотриманням: проведення вибірових перевірок водіїв; вдосконалення порядку обліку порушень ПДР; проведення процедур контролю та перевірки дотримання основних елементів безпеки; здійснення контролю за дотриманням ПДР всіма учасниками руху; вдосконалення системи автоматичної фіксації порушення ПДР та проведення інших заходів.

Підвищення безпеки руху на АТ можливе лише завдяки всебічному вдосконаленню ДТС, яке досягається завдяки комплексному покращенню характеристик її компонентів та інтерфейсів їх взаємодії. При цьому, напрямки вдосконалення характеристик компонентів ДТС полягають в наступному. Покращення характеристик суб'єктів системи, тобто учасників дорожнього руху, можливе завдяки вдосконаленню системи підготовки та перепідготовки водіїв, в тому числі за результатами оцінки технологічної складності особливих випадків експлуатації; покращенню медичного обслуговування та контролю за станом здоров'я водіїв; формуванню та популяризації безпечної поведінки на дорогах, а також завдяки проведенню навчально-виховних заходів, щодо правил поведінки на дорозі та ПДР. Покращення характеристик об'єктів системи, тобто АТЗ, можливе завдяки поліпшенню їх ергономічних характеристик, технічного стану та вдосконаленню їх компонентів та функціональних систем. Покращення характеристик процедур ДТС можливе завдяки вдосконаленню організації перевезень [52], [53] і контролю роботи водіїв [54], завдяки гармонізації та створенню єдиної нормативно-правової бази в сфері автомобільних перевезень, вдосконаленню та нормуванню ПДР та виконанню інших заходів. Вдосконалення характеристик внутрішнього та зовнішнього антропогенного середовища ДТС можливе завдяки обладнанню АТЗ сучасними системами підвищення безпеки та комфорту, поліпшенню дорожніх умов, ремонту і реконструкції доріг та дорожньої інфраструктури. Підвищення БДР може досягатись також завдяки оперативному реагуванню на ДТП та проведенню процедур їх ліквідації. Підвищення характеристик системи ліквідації наслідків ДТП можливе завдяки покращенню характеристик медичного забезпечення БДР

та рятувальних служб. Напрямки вдосконалення інтерфейсів взаємодії компонентів ДТС, загалом, полягають в вдосконаленні інтерфейсів «Процедури - Суб'єкт», «Суб'єкт - Об'єкт» та «Об'єкт - Середовище». Вдосконалення зазначених інтерфейсів полягає в вдосконаленні нормативно-правового забезпечення управління ТЗ, підвищенню психофізіологічного здоров'я учасників дорожнього руху, покращенню ергономічних та експлуатаційно-технічних характеристики АТЗ і дорожньо-транспортної мережі.

Оскільки, активним елементом ДТС є її суб'єкт, тобто різноманітні активні учасники дорожнього руху, які здійснюють управління ТЗ на основі інформації про параметри руху ТЗ та про стан оточуючого середовища від різного роду датчиків та вимірювальних систем, то важливим напрямком підвищення БДР є покращення інформаційного забезпечення учасників дорожнього руху. З цієї точки зору основними напрямками підвищення БДР є наближення швидкості надходження інформації до психофізіологічних можливостей учасників дорожнього руху та усунення дорожньо-транспортних ситуацій, що призводять до помилок при виборі напрямку та режиму руху [55]. З врахуванням підвищення інтенсивності руху та вдосконалення динамічних властивостей ТЗ, зазначені напрями підвищення БДР передбачають наступне: скорочення кількості проміжних розрахунків, які має виконати учасник дорожнього руху, у процесі прийняття темпових та орієнтаційних рішень; забезпечення раннього попередження про можливість виникнення ДТП та формування рекомендацій щодо її уникнення; підвищення точності, наочності, однозначності та достовірності інформації про параметри руху ТЗ та стан оточуючого середовища; забезпечення своєчасності надходження інформації в відповідний контур управління; застосування системи підтримки прийняття рішень або автоматизованої системи управління ТЗ або функціональними системами ТЗ; зменшення невизначеності ситуації виникнення ДТП; та інше.

Ще одним важливим напрямком підвищення безпеки руху на АТ є розробка та застосування автоматизованої системи попередження про можливість зіткнення та автоматичної системи уникнення зіткнень. Робота

зазначених систем має ґрунтуватись на визначенні позиційних і орієнтаційних параметрів відносного положення об'єктів та параметрів їх відносного руху. Головною роллю впровадження таких систем є забезпечення максимальної ефективності роботи ДТС: високих швидкостей руху транспортного потоку, високої пропускної здатності дорожньо-транспортної мережі, високого рівня безпеки руху. Впровадження зазначених систем дозволить здійснювати інформування учасників дорожнього руху про умови руху та надавати їм рекомендації щодо режиму руху в залежності від стану ДТС [56], інформування центру управління рухом про характеристики транспортного потоку та стан ДТС та інформування дорожньої служби про стан дорожньо-транспортної мережі доріг з метою планування та проведення ремонтних робіт, реконструкцій, тощо. Для створення зазначених систем підвищення безпеки руху на АТ необхідно:

- розробити нові або вдосконалити існуючі підходи до визначення відносного просторового положення АТЗ та параметрів їх відносного руху;
- розробити нові або вдосконалити існуючі системи попередження про можливість зіткнення в режимі реального часу і системи визначення параметрів відносного просторового положення АТЗ та параметрів їх відносного руху;
- забезпечити високу точність визначення параметрів відносного просторового положення об'єктів та параметрів їх відносного руху;
- забезпечити своєчасність надходження та високу достовірність інформації про відносне просторове положення об'єктів та параметри їх відносного руху в систему управління АТЗ та систему підтримки прийняття рішення;
- розробити нові або вдосконалити існуючі алгоритми визначення оптимальних траєкторій руху АТЗ для просторово-часового розведення траєкторій їх руху з метою попередження виникнення та уникнення ДТП;
- розробити комплексну систему підтримки прийняття рішень, яка б одночасно дозволила скоротити психіко-фізіологічне навантаження на водія АТЗ та підвищити рівень безпеки руху на АТ;
- розробити систему моніторингу руху АТЗ з метою аналізу та попередження виникнення передумов до виникнення ДТП.

1.3. Поняття та методи позиціонування і моніторингу на автомобільному транспорті.

Під позиціонуванням розуміють процес визначення позиції об'єкту відносно визначеної системи координат. Схема позиціонування об'єкту, на прикладі АТЗ зображена на рис. 1.8 та передбачає визначення положення АТЗ, як матеріальної точки, та просторового положення зв'язаної системи координат АТЗ відносно осей системи координат визначеної системи відліку. Окремо можна виділити динамічне позиціонування – процес утримання АТЗ в заданій позиції, тобто утримання його в певній області простору з визначеним орієнтуванням його осей, завдяки застосуванню його органів управління.

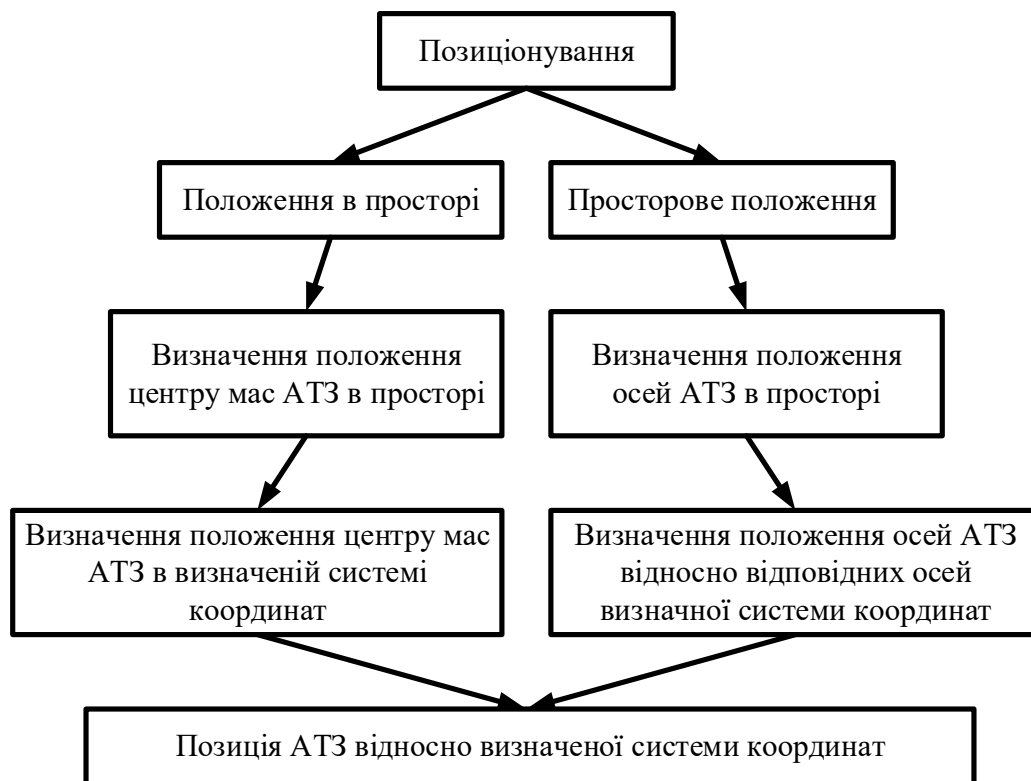


Рисунок 1.8 – Схема позиціонування АТЗ

Під моніторингом розуміють процес безперервного або систематичного відслідковування та контролю якісних і кількісних показників, які характеризують певний об'єкт, явище чи процес, та тенденцій їх зміни, завдяки застосування наукових, технічних, технологічних, організаційних та інших заходів. Також під моніторингом розуміють процес визначення стану

оточуючого середовища з метою визначення оптимальних параметрів роботи об'єкту чи протікання процесу. Моніторинг здійснюється для попередження виходу досліджуваного параметру за допустимі межі з метою запобігання виникненню критичної або небезпечної ситуації. Результати моніторингу служать для обґрунтування управлінських рішень та застосовуються в системі підтримки прийняття рішення або в системі автоматичного управління.

Під позиціонуванням на АТ будемо розуміти процес визначення параметрів положення АТЗ відносно інших АТЗ та елементів транспортної інфраструктури з врахуванням їхнього просторового положення. З точки зору підвищення безпеки руху на АТ важливим є визначення наступних параметрів: відносних координат в декартовій або полярній системі координат, параметрів орієнтаційного положення АТЗ відносно інших елементів ДТС.

Під моніторингом на АТ будемо розуміти процес контролю характеристик положення АТЗ відносно інших елементів ДТС і параметрів їх відносного руху, з метою попередження виникнення ДТП. З точки зору підвищення безпеки руху на АТ важливим є моніторинг наступних параметрів: відносних координат, швидкості та прискорення руху АТЗ в трьох-координатному просторі відносно інших елементів ДТС; відносне положення векторів руху АТЗ, а також відстань, швидкість зближення та час руху АТЗ до потенційної точки зіткнення, тощо.

Для дистанційного визначення положення використовують різноманітні навігаційні методи, основні з яких представлені на рис. 1.9.

Узагальнений метод ліній та поверхонь положення полягає в визначенні положення, як точки перетину поверхонь або ліній положення. В загальному випадку, положення об'єкту визначає точка перетину чотирьох поверхонь положення або трьох ліній положення. Поверхня положення – це геометричне місце точок у просторі, а лінія положення – геометричне місце точок на площині для яких характерне однакове значення навігаційного параметру [57]. Під навігаційним параметром розуміють фізичну або геометричну величину, значення якої функціонально пов'язане з конкретною точкою та цілком визначене в ній в даний момент часу.

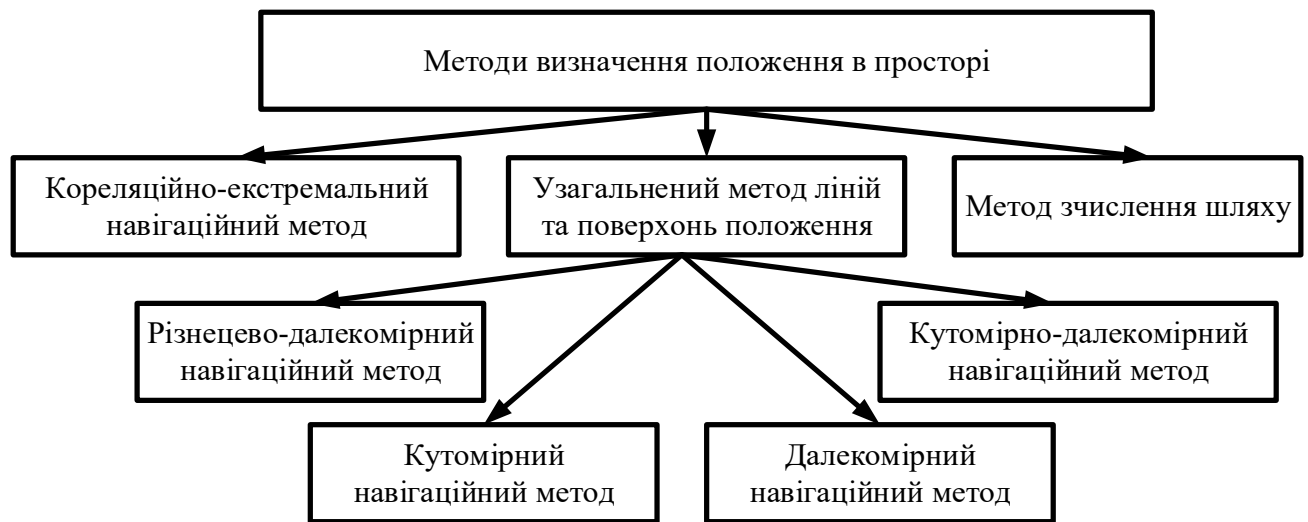


Рисунок 1.9 – Методи визначення положення в просторі

Для визначення положення найбільшого застосування отримали наступні навігаційні параметри: похила дальність, пеленг об'єкту, пеленг маяка, різниця відстаней від об'єкту до двох маяків, які визначають відповідні поверхні та лінії положення. Під похилою дальністю розуміють найкоротшу відстань від об'єкту до початку відліку, яким зазвичай є випромінювальний навігаційний маяк. Похилій дальності відповідає лінія рівних відстаней, яка має форму кола та площина рівних відстаней, яка має форму сфери з центром в навігаційному маяку. Під пеленгом об'єкта розуміють кут між північним напрямком меридіану, що проходить через навігаційний маяк і напрямком на об'єкт. Під пеленгом маяка розуміють кут між північним напрямком меридіану, що проходить через об'єкт і напрямком на маяк. Пеленгу об'єкта та пеленгу маяка відповідає лінія рівних пеленгів, яка має форму прямої лінії та площина рівних пеленгів. Різниці відстаней від об'єкту до двох маяків відповідає лінія рівних різниць відстаней, яка має форму гіперболи та площина рівних різниць відстаней, яка має форму сферичної гіперболи. В залежності від навігаційного параметру, що вимірюється розрізняють кутомірний, далекомірний, кутомірно-далекомірний та різницево-далекомірний навігаційний метод визначення положення об'єкту в просторі.

Узагальнений метод ліній та поверхонь положення отримав широке застосування в радіонавігаційних системах. В залежності від вимірюваного навігаційного параметру розрізняють наступні типи навігаційних системи, які

реалізують відповідні методи визначення положення в просторі: кутомірні, далекомірні, кутомірно-далекомірні та різницево-далекомірні.

Кутомірні радіонавігаційні системи забезпечують визначення взаємного кутового положення об'єкту та джерела випромінювання – азимуту об'єкту. Кутомірна навігаційна система забезпечує випромінювання та прийом всенаправленого опорного та вузькоспрямованого радіосигналів. Розрізняють часовий та фазовий метод визначення азимуту об'єкту. Часовий метод полягає в вимірюванні часу між прийомом опорного та вузькоспрямованого радіосигналів. Прикладами кутомірних радіонавігаційних систем, які реалізують даний метод є радіосистема ближньої навігації, автоматичний радіокомас та інші. Фазовий метод полягає в вимірюванні різниці фази між опорним та вузькоспрямованим радіосигналами. Прикладами кутомірних радіонавігаційних систем, які реалізують даний метод є системи VOR, TACAN та інші. При цьому, визначення положення об'єкту на площині здійснюється шляхом вимірювання азимутів в горизонтальній площині на два маяки. Застосування кутомірної навігаційної системи для визначення положення об'єкту в просторі здійснюється шляхом вимірювання азимутів в горизонтальній площині на два маяки та висоти положення об'єкту або вимірювання трьох азимутів: двох – в горизонтальній площині та одного в вертикальній площині або навпаки.

Далекомірні навігаційні системи забезпечують вимірювання похилої дальності з об'єкту до маяка. Їх принцип роботи полягає в вимірюванні часу між надісланим радіосигналом-запитом та прийнятим радіосигналом-відповіддю. Прикладами далекомірних навігаційних систем є системи DME, GPS та інші. При цьому, визначення положення об'єкту на площині здійснюється шляхом вимірювання дальності до двох маяків, а в просторі шляхом визначення дальності до трьох або чотирьох маяків в залежності від характеристик об'єкту та середовища його руху, а також процедури проведення вимірювань.

Кутомірно-далекомірні навігаційні системи забезпечують визначення азимуту об'єкту та дальності до радіомаяка. Системи даного типу містять кутомірний та далекомірний канали, які і забезпечують визначення відповідного

навігаційного параметру. Прикладом кутомірно-далекомірної навігаційної системи є система VOR / DME. При цьому, визначення положення об'єкту на площині здійснюється шляхом вимірювання дальності та пеленгу на один маяк, а визначення положення об'єкту в просторі можливе завдяки визначенню пеленгу та дальності до двох маяків.

Різнецево-далекомірні навігаційні системи забезпечують визначення різниці дальності до двох радіомаяків. Їх принцип роботи полягає в вимірюванні часу між прийомом радіосигналів від двох радіомаяків або їх різниці фаз. Прикладами різнецево-далекомірної навігаційної системи є радіотехнічна система дальньої навігації та система LORAN. При цьому, визначення положення об'єкту на площині здійснюється шляхом вимірювання двох різниць дальностей, а для визначення положення об'єкту в просторі необхідно вимірювання щонайменше трьох різниць дальностей.

Кореляційно – екстремальна навігація ґрунтується на аналізі властивостей аномальних полів компонент геофізичного поля Землі. Під аномальним геофізичним полем розуміють поле, для якого модель залежності значення поля від просторово-часових характеристик Землі чи її ділянки або не існує або надто складна, в зв'язку з тим, що аномальні компоненти є дрібноструктурними та високочастотними. Кореляційно-екстремальний навігаційний метод полягає в порівнянні поточного зображення геофізичного поля з еталонним для якого відома карта, яка знаходиться в пам'яті комп'ютера. Порівняння здійснюється на основі кореляційної функції, екстремум якої співпадає з найімовірнішим положенням об'єкту. За фізичним походженням виділяють наступні геофізичні поля, які можуть бути застосованими для кореляційно-екстремальної навігації: поле рельєфу земної поверхні, оптичне та теплове поле земної поверхні, поле радіолокаційного контрасту, магнітне і гравітаційне поле Землі [58] та інші.

Поле рельєфу земної поверхні характеризується перепадами місцевості відносно певного рівня. Вимірювання параметрів поля рельєфу земної поверхні здійснюється за допомогою радіовисотомірів, барометричних чи інерційних вимірювачів висоти. Оптичне поле земної поверхні характеризується

геометричними і спектральними ознаками зображень поверхні. Вимірювання параметрів оптичного поля земної поверхні здійснюється за допомогою оптичних або телевізійних засобів отримання зображення. Теплове поле земної поверхні характеризується полем теплового випромінювання елементів поверхні Землі в інфрачервоному, міліметровому та сантиметровому діапазонах хвиль. Вимірювання параметрів теплового поля земної поверхні здійснюється радіометрами відповідного діапазону довжин хвиль. Поле радіолокаційного контрасту характеризується відбивальними властивостями місцевості в діапазоні радіохвиль. Вимірювання параметрів поля радіолокаційного контрасту здійснюється радіолокаторами із скануючим променем. Нормальне та аномальне магнітне поле Землі характеризується напруженістю та напрямом магнітних силових ліній, зумовлених магнітними породами ядра Землі та її поверхневого шару. Вимірювання параметрів магнітного поля Землі здійснюється індукційними, квантовими та феррозондовими магнітометрами. Гравітаційне поле Землі характеризується напруженістю та напрямом гравітаційних силових ліній. Вимірювання параметрів гравітаційного поля Землі здійснюється гравітометрами, принцип роботи яких ґрунтується на вимірюванні сили притягування еталонних мас. Крім зазначених існує ще ряд геофізичних полів Землі. Кореляційно–екстремальні навігаційні системи характеризуються автономністю, завадозахищеністю, відносно невеликою точністю та потребують наявності потужної обчислювальної системи та актуальної карти геофізичного поля. Кореляційно-екстремальні навігаційні системи не знайшли застосування для визначення положення АТЗ, проте знайшли широке застосування як резервна навігаційна система для безпілотних літальних апаратів.

Метод зчислення шляху полягає в визначенні поточного місцеположення об'єкту в трьох-координатному просторі, як результуючої його початкового положення та його зміни по кожній з осей в процесі руху. Застосування методу зчислення шляху передбачає визначення лінійних переміщень по кожній з осей трьох-координатного простору шляхом інтегрування компонент швидкості руху та подвійного інтегрування компонент прискорення руху по кожній з осей.

Метод зчислення шляху знайшов широке застосування в інерційних навігаційних системах (ІНС). До основних переваг ІНС можна віднести відносно високу точність та чутливість, відносно малу масу та габарити, автономність, завадозахищеність, можливість повної автоматизації всіх процесів, висока інформативність та інші, а до основних недоліків – накопичення похибки з часом, відносно висока вартість обладнання, складність алгоритму визначення прискорень в навігаційній системі координат та інші. Корекція помилок ІНС відбувається на основі інформації від навігаційних систем з іншим фізичним принципом дії. Найчастіше для цих цілей використовуються навігаційні системи, робота яких ґрунтується на узагальненому методі ліній та поверхонь положення.

Визначення просторового положення не знайшло широкого застосування на АТ, але широко використовується в авіаційному, річковому та морському транспорті. Основні методи визначення просторового положення об'єкту представлені на рис. 1.10. Гіроскопічний метод полягає в визначенні кутового просторового положення відносно системи координат, яка виставляється перед початком руху. Інерційний метод полягає в визначенні кутових прискорень, швидкостей та переміщень з подальшим їх аналізом. Недоліками зазначених підходів є накопичення помилок з часом. Також, вони не забезпечують дистанційне визначення відносного просторового положення об'єктів. Оптичні методи полягають в аналізі зображення визначеної системи реперних точок, яке отримують з застосуванням системи камер. Розрізняють оптичні методи обробки зображення та оптичні методи обробки положення. Методи обробки зображення полягають в визначенні просторового положення, шляхом співставлення зображення візуальних об'єктів з їх базовим зображенням. Методи обробки положення полягають в визначенні просторового положення та позиції кількох камер, жорстко зв'язаних з об'єктом, відносно візуальних орієнтирів з відомими координатами та розмірами. Оптичні методи дозволяють забезпечити дистанційне визначення відносного просторового положення. При цьому їх робота складно автоматизується, а сфера їх застосування – обмежена.

Для моніторингу застосовується інформаційно-аналітична система до складу якої входить підсистема вимірювання контрольованих параметрів, підсистема обробки та аналізу даних, підсистема формування та відображення результатів моніторингу та підсистема формування рекомендацій для суб'єкту управління. Також важливим елементом системи моніторингу є моделі зовнішнього середовища, об'єкту моніторингу та суб'єкту управління, які використовуються в процесі формування рекомендацій.

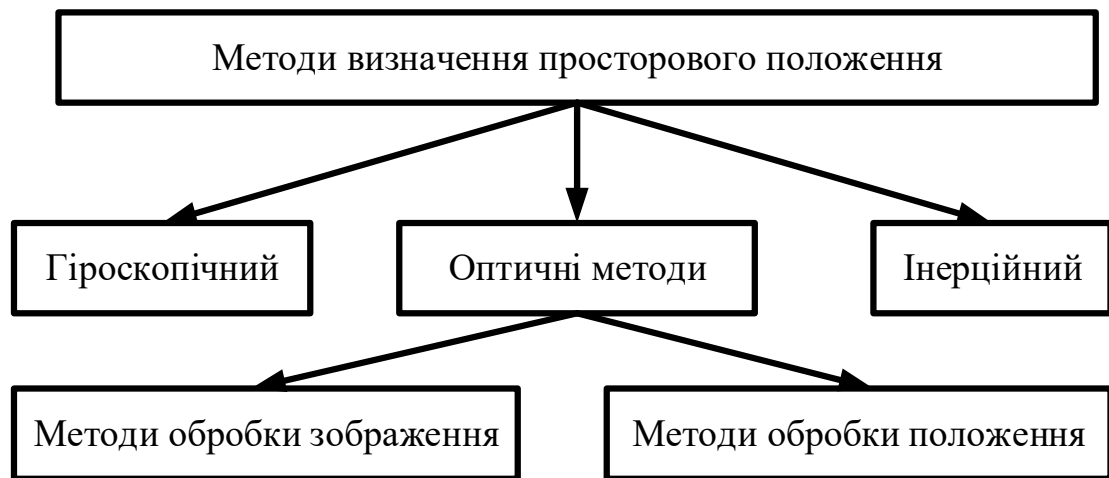


Рисунок 1.10 – Методи визначення просторового положення

В залежності від технології реалізації процесу моніторингу розрізняють наступні системи моніторингу, які показано на рис. 1.11 [59]. Традиційна система моніторингу забезпечує вимірювання та відображення значення контрольованих параметрів, а функцію збору, обробки, аналізу даних, прийняття рішення та здійснення керуючих впливів здійснює оператор. Інтерактивна система моніторингу здійснює вимірювання контрольованих параметрів; збір, обробку та аналіз даних; формування рекомендацій для оператора в інтерактивному режимі у реальному масштабі часу та сигналізацію виходу контрольованих параметрів за допустимі межі, а оператор здійснює функцію прийняття рішення та здійснення керуючих впливів. Інтерактивна системи моніторингу реалізується в системах підтримки прийняття рішення. Автоматизована система моніторингу здійснює вимірювання контрольованих параметрів; збір, обробку та аналіз даних; автоматичне підтримання значення певних контрольованих параметрів в

допустимих межах; формування рекомендацій для оператора, щодо інших параметрів та сигналізацію їх виходу за допустимі межі, а оператор здійснює функцію прийняття рішення та здійснення керуючих впливів. Автоматизована системи моніторингу реалізується в інтелектуальних системах управління. В автоматичних системах моніторингу функції вимірювання контрольованих параметрів; збору, обробки та аналізу даних; формування рекомендацій та прийняття рішення, а також здійснення керуючих впливів здійснюються системою. Автоматична системи моніторингу реалізується в автоматичних системах управління. Оператор або відсутній в такій системі моніторингу або здійснює загальний контроль роботи системи.

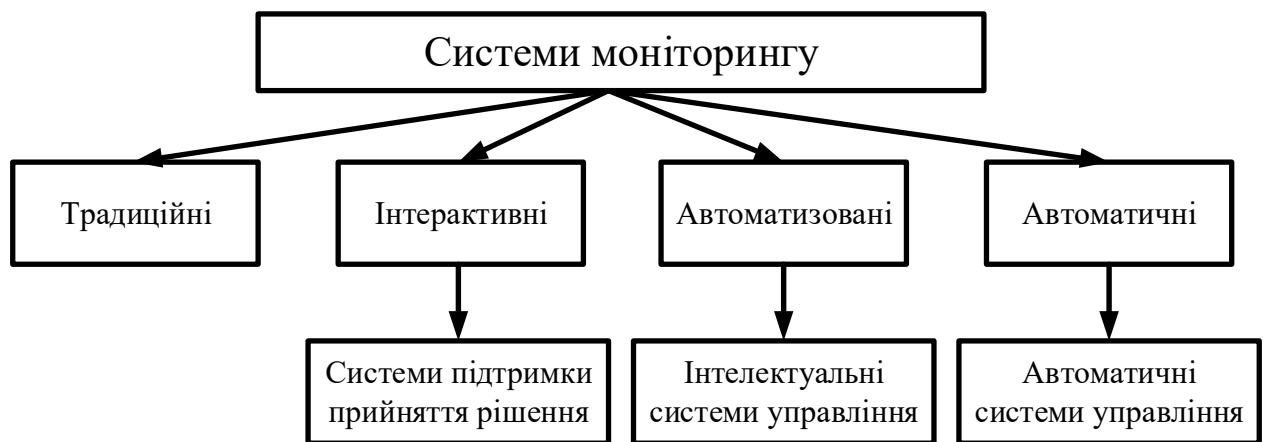


Рисунок 1.11 – Системи моніторингу

Робота систем моніторингу на АТ полягає в зборі, обробці, зберіганні, аналізі даних про параметри поточного стану та функціонування АТЗ. Системи моніторингу також забезпечують прогнозування подальшого стану та параметрів функціонування АТЗ і формування на основі прогнозування рекомендацій, щодо управління АТЗ, з метою попередження виходу контрольованих параметрів за допустимі межі, зокрема, для попередження виникнення ДТП. Системи моніторингу не знайшли широкого застосування для АТ. При цьому, існуючі системи моніторингу не дозволяють визначати відносні параметри руху об'єктів.

1.4. Системи та підходи до позиціонування і моніторингу на автомобільному транспорті.

Для вирішення питань визначення положення, параметрів руху та пройденого шляху АТЗ найбільшого розповсюдження отримала супутникова навігаційна система (СНС) [60]. СНС реалізує узагальнений метод ліній та поверхонь положення. СНС – це система космічного та наземного обладнання, а також апаратури користувача, яка призначена для позиціонування об'єкту в часі та просторі і визначенні навігаційних параметрів його руху. СНС забезпечує визначення дальностей до радіопередавачів – штучних супутників Землі. Основними перевагами СНС є висока ефективність, автономність, всепогодність, оперативність, глобальність, відсутність накопичення похибки, простота, зручність використання та інші. [61] А основними недоліками – відносно невисока точність (до 10 м в залежності від обладнання, що використовується), низька швидкість відновлення інформації, слабка завадозахищеність, спотворення і затримка сигналу та інші. Для підвищення точності та достовірності інформації від СНС використовуються бортова, наземна та супутникова система функціонального доповнення [62]. Робота бортової системи функціональних доповнень полягає в застосуванні сукупності алгоритмів роботи приймача для моніторингу цілісності системи, а також використання надлишкової інформації від інших бортових систем. Її використання не дозволяє забезпечити достатньо високу точність визначення положення об'єкту. Принцип роботи наземної системи функціонального доповнення, прикладом якої є локальна система функціонального доповнення (LAAS), яка складається з однієї станції, полягає в наступному. Наземна станція визначає власні координати на основі сигналів від супутників, які знаходяться в зоні видимості, здійснює моніторинг цілісності СНС та визначає поправки до GPS-сигналу і здійснює передачу поправок GPS-користувачам по лініям цифрового зв'язку в ультракороткохвильовому діапазоні. Супутникова система функціонального доповнення, прикладом якої є система функціонального доповнення з широкою зоною дії (WAAS), забезпечує підвищення точності

роботи СНС завдяки трансляції GPS-подібного сигналу. В якості наземного обладнання використовується мережа наземних станцій з відомими координатами. Принцип роботи WAAS полягає в наступному. Наземна станція визначає поправки до ефемеридів, часу, параметрів іоносферної моделі та транслює GPS-подібний сигнал. До недоліків систем наземного та супутникового функціонального доповнення можна віднести необхідність встановлення додаткових наземних станцій, складні алгоритми визначення поправок, обмежена пропускна здатність. Для АТ наземна та супутникова система функціонального доповнення не знайшли широкого застосування, а бортова система – є складовою частиною сучасних GPS-приймачів. Застосування СНС на АТ дозволяє визначити абсолютне положення АТЗ з прив'язкою до дорожньо-транспортної мережі. При цьому, недостатньо висока точність роботи СНС не дозволяє використовувати їх сигнали для попередження виникнення і уникнення ДТП з метою підвищення безпеки дорожнього руху на АТ.

Для визначення положення АТЗ відносно інших елементів ДТС застосовуються ультразвукові датчики вимірювання відстані, радіодалекоміри, лідари та системи комп'ютерного зору. Принцип визначення відносного положення АТЗ полягає в вимірюванні відстані до об'єктів, які знаходяться навколо АТЗ з подальшим аналізом цих даних.

Ультразвукові датчики вимірювання відстані дозволяють вимірювати відстань до перешкод в діапазоні від 0,2 до 20 м. та знайшли широке застосування в парктроніках для АТЗ. Їх робота заснована на принципі ехолокації і полягає в вимірюванні часу між надісланням та прийняттям відбитого ультразвукового сигналу. Робота ультразвукового датчику вимірювання відстані полягає в наступному. Датчик випромінює короткі високочастотні звукові імпульси через визначений інтервал часу, які розповсюджуються зі швидкістю звуку в повітрі. При зіткненні імпульсу з перешкодою він відбивається та потрапляє на датчик в вигляді еха. Основними перевагами ультразвукових датчиків відстані є безконтактність вимірювання, низьке енергоспоживання, низька вартість, невеликі маса та габарити, відносна простота, відносно невисока

ціна, широка сфера застосування та інші [63]. До основних недоліків ультразвукових датчиків відстані можна віднести – залежність точності вимірювання від щільності середовища розповсюдження, відносно невелика дальність дії – до 20 метрів, залежність точності вимірювання від матеріалу об'єкту, відбивання і перевідбивання звукового сигналу від перешкод та інші.

Радіодалекоміри забезпечують визначення дальності до об'єктів з використанням радіохвиль з довжиною в діапазоні від 1 до 100 м. Розрізняють часовий, частотний та фазовий метод визначення дальності з застосування радіодалекомірів. Часовий метод радіодалекометрії полягає в вимірюванні часу проходження радіосигналу від випромінювача до перешкоди та назад. Частотний метод радіодалекометрії полягає в вимірюванні частоти биття прямого і відбитого радіосигналів. Фазовий метод радіодалекометрії полягає в визначенні фазового зсуву між опорним та несучим гармонійним радіоімпульсом. На АТ знайшли широке застосування радары, радіодалекоміри з часовим методом вимірювання, дального та середнього радіусу дії, які призначені для виявлення інших транспортних засобів та пішоходів. Радари дального радіусу дії використовуються в системах екстреного гальмування та адаптивного круїз-контролю. Максимальна дальність дії таких систем складає 200-250 м. Радари середнього радіусу дії використовуються для виявлення сліпих зон, сповіщення про перехресний рух ззаду та підтримки зміни смуги руху. Максимальна дальність дії таких систем складає 50-80 м. До основних переваг радарів можна віднести наступне: дистанційне виявлення віддалених об'єктів, всепогодність роботи, безконтактність вимірювання, висока точність і надійність роботи, широка сфера застосування та інші. До основних недоліків радарів можна віднести обмежену роздільну здатність, поле зору та дальність дії; вразливість до радіоелектронних перешкод; відносну складність експлуатації та інші [64].

Лідари забезпечують визначення дальності до об'єктів з точністю до 10 см та формують трьохвимірне 360-градусне зображення оточуючого середовища за допомогою використання активних дальномірів оптичного діапазону [65]. Розрізняють механічні лідари з поворотною діаграмою випромінювання та

твердотільні статичні лідари. Формування 360-градусного зображення у механічних лідарів відбувається завдяки обертанню датчика навколо вертикальної осі, а у твердотільних лідарах – завдяки об'єднанню інформації від кількох статично встановлених датчиків, кожен з яких сканує свою визначену область оточуючого середовища. Лідар забезпечує випромінювання і прийом близько 100 000 лазерних променів за секунду та формує масив точок вимірювання на основі яких і будується трьохвимірне зображення оточуючого середовища. До основних переваг лідарів можна віднести наступне: висока роздільна здатність, невеликі розмір і вага, широке поле зору, висока точність і швидкість вимірювання, широке застосування та інші. До основних недоліків лідарів можна віднести чутливість до погодних умов, невеликий радіус дії, складність інтерпретації даних вимірювання, відносно висока вартість та інші.

Системи комп'юторного зору забезпечують виявлення об'єктів оточуючого середовища за допомогою використання системи камер, алгоритму комп'юторного зору, машинного навчання та штучного інтелекту [66]. Виявлення об'єктів з використанням системи комп'юторного зору полягає в класифікації та локалізації об'єктів. Класифікація об'єктів полягає в виявленні конкретних об'єктів на зображенні з використання згорткових нейронних мереж. Локалізація об'єктів полягає в визначенні точного місцеположення об'єктів за допомогою алгоритму немаксимального придушення. Основними перевагами систем комп'юторного зору є відносно невисока ціна, простота експлуатації, висока точність виявлення конкретних об'єктів та інші. До основних недоліків систем комп'ютерного зору можна віднести чутливість до погодних умов, складність в вимірюванні точного місцеположення та координат об'єктів та інші.

Ще одним з пріоритетних напрямків розвитку автотранспортної галузі є розробка та створення інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Серед основних проблем на вирішення яких спрямовані ІТС є низька продуктивність транспортної системи, затримки при перевезенні вантажів та пасажирів, високий рівень людських втрат в результаті ДТП, негативний вплив на навколишнє середовище, висока енергоємність автотранспортних перевезень та інші [67].

ІТС представляють собою комплекс автоматичних та автоматизованих систем, які призначені для збору, обробки та передачі інформації про стан і параметри роботи АТЗ та інших елементів ДТС з метою регулювання транспортних потоків [68] та вирішення транспортних завдань [69], [70]. ІТС забезпечують виконання наступних завдань: управління рухом; реалізація концепції Smart Logistics [71]; реалізація концепції Smart City [72], [73], [74]; оптимізація маршруту руху АТЗ [75], [76], та маршрутів доставки вантажів [77], [78], [79]; управління технічним обслуговуванням; управління транспортними засобами; контроль та моніторинг стану та параметрів руху АТЗ; організації [80], [81], [82] та управління вантажними та пасажирськими перевезеннями [83]; забезпечення електронної оплати; підвищення екологічної безпеки [84], [85]; надання інформаційних послуг для водіїв [86], пасажирів та перевізників [87], [88]; реагування на надзвичайні ситуації та інші. Передбачається, що до складу ІТС будуть входити розумні і безпілотні АТЗ, які будуть здатні взаємодіяти з іншими елементами ДТС з метою підвищення безпеки руху та оптимізації маршруту їх руху [89]. Однією з концепцій, що реалізують цей напрямок розвитку автотранспортної галузі є концепція «зв'язаного» автомобіля. Дана концепція передбачає полягає в обладнанні АТЗ засобами орієнтації та навігації, а також мережевим обладнанням, з метою обміну інформацією між учасниками дорожнього руху та елементами ВДМ. При цьому, розглядають наступні інтерфейси взаємодії: АТЗ – АТЗ (V2V), АТЗ – Інфраструктура (V2I), АТЗ – Пішоходи (V2P), АТЗ – Електронні пристрої (V2D), АТЗ – Електромережа (V2G), АТЗ – Дім (V2H).

Система V2V є системою безпроводного зв'язку, яка дозволяє двом АТЗ обмінюватись даними про параметри їх руху та стан ВДМ в режимі реального часу. Система V2V дозволяє оцінити відносну швидкість та напрямок руху АТЗ, а також надавати попереджувальні сигнали. Серед основних напрямків застосування системи V2V є попередження про небезпеку обгону, допомога при зміні смуги руху, електронні стоп-сигнали, запобігання зіткненню, попередження про наявність об'єктів в сліпій зоні автомобіля, запобігання зіткнень на перехресті, корпоративний адаптивний круїз-контроль та інші.

Система V2I є системою безпроводного зв'язку, яка дозволяє АТЗ обмінюватись даними з об'єктами інфраструктури ВДМ. Серед основних напрямків їх застосування є попередження зіткнення, електронні стоп-сигнали на світлофорах, автоматичне паркування, позиціонування на ВДМ та інші.

Система V2P є системою взаємодії АТЗ з пішоходами, які перебувають в безпосередній близькості до АТЗ. Система V2P, в першу чергу, передбачає взаємодію АТЗ з електронними приладами пішоходів. Система V2P забезпечує виявлення пішоходів в зоні дії даної системи і параметрів їх руху, а також видачу попереджувальних сигналів водію АТЗ та пішоходу.

Система V2D є системою взаємодії АТЗ з електронними пристроями, які підключені до системи «зв'язаного» автомобіля. Система V2D може бути застосована для діагностики роботи АТЗ, оптимізації процесів технічного обслуговування та ремонту АТЗ. Система V2G є системою обміну електроенергією між АТЗ та електромережею. Система V2G, в першу чергу, може бути застосована для електроавтомобілів з метою підвищення дальності їх руху. Система V2N є системою обміну електроенергією між АТЗ та стаціонарними об'єктами, такими як будинок, заправна станція, тощо.

Обмеження застосування технології зв'язаних автомобілів пов'язане з відсутністю стандартів V2V прикладного рівня, складністю вирішення питання забезпечення приватності та захисту системи від маніпуляцій, способи та підходи до ефективної фільтрації даних при скупченні зв'язаних автомобілів.

В [90] розглядається застосування V2V та V2I систем для забезпечення безпеки дорожнього руху і зменшенню викидів CO_2 та показано, що системи V2I забезпечують кращу швидкість прийому повідомлень і кращу ефективність безпеки порівняно з системою оповіщення V2V. При цьому, в роботі розглядається лише положення АТЗ як матеріальних точок.

Застосування ІТС та автоматизованих систем керування АТЗ дає наступні переваги: спрощення процедури управління, автоматизація рутинних процедур, зниження навантаження на водія та покращення умов їх роботи, оптимізація маршруту руху, підвищення БДР, покращення енергоефективності та інші.

Висновки по розділу 1.

Під безпекою руху на АТ розуміють стан дорожнього руху, який забезпечує збереження та захист життя і здоров'я учасників дорожнього руху, а також захист і збереження довкілля і майна. Рівень БДР залежить від стану ДТС, до складу якої входять активні учасники дорожнього руху та їх ТЗ, процедури та середовище дорожнього руху. Підвищення безпеки руху на АТ є однією зі світових пріоритетних задач в зв'язку з його високою аварійністю. У відповідності до статистичного аналізу безпеки руху в Україні аварійність руху на АТ є переважаючою порівняно з іншими видами транспорту. При цьому, основними причинами виникнення ДТП – є порушення правил маневрування і недотримання безпечної дистанції та інтервалів руху, основними типами ДТП – є попутне та бокове зіткнення, а основними передумовами виникнення ДТП – є помилки в визначенні відносного просторового положення ТЗ та параметрів їх руху. Серед основних напрямків підвищення безпеки руху на АТ можна виділити наступні: державне управління в сфері БДР; підвищення безпеки АТЗ, доріг та дорожньої інфраструктури; забезпечення безпечної поведінки учасників дорожнього руху; підвищення безпеки перевезення пасажирів та вантажів; розробка, створення та впровадження автоматизованої системи попередження про можливість зіткнення і автоматичної системи уникнення зіткнення та інші.

Забезпечення визначення відносного положення ТЗ та параметрів їх руху можливе завдяки розробці та впровадженню системи позиціонування та моніторингу на АТ. Під позиціонуванням на АТ розуміють процес визначення положення АТЗ в просторі, як матеріальної точки, а також положення осей його зв'язаної системи координат. Під моніторингом на АТ розуміти процес визначення та контролю параметрів відносного положення елементів ДТС, а також параметрів їх відносного руху з метою попередження виникнення ДТП.

Визначення позиційного положення АТЗ, тобто його положення як матеріальної точки, дозволяє вирішити навігаційні завдання, тобто визначити місцеположення АТЗ на маршруті руху. Для дистанційного визначення позиційного положення об'єктів використовують різноманітні навігаційні

методи, серед яких найбільшого розповсюдження на АТ отримав узагальнений метод ліній та поверхонь положення. Серед систем, які реалізують узагальнений метод ліній та поверхонь положення на АТ найбільшого розповсюдження отримали СНС та далекомірні системи. СНС забезпечує визначення позиційного положення АТЗ в загальній системі координат і використовується для навігації. Далекомірні системи, до яких відносяться ультразвукові, радіо та лазерні далекоміри, забезпечують визначення відносного позиційного положення АТЗ.

Визначення орієнтаційного положення АТЗ, тобто визначення положення осей зв'язаної системи координат АТЗ відносно осей координат відповідної системи відліку, дозволяє покращити процес керування АТЗ. Для визначення орієнтаційного положення об'єктів використовуються різноманітні методи, серед яких на АТ найбільшого розповсюдження отримали гіроскопічний метод та оптичні методи. Гіроскопічний метод застосовується для визначення орієнтаційного положення АТЗ відносно горизонтальної площини, а оптичні методи – для визначення орієнтаційного положення АТЗ відносно інших елементів ДТС.

Для моніторингу використовують системи підтримки прийняття рішення та бортові обчислювальні системи. Основним їх недоліком є те, що вони не дозволяють визначати відносні параметри руху об'єктів. Системи моніторингу не знайшли широкого застосування для АТ.

Окремим напрямком розвитку автотранспортної галузі є розробка та створення ІТС, які представляють собою комплекс автоматичних та автоматизованих систем, які призначені для збору, обробки та передачі інформації про стан і параметри роботи АТЗ та інших елементів ДТС.

Загалом, на основі проведеного аналізу, можна зробити висновок, що існуючі підходи та системи позиціонування та моніторингу на АТ не забезпечують одночасне визначення відносного позиційного та орієнтаційного положення АТЗ та відносних параметрів їх руху.

РОЗДІЛ II

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ПОЗИЦІОНУВАННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Феномен взаємодії електромагнітного випромінювання з об'єктами різної фізичної природи широко використовується в дослідженнях у багатьох галузях науки та техніки. Вимірювання параметрів випромінювання після його взаємодії з об'єктом дослідження є потужним засобом дослідження. Це пояснюється яскраво вираженою залежністю характеру взаємодії випромінювання та об'єкта дослідження від властивостей об'єкту. Одними із найперспективніших методів дослідження є поляриметричні методи вимірювання, внаслідок їх високої інформативності [91]. При цьому розрізняють пряму та обернену задачі дослідження. Пряма задача полягає в визначенні характеристик випромінювання після його взаємодії з об'єктом із відомими параметрами. Обернена задача полягає в визначенні параметрів об'єкту, за умови відомих характеристик випромінювання до та після взаємодії з об'єктом [92]. На даному етапі розвитку науки, більшого розповсюдження отримали обернені задачі, оскільки вони дозволяють досліджувати об'єкти різної фізичної природи. Під поляриметричними методами вимірювання розуміють методи, які передбачають визначення параметрів поляризованого випромінювання після його взаємодії з об'єктом дослідження. До таких параметрів відносяться степінь поляризації, азимут площини поляризації (АПП), еліптичність та інші. Параметри які визначаються в кожному конкретному дослідженні обумовлюються об'єктом дослідження, методом дослідження та системою вимірювання, яка використовується. Серед поляриметричних методів вимірювання найбільшого розповсюдження отримали поляризаційно-оптичні методи [93], завдяки їх високій точності та чутливості. З однієї сторони, це пред'являє високі вимоги до якості експерименту, системи дослідження та до глибини аналізу результатів, а з іншої – в цьому полягає їхня перевага.

2.1. Фізичні основи поляриметричних вимірювань.

Електромагнітна хвиля характеризується векторами напруженості електричного та магнітного полів. В процесі розповсюдження випромінювання відбувається періодична зміна значень напруженості електричного поля та магнітної індукції магнітного поля по величині і знаку. При цьому, під поляризацією випромінювання розуміють характеристику нерівномірності розподілу по напрямку амплітуд коливань електричного та магнітного векторів. Для опису та дослідження поляризованого випромінювання розглядають поляризаційну діаграму, яка утворюється при проекції траєкторії руху кінця електричного вектору на проекційну площину. При цьому, виділяють лінійну, циркулярну (кругову) та еліптичну поляризації.

Для лінійно поляризованого випромінювання характерним є те, що електричний вектор коливається вздовж одного напрямку, який разом з напрямком розповсюдження хвилі утворює площину поляризації. Лінійний тип поляризації містить нескінченну кількість форм поляризації, які відрізняються орієнтацією площини поляризації в просторі. Лінійно поляризоване випромінювання характеризується АПП та амплітудою. Під АПП розуміють кут φ між вибраною фіксованою лінією на проекційній площині і проекцією площини поляризації на проекційну площину. АПП лінійно поляризованого випромінювання відраховується проти годинникової стрілки, якщо спостерігати в напрямку розповсюдження випромінювання.

Для циркулярно поляризованого випромінювання характерним є те, що кінець його електричного вектору описує в просторі гвинтову лінію, а його проекція на проекційну площину має вигляд кола. Циркулярно поляризоване випромінювання характеризується амплітудою та формою випромінювання. Для циркулярно поляризованого випромінювання розрізняють дві форми: правоциркулярну, в якій обертання відбувається за годинниковою стрілкою, та лівоциркулярну, в якій обертання відбувається проти годинникової стрілки, якщо спостерігати назустріч випромінювання.

Проекція еліптично поляризованого випромінювання на проекційну площину має вигляд еліпса. Еліптично поляризоване випромінювання характеризується азимутом головної осі, еліптичністю, розмірами еліпса, напрямком обходу еліпса. Під еліптичністю розуміють відношення малої пів осі еліпса до великої. Під азимутом головної осі розуміють кут між проекцією великої пів осі еліпса на проекційну площину та вибраною фіксованою лінією на ній. По напрямку обходу розрізняють випромінювання правоеліптичні, при обході за годинниковою стрілкою, та лівоеліптичні, при обході проти годинникової стрілки, якщо спостерігати назустріч випромінювання. Еліптично поляризоване випромінювання має нескінченне число форм, які відрізняються по азимуту, еліптичності і напрямку обходу еліпса.

Елементарне монохроматичне випромінювання має лінійну поляризацію. При суперпозиції когерентних елементарних монохроматичних променів отримують поляризоване випромінювання тип та форма якого залежить від амплітуд та фаз елементарних променів. При цьому, у загальному випадку, отримують еліптично поляризоване випромінювання, а лінійно та циркулярно поляризоване випромінювання є окремими випадками при еліптичності рівній нулю та одиниці, відповідно. При суперпозиції некогерентних елементарних променів отримують частково поляризоване та неполяризоване випромінювання. Для характеристики частково поляризованого випромінювання користуються показником степеню поляризації, який є відношенням інтенсивності поляризованої частини випромінювання до повної його інтенсивності. Найбільш загальним випадком є частково поляризоване випромінювання, а неполяризоване та поляризоване є крайніми випадками при степеню поляризації рівному 0% та 100%, відповідно.

Для опису характеристик поляризованого випромінювання використовують чотиривимірний вектор Стокса, двовимірний вектором Максвела (Джонса), матрицю когерентності (щільності). Для розрахунку характеристик поляризованого випромінювання застосовують матричні методи Джонса і Мюллера, а також квантово-механічний підхід.

Вектор Стокса включає чотири параметри: S_0 – параметр пропорційної сумарної інтенсивності випромінювання, S_1 – параметр переважної горизонтальної поляризації, S_2 – параметр переважної лінійної поляризації з азимутом 45° , S_3 – параметр переважної правоциркулярної поляризації. При цьому, якщо параметр має від’ємне значення, то переважною є ортогональна форма поляризації. Розмірністю параметрів вектору Стокса є інтенсивність, а при перетвореннях вектору Стокса не враховуються амплітуди та фази коливання. В зв’язку з цим, вектор Стокса використовується при операціях з некогерентним випромінюванням. Для опису повністю поляризованого випромінювання з врахуванням фазових співвідношень між пучками випромінювання використовують двовимірний вектор Джонса. При розповсюдженні випромінювання вздовж осі Oz елементами вектору Джонса є компоненти електричного вектору, розкладеного по осям Ox і Oy в комплексній формі. Для опису частково когерентного та частково поляризованого випромінювання використовується матриця когерентності, яка представляє собою квадратичну матрицю другого порядку, яку отримують в результаті добутку вектору Джонса з його транспонованим комплексно-спряженим вектором. Для перерахунку параметрів вектору Стокса, вектору Джонса та матриці когерентності в поляризаційні параметри випромінювання і навпаки можуть бути застосовані відповідні формули перерахунку.

Метод розрахунку Джонса оперує векторами Максвелла (Джонса) та використовуються для повністю поляризованого випромінювання та для опису комбінації когерентних пучків. Метод розрахунку Мюллера оперує векторами Стокса та використовуються для частково поляризованого випромінювання і для опису перетворення некогерентного випромінювання. Квантово-механічний підхід використовує матрицю когерентності і використовується для операцій з частково поляризованим і частково когерентним випромінюванням. Зазначені методи розрахунку полягають в визначенні параметрів випромінювання при суперпозиції кількох променів чи після проходження променю через оптичні елементи з відомими параметрами.

Прилади, які призначені для вимірювання поляризаційних характеристик випромінювання називають поляриметрами. В якості таких параметрів може бути степінь поляризації, АПП лінійно поляризованого випромінювання, азимут головної осі еліптично-поляризованого випромінювання, еліптичність, елементи матриці когерентності, параметри вектору Стокса, параметри вектору Джонса та інші. Визначення параметрів поляризованого випромінювання з використанням поляриметрів полягає в оцінці інтенсивності випромінювання, яке проходить через відповідну оптичну систему. Розрізняють наступні види поляриметрів: поляриметри для вимірювання азимуту та кута повороту площини поляризації лінійно поляризованого випромінювання; еліпсометри, які призначені для визначення параметрів еліптичності еліптично-поляризованого випромінювання; поляриметри степеню поляризації частково поляризованого випромінювання, поляриметр вектору Стокса та інші. По призначенню поляриметри діляться на аналізатори, які призначені для дослідження параметрів випромінювання та аналітичні прилади, які призначені для дослідження зміни параметрів поляризованого випромінювання після його взаємодії з досліджуваною речовиною. Також поляриметри класифікуються по принципу модуляції, який в них застосовується [94]. Розрізняють модуляцію шляхом механічного обертання анізотропних елементів оптичної системи [95] та модуляцію з використанням активних перетворювачів поляризації на основі електрооптичних, фотопружних чи магнітооптичних [96], [97] явищ. По способу реєстрації поляриметри діляться на візуальні та фотоелектричні. Як візуальні, так і фотоелектричні поляриметри можуть бути виконані по схемі з безпосереднім відліком або по компенсаційній схемі. Останнім часом більшого розповсюдження отримують автоматичні фотоелектричні поляриметри компенсаційного типу. При цьому, поєднання фотоелектричних поляриметрів, алгоритму проведення вимірювань та обчислювальної системи дозволяє створювати поляриметричні системи вимірювання здатні визначати переважну кількість параметрів поляризованого випромінювання з високою точністю та чутливістю вимірювання.

2.2. Розподіл інтенсивності лінійно поляризованого променю після його падіння на діелектричну пластину

При падінні променю на плоску межу поділу двох середовищ спостерігається процес його заломлення та відбивання. При цьому, розподіл інтенсивності падаючого променю між заломленим та відбитим променями залежить від середньої глибини проникнення променю в речовину середовища та кута падіння променю (КПП). Під середньою глибиною проникнення променю розуміють товщину шару речовини, після проходження якого інтенсивність променю зменшиться в e раз. Величина обернена до середньої глибини проникнення називається коефіцієнтом поглинання. Коефіцієнт поглинання середовища та вплив довжини хвилі променю на його величину залежить від речовини середовища та обумовлюється частотами власних коливань електронів в атомах чи коливань атомів в молекулі або іншими властивостями речовини. В загальному випадку, діелектрики відносяться до слабо поглинаючих речовин та характеризуються коефіцієнтом поглинання в межах від 10^{-3} до 10^{-5} см^{-1} , а метали відносяться до сильно поглинаючих речовин та характеризуються коефіцієнтом поглинання в межах від 10^3 до 10^4 см^{-1} . Слабо поглинаючі речовини характеризуються тим, що переважна частина інтенсивності падаючого на них променю заломлюється, а сильно поглинаючі – тим, що переважна частина інтенсивності падаючого на них променю – відбивається. Вплив КПП на розподіл інтенсивності між заломленим та відбитим променями полягає в наступному: при великих КПП переважаючим є відбивання, а при малих КПП – заломлення. В подальшому будемо розглядати межу поділу між повітрям та ізотропною діелектричною плоскопаралельною пластиною (ІДПП), під якою будемо розуміти оптичну деталь, оптичні властивості якої не залежать від напрямку розповсюдження променю та яка обмежена з протилежних боків плоскими паралельними поверхнями.

При відбиванні лінійно поляризованого променю (ЛПП) від діелектричної пластини при переході повітря – пластини для всіх кутів падіння та при переході пластини – повітря при кутах падіння менше кута повного відбивання

поляризація відбитого променя зберігається лінійною та відбувається зміна його АПП [98]. При цьому, для падаючого ЛПП власні поляризації відбитого та заломленого променів теж є лінійно поляризованими [99]. Тобто, якщо падаючий промінь горизонтально (вертикально) поляризований, то відбитий та заломлений промені теж будуть горизонтально (вертикально) поляризованими. В випадку, коли падаючий промінь лінійно поляризований з певним, відмінним від 0° чи 90° , АПП, то відбитий і заломлений промені теж будуть лінійно поляризованими, а їх АПП будуть відрізнятися від АПП падаючого променя. Ці висновки ґрунтуються на безперервності тангенціальних компонент електричного та магнітного векторів променя на межі поділу двох середовищ та пояснюються відмінністю френелівських коефіцієнтів підсилення для p - і s - компонент променя. Для визначення амплітуд заломленого та відбитого променів, а також їхніх АПП доцільно розкласти падаючий промінь на p - і s - компоненти, як показано на рис. 2.1, визначити амплітуди p - і s - компонент для заломленого та відбитого променів у відповідності до формул Френеля, а результуючу амплітуду знайти як суперпозицію p - і s - компонент променя.

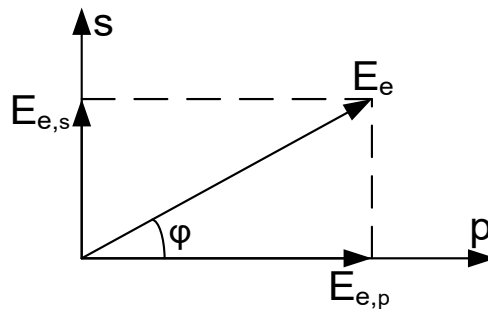


Рисунок 2.1 – Схема розкладання електричного вектора на s - і p - компоненти

Враховуючи те, що, зазвичай, відлік АПП ЛПП проводиться від площини падіння, то формули для визначення амплітуд p - і s - компонент променя матимуть наступний вид:

$$E_{e,s} = E_e \cdot \sin(\varphi), \quad E_{e,p} = E_e \cdot \cos(\varphi), \quad (2.1)$$

де E_e – амплітуда падаючого променя, $E_{e,s}$ і $E_{e,p}$ – амплітуди s - і p - компонент падаючого променя, φ – АПП падаючого променя.

Формули Френеля для заломленого та відбитого променів відображають коефіцієнт посилення s – і p – компонент падаючого променю при його відбиванні та заломленні і мають наступний вид:

$$\begin{aligned} K_{r,s0} &= \frac{E_{r,s}}{E_{e,s}} = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)}, & K_{r,p0} &= \frac{E_{r,p}}{E_{e,p}} = \frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)}, \\ K_{d,s0} &= \frac{E_{d,s}}{E_{e,s}} = \frac{2 \cdot \sin(r) \cdot \cos(i)}{\sin(i+r)}, & K_{d,p0} &= \frac{E_{d,p}}{E_{e,p}} = \frac{2 \cdot \sin(r) \cdot \cos(i)}{\sin(i+r) \cdot \cos(i-r)}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $K_{r,s0}$, $K_{r,p0}$, $K_{d,s0}$, $K_{d,p0}$ – коефіцієнти посилення компонент падаючого променю при переході повітря – пластина для компонент відбитого та заломленого променів відповідно, $E_{r,s}$ і $E_{r,p}$ – амплітуди s – і p – компонент відбитого променю, $E_{d,s}$ і $E_{d,p}$ – амплітуди s – і p – компонент заломленого променю, i – просторовий КПП, r – кут заломлення променю.

З врахуванням схеми розкладання електричного вектору на s – і p – компоненти формули для визначення амплітуд s – і p – компонент заломленого та відбитого променів матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned} E_{r,s} &= K_{r,s0} \cdot E_{e,s} = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \cdot E_e \cdot \sin(\varphi), & E_{r,p} &= K_{r,p0} \cdot E_{e,p} = \frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)} \cdot E_e \cdot \cos(\varphi), \\ E_{d,s} &= K_{d,s0} \cdot E_{e,s} = \frac{2 \cdot \sin(r) \cdot \cos(i)}{\sin(i+r)} \cdot E_e \cdot \sin(\varphi), \\ E_{d,p} &= K_{d,p0} \cdot E_{e,p} = \frac{2 \cdot \sin(r) \cdot \cos(i)}{\sin(i+r) \cdot \cos(i-r)} \cdot E_e \cdot \cos(\varphi). \end{aligned} \quad (2.3)$$

При цьому, формули для визначення амплітуд заломленого та відбитого променю матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned} E_r &= \sqrt{E_{r,s}^2 + E_{r,p}^2} = E_e \cdot \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \sqrt{\sin^2(\varphi) + \frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)} \cdot \cos^2(\varphi)}, \\ E_d &= \sqrt{E_{d,s}^2 + E_{d,p}^2} = 2 \cdot E_e \cdot \frac{\sin(r) \cdot \cos(i)}{\sin(i+r)} \sqrt{\sin^2(\varphi) + \frac{1}{\cos^2(i-r)} \cdot \cos^2(\varphi)}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

З урахуванням зміни поперечного перетину променю внаслідок заломлення, формули для визначення інтенсивності заломленого та відбитого променю матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned} I_r = E_r^2 &= E_e^2 \cdot \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \cdot \left(\sin^2(\varphi) + \frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)} \cdot \cos^2(\varphi) \right), \\ I_d = E_d^2 \cdot n \cdot \frac{\cos(r)}{\cos(i)} &= 4 \cdot E_e^2 \cdot n \cdot \frac{\sin^2(r) \cdot \cos(i) \cdot \cos(r)}{\sin^2(i+r)} \cdot \left(\sin^2(\varphi) + \frac{1}{\cos^2(i-r)} \cdot \cos^2(\varphi) \right). \end{aligned} \quad (2.5)$$

де I_r, I_d , – інтенсивності відбитого та заломленого променів, відповідно.

Формула, яка пов'язує інтенсивності падаючого, відбитого та заломленого променів матиме наступний вид:

$$I_e = E_e^2 = I_r + I_d = E_r^2 + n \cdot E_d^2 \cdot \frac{\cos(r)}{\cos(i)}. \quad (2.6)$$

Формула (2.6) відображає закон збереження енергії при падінні променю на межу поділу двох середовищ. Також слід відмітити, що принцип роботи існуючих поляриметричних пристроїв та систем полягає в вимірюванні інтенсивності падаючого на них променю, а не його амплітуди.

Для детальнішого дослідження процесу розподілу інтенсивності ЛПП після його падіння на ІДПП розглянемо схему його розповсюдження, яка зображена на рис. 2.2. Промінь з амплітудою електричного поля E_e падає на першу грань ІДПП під кутом i . Після падіння падаючий промінь ділиться на два промені: відбитий з амплітудою E_r і заломлений з амплітудою E_{d0} . У відповідності до законів заломлення світла, відбитий промінь відбивається під кутом, який рівний куту падіння i , а заломлений промінь заломлюється під кутом заломлення r , значення якого визначається з закону Снеліуса. Заломлений промінь після проходження ІДПП падає на другу грань ІДПП під кутом i_1 та ділиться на два промені, відбитий з амплітудою $E_{r0.1}$ і заломлений з амплітудою E_d . Оскільки, пластина плоско-паралельна, то КПП та його відбивання від другої

грані ІДПП рівні куту заломлення через першу грань: $i_1 = r$, а кут заломлення через другу грань ІДПП рівний КПП на першу грань: $r_1 = i$. Тому, для променя, що падає на другу грань ІДПП формули Френеля приймуть наступний вид:

$$\begin{aligned} K_{r,s} &= \frac{E_{r,s}}{E_{e,s}} = -\frac{\sin(r-i)}{\sin(r+i)}, & K_{r,p} &= \frac{E_{r,p}}{E_{e,p}} = \frac{\operatorname{tg}(r-i)}{\operatorname{tg}(r+i)}, \\ K_{d,s} &= \frac{E_{d,s}}{E_{e,s}} = \frac{2 \cdot \sin(i) \cdot \cos(r)}{\sin(r+i)}, & K_{d,p} &= \frac{E_{d,p}}{E_{e,p}} = \frac{2 \cdot \sin(i) \cdot \cos(r)}{\sin(r+i) \cdot \cos(r-i)}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

де $K_{r,s}$, $K_{r,p}$, $K_{d,s}$, $K_{d,p}$ – коефіцієнти посилення компонент падаючого променя при переході пластина – повітря для s – і p – компонент відбитого та заломленого променів, відповідно.

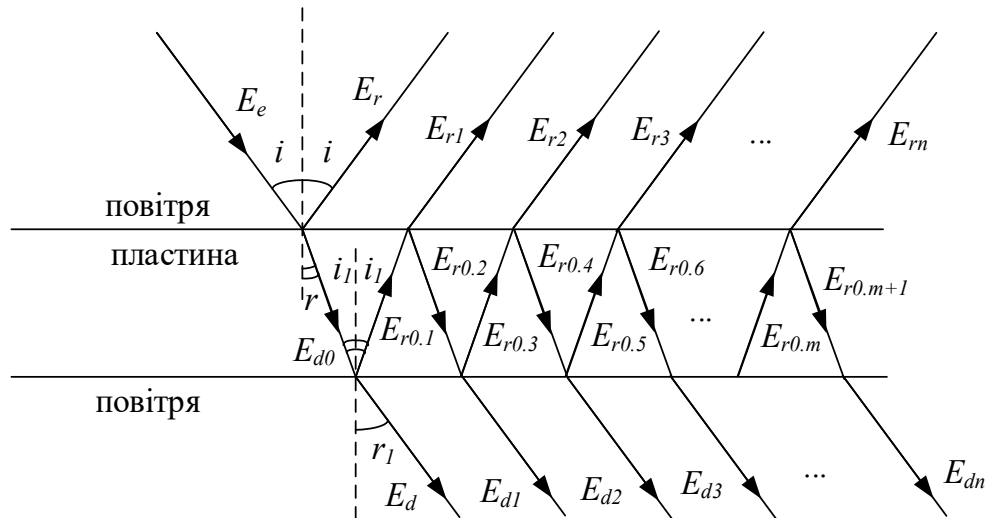


Рисунок 2.2 – Схема розповсюдження променя після його падіння на ІДПП

Відбитий від другої грані ІДПП промінь з амплітудою $E_{r0.1}$ після проходження ІДПП падає на першу грань ІДПП, де відбувається його відбивання та заломлення. Заломлений промінь з амплітудою E_{r1} розповсюджується в напрямку розповсюдження відбитого від першої грані ІДПП променя, а відбитий промінь з амплітудою $E_{r0.2}$ проходить через ІДПП, падає на другу грань ІДПП, де відбувається процес його відбивання та заломлення. Заломлений промінь з амплітудою E_{d1} розповсюджується в напрямку розповсюдження двічізаломленого променя, а відбитий промінь з амплітудою $E_{r0.3}$ проходить через ІДПП, падає на першу грань ІДПП, де відбувається процес його відбивання та заломлення і процес

знову повторюється. Таким чином, після падіння поляризованого променя з амплітудою E_e на ІДПП він ділиться на три основні складові: відбитий від першої грані ІДПП промінь з амплітудою E_r , двічізаломлений промінь з амплітудою E_d , умовно поглинутий промінь з амплітудою $E_{r0,1}$, який розкладається на умовно «відбиті» промені з амплітудами $E_{r1} \dots E_{rn}$ та умовно «двічізаломлені» промені з амплітудами $E_{d1} \dots E_{dn}$. При цьому, формули для визначення інтенсивності відбитого I_r , двічі заломленого I_d , умовно «відбитих» та умовно «двічізаломлених» променів матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned}
 I_r &= K_{r,s0}^2 \cdot E_e^2 + K_{r,p0}^2 \cdot E_e^2; \\
 I_d &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot E_e^2; \\
 I_{r1} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot K_{r,s}^2 \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot K_{r,p}^2 \cdot E_e^2; \\
 I_{d1} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot K_{r,s}^4 \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot K_{r,p}^4 \cdot E_e^2; \\
 I_{r2} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot K_{r,s}^6 \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot K_{r,p}^6 \cdot E_e^2; \\
 I_{d2} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot K_{r,s}^8 \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot K_{r,p}^8 \cdot E_e^2; \\
 I_{r3} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot K_{r,s}^{10} \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot K_{r,p}^{10} \cdot E_e^2; \\
 I_{d3} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot K_{r,s}^{12} \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot K_{r,p}^{12} \cdot E_e^2 \\
 &\dots \\
 I_{rn} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot K_{r,s}^{2(2n-1)} \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot K_{r,p}^{2(2n-1)} \cdot E_e^2; \\
 I_{dn} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot K_{r,s}^{2(2n)} \cdot E_e^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot K_{r,p}^{2(2n)} \cdot E_e^2.
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

На основі формул (2.8) можна вивести формули визначення інтенсивності умовно «відбитих» та «двічізаломлених» променів, які матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=0}^n I_{r_i} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot E_e^2 \cdot \sum_{i=0}^n K_{r,s}^{2(2n-1)} + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot E_e^2 \cdot \sum_{i=0}^n K_{r,p}^{2(2n-1)}; \\
 \sum_{i=0}^n I_{d_i} &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot E_e^2 \cdot \sum_{i=0}^n K_{r,s}^{2(2n)} + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot E_e^2 \cdot \sum_{i=0}^n K_{r,p}^{2(2n)}.
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

Враховуючи те, що $0 < K_{r,s} < 1$ та $0 < K_{r,p} < 1$, то вирази під знаком суми можна представити в вигляді суми елементів нескінченної спадної геометричної прогресії. З врахуванням цього формули для визначення інтенсивності відбитого, двічізаломленого, умовно «відбитих» I_r' та умовно «двічізаломлених» I_d' променів будуть мати наступний вид:

$$\begin{aligned}
I_r &= K_{r,s0}^2 \cdot Ee_s^2 + K_{r,p0}^2 \cdot Ee_p^2; \\
I_d &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot Ee_s^2 + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot Ee_p^2; \\
I_r' &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot Ee_s^2 \cdot \frac{K_{r,s}^2}{1 - K_{r,s}^4} + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot Ee_p^2 \cdot \frac{K_{r,p}^2}{1 - K_{r,p}^4}; \\
I_d' &= K_{d,s0}^2 \cdot K_{d,s}^2 \cdot Ee_s^2 \cdot \frac{K_{r,s}^4}{1 - K_{r,s}^4} + K_{d,p0}^2 \cdot K_{d,p}^2 \cdot Ee_p^2 \cdot \frac{K_{r,p}^4}{1 - K_{r,p}^4}.
\end{aligned} \tag{2.10}$$

В результаті математичного моделювання процесу розповсюдження ЛПП після його падіння на алмазну ІДПП з використанням формул (2.1), (2.2), (2.7) та (2.10) були отримані графіки залежності інтенсивностей променів від КПП для різних значень АПП падаючого променя та від АПП падаючого променя для різних значень КПП. Для більш детального дослідження впливу КПП та АПП падаючого променя, а також матеріалу ІДПП, на розподіл інтенсивності падаючого променя між двічізаломленим та відбитим променями було побудовано графік залежності значення КПП, при якому інтенсивності відбитого та двічізаломленого променів рівні між собою, від значення АПП падаючого променя для ІДПП з трьох матеріалів: алмазу ($n = 2,417$), важкого флінта ТФ5 ($n = 1,755$) та кварцового скла ($n = 1,458$). Значення кутів падіння для точок, що розміщуються вище графіку будуть відповідати КПП при яких більша інтенсивність відбитого променя, а ті, що розміщені нижче – КПП при яких більша інтенсивність двічізаломленого променя.

Проаналізувавши графіки інтенсивностей променів від КПП, які зображені на рис. 2.3 та від АПП падаючого променя, які зображені на рис. 2.4 можна зробити наступні висновки. Загалом, зі зростанням АПП падаючого променя інтенсивність відбитого, умовно «відбитих» та умовно «двічізаломлених» променів – збільшується, а двічізаломленого променя – зменшується. Загалом, зі зростанням КПП інтенсивності відбитого та умовно «двічізаломлених» променів – зростає, а двічізаломленого та умовно «відбитих» – зменшується. Сумарна інтенсивність умовно «відбитих» променів складає до 17%, а умовно «двічізаломлених» – до 9% від інтенсивності падаючого променя.

Графіки залежностей симетричні відносно осі ординат, тобто залежності ідентичні для додатних та від'ємних КПП та АПП падаючого променя.

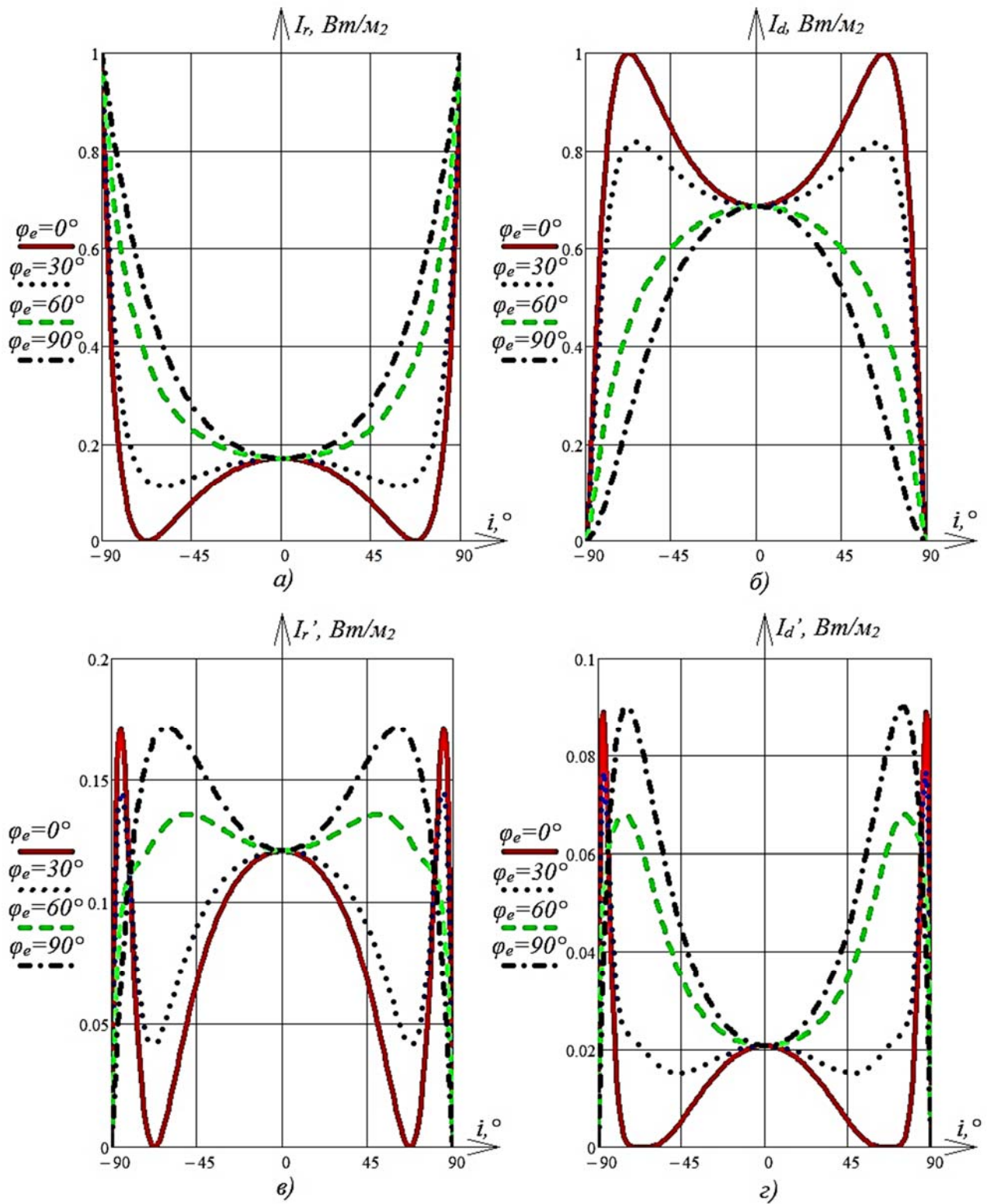


Рисунок 2.3 – Графіки залежності інтенсивностей відбитого ($I_r = f(i)$) (а), двізізаломленого ($I_d = f(i)$) (б), умовно «відбитих» ($I_r' = f(i)$) (в), умовно «двізізаломлених» ($I_d' = f(i)$) (г) променів від КПП.

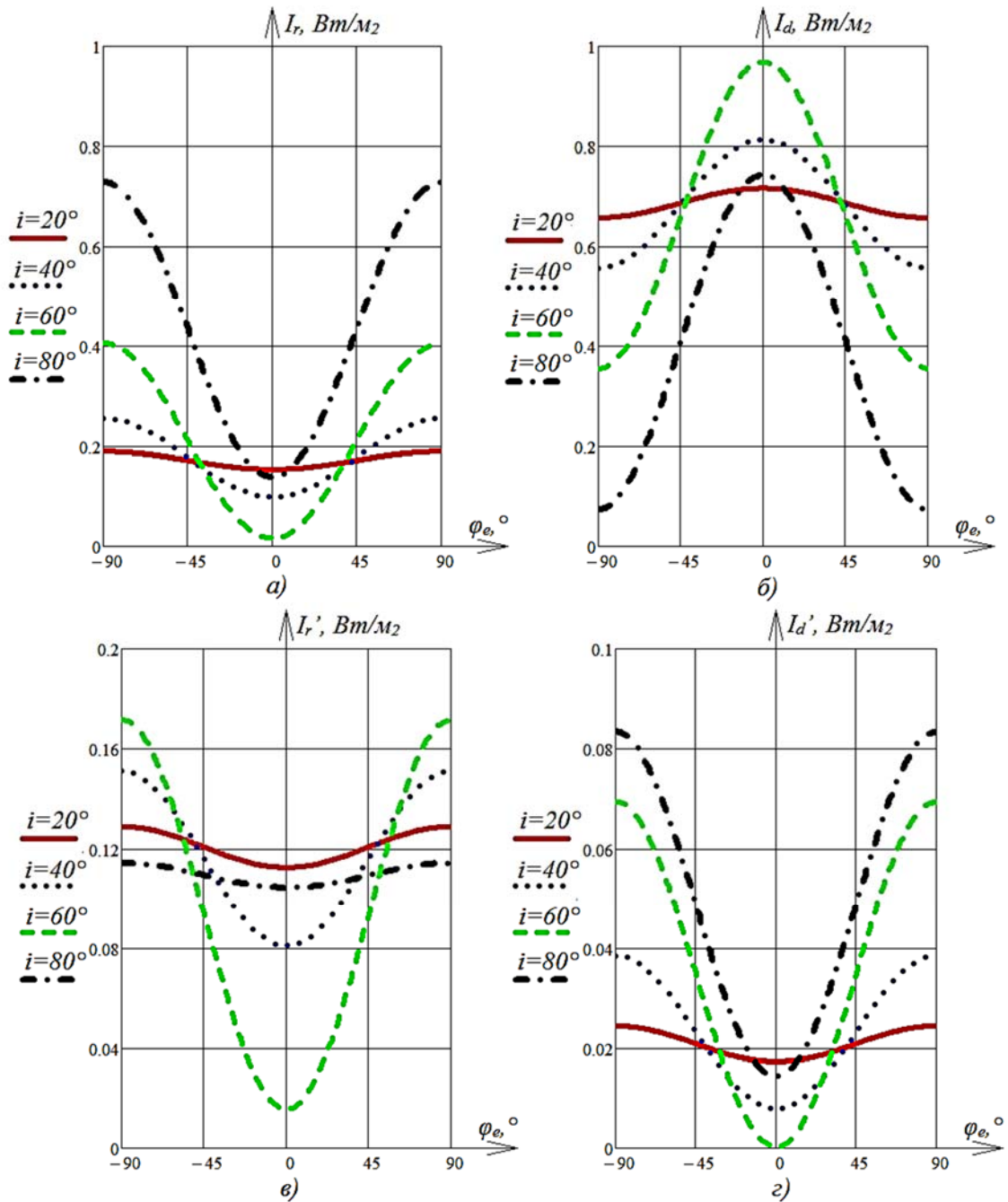


Рисунок 2.4 – Графіки залежності інтенсивностей відбитого ($I_r = f(\varphi_e)$) (а), двічізаломленого ($I_d = f(\varphi_e)$) (б), умовно «відбитих» ($I_r' = f(\varphi_e)$) (в), умовно «двічізаломлених» ($I_d' = f(\varphi_e)$) (г) променів від АПП падаючого променя.

З графіку залежності значення КПП, при якому інтенсивності відбитого та двічізаломленого променів рівні між собою, який приведено на рис. 2.5, на прикладі для алмазної ІДПП, бачимо що для всього діапазону зміни АПП падаючого променя при кутах падіння до 58° більшу інтенсивність має двічізаломлений промінь. Для КПП від 58° до 85° більшу інтенсивність для певних азимутів має двічізаломлений промінь, а для деяких – відбитий. І при

збільшенні кута падіння від 58° до 85° значення АПП для якого інтенсивність двічізаломленого променю вища зменшується від 90° до 0° . А при кутах падіння більше 85° більшу інтенсивність має відбитий промінь. Максимальний КПП, при якому інтенсивність двічізаломленого променю більша за інтенсивність відбитого променю, спостерігається при АПП падаючого променю рівному 0° . Ідентична поведінка характерна і для ІДПП з інших матеріалів.

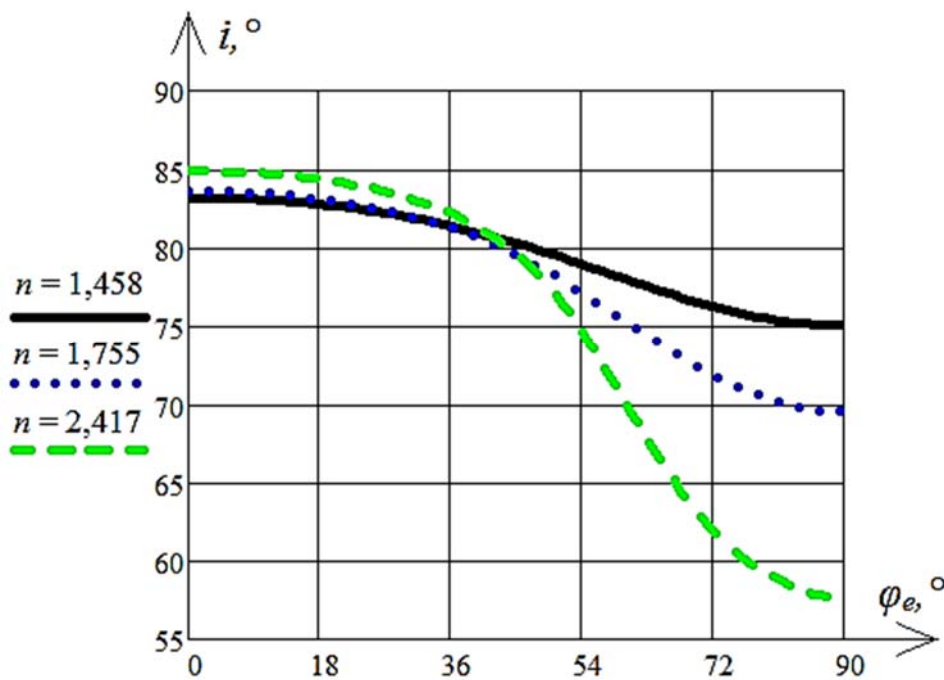


Рисунок 2.5 – Графік залежності КПП, при якому інтенсивності відбитого та двічізаломленого променів рівні між собою, від АПП падаючого променю ($i_d = f(\varphi_e)$).

Також, з рис. 2.5 бачимо, що при зростанні показника заломлення матеріалу ІДПП спостерігається зменшення граничного КПП, для всього діапазону АПП падаючого променю, для якого інтенсивність двічізаломленого променю є переважаючою та незначне зростання граничного КПП – для якого інтенсивність відбитого променю є переважаючою. Таким чином, вимірювання поляризаційних характеристик двічізаломленого променю є більш доцільним, оскільки двічізаломлений промінь характеризується вищою інтенсивністю для переважної кількості КПП та АПП падаючого променю, а також тому, що технічно простіше розмістити блок вимірювання в напрямку розповсюдження двічізаломленого променю, аніж в напрямку відбитого променю.

2.3. Зв'язок між азимутами площини поляризації падаючого та двічізаломленого променів

При проходженні ЛПП крізь ІДПП спостерігається поворот його площини поляризації, який пояснюється різними коефіцієнтами посилення для p – та s – компонент падаючого променю. Залежність АПП двічізаломленого променю від АПП падаючого променю з урахуванням схеми розкладання електричного вектору на s - і p – компоненти має наступний вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\varphi_d) &= \frac{E_{d,s}}{E_{d,p}} = \frac{K_{d,s0} \cdot K_{d,s} \cdot Ee_s}{K_{d,p0} \cdot K_{d,p} \cdot Ee_p} = \cos(i-r) \cdot \cos(r-i) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_e) = \cos^2(i-r) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_e); \\ \phi_d &= \operatorname{arctg}(\cos^2(i-r) \cdot \operatorname{tg}(\phi_e)). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Для дослідження залежності АПП двічізаломленого променю від АПП падаючого променю та КПП проведемо математичне моделювання падіння ЛПП на алмазну ІДПП, результати якого представлені на рис. 2.6. З рис. 2.6 бачимо, що залежність АПП двічізаломленого променю від КПП симетрична відносно осі ординат, а залежності АПП двічізаломленого променю від АПП падаючого променю симетрична відносно початку координат. Це пояснюється тим, що в формулу (2.11) КПП i входить як аргумент функції косинуса, а АПП падаючого променю φ_e – як аргумент функції тангенсу. З урахуванням цього, при подальших розрахунках діапазон зміни КПП i та АПП падаючого променю φ_e будемо брати від 0° до 90° . Також, з приведених графіків видно, що між АПП падаючого та двічізаломленого променів існує пряма залежність. При цьому, для від'ємних КПП, існує пряма залежність між АПП двічізаломленого променю та КПП при додатніх АПП падаючого променю та обернена залежність при їх від'ємних значеннях, а для додатніх КПП навпаки: обернена залежність для додатніх АПП падаючого променю та пряма залежність – при їх від'ємних значеннях.

З графіків, приведених на рис. 2.6, видно, що залежності, для різних значень АПП падаючого променю та КПП, характеризуються різною крутизною, а відповідно і чутливістю вимірювання. При цьому, під чутливістю вимірювання

будемо розуміти відношення зміни досліджуваного параметру, в даному випадку, АПП двічізаломленого променя, до зміни змінюваних параметрів, в даному випадку, показника заломлення матеріалу ІДПП, КПП та його АПП.

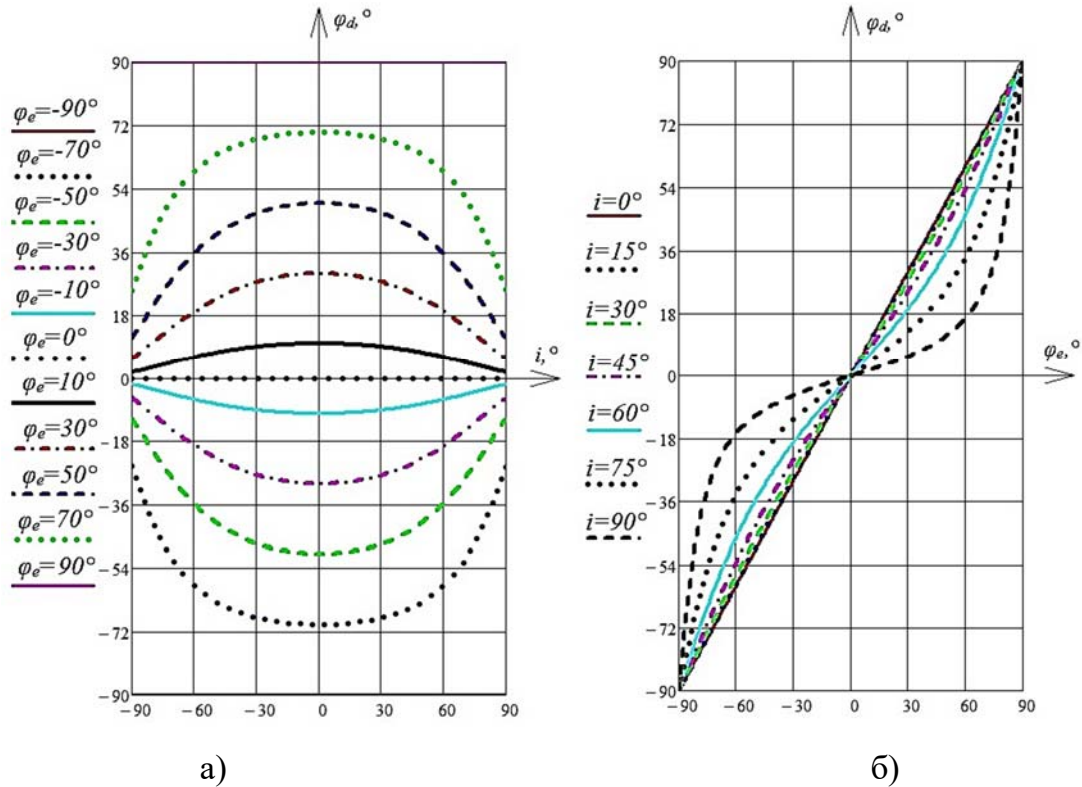


Рисунок 2.6 – Графіки залежності АПП двічізаломленого променя від КПП ($\varphi_d = f(i)$) (а) та від АПП падаючого променя ($\varphi_d = f(\varphi_e)$) (б).

Для дослідження впливу матеріалу ІДПП на чутливість вимірювання проведемо математичне моделювання падіння променя на ІДПП з різних матеріалів. Чутливість вимірювання будемо визначати за наступною формулою:

$$A_{\varphi_d j} = \frac{\Delta \varphi_{d,j}}{\Delta i} = \frac{\varphi_{d,j} - \varphi_{d,j-1}}{i_j - i_{j-1}} \quad (2.12)$$

де Δi – крок зміни КПП, $\Delta \varphi_{d,j}$ – зміна АПП двічізаломленого променя, $\varphi_{d,j}$ і $\varphi_{d,j-1}$ – поточне та попереднє значення АПП двічізаломленого променя, відповідно, i_j і i_{j-1} – поточне та попереднє значення КПП, відповідно.

На рис. 2.7 приведені результати математичного моделювання падіння променя на ІДПП з наступних матеріалів: алмазу ($n = 2,417$), важкого флінта

ТФ5 ($n = 1,755$) та кварцового скла ($n = 1,458$) – графіки залежності чутливості вимірювання АПП двічізаломленого променя від АПП падаючого променя при кроці зміни КПП $\Delta i = 90^\circ$. З графіків на рис. 2.7, бачимо, що при зростанні показника заломлення матеріалу ІДПП зростає по модулю чутливість вимірювання. При цьому, для кожного матеріалу ІДПП існує значення АПП падаючого променя, для якого характерна максимальна чутливість. При зростанні АПП падаючого променя від 0° до цього значення спостерігається плавне зростання чутливості, а при його подальшому зростанні до 90° – її різке зниження. При зростанні значення показника заломлення спостерігається зростання значення АПП падаючого променя з максимальною чутливістю.

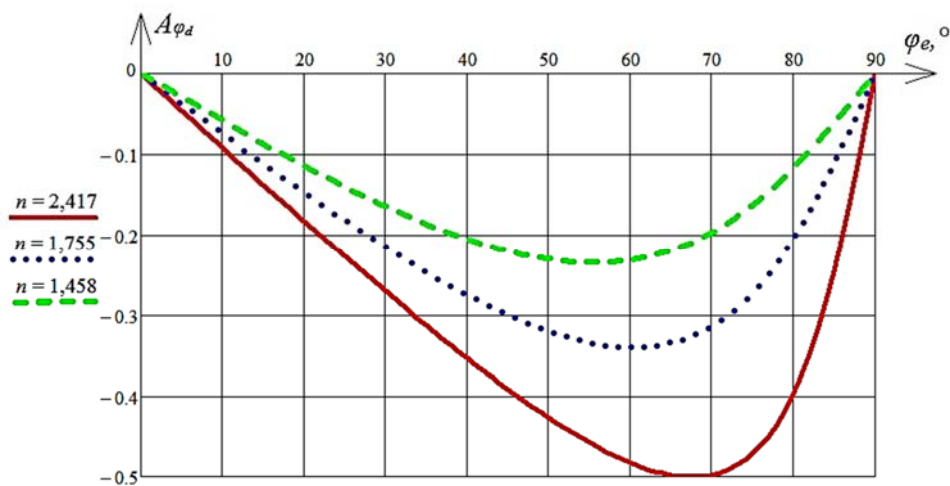


Рисунок 2.7 – Графіки залежності чутливості вимірювання АПП двічізаломленого променя від АПП падаючого променя ($A\varphi_d = f(\varphi_e)$).

Для дослідження впливу КПП та АПП на чутливість вимірювання АПП двічізаломленого променя проведемо математичне моделювання процесу падіння ЛПП на алмазну ІДПП, результати якого приведені на рис. 2.8. В процесі математичного моделювання зміна змінюваних параметрів проводилась з кроком в 1° . З рис. 2.8 бачимо, що при зростанні КПП для переважної кількості значень АПП падаючого променя спостерігається зростання чутливості вимірювання, а при зростанні АПП падаючого променя спостерігається зростання чутливості вимірювання по модулю для переважної кількості КПП. Залежності мають точки екстремуму, після досягнення яких ситуація змінюється

на протилежну. Таким чином, для забезпечення максимальної чутливості необхідно, щоб матеріал ІДПП мав високий показник заломлення, а також обрати пару значень КПП та його АПП, які б забезпечили високу чутливість. В якості матеріалу ІДПП для подальших досліджень було обрано алмаз, оскільки він характеризується одним з найвищих показників заломлення.

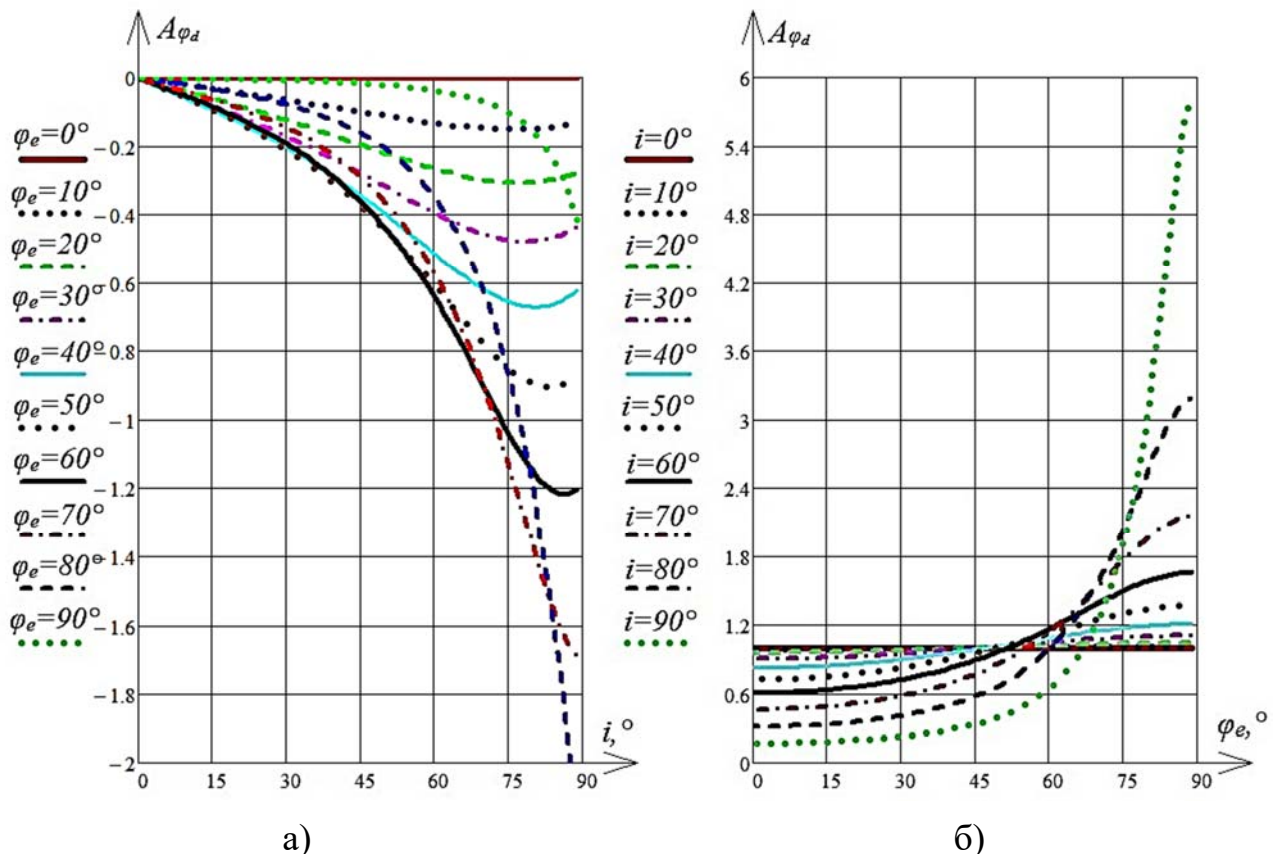


Рисунок 2.8 – Графіки залежності чутливості вимірювання від зміни КПП ($A\varphi_d = f(i)$ ($\Delta i = 1^\circ$)) (а) та від АПП падаючого променя ($A\varphi_d = f(\varphi_e)$ ($\Delta \varphi_e = 1^\circ$)) (б).

З графіків, приведених на рис. 2.7, бачимо, що найвища чутливість вимірювання для алмазної ІДПП, забезпечується при АПП падаючого променя $\varphi_e = 67,5^\circ$. Для визначення КПП на алмазну ІДПП, який забезпечує максимальну чутливість вимірювання побудуємо графік залежності чутливості вимірювання від КПП з АПП $\varphi_e = 67,5^\circ$, який приведено на рис. 2.9, проаналізувавши який бачимо, що максимальна чутливість вимірювання, спостерігається при $i = 90^\circ$. Оптимальне значення КПП знайдемо як точку перетину графіків залежності інтенсивності двічізаломленого променя та чутливості вимірювання по модулю

від КПП, які зображені на рис. 2.10. З графіку, приведеного на рис. 2.10, бачимо, що для алмазної ІДПП оптимальне значення КПП складає 56° .

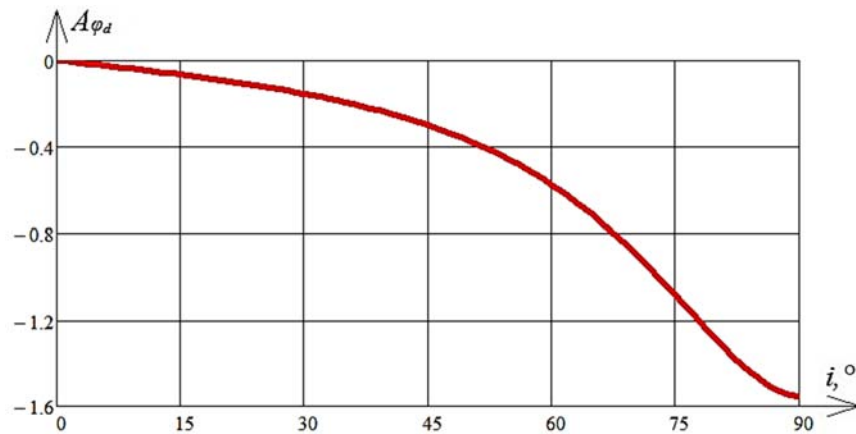


Рисунок 2.9 – Графік залежності чутливості вимірювання АПП двічізаломленого променя від зміни КПП при $\varphi_e = 67,5^\circ$ ($A\varphi_d = f(i)$).

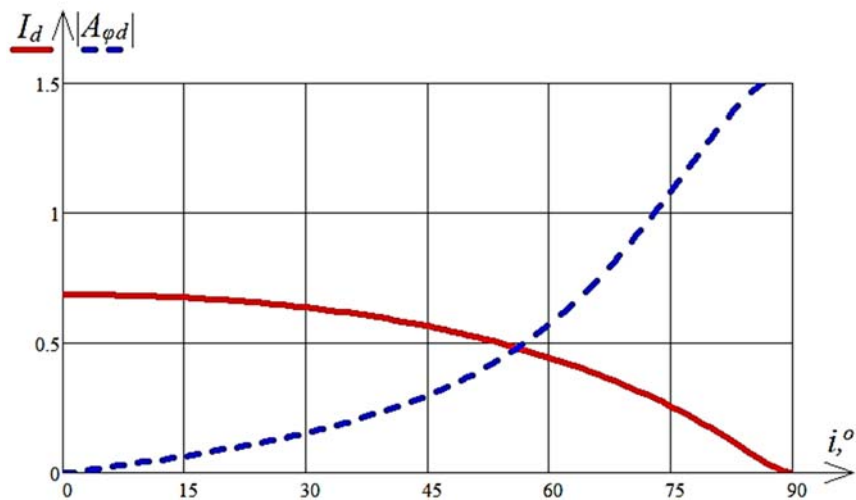


Рисунок 2.10 – Графіки залежності інтенсивності двічізаломленого променя ($I = f(i)$) та чутливості вимірювання його АПП ($A\varphi_d = f(i)$) від КПП при $\varphi_e = 67,5^\circ$

Таким чином, значення АПП двічізаломленого променя залежить від трьох параметрів: АПП падаючого променя та його кута падіння, а також від показника заломлення матеріалу ІДПП. В результаті математичного моделювання було обґрунтовано вибір алмазу в якості матеріалу ІДПП, а також було визначено, що максимальна чутливість вимірювання забезпечується при АПП падаючого променя $\varphi_e = 67,5^\circ$, для якого оптимальний КПП складає 56° . Отримана процедура і результати математичного моделювання дозволяють визначити оптимальні параметри роботи поляриметричної системи.

2.4. Поляриметричний метод визначення напрямку на джерело лінійно поляризованого випромінювання

Дистанційне визначення взаємного просторового положення АТЗ з метою визначення їх відносної просторової орієнтації та координат є актуальною науковою задачею. Вирішення цієї задачі є особливо актуальним для управління рухомими системами з метою забезпечення їх руху по заданій траєкторії з заданим рівнем безпеки руху, а також з метою попередження та уникнення зіткнень чи забезпечення безпечного стикування. Визначення взаємного просторового положення АТЗ можливе завдяки визначенню відстані між ними та азимутального напрямку один на одного. Одним з напрямків для визначення азимутального напрямку АТЗ один на одного є розробка поляриметричної системи дистанційного визначення взаємного просторового положення АТЗ. Її принцип роботи полягає в вимірюванні параметрів ЛПП, який випромінюється на одному АТЗ та сприймається на іншому з подальшим визначенням азимутального напрямку на джерело поляризованого випромінювання.

Суть поляриметричного методу визначення азимутального напрямку на джерело поляризованого випромінювання [17], блок схема якого зображена на рис. 2.11, полягає в наступному. Джерело поляризованого випромінювання 1 випромінює потік поляризованих променів з визначеним кутом розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині, а також з визначеним АПП. При цьому, може забезпечується зв'язок між напрямком випромінювання та АПП променя, що випромінюється. Потік поляризованих променів після проходження середовища розповсюдження 2 падає на ІДПП 3, де відбувається їх заломлення та відбивання. ІДПП забезпечує поворот площини поляризації двічізаломленого променя в залежності від АПП падаючого променя та його кута падіння. Двічізаломлені промені за допомогою збиральної лінзи 4 фокусуються на модуляторі 5, після проходження якого проходять через аналізатор 6 та падають на фотодетектор 7. Модулятор 5 забезпечує модуляцію променів в змінному магнітному полі з метою підвищення чутливості вимірювання та забезпечує «тіньовий» метод вимірювання. Аналізатор 6 забезпечує визначення АПП

променю, а фотодетектор 7 – перетворення значення АПП променю в електричний сигнал. Отриманий після фотодетектора 7 електричний сигнал надходить в блок обчислень та управління 8, який призначений для управління роботою системи та здійснення розрахунків і забезпечує визначення АПП падаючого променю, а також його плоских кутів падіння в горизонтальній та вертикальній площині. Сигнал від блоку обчислень та управління 8 надходить до модулятора для забезпечення доуправління його роботою з метою забезпечення «тіньового» методу вимірювання, а також може надходити в обчислювальну систему більш високої ієрархії, наприклад в систему автоматичного управління.

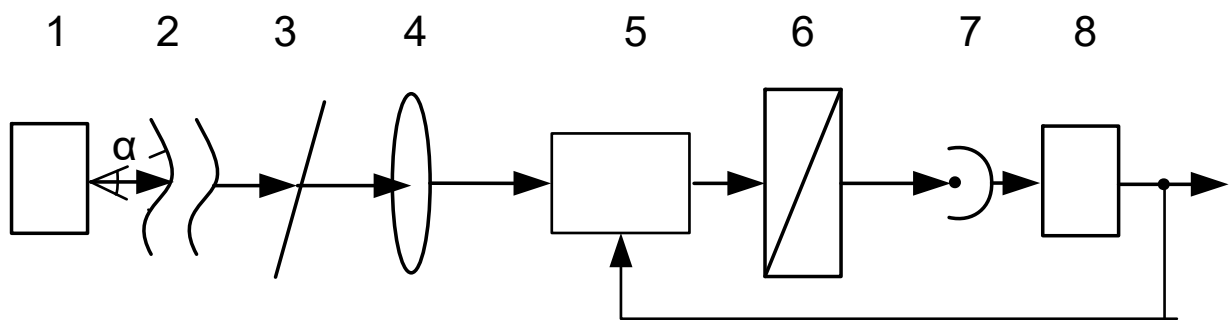


Рисунок 2.11 – Блок-схема поляриметричного методу визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання

Таким чином, запропонований поляриметричний метод визначення азимутального напрямку на джерело поляризованого випромінювання забезпечує вимірювання АПП двічізаломленого променю з подальшим визначенням АПП падаючого променю та його просторового кута падіння. При цьому, використання модулятора в оптичному каналі та застосуванні «тіньового» методу проведення вимірювань забезпечує високу чутливість. Вимірюваний параметр – АПП двічізаломленого променю пов'язаний з обчислювальними параметрами – просторовим КПП i та його АПП φ_e , як зазначалось, залежністю (2.11).

Схема розкладання просторового КПП i на плоскі КПП в горизонтальній i_z та вертикальній i_e площині представлена на рис. 2.12, де точки С та О - джерело випромінювання та блок вимірювання.

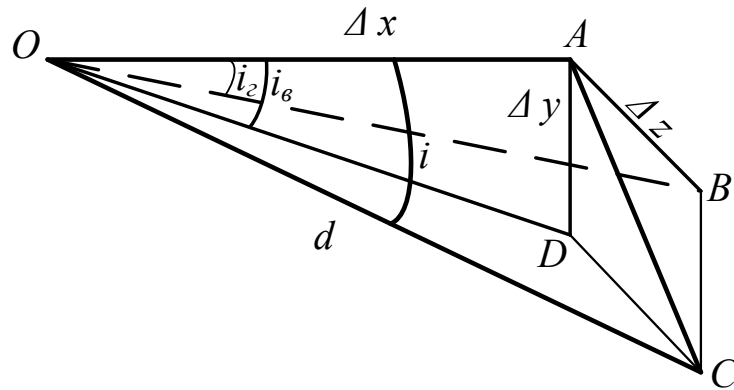


Рисунок 2.12 – Схема розкладання просторового КПП i на плоскі КПП в горизонтальній i_z та вертикальній i_6 площині

Формула залежності просторового кута падіння від значень його плоских кутів падіння виводиться наступним чином:

$$\begin{aligned}
 OA &= \Delta x = d \cdot \cos(i); \\
 AB = DC = \Delta z &= \Delta x \cdot \operatorname{tg}(i_z); \quad AD = BC = \Delta y = \Delta x \cdot \operatorname{tg}(i_6); \quad AC = \Delta x \cdot \operatorname{tg}(i); \\
 AC^2 &= DC^2 + AD^2; \\
 \Delta x^2 \cdot \operatorname{tg}^2(i) &= \Delta x^2 \cdot (\operatorname{tg}^2(i_z) + \operatorname{tg}^2(i_6)); \\
 i &= \operatorname{arctg}(\sqrt{\operatorname{tg}^2(i_z) + \operatorname{tg}^2(i_6)}).
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

де d – відстань між АТЗ, Δx – відстань між АТЗ по повздовжній осі, Δy – відстань між АТЗ в вертикальній площині, Δz – відстань між АТЗ в горизонтальній площині, i – просторовий кут падіння, i_z – плоский КПП в горизонтальній площині, i_6 – плоский КПП в вертикальній площині.

На рис. 2.13 приведені графіки залежності просторового КПП від плоских КПП в горизонтальній та вертикальній площині, отримані в результаті математичного моделювання. Проаналізувавши графіки приведені на рис. 2.13 можна зробити наступні висновки: при зростанні плоских кутів падіння спостерігається зростання просторового кута падіння; крутизна графіку залежності, а отже і чутливість, зростає при окремому зростанні плоских кутів падіння та зменшується при їх одночасному зростанні; графіки залежності для плоских кутів падіння в горизонтальній та вертикальній площині ідентичні, тобто їх вплив рівнозначний, що також видно із формули (2.13).

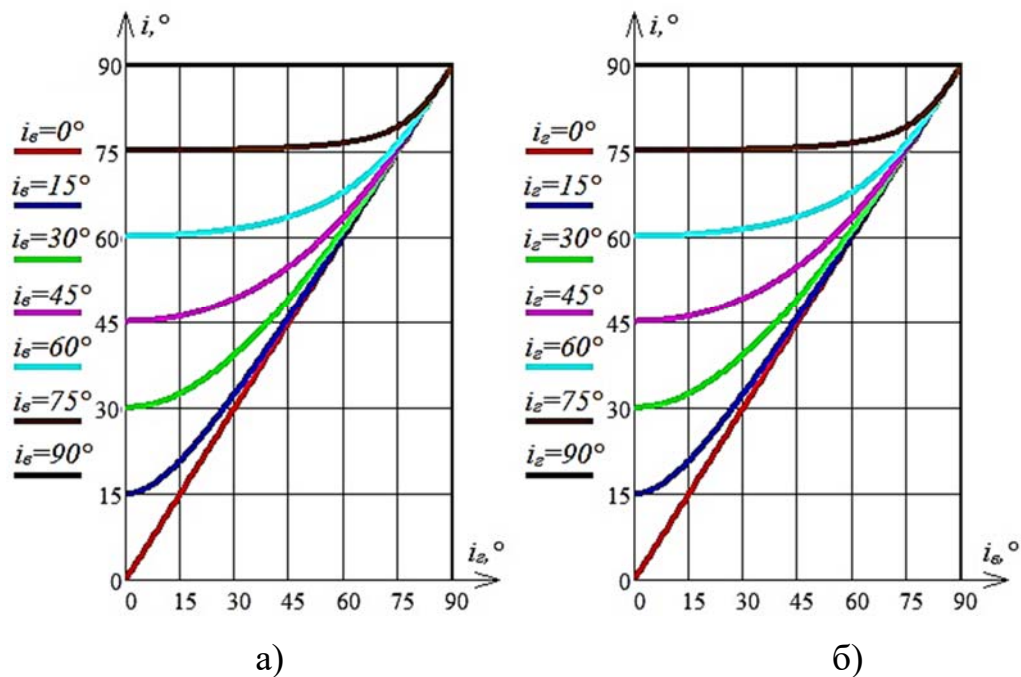


Рисунок 2.13 – Графіки залежності просторового кута падіння від плоских кутів падіння в горизонтальній ($i = f(i_e)$) (а) та вертикальній ($i = f(i_e)$) (б) площині.

Для визначення азимутального напрямку на джерело поляризованого випромінювання з використанням запропонованого методу вимірювання необхідно забезпечити визначення плоских КПП в горизонтальній та вертикальній площині, які і визначатимуть азимут на джерело випромінювання в відповідних площинах. Для забезпечення визначення азимутального напрямку на нерухоме джерело поляризованого випромінювання, необхідно забезпечити вимірювання в двох каналах, за умови відомого значення АПП падаючого променя та трьох, за умови – коли його значення невідоме. При цьому, передбачається, що крен відсутній. За умови, коли крен між АТЗ може мати місце, то кількість каналів вимірювання має бути збільшена на один. Кількість каналів необхідних для визначення просторового положення АТЗ відносно рухомого джерела поляризованого випромінювання визначається його схемою випромінювання та кількістю степенів свободи відносного руху між джерелом випромінювання та АТЗ. Загалом, на кожен із степенів свободи відносного руху необхідно забезпечити, щонайменше, один канал вимірювання. Детальніше питання визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання та визначення відносного положення АТЗ буде розглянуте в розділі 3.

Система, яка реалізує запропонований метод складається з трьох частин: блоку випромінювання, середовища розповсюдження та блоку вимірювання. Блок випромінювання випромінює ЛПП з визначеними апертурою розсіювання та АПП. Середовище розповсюдження забезпечує розповсюдження ЛПП від блоку випромінювання до блоку вимірювання та може спричинювати зміну поляризаційних властивостей ЛПП. Блок вимірювання вимірює АПП двічізаломленого променя та визначення АПП падаючого променя та його плоских кутів падіння в горизонтальній та вертикальній площинах.

Запропонований поляриметричний метод визначення напрямку на джерело ЛПП характеризується відносно великою кількістю каналів блоку вимірювання: від 2 до 4 при визначенні напрямку на нерухоме джерело ЛПП та щонайменше по одному каналу на кожен із степенів свободи відносного руху при визначенні просторового положення відносно рухомого джерела ЛПП. Зменшення впливу середовища розповсюдження та кількості каналів вимірювання можливе завдяки використанню одно-канального блоку випромінювання з модулятором або двох-канального блоку випромінювання. При цьому, принцип роботи полягатиме в випромінюванні двох поляризованих променів, АПП φ_e яких відрізняються на визначену величину δ та вимірюванні двох АПП двічізаломлених променів з подальшим проведенням розрахунків. При застосуванні одно-канального блоку випромінювання з модулятором випромінювання проводяться в імпульсному режимі, а при застосуванні двох-канального блоку випромінювання – в імпульсному або безперервному режимі.

Суть вдосконаленого поляриметричного методу визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання розглянемо на прикладі системи з одно-канальним блоком випромінювання з модулятором, блок-схема якого зображена на рис. 2.14. Джерело випромінювання 1 випромінює потік ЛПП визначеної довжини хвилі з визначеним АПП в імпульсному режимі. Потік ЛПП проходить через комірку Фарадея 2, яка забезпечує поворот площини поляризації ЛПП парного імпульсу на величину δ у відповідності до керуючого сигналу, який надходять від звукового генератора 3. Після проходження комірки

Фарадея ЛПП проходить через розсіювальну лінзу 4, яка забезпечує розсіювання ЛПП з визначеними апертурами розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині. Розсіяний ЛПП 5 проходить через середовище розповсюдження 6, після проходження якого ЛПП 7 падає на ІДПП 8. ІДПП забезпечує поворот площини поляризації двічізаломленого в залежності від АПП падаючого променя та його просторового кута падіння. В кожному з двох каналів вимірювання відбувається наступне. Після проходження ІДПП 8 двічізаломлений промінь проходить через фокусуючу лінзу 9 та фокусується на модулятор 10. Модулятор 10 забезпечує модуляцію ЛПП в змінному магнітному полі, для підвищення чутливості вимірювання. Після модулятора 10 ЛПП проходить через аналізатор 11 та падає на фотодетектор 12, які забезпечують визначення АПП двічізаломленого променя та перетворення його значенню в електричний сигнал. Електричний сигнал після фотодетектора 12 надходить в блок обчислення та управління 13, який забезпечує управління роботою системи та здійснює визначення АПП падаючого променя і його плоских кутів падіння. Сигнал від блоку обчислень та управління 13 надходить до модулятора 10 для забезпечення «тіньового» методу вимірювання. Також сигнал від блоку обчислення та управління 13 може надходити в систему управління більш високої ієрархії, де відбувається визначення відносного просторово положення АТЗ та параметрів їх відносного руху з можливістю формування сигналів доуправління для попередження та уникнення зіткнень.

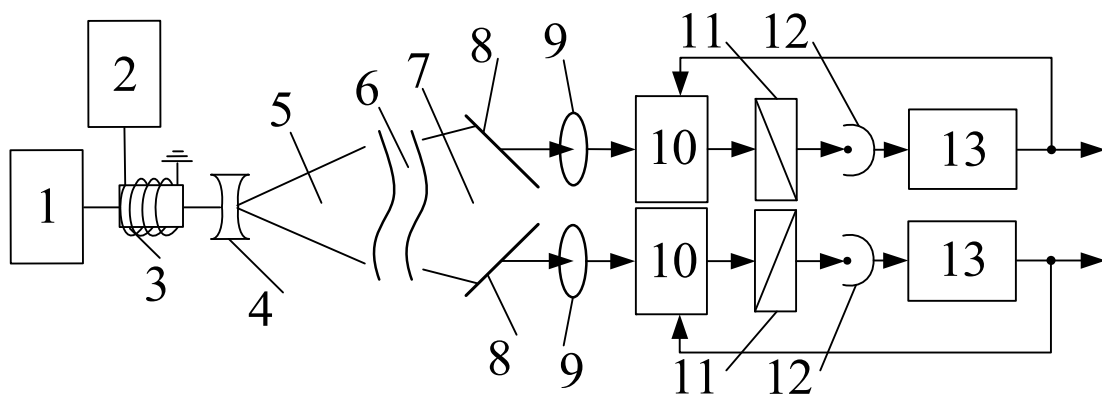


Рисунок 2.14 – Блок-схема вдосконаленого поляриметричного методу визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання

Оскільки, визначення плоских КПП та його АПП є оберненою задачею, то, також, необхідно розробити алгоритм проведення вимірювань та здійснення обчислень, який би забезпечив однозначне визначення шуканих параметрів. Алгоритм проведення вимірювання для вдосконаленого поляриметричного методу визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання, блок-схема якого зображена на рис. 2.15, полягає в наступному [18].

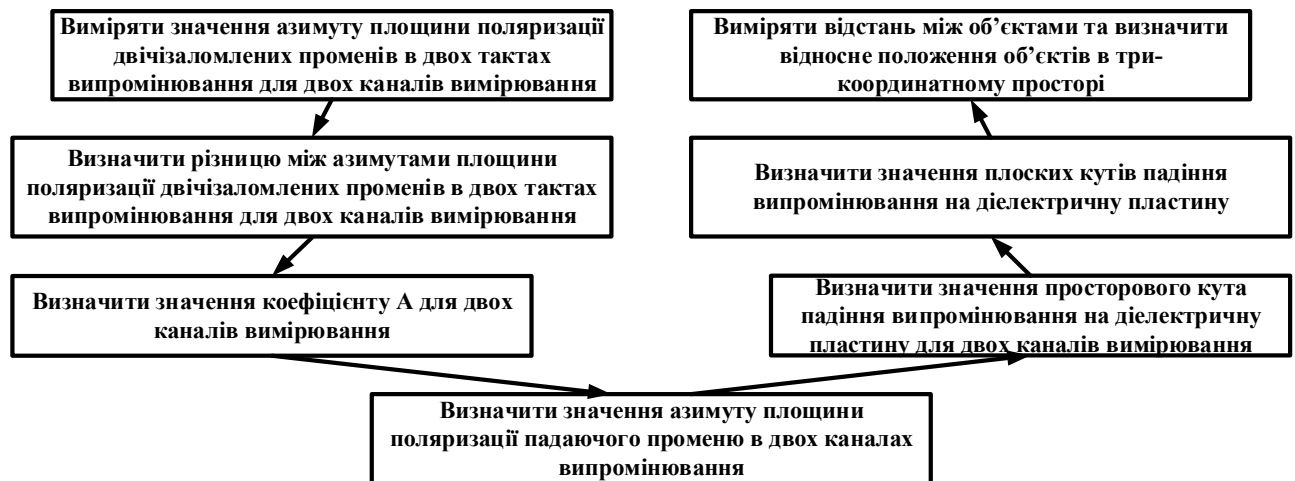


Рисунок 2.15 – Блок-схема алгоритму проведення вимірювань

Крок 1. Виміряти та передати в блок обчислень та управління АПП двічізаломленого променя для променя в першому (ϕ_{d0}) та другому (ϕ_{d1}) такті випромінювання для двох каналів вимірювання.

Крок 2. Визначити різницю (Δ) між АПП двічізаломлених променів в першому та другому такті випромінювання для двох каналів вимірювання:

$$\Delta = \phi_{d1} - \phi_{d0}.$$

Крок 3. Визначити значення коефіцієнту A для двох каналів вимірювання:

$$A = \frac{1 + \frac{\operatorname{tg}(\Delta)}{\operatorname{tg}(\phi_{d0})}}{1 - \operatorname{tg}(\phi_{d0}) \cdot \operatorname{tg}(\Delta)}.$$

Крок 4. Визначити значення АПП падаючого променя (φ_{e1} та φ_{e2}) для двох каналів вимірювання:

$$\varphi_{e1,2} = \arctg \left(\frac{-(1-A) \pm \sqrt{(1-A)^2 - 4 \cdot A \cdot \operatorname{tg}^2(\delta)}}{2 \cdot A \cdot \operatorname{tg}(\delta)} \right).$$

Крок 5. Обрати значення АПП падаючого променя з урахуванням наступної умови, для двох каналів вимірювання:

$$\varphi_e = \begin{cases} \varphi_{e1} & \text{if} \left(\left| 1 - \frac{\operatorname{tg}(\varphi_{d0})}{\operatorname{tg}(\varphi_{e1})} \right| < \left| 1 - \frac{\operatorname{tg}(\varphi_{d0})}{\operatorname{tg}(\varphi_{e2})} \right| \& \frac{\operatorname{tg}(\varphi_{d0})}{\operatorname{tg}(\varphi_{e1})} < 1 \right) \\ \varphi_{e2} & \text{if} \left(\left| 1 - \frac{\operatorname{tg}(\varphi_{d0})}{\operatorname{tg}(\varphi_{e2})} \right| < \left| 1 - \frac{\operatorname{tg}(\varphi_{d0})}{\operatorname{tg}(\varphi_{e1})} \right| \& \frac{\operatorname{tg}(\varphi_{d0})}{\operatorname{tg}(\varphi_{e2})} < 1 \right) \end{cases}.$$

Крок 6. Визначити значення просторового кута падіння випромінювання на ІДПП (i_1, i_2) для двох каналів вимірювання:

$$i_{1,2} = \arctg \left(\frac{\mp \sin \left(\arccos \left(\mp \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi_{d0})}{\operatorname{tg}(\varphi_e)}} \right) \right) \cdot n}{n \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{tg}(\varphi_{d0})}{\operatorname{tg}(\varphi_e)}} \pm 1} \right).$$

Крок 7. Обрати в якості значення просторового кута падіння випромінювання на ІДПП значення з урахуванням наступної умови для двох каналів вимірювання:

$$i = \begin{cases} i_1 & \text{if} (i_1 > 0 \& i_2 < 0) \\ i_2 & \text{if} (i_2 > 0 \& i_1 < 0) \end{cases}.$$

Крок 8. Визначити плоскі кути падіння випромінювання на ІДПП (i_z, i_θ), розв'язавши наступну систему рівняння за допомогою метода Гауса-Зейделя:

$$\begin{cases} i_z = \arctg\left(\sqrt{\operatorname{tg}^2(i_{n1}) - \operatorname{tg}^2(i_\theta + i_{nl.\theta.1})}\right) - i_{nl.z.1}, \\ i_\theta = \arctg\left(\sqrt{\operatorname{tg}^2(i_{n2}) - \operatorname{tg}^2(i_z + i_{nl.z.2})}\right) - i_{nl.\theta.2} \end{cases},$$

де i_{n1}, i_{n2} – просторові КПП в першому та другому каналах вимірювання, відповідно; $i_{nl.z.1}, i_{nl.z.2}, i_{nl.\theta.1}, i_{nl.\theta.2}$ – кути установки ІДПП в горизонтальній та вертикальній площинах в першому та другому каналах вимірювання, відповідно.

Крок 9. Виміряти відстань між об'єктами d та визначити відносного положення АТЗ в три-координатному просторі:

$$\begin{aligned} \Delta x &= d \cdot \cos(i); \\ \Delta y &= d \cdot \cos(i) \cdot \operatorname{tg}(i_\theta); \\ \Delta z &= d \cdot \cos(i) \cdot \operatorname{tg}(i_z). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Запропонований алгоритм вимірювання забезпечує однозначне визначення АПП падаючого променя φ_e та його плоских кутів падіння в горизонтальній i_z та вертикальній i_θ площині. Отримані значення можуть передаватись до бортового комп'ютера чи системи управління, де відбувається їх обробка, проводяться розрахунки та відбувається визначення відносного положення АТЗ та параметрів їх відносного руху.

Для високоточного вимірювання відстані між об'єктами d може бути застосований вузькоспрямований лазерний далекомір, який визначатиме відстань до АТЗ з визначенням, за допомогою запропонованого методу, азимутальним напрямком. Таким чином, поєднання вузькоспрямованого лазерного далекоміру з системою, що реалізує поляриметричний метод визначення напрямку на джерело ЛПП, дозволить визначати взаємне просторового положення АТЗ. При цьому, буде забезпечуватись визначення як позиційних, так і орієнтаційних параметрів відносного положення АТЗ.

2.5. Вплив середовища розповсюдження на характеристики лінійно поляризованого променя

При проходженні випромінювання через середовище розповсюдження відбувається зменшення його інтенсивності та зміна його поляризаційних властивостей. Вид та величина впливу середовища розповсюдження залежить від його фізико-хімічного складу та товщини. Основні види впливу середовища розповсюдження на характеристики випромінювання показано на рис. 2.16.



Рисунок 2.16 – Схема впливу середовища розповсюдження на характеристики випромінювання

Процес поглинання випромінювання полягає в зменшенні його інтенсивності в результаті поглинання квантів випромінювання атомами або молекулами речовини з подальшим їх переходом з нижчих енергетичних рівнів на вищі або з одного коливального чи обертового стану в інший. Для кількісної оцінки поглинальної здатності середовища використовується коефіцієнт пропускання, а також поняття оптичної густини. Під коефіцієнтом пропускання T розуміють безрозмірну величину, яка визначає відношення інтенсивності випромінювання I , яке пройшло через шар речовини товщиною d до інтенсивності випромінювання I_0 , що падає на шар речовини: $T = I / I_0$. Під оптичною густиною D розуміють безрозмірну міру поглинання середовищем для даної довжини хвилі, яка визначається як десятковий логарифм від величини

оберненої до коефіцієнту пропускання: $D = \lg(1/T) = \lg(I_0/I) = k \cdot d$, де k – коефіцієнт, який залежить від довжини хвилі. Таким чином, величина поглинання випромінювання залежить від довжини хвилі, фізико-хімічного складу середовища розповсюдження та його товщини.

На рис. 2.17 представлений спектр пропускання для атмосфери Землі [5], яка виступає середовищем розповсюдження в процесі визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання. Як бачимо з рис. 2.17, можна виділити наступні діапазони довжини хвилі, які характеризуються високим (понад 0,9) коефіцієнтом пропускання випромінювання: в видимому спектрі – 0,6 – 0,7 мкм; в короткохвильовому інфрачервоному спектрі – 0,83 – 0,89 мкм, 0,98 – 1,1 мкм, 1,22 – 1,3 мкм; в середньохвильовому інфрачервоному спектрі – 1,52 – 1,73 мкм, 2,1 – 2,28 мкм.

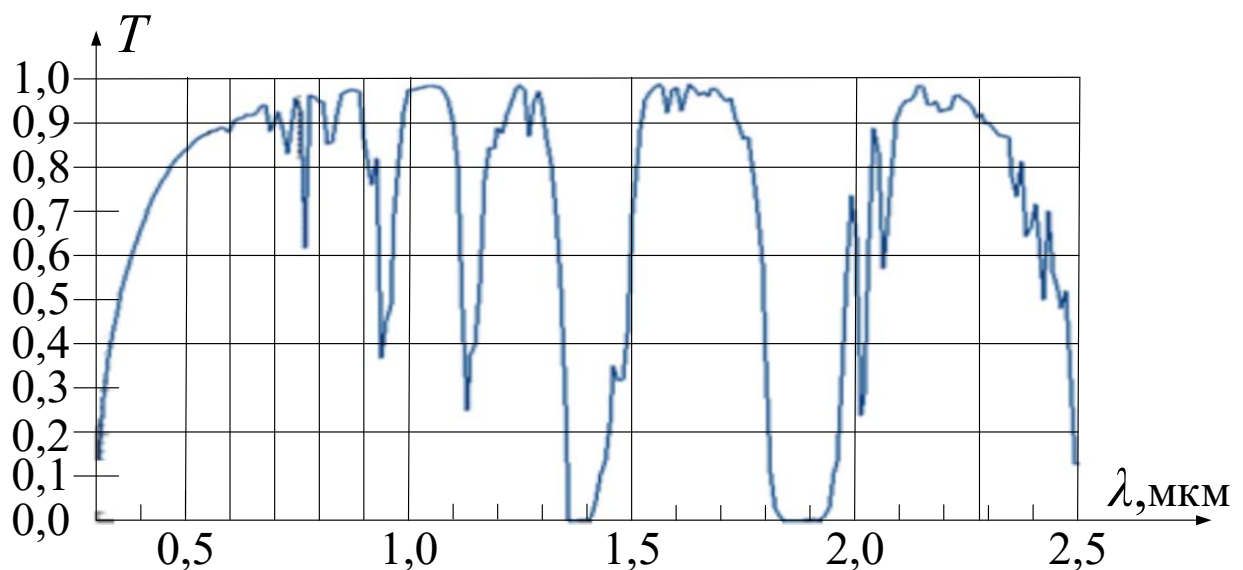


Рисунок 2.17 – Графік залежності коефіцієнту пропускання від довжини хвилі для Земної атмосфери.

Поглинання випромінювання в процесі використання запропонованого поляриметричного методу призводить до зменшення дальності дії системи та до зниження інтенсивності випромінювання, що падає на блок вимірювання. Для мінімізації поглинання випромінювання середовищем розповсюдження необхідно підбирати випромінювач з довжиною хвилі для якої коефіцієнт

пропускання повітряним середовищем високий. Для дистанційного зондування найбільшого застосування отримали Nd:YAG-лазери на довжинах хвиль 1,064 мкм та 1,55 мкм. Також в якості таких випромінювачів можуть бути обрані наступні лазери: Ruby-лазер ($\lambda = 0,69$ мкм), AlGaAs-лазер ($\lambda = 0,8 - 0,9$ мкм), Ti:Sa-лазер ($\lambda = 0,68 - 1,13$ мкм), Er:YAG-лазер ($\lambda = 1,64$ мкм) та інші.

Процес розсіювання випромінювання полягає в зміні напрямку розповсюдження променів внаслідок взаємодії із частинками середовища розповсюдження. В залежності від розміру частинок розрізняють Релеївське розсіювання, розсіювання Мі та неселективне розсіювання.

Релеївське розсіювання залежить від довжини хвилі і полягає в розсіюванні променів частинками, які менші за довжину хвилі. Інтенсивність розсіяного випромінювання описується законом Релея і має наступний вид:

$$I_{\text{Релея}} = \frac{C \cdot I}{\lambda^4}; \quad (2.15)$$

де I – інтенсивність падаючого випромінювання, $I_{\text{Релея}}$ – інтенсивність Релеївського розсіяного випромінювання, C – коефіцієнт, що залежить від фізичної природи та концентрації часточок, λ – довжина хвилі випромінювання.

Розсіювання Мі також залежить від довжини хвилі і полягає в розсіюванні променів частинками, які співрозмірні з довжиною хвилі. Інтенсивність розсіяного випромінювання описується законом Шулейкіна-Мі та має наступний вид:

$$I_{\text{Мі}} = \frac{\beta \cdot I}{\lambda^\varepsilon}; \quad (2.16)$$

де $I_{\text{Мі}}$ – інтенсивність Мі-розсіяного випромінювання, I – інтенсивність падаючого випромінювання, β – коефіцієнт, що залежить від будови часточок, що розсіюють, λ – довжина хвилі випромінювання, ε – коефіцієнт, який залежить від розміру часточок, що розсіюють ($0 < \varepsilon < 4$).

Неселективне розсіювання не залежить від довжини хвилі та забезпечує однакове розсіюванні випромінювання на всьому діапазоні і полягає в розсіюванні променів частинками, розміри яких більші за довжину хвилі.

Розсіювання випромінювання в процесі визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання з використанням запропонованого поляриметричного методу призводить до появи похибки в визначенні просторового КПП та, відповідно, до похибки в визначенні плоских КПП в горизонтальній та вертикальній площині. Одним з шляхів зменшення впливу розсіювання на точність вимірювання є підбір довжини хвилі блоку випромінювання. Оскільки зі зростанням довжини хвилі спостерігається зменшення Релеївського розсіювання та розсіювання Мі, то перевагу потрібно надавати більш високим довжинам хвиль.

В залежності від характеристик розповсюдження випромінювання в різних напрямках через середовище розрізняють ізотропні та анізотропні середовища. Для ізотропних середовищ характерним є те, що вони однаково впливають на розповсюдження променів у будь-якого напрямку. А властивості розповсюдження променів в анізотропних середовищах залежать від напрямку розповсюдження. Анізотропія проявляється в різних коефіцієнтах пропускання чи різних показниках заломлення для різних напрямків розповсюдження, тощо. Ізотропні середовища не впливають на поляризаційні властивості променю, що крізь них проходить, а анізотропні середовища можуть спричинювати зміну поляризаційних властивостей променю. Аморфні тіла, рідини та гази, переважно, є ізотропними, а анізотропія характерна для певних монокристалів, полімерів, колоїдів, кристалів тощо. Повітряне середовище, як середовище розповсюдження для поляриметричної системи визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання є ізотропним. Тому в подальших дослідженнях не будемо брати до уваги зміну поляризаційних властивостей випромінювання під час його проходження через повітряне середовище.

При падінні променю на частинку з розмірами, які значно більші за його довжину хвилі можна розглядати це падіння як падіння променю на межу поділу

двох середовищ. В цьому випадку спостерігається процес заломлення та відбивання променю. Після проходження другого середовища повторно відбувається процес заломлення та відбивання променю на межі поділу між другим та першим середовищем. Таким чином, після падіння променю на частинку з розмірами, які значно більші за його довжину хвилі інтенсивність падаючого випромінювання ділиться між двічізаломленим, відбитим, та поглиnutим променем, як це було розглянуто в розділі 2.2. При цьому, напрямок розповсюдження відбитого та двічізаломленого променю, коли грані другого середовища не плоскопаралельні, відрізняються від напрямку розповсюдження падаючого променю. За умови коли грані другого середовища розповсюдження плоскопаралельні, то напрямок розповсюдження падаючого та двічізаломленого променю збігаються, але відбувається зміщення променю, величина якого залежить від товщини другого середовища розповсюдження. Також, при падінні променю на межу поділу двох середовищ спостерігається поворот площини поляризації відбитого та двічізаломленого променів по відношенню до падаючого ЛПП, який пояснюється різними коефіцієнтами посилення р- та s-компоненти променю та описується формулами Френеля. Таким чином, в результаті падіння променю на частинку з розмірами, які значно більші за його довжину хвилі спостерігається розсіяння променю та зміна його поляризаційних характеристик. Для зменшення цього виду впливу середовища розповсюдження на поляризаційні характеристики випромінювання необхідно проводити підбір довжини хвилі блоку випромінювання в залежності від фізико-хімічного складу середовища розповсюдження.

Таким чином, для зменшення впливу середовища розповсюдження на характеристики лінійно поляризованого випромінювання необхідно проводити підбір довжини хвилі випромінювання. Для побудови поляриметричних систем позиціонування АТЗ пропонується застосовувати Nd:YAG – лазер на довжині хвиль 1,064 мкм, яка характеризується $T \approx 0,975$.

Висновки по розділу 2

Поляризаційно-оптичні методи вимірювання є одними із перспективних методів дослідження внаслідок їх високої інформативності, точності та чутливості. До основних поляризаційних параметрів, які визначаються в процесі проведення вимірювань можна віднести: тип та форма поляризації, степінь поляризації, АПП лінійно поляризованого випромінювання; еліптичність та азимут головної осі еліптично-поляризованого випромінювання. Для опису характеристик поляризованого випромінювання застосовують матрицю когерентності, двовимірний вектор Джонса, чотиривимірний вектор Стокса, а для розрахунку характеристик поляризованого випромінювання використовують квантово-механічний підхід та матричні методи Джонса і Мюллера. Для визначення поляризаційних характеристик випромінювання застосовують поляриметри, принцип роботи яких полягає в вимірюванні інтенсивності випромінювання після його проходження через відповідну оптичну систему.

Застосування поляриметричного методу вимірювання (ПМВ) для позиціонування автотранспортних засобів руху можливе завдяки застосуванню ІДПП в оптичному каналі вимірювання. Після падіння ЛПП на ІДПП спостерігається поділ його інтенсивності між заломленим та відбитим променями. Формули Френеля визначають коефіцієнти посилення амплітуди s – і p – компонент падаючого променя для s – і p – компонент заломленого та відбитого променів, які в свою чергу визначають амплітуду та інтенсивність відбитого та заломленого променів. Після падіння променя на ІДПП він ділиться на три основні складові: двічізаломлений промінь, відбитий промінь та умовно поглинутий промінь, який ділиться на умовно «двічізаломлені» промені та умовно «відбиті» промені. Залежність інтенсивності зазначених променів від АПП та КПП мають наступний характер. Зі зростанням АПП падаючого променя інтенсивність двічізаломленого променя зменшується, а інших – зростає. При зростанні КПП інтенсивність двічізаломленого та умовно «відбитих» променів зменшується, а інших – зростає. При цьому сумарна

інтенсивність умовно «відбитих» та умовно «двічізаломлених» променів складає до 26% від інтенсивності падаючого променя. Вплив показника заломлення матеріалу ІДПП на розподіл інтенсивності падаючого променя між відбитим та двічізаломленим променями має наступний характер. Можна виділити два граничних значення КПП при яких відбувається зміна характеру розподілу інтенсивності падаючого променя між відбитим та двічізаломленим променями. Для всього діапазону зміни АПП падаючого променя та для кутів падіння менших першого граничного значення більшу інтенсивність має двічізаломлений промінь, а для кутів падіння більше другого граничного значення більшу інтенсивність має відбитий промінь. Для кутів падіння в діапазоні від першого до другого граничного значення більшу інтенсивність для певних АПП падаючого променя має двічізаломлений промінь, а для інших – відбитий. При цьому зі зростанням кута падіння від першого до другого граничного значення АПП падаючого променя для якого вища інтенсивність двічізаломленого променя зменшується від 90° до 0° . Для алмазної ІДПП, значення цих граничних кутів падіння складає 58° та 85° . Також зі зростанням показника заломлення матеріалу ІДПП спостерігається зменшення значення першого граничного кута падіння та незначне підвищення значення другого граничного кута падіння. Оскільки для переважної кількості АПП та КПП більшу інтенсивність має двічізаломлений промінь, то для проведення подальших досліджень щодо побудови поляриметричної системи обрано двічізаломлений промінь.

В результаті проходження ЛПП крізь ІДПП відбувається поворот площини поляризації двічізаломленого променя по відношенню до падаючого в результаті різних коефіцієнтів посилення для s – та p – компонент падаючого променя. Між АПП двічізаломленого променя та АПП падаючого променя і його просторовим кутом падіння існує пряма залежність. Таким чином АПП двічізаломленого променя може бути використаним в якості вимірюваного параметру. При цьому, чутливість вимірювання залежить від матеріалу ІДПП, АПП падаючого променя та його просторового кута падіння. В результаті

математичного моделювання було обґрунтовано вибір алмазу в якості матеріалу ІДПП, а також було визначено, що максимальна чутливість вимірювання забезпечується при АПП падаючого променя $\varphi_e = 67,5^\circ$, для якого оптимальний КПП складає 56° .

Одним з напрямків визначення взаємного просторового положення АТЗ є визначення азимутального напрямку з одного АТЗ на інший та дальності між ними. Для вирішення цієї задачі може бути застосований поляриметричний метод визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання. Запропонований метод полягає в визначенні плоских КПП та АПП падаючого променя, який може бути зв'язаний з пеленгом з джерела випромінювання на АТЗ на якому проводяться вимірювання. Запропонований метод може бути вдосконаленим, з метою скорочення кількості каналів блоку вимірювання та зменшення впливу середовища розповсюдження, шляхом застосування двоканального блоку випромінювання або блоку випромінювання з модулятором та відповідного алгоритму проведення вимірювань.

Вплив середовища розповсюдження на інтенсивність та поляризаційні властивості випромінювання залежить від його товщини та його фізико-хімічного складу. Небажаний вплив середовища розповсюдження може бути зменшеним шляхом підбору довжини хвилі випромінювання. Для побудови поляриметричних систем позиціонування АТЗ пропонується застосовувати Nd:YAG – лазер, які широко використовуються для дистанційного зондування, на довжині хвиль $1,064$ мкм, для якої $T \approx 0,975$.

РОЗДІЛ III

ПОЛЯРИМЕТРИЧНІ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДНОСНОГО ПОЛОЖЕННЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ВУЛИЧНО-ДОРОЖНІЙ МЕРЕЖІ

Для визначення положення та параметрів руху АТЗ в три-координатному просторі розглядають шість степенів свободи: три лінійних та три кутових. Лінійні степені свободи визначають рух АТЗ як матеріальної точки та розглядають рух його центру мас. При цьому, розглядається переміщення АТЗ відносно початку координат в повздовжньому, поперечному та вертикальному напрямках та вимірюються відстані від початку координат до проекції центру мас АТЗ на відповідні осі – Δx , Δy , Δz (при застосуванні Декартової системи координат) або дальність до АТЗ d та азимуту на АТЗ відносно горизонтальної θ (зенітний кут) та вертикальної φ (азимутальний кут) площин (при застосуванні сферичної системи координат). Кутові степені свободи визначають рух АТЗ відносно його центру мас. При цьому, розглядаються повороти АТЗ навколо його повздовжньої, поперечної та вертикальної осей та вимірюються кут між віссю OY та проекцією вертикальної осі АТЗ на площину YOZ (кут крену γ), між віссю OX та проекції повздовжньої осі АТЗ на площину XOY (кут тангажу (диференту) θ) та між віссю OX та проекції повздовжньої осі АТЗ на площину XOZ (кут рискання ψ). Визначення лінійних параметрів положення АТЗ визначають його положення в просторі та застосовуються в процесі навігації, а кутових параметрів – просторове положення та застосовуються в процесі управління.

При розгляді питання визначення положення АТЗ на ВДМ розглядають його абсолютне та відносне положення. Абсолютне положення АТЗ визначається відносно загального стаціонарного початку координат. При визначенні відносного положення в якості початку координат може виступати будь-яка точка чи будь-який об'єкт, в тому числі і АТЗ, що рухається. При визначенні положення АТЗ A відносно іншого АТЗ B в якості початку координат приймається центр мас АТЗ B , а в якості осей – осі зв'язаної системи координат

АТЗ B . Таким чином, лінійні параметри відносного просторового положення визначаються як положення центру мас АТЗ A відносно зв'язаної системи координат АТЗ B , а кутові параметри – як кутове положення зв'язаної системи координат АТЗ A відносно зв'язаної системи координат АТЗ B , перенесеної в центр мас АТЗ A , як це показано на рис. 3.1.

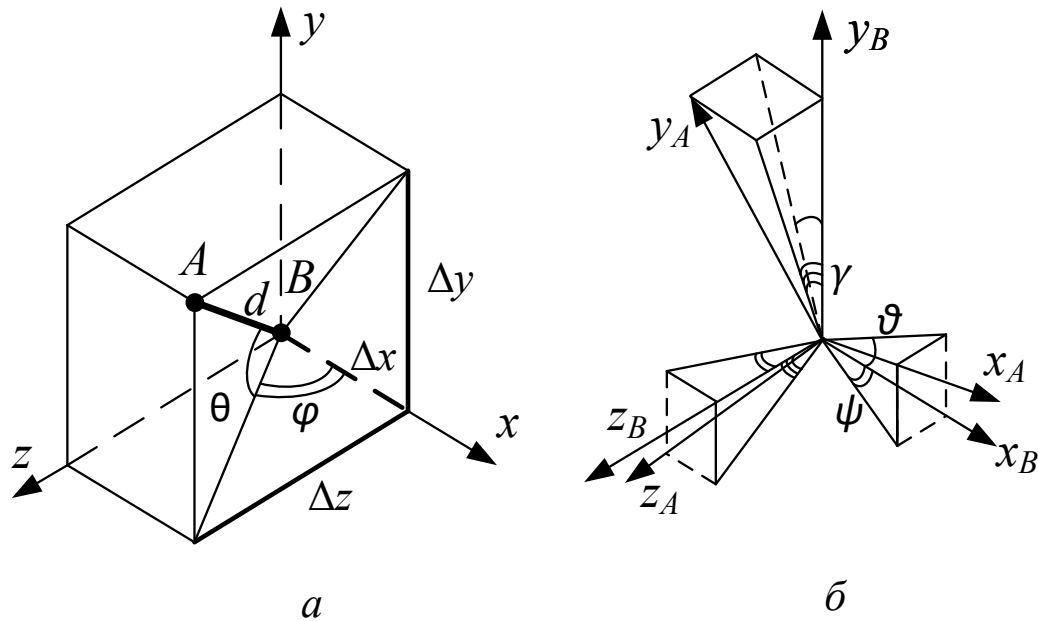


Рисунок 3.1 – Схема визначення лінійних (навігаційних) (а) та кутових (б) параметрів відносного просторового положення АТЗ A та B на ВДМ

Застосування ПМВ для визначення взаємного просторового положення об'єктів розглядається авторами в роботі [6], в якій запропоновано поляриметричний підхід до визначення взаємного просторового положення об'єктів та пристрій, що його реалізує, та на основі математичного моделювання проведені розрахунки параметрів роботи системи.

В загальному випадку, ПМВ може бути застосованим для визначення параметрів відносного положення АТЗ наступним чином. Вимірювання проводяться в двох каналах: кутомірному та далекомірному. Кутومی́рний канал вимірювання забезпечує визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання. Його робота полягає в наступному. На АТЗ B , відносно якого здійснюється визначення відносного положення АТЗ A , розміщується блок

випромінювання, який випромінює ЛПП з визначеним АПП та визначеними апертурами розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині. При цьому, може забезпечуватись зв'язок між напрямом випромінювання та АПП променю, що випромінюється. На АТЗ *А*, відносно просторове положення якого визначається, розміщується блок вимірювання, який призначений для вимірювання АПП двічізаломленого променю. Сигнал від блоку вимірювання подається в блок обчислень та управління для визначення АПП падаючого променю та його плоских кутів падіння, які і визначають напрямок на джерело випромінювання, тобто на АТЗ *В*. Обладнання далекомірного каналу розміщується на АТЗ *А* та забезпечує вимірювання дальності до АТЗ в напрямку, визначеному кутомірним каналом вимірювання, тобто до АТЗ *В*. В якості обладнання далекомірного каналу може використовуватись вузько спрямований лазерний далекомір, локатор, лідар чи інший пристрій. Сигнал від далекомірного каналу, також, надходить в блок обчислень та управління, де проводяться розрахунки по визначенню параметрів відносного положення АТЗ. Запропонований підхід в залежності від складу та структури системи, що його реалізує, може бути застосований для визначення кутових, навігаційних (лінійних), та лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ, а також параметрів їх відносного руху. З використанням запропонованого підходу можливе визначення відносного положення АТЗ з довільною кількістю відносних степенів їх руху. При цьому, в залежності від кількості відносних степенів руху буде змінюватись склад системи вимірювання: кількість каналів блоку випромінювання та блоку вимірювання, схема випромінювання, процедура та алгоритм проведення розрахунків.

Запропонований поляриметричний метод може бути застосований для визначення абсолютного положення АТЗ шляхом вимірювання азимутального положення відносно двох джерел випромінювання з відомими координатами (кутомірний метод визначення положення) або азимутального положення та дальності до одного джерела випромінювання з відомими координатами (кутомірно-далекомірний метод визначення положення).

3.1. Поляриметрична модель визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ на вулично-дорожній мережі.

Застосування ПМВ для визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ можливе завдяки прив'язці АПП променю, що випромінюється блоком випромінювання, до напрямку його випромінювання. При цьому, АПП падаючого променю буде напрямку зв'язаний з азимутом на блок випромінювання, а КПП буде залежати від курсового кута на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині.

Застосування ПМВ для визначення навігаційних параметрів відносного положення об'єктів, розглядається в роботі [100], яка присвячена дослідженню питання розробки навігаційної системи на основі поляриметричних технологій. В роботі розглядаються методи визначення положення об'єкту та запропоновано поляриметричний метод визначення азимуту з джерела випромінювання на об'єкт шляхом визначення АПП падаючого променю та система, що його реалізує. Запропонована система складається з двох каналів, до складу кожного з них входить наземний блок випромінювання та бортовий двоканальний блок вимірювання, і забезпечує визначення азимуту з джерела випромінювання на об'єкт. Запропонований метод та система можуть бути застосовані при кутомірному методі визначення положення АТЗ, за умови визначення азимутів з двох джерел випромінювання, чи кутомірно-далекомірному методі, за умови визначення азимуту з джерела випромінювання та дальності до нього. Робота [2] є продовженням роботи [97]. В роботі розглядається поляриметричний навігаційний метод визначення координат повітряного судна в процесі польоту та система, що його реалізує. Система складається з двох каналів, кожен з яких включає вузькоспрямований блок випромінювання з модулятором та двоканальний блок вимірювання, канали якого відрізняються кутом установки ІДПП. Також в роботі визначені оптимальний кут падіння та АПП падаючого променю, отримані на основі математичного моделювання роботи системи.

В загальному випадку, ПМВ може бути застосованим для визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ наступним чином.

Вимірювання проводяться в двох каналах: горизонтальному та вертикальному. Вертикальний канал системи визначає азимут на АТЗ відносно горизонтальної площини θ , а горизонтальний – відносно вертикальної площини φ . Склад горизонтального та вертикального каналів ідентичний. Блок-схема каналу вимірювання представлена на рис. 3.2 та включає блок випромінювання 1, середовище розповсюдження 2 та двоканальний блок вимірювання 3.

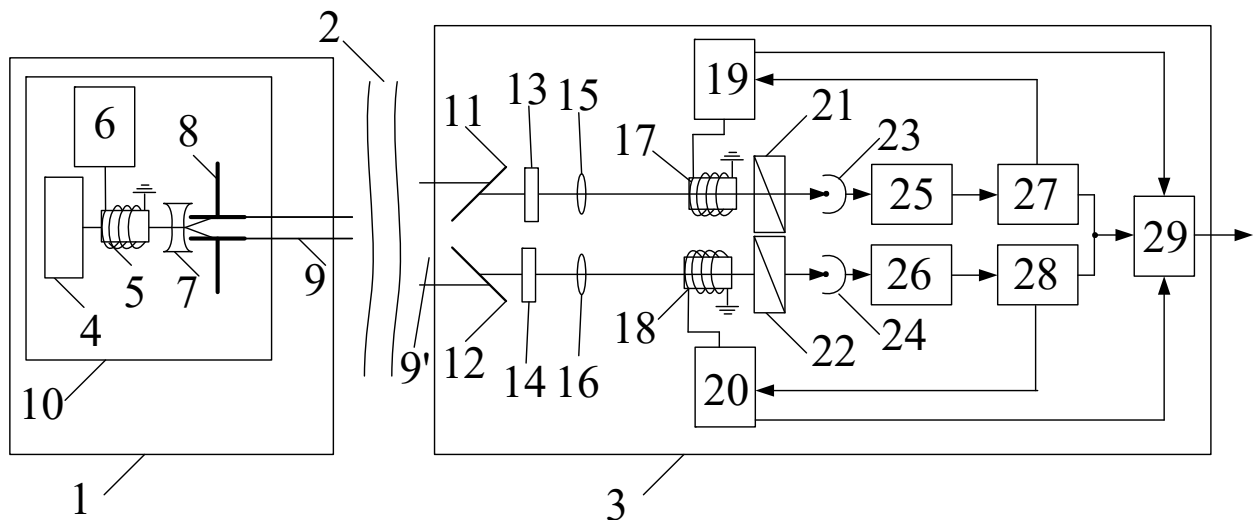


Рисунок 3.2 – Блок-схема каналу вимірювання лінійних параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ

Блок випромінювання 1 розміщується на навігаційному маяку чи на АТЗ B , відносно якого визначається просторове положення. Блок випромінювання горизонтального каналу випромінює розсіяний ЛПП з мінімальним кутом розходження в горизонтальній площині та максимальним кутом розходження в вертикальній площині, а вертикального каналу – з мінімальним кутом розходження в вертикальній площині та максимальним кутом розходження в горизонтальній площині. При цьому, забезпечується поворот блоку випромінювання вертикального каналу навколо поперечної осі, а блоку випромінювання горизонтального каналу – навколо вертикальної осі, з одночасним поворотом площини поляризації променю. Графіки залежності АПП променю від напрямку випромінювання в горизонтальному ($\varphi_{e.g} = f(\varphi_e)$) та вертикальному ($\varphi_{e.v} = f(\theta_e)$) каналах приведені на рис. 3.3.

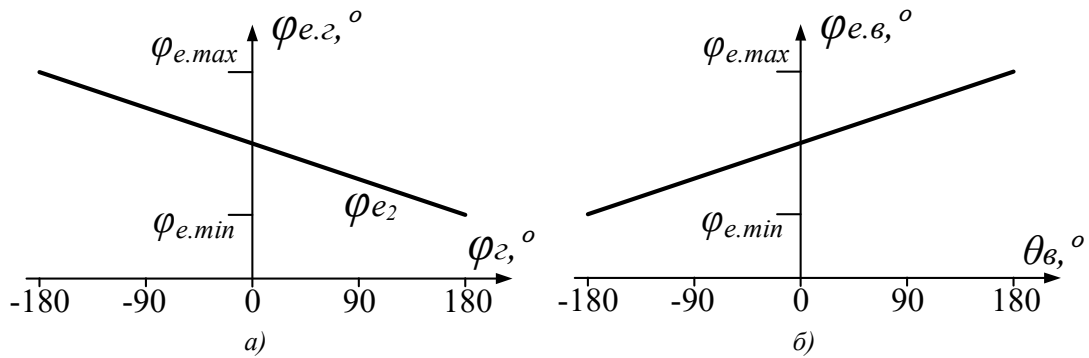


Рисунок 3.3 – Графік залежності АПП променю, що випромінюється блоком випромінювання в горизонтальному (а) та вертикальному (б) каналах від напрямку випромінювання

Формули залежності АПП ЛПП від напрямку випромінювання в вертикальному $\varphi_{e.v}$ та горизонтальному $\varphi_{e.z}$ каналах мають наступний вид:

$$\begin{aligned} \varphi_{0z} &= \frac{\varphi_{e.max.z} + \varphi_{e.min.z}}{2}; & \varphi_{0v} &= \frac{\varphi_{e.max.v} + \varphi_{e.min.v}}{2}; \\ K_z &= \frac{\varphi_{e.max.z} - \varphi_{e.min.z}}{\Delta\varphi_z}; & K_v &= \frac{\varphi_{e.max.v} - \varphi_{e.min.v}}{\Delta\theta_v}; \\ \varphi_{e.z} &= \varphi_{0z} - K_z \cdot \varphi_z; & \varphi_{e.v} &= \varphi_{0v} + K_v \cdot \theta_v; \end{aligned} \quad (3.1)$$

де $\varphi_{e.max.z}$, $\varphi_{e.max.v}$, $\varphi_{e.min.z}$, $\varphi_{e.min.v}$ – максимальне та мінімальне значення АПП променю, що випромінюється в горизонтальному та вертикальному каналах, °; φ_{0z} , φ_{0v} – значення АПП променю, що випромінюється, який відповідає нульовому азимуту на блок випромінювання в горизонтальному та вертикальному каналах, °; K_z , K_v – коефіцієнти пропорційності між АПП променю, що випромінюється та азимуту на блок випромінювання в горизонтальному та вертикальному каналах; $\Delta\varphi_z$, $\Delta\theta_v$ – діапазон зміни азимуту на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, °; φ_z , θ_v – значення азимуту на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, °; $\varphi_{e.z}$, $\varphi_{e.v}$ – значення АПП променю, що випромінюється в горизонтальному та в вертикальному каналі, °.

В якості середовища розповсюдження 2 виступає повітряний простір між блоком випромінювання 1 та відповідними блоком вимірювання 2. Двоканальні

блоки вимірювання розміщуються на АТЗ A , відносно положення якого визначається, та забезпечують вимірювання АПП двічізіломленого променю в горизонтальному та вертикальному каналах і обчислення азимутів θ_ϵ та φ_ϵ з АТЗ B на АТЗ A за наступними формулами:

$$\theta_\epsilon = \frac{\varphi_{\epsilon\epsilon} - \varphi_{0\epsilon}}{K_\epsilon}; \quad \varphi_\epsilon = \frac{\varphi_{0\epsilon} - \varphi_{\epsilon\epsilon}}{K_\epsilon}. \quad (3.2)$$

При цьому, канали вимірювання відрізняються кутом установки ІДПП, що забезпечує різні просторові КПП. Формула залежності просторового КПП від значень плоских КПП з врахуванням кутів установки ІДПП в горизонтальній та вертикальній площині має наступний вид:

$$i = \arctg \left(\sqrt{tg^2(i_\epsilon + i_{\epsilon.nl}) + tg^2(i_\epsilon + i_{\epsilon.nl})} \right), \quad (3.3)$$

де $i_{\epsilon.nl}$, $i_{\epsilon.nl}$ – кути установки ІДПП в горизонтальній та вертикальній площині.

Робота блоку випромінювання 1 полягає в наступному. Джерело випромінювання 4 випромінює ЛПП визначеної довжини хвилі з визначеним АПП, який падає на комірку Фарадея 5. Комірка Фарадея 5 виступає в якості модулятора і забезпечує поворот площини поляризації ЛПП у відповідності до сигналів управління, які надходять від звукового генератора 6. Звуковий генератор 6 забезпечує формування сигналів управління у відповідності до закону залежності АПП ЛПП, що випромінюється, від напрямку його випромінювання, які надходять в комірку Фарадея 5 та в систему управління оберальною платформою 10. Після проходження комірки Фарадея ЛПП проходить через розсіювальну лінзу 7 та вузько-щілинну діафрагму 8, які забезпечують його розсіювання з визначеними апертурами розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині. Блок випромінювання встановлюється на оберальній платформі 10, яка забезпечує його поворот навколо відповідної осі у відповідності до сигналів управління, які надходять від звукового

генератора 6. Завдяки використанню обертальної платформи 10 та модулятора 5, які працюють від одного джерела управляючих сигналів, забезпечується однозначний зв'язок між АПП ЛПП 9 та напрямком його випромінювання. ЛПП 9, що випромінюється блоком випромінювання 1, проходить через середовища розповсюдження 2 та падає на блок вимірювання 3. Вид та величина впливу середовища розповсюдження 2 на поляризаційні властивості ЛПП 9 залежить від фізико-хімічного складу середовища розповсюдження та його товщини. Після проходження середовища розповсюдження 2 ЛПП 9' падає на двоканальний блок вимірювання. Робота каналів блоку вимірювання ідентична і полягає в наступному. ЛПП 9' падає на ІДПП 11 (12), де відбувається його відбивання та заломлення. ІДПП забезпечує поворот площини поляризації відбитого та двічізаломленого променів в залежності від АПП та кута падіння падаючого на ІДПП променя. Двічізаломлений ЛПП проходять через оптичний Фільтр 13 (14), який забезпечує пропускання променю з довжиною хвилі, яка відповідає довжині хвилі ЛПП, що випромінюється відповідним блоком випромінювання. Після проходження оптичного фільтру двічізаломлений ЛПП проходить фокусуючу лінзу 15 (16) та фокусується на комірці Фарадея 17 (18). Комірка Фарадея 17 (18) виступає в якості модулятора та призначена для модуляції поляризованого ЛПП в змінному магнітному полі для підвищення чутливості вимірювання. Управляючий сигнал на комірку Фарадея формується звуковим генератором 19 (20) на основі модулюючого сигналу та управляючого сигналу від синхронного детектора 27 (28). Після проходження комірки Фарадея двічізаломлений ЛПП проходить через аналізатор 21 (22), який призначений для визначення АПП падаючого на нього променя. Аналізатор 21 (22) забезпечує пропускання ЛПП з інтенсивністю, яка визначається у відповідності до Закону Малюса. Після проходження аналізатора ЛПП падає на фотоелектричний детектор 23 (24), який забезпечує перетворення інтенсивності ЛПП в електричний сигнал. Електричний сигнал з фотодетектора проходить через вузькосмуговий підсилювач 25 (26), де відбувається його посилення та надходить в синхронний детектор 27 (28). Синхронний детектор призначений

для підвищення чутливості вимірювання та забезпечує методику вимірювання «по нулю сигналу», шляхом формування управляючого сигналу, який надходить до звукового генератора 19 (20). Сигнал від синхронного детектора 27 (28), також, надходить в обчислювальний блок 29. Також в обчислювальний блок 29 надходить сигнал від звукового генератора 19 (20). Сигнал від звукового генератора пропорційний АПП двічізаломленого ЛПП в попередній момент вимірювання, а сигнал від синхронного детектора – зміні АПП в поточний момент вимірювання. Обчислювальний блок є спільним для всіх каналів вимірювання і призначений для обробки результатів вимірювання та здійснення розрахунків. Обчислювальний блок забезпечує визначення АПП двічізаломленого ЛПП в кожному з каналів вимірювання та обчислення АПП падаючого ЛПП та його плоских кутів падіння. Сигнал від обчислювального блоку надходить в обчислювальну систему більш високої ієрархії, де відбувається визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ.

Система, яка реалізує запропоновану поляриметричну модель визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ складається з горизонтального та вертикального каналів, кожен з яких складається з блоку випромінювання та двоканального блоку вимірювання. Запропонована система забезпечує проведення вимірювань в чотирьох каналах. При цьому, формула залежності АПП двічізаломленого променя від просторового КПП та його АПП (2.11) з врахуванням закону Снеліуса та формули (3.3) приймає наступний вид:

$$\varphi_d = \arctg \left(\cos^2 \left(\frac{\arctg \left(\sqrt{tg^2(i_z + i_{z,nl}) + tg^2(i_e + i_{e,nl})} \right) - \arcsin \left(\frac{\sin \left(\arctg \left(\sqrt{tg^2(i_z + i_{z,nl}) + tg^2(i_e + i_{e,nl})} \right) \right)}{n} \right)}{n} \right) \right) \cdot tg(\varphi_e) \right). \quad (3.4)$$

Таким чином, блок обчислення буде забезпечувати визначення чотирьох параметрів: АПП падаючого променя в горизонтальному $\varphi_{e,z}$ та вертикальному $\varphi_{e,e}$ каналах, плоский КПП в горизонтальній $i_{z,e}$ і вертикальній $i_{e,e}$ площині, шляхом

розв'язання системи з чотирьох рівнянь виду (3.4) з чотирма невідомими. АПП падаючого променя в горизонтальному та вертикальному каналі будуть визначати азимут з АТЗ з блоком випромінювання на АТЗ з блоком вимірювання в горизонтальній (φ_z) та вертикальній (θ_θ) площині, а плоскі кути падіння i_{z1} та $i_{\theta1}$ будуть визначати курсові кути з АТЗ з блоком вимірювання на АТЗ з блоком випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині.

Кутомірно-далекомірна поляриметрична модель визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ, схема якого зображена на рис. 3.4, полягає в наступному. Система вимірювання забезпечує визначення азимутів з АТЗ B на АТЗ A в горизонтальній (φ_z) та вертикальній (θ_θ) площині, а також дальності між АТЗ d .

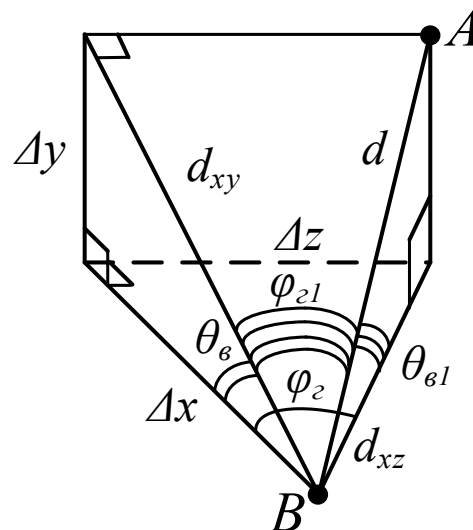


Рисунок 3.4 – Схема кутомірно-далекомірної поляриметричної моделі визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ

Для визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ проведемо наступні розрахунки:

$$\Delta y = \Delta x \cdot \operatorname{tg}(\theta_\theta); \quad \Delta z = \Delta x \cdot \operatorname{tg}(\varphi_z); \quad d_{xy} = \frac{\Delta x}{\cos(\theta_\theta)}; \quad d_{xz} = \frac{\Delta x}{\cos(\varphi_z)};$$

$$\theta_{\theta 1} = \arctg\left(\frac{\Delta y}{d_{xz}}\right) = \arctg(\operatorname{tg}(\theta_\theta) \cdot \cos(\varphi_z)); \quad \varphi_{z1} = \arctg\left(\frac{\Delta z}{d_{xy}}\right) = \arctg(\operatorname{tg}(\varphi_z) \cdot \cos(\theta_\theta));$$

$$d_{xz} = d \cdot \cos(\theta_{\theta 1}) = d \cdot \cos(\arctg(\operatorname{tg}(\theta_\theta) \cdot \cos(\varphi_z))); \quad d_{xy} = d \cdot \cos(\varphi_{z1}) = d \cdot \cos(\arctg(\operatorname{tg}(\varphi_z) \cdot \cos(\theta_\theta))).$$

Таким чином, формули для визначення відносного положення АТЗ в декартовій системі координат матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= d_{xy} \cdot \cos(\theta_6) = d \cdot \cos(\arctg(\tg(\varphi_2) \cdot \cos(\theta_6))) \cdot \cos(\theta_6) = \frac{d \cdot \cos(\theta_6)}{\sqrt{\tg^2(\varphi_2) \cdot \cos^2(\theta_6) + 1}}; \\
 \Delta x &= d_{xz} \cdot \cos(\varphi_2) = d \cdot \cos(\arctg(\tg(\theta_6) \cdot \cos(\varphi_2))) \cdot \cos(\varphi_2) = \frac{d \cdot \cos(\varphi_2)}{\sqrt{\tg^2(\theta_6) \cdot \cos^2(\varphi_2) + 1}}; \\
 \Delta y &= d_{xy} \cdot \sin(\theta_6) = d \cdot \cos(\arctg(\tg(\varphi_2) \cdot \cos(\theta_6))) \cdot \sin(\theta_6) = \frac{d \cdot \sin(\theta_6)}{\sqrt{\tg^2(\varphi_2) \cdot \cos^2(\theta_6) + 1}}; \\
 \Delta z &= d_{xz} \cdot \sin(\varphi_2) = d \cdot \cos(\arctg(\tg(\theta_6) \cdot \cos(\varphi_2))) \cdot \sin(\varphi_2) = \frac{d \cdot \sin(\varphi_2)}{\sqrt{\tg^2(\theta_6) \cdot \cos^2(\varphi_2) + 1}}.
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Формули для визначення відносного положення АТЗ в сферичній системі координат матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned}
 d &= d; \\
 \varphi &= \varphi_2; \\
 \theta &= \arctg(\tg(\theta_6) \cdot \cos(\varphi_2)).
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Запропонована кутомірно-daleкомірна поляриметрична модель може бути застосована для визначення лінійних параметрів положення АТЗ відносно інших елементів ДТС або АТЗ один відносно одного. Запропонована поляриметрична кутомірно-daleкомірна модель дозволяє визначати відносне положення АТЗ з п'ятьма відносними степенями руху, окрім відносного повороту АТЗ навколо повздовжньої осі, оскільки, він буде вносити похибку в вимірювання, шляхом додаткового повороту площини поляризації падаючого променя відносно блоку вимірювання. При цьому, відносні переміщення АТЗ будуть призводити до зміни відносного лінійного положення АТЗ, поворот АТЗ з блоком вимірювання навколо поперечної чи вертикальної осей буде призводить до зміни плоских КПП, а поворот АТЗ з блоком випромінювання навколо поперечної чи вертикальної осей буде призводить до повороту системи координат та, відповідно, до зміни відносного положення АТЗ.

Кутомірна поляриметрична модель визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ, схема якого зображено на рис. 3.5, полягає в наступному. Система вимірювання забезпечує визначення азимутів з об'єктів B_1 та B_2 на АТЗ A в горизонтальній (φ_1 та φ_2) та вертикальній (θ_1 та θ_2) площині. В якості об'єктів B_1 та B_2 виступають об'єкти відносно лінійне положення яких ($\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta z_m$) та дальність між якими в горизонтальній ($d_{m,z}$) та вертикальній ($d_{m,\theta}$) площині відомі, і відносно положення яких залишається незмінним. В якості таких об'єктів можуть виступати стаціонарні елементи ДТС або АТЗ рух яких синхронізований. При цьому, можна виділити пеленг на об'єкт B_2 з об'єкту B_1 в горизонтальній (φ_m) та вертикальній (θ_m) площині.

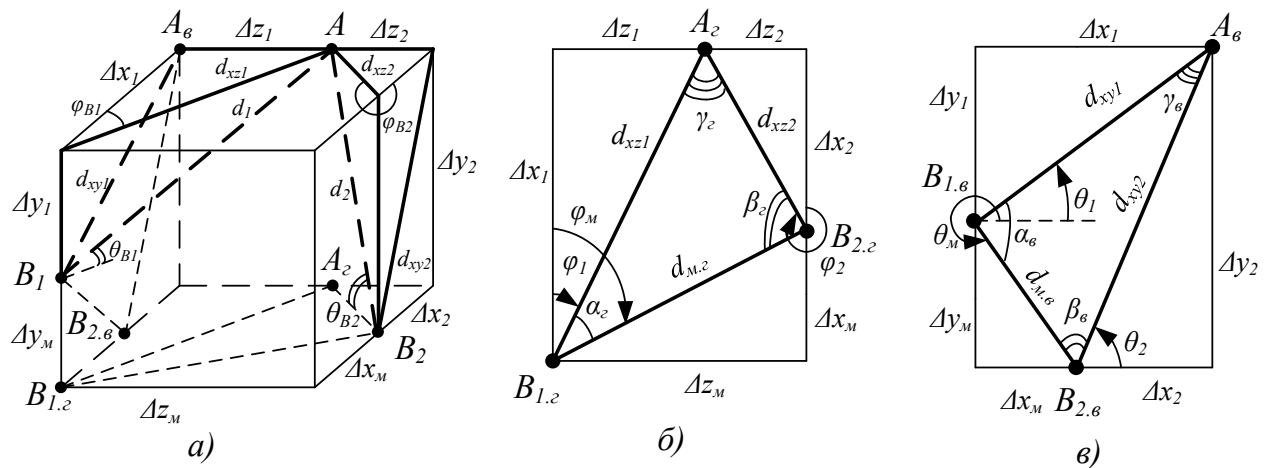


Рисунок 3.5 – Схема кутомірної поляриметричної моделі визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ (а) та її проекція на горизонтальну (б) та вертикальну (в) площини

Для визначення лінійних параметрів положення АТЗ A відносно АТЗ B_1 та B_2 розглянемо косокутні трикутники $B_{1,z}A_zB_{2,z}$ та $B_{1,\theta}A_\theta B_{2,\theta}$, утворені проекціями центрів мас АТЗ A , B_1 та B_2 на горизонтальну та вертикальну площини, відповідно. Сторони цих трикутників будуть визначати проекції дальностей між АТЗ A , B_1 та B_2 на горизонтальну та вертикальну площину. Формули для визначення значень плоских кутів трикутників $B_{1,z}A_zB_{2,z}$ та $B_{1,\theta}A_\theta B_{2,\theta}$: $\alpha_z, \alpha_\theta, \beta_z, \beta_\theta, \gamma_z, \gamma_\theta$ матимуть вид (3.7). Формули для визначення значень невідомих сторін трикутників $B_{1,z}A_zB_{2,z}$ та $B_{1,\theta}A_\theta B_{2,\theta}$: $d_{xy1}, d_{xy2}, d_{xz1}, d_{xz2}$ отримані з терми синусів

матимуть вид (3.8). Формули для визначення відносного положення АТЗ в декартовій системі координат матимуть вид (3.9).

$$\begin{aligned}\alpha_z &= \begin{cases} |\varphi_m - \varphi_l| & \text{if } |\varphi_m - \varphi_l| < 180 \\ 360 - |\varphi_m - \varphi_l| & \text{if } |\varphi_m - \varphi_l| > 180 \end{cases}; \quad \alpha_6 = \begin{cases} |\theta_m - \theta_l| & \text{if } |\theta_m - \theta_l| < 180 \\ 360 - |\theta_m - \theta_l| & \text{if } |\theta_m - \theta_l| > 180 \end{cases}; \\ \beta_z &= \begin{cases} |180 + \varphi_m - \varphi_2| & \text{if } |180 + \varphi_m - \varphi_2| < 180 \\ 360 - |180 + \varphi_m - \varphi_2| & \text{if } |180 + \varphi_m - \varphi_2| > 180 \end{cases}; \\ \beta_6 &= \begin{cases} |180 + \theta_m - \theta_2| & \text{if } |180 + \theta_m - \theta_2| < 180 \\ 360 - |180 + \theta_m - \theta_2| & \text{if } |180 + \theta_m - \theta_2| > 180 \end{cases}; \\ \gamma_z &= \begin{cases} |\varphi_2 - \varphi_l| & \text{if } |\varphi_2 - \varphi_l| < 180 \\ 360 - |\varphi_2 - \varphi_l| & \text{if } |\varphi_2 - \varphi_l| > 180 \end{cases}; \quad \gamma_6 = \begin{cases} |\theta_2 - \theta_l| & \text{if } |\theta_2 - \theta_l| < 180 \\ 360 - |\theta_2 - \theta_l| & \text{if } |\theta_2 - \theta_l| > 180 \end{cases}.\end{aligned}\quad (3.7)$$

$$\begin{aligned}d_{xy1} &= \frac{d_{m,6} \cdot \sin(\beta_6)}{\sin(\gamma_6)}; \quad d_{xy2} = \frac{d_{m,6} \cdot \sin(\alpha_6)}{\sin(\gamma_6)}; \\ d_{xz1} &= \frac{d_{m,z} \cdot \sin(\beta_z)}{\sin(\gamma_z)}; \quad d_{xz2} = \frac{d_{m,z} \cdot \sin(\alpha_z)}{\sin(\gamma_z)}.\end{aligned}\quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}\Delta x_1 &= d_{xy1} \cdot \cos(\theta_1) = d_{xz1} \cdot \cos(\varphi_1) = \frac{d_{m,6} \cdot \sin(\beta_6) \cdot \cos(\theta_1)}{\sin(\gamma_6)} = \frac{d_{m,z} \cdot \sin(\beta_z) \cdot \cos(\varphi_1)}{\sin(\gamma_z)}; \\ \Delta x_2 &= d_{xy2} \cdot \cos(\theta_2) = d_{xz2} \cdot \cos(\varphi_2) = \frac{d_{m,6} \cdot \sin(\alpha_6) \cdot \cos(\theta_2)}{\sin(\gamma_6)} = \frac{d_{m,z} \cdot \sin(\alpha_z) \cdot \cos(\varphi_2)}{\sin(\gamma_z)}; \\ \Delta y_1 &= d_{xy1} \cdot \sin(\theta_1) = \frac{d_{m,6} \cdot \sin(\beta_6) \cdot \sin(\theta_1)}{\sin(\gamma_6)}; \\ \Delta y_2 &= d_{xy2} \cdot \sin(\theta_2) = \frac{d_{m,6} \cdot \sin(\alpha_6) \cdot \sin(\theta_2)}{\sin(\gamma_6)}; \\ \Delta z_1 &= d_{xz1} \cdot \sin(\varphi_1) = \frac{d_{m,z} \cdot \sin(\beta_z) \cdot \sin(\varphi_1)}{\sin(\gamma_z)}; \\ \Delta z_2 &= d_{xz2} \cdot \sin(\varphi_2) = \frac{d_{m,z} \cdot \sin(\alpha_z) \cdot \sin(\varphi_2)}{\sin(\gamma_z)}.\end{aligned}\quad (3.9)$$

Формули для визначення відносного положення АТЗ в сферичній системі координат матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned}d_1 &= \sqrt{d_{xz1}^2 + \Delta y_1^2} = \sqrt{d_{xy1}^2 + \Delta z_1^2}; \quad d_2 = \sqrt{d_{xz2}^2 + \Delta y_2^2} = \sqrt{d_{xy2}^2 + \Delta z_2^2}; \\ \varphi_{B1} &= \varphi_1; \quad \varphi_{B2} = \varphi_2; \\ \theta_{B1} &= \arctg\left(\frac{\Delta y_1}{d_{xz1}}\right); \quad \theta_{B2} = \arctg\left(\frac{\Delta y_2}{d_{xz2}}\right).\end{aligned}\quad (3.10)$$

Запропонована кутомірна поляриметрична модель може бути застосована для визначення лінійних параметрів відносного положення нерухомого або рухомого АТЗ A відносно пари маяків (об'єктів B_1 та B_2). В якості об'єктів B_1 та B_2 можуть виступати стаціонарні елементи ДТС або рухомі АТЗ за умови, що їх відносне просторове положення відоме та забезпечена синхронізація роботи їх блоків випромінювання. Запропонована поляриметрична кутомірна модель, як і кутомірно-daleкомірна модель дозволяє визначати відносне положення АТЗ з п'ятьма відносними степенями руху, крім відносного повороту об'єктів навколо повздовжньої осі. При цьому, лінійне переміщення АТЗ A чи узгоджене лінійне переміщення пари АТЗ B_1 та B_2 призводитиме до зміни їх відносного положення, поворот АТЗ A навколо поперечної та вертикальної осей призводитиме до зміни плоских КПП. Синхронний поворот АТЗ B_1 та B_2 навколо поперечної чи вертикальної осей буде призводити до зміни просторового положення АТЗ A відносно пари АТЗ B_1 та B_2 завдяки повороту системи координат, яка прив'язана до АТЗ B_1 та B_2 .

Загалом, запропонована кутомірно-daleкомірна поляриметрична модель визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ доцільно застосовувати для визначення відносного положення двох нерухомих об'єктів один відносно одного, рухомого об'єкту відносно нерухомого та двох рухомих об'єктів один відносно одного. Зокрема положення АТЗ, що зупинився, відносно елементу ВДМ; рухомого АТЗ відносно нерухомого АТЗ чи елементу ВДМ та двох рухомих АТЗ один відносно одного. Запропонована кутомірна поляриметрична модель визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ доцільно застосовувати для визначення відносного положення нерухомого або рухомого об'єкту відносно системи з двох нерухомих маяків або двох рухомих об'єктів, переміщення і робота яких синхронізована. Зокрема для визначення положення АТЗ відносно елементів ВДМ, або відносно системи рухомих АТЗ, переміщення і робота блоків випромінювання яких синхронізована.

3.2. Поляриметрична модель визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ на вулично-дорожній мережі.

Застосування ПМВ для визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ полягає в наступному. Блок випромінювання забезпечує випромінювання ЛПП з однаковим АПП в усіх напрямках випромінювання. Блок вимірювання забезпечує визначення АПП падаючого на нього променю та його плоских кутів падіння. При цьому, плоскі кути падіння будуть визначати відносний курс та тангаж АТЗ з блоком вимірювання відносно напрямку на АТЗ з блоком випромінювання, а різниця АПП променю, що випромінюється та падаючого на блок вимірювання променю визначатиме відносний крен АТЗ.

Застосування ПМВ для визначення кутових параметрів відносного положення об'єктів, запропоновано в роботі [101], яка присвячена дослідженню можливості застосування ПМВ для розробки поляриметричної системи посадки. В роботі запропоновано поляриметричний метод визначення просторового положення безпілотного літального апарату під час заходу на посадку, двоканальна система, що його реалізує та алгоритм проведення вимірювань. До складу запропонованої системи входить наземний блок випромінювання та бортовий двоканальний блок вимірювання. Робота [102] є продовженням [98] і присвячена розробці фізичних основ поляриметричної системи посадки. В роботі запропоновано поляриметричний метод формування глісади посадки, поляриметричний метод вимірювання кутових відхилень повітряного судна від траєкторії посадки та поляриметричну систему посадки, яка їх реалізує. Запропонована система дозволяє визначати кутові відхилення повітряного судна від траєкторії посадки по курсу та глісаді, а також крену повітряного судна в процесі заходу на посадку. До складу запропонованої системи входить наземний одно-канальний блок випромінювання з модулятором та бортовий двоканальний блок вимірювання, канали якого відрізняються кутом установки ІДПП.

В загальному випадку, ПМВ може бути застосованим для визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ наступним чином. Вимірювання проводяться в одному каналі, блок-схема якого представлена на рис. 3.6.

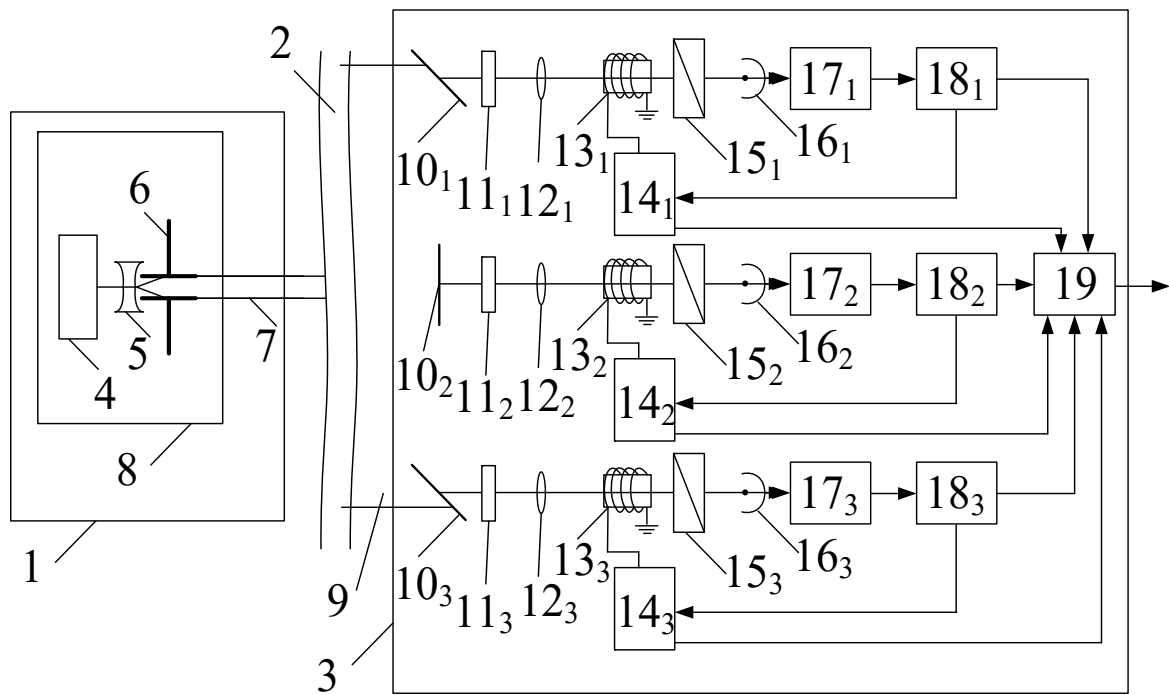


Рисунок 3.6 – Блок-схема каналу вимірювання кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ

До складу каналу входить блок випромінювання 1, середовище розповсюдження 2 та блок вимірювання 3. Блок випромінювання 1 розміщується на АТЗ В, відносно якого визначається кутове просторове положення АТЗ А. Блок випромінювання випромінює розсіяний ЛПП з визначеними кутами розходження в вертикальній та горизонтальній площині. При цьому, забезпечується поворот блоку випромінювання без зміни АПП променю з метою випромінювання в усіх необхідних напрямках. В якості середовища розповсюдження 2 виступає повітряний простір. Трьох-канальний блок вимірювання 3 розміщується на АТЗ А, відносно кутового положення якого визначається та забезпечує вимірювання АПП двічізаломленого променю і визначення АПП падаючого променю та його плоских кутів падіння. При цьому, канали вимірювання відрізняються кутом установки ІДПП, що забезпечує різні просторові КПП. Запропонована модель визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ забезпечує обчислення кутів курсу та тангажу АТЗ А відносно напрямку на АТЗ В, а також відносного крену АТЗ.

Робота каналу випромінювання полягає в наступному. Джерело випромінювання 4 випромінює ЛПП визначеної довжини хвилі з визначеним

АПП (φ_0), який проходить через розсіювальну лінзу 5 та вузько-щілинну діафрагму 6, які забезпечують розсіювання променю з визначеними апертурами розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині. Блок випромінювання встановлюється на обертальній платформі 8, яка забезпечує його поворот навколо відповідної осі обертання для забезпечення випромінювання в усіх необхідних напрямках. Промінь 7, що випромінюється блоком випромінювання проходить через середовище розповсюдження 2, де відбувається зміна його поляризаційних властивостей в залежності від фізико-хімічного складу середовища розповсюдження. Після проходження середовища розповсюдження 2 промінь 9 падає на три-канальний блок вимірювання 3. Робота каналів блоку вимірювання ідентична і полягає в наступному. ЛПП 9 падає на ІДПП 10_1 ($10_2/10_3$), де відбувається його відбивання та заломлення. ІДПП забезпечує поворот площини поляризації двічізаломленого та відбитого променю завдяки різних коефіцієнтів пропускання для p - та s - компонент падаючого променю, які залежать від просторового КПП i та його АПП φ_e і описуються формулами Френеля. Двічізаломлений промінь проходить оптичний фільтр 11_1 ($11_2/11_3$), який налаштований на довжину хвилі променю, що випромінюється блоком випромінювання. Після проходження оптичного фільтру двічізаломлений промінь проходить збиральну лінзу 12_1 ($12_2/12_3$) та фокусується на комірці Фарадея 13_1 ($13_2/13_3$). Комірка Фарадея 13_1 ($13_2/13_3$) виступає в якості модулятора та забезпечує модуляцію поляризованого випромінювання в змінному магнітному полі для підвищення чутливості вимірювання. Управляючий сигнал на комірку Фарадея формується звуковим генератором 14_1 ($14_2/14_3$) на основі модулюючого сигналу та управляючого сигналу від синхронного детектора 18_1 ($18_2/18_3$). Після проходження комірки Фарадея двічізаломлений промінь проходить через аналізатор 15_1 ($15_2/15_3$), який призначений для визначення АПП падаючого на нього променю. Після проходження аналізатора промінь падає на фотоелектричний детектор 16_1 ($16_2/16_3$), який забезпечує перетворення інтенсивності падаючого на нього променю в електричний сигнал. Електричний сигнал з фотодетектора проходить

через вузькосмуговий підсилювач 17_1 ($17_2/17_3$), де відбувається його посилення та надходить в синхронний детектор 18_1 ($18_2/18_3$). Синхронний детектор забезпечує методику вимірювання «по нулю сигналу», шляхом формування управляючого сигналу, який надходить до звукового генератора 14_1 ($14_2/14_3$). Сигнал від синхронного детектора 18_1 ($18_2/18_3$), який пропорційний зміні АПП двічізаломленого променя в поточний момент вимірювання, надходить в обчислювальний блок 19. Також в обчислювальний блок 19 надходить сигнал від звукового генератора 14_1 ($14_2/14_3$), який пропорційний АПП двічізаломленого променя в попередній момент вимірювання. Обчислювальний блок 19 є спільним для всіх каналів вимірювання і призначений для первинної обробки результатів вимірювання та здійснення розрахунків. Обчислювальний блок забезпечує визначення АПП двічізаломленого променя в кожному з каналів вимірювання, а також обчислення АПП падаючого променя та його плоских кутів падіння. Сигнал від обчислювального блоку надходить в обчислювальну систему вищої ієрархії, де відбувається визначення кутових параметрів відносного положення об'єктів. Поляриметрична модель визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ, схема якого зображена на рис. 3.7, полягає в наступному. Система вимірювання забезпечує визначення кута курсу (ψ_B) та кута тангажу (ϑ_B) АТЗ A відносно напрямку на АТЗ B та відносний кут крену (γ_B) між АТЗ A та B .

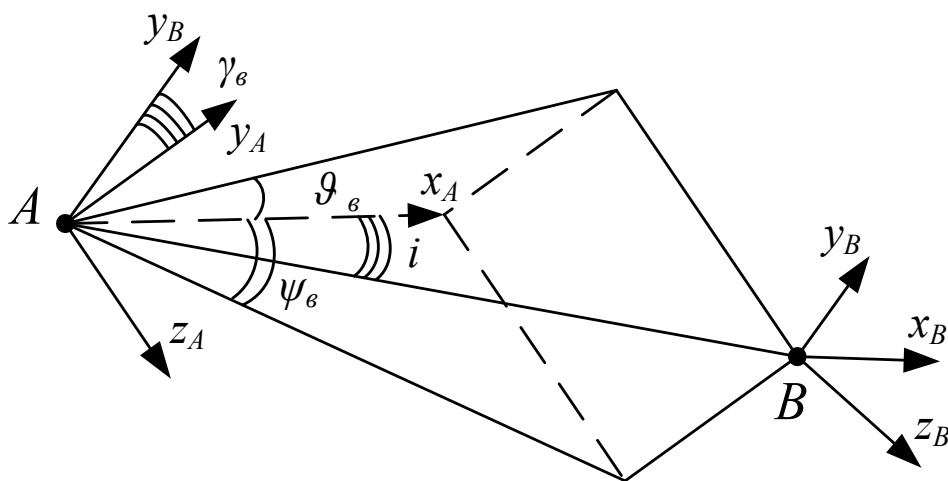


Рисунок 3.7 – Схема поляриметричної моделі визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ

Система, яка реалізує запропоновану поляриметричну модель визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ складається з всенаправленого блоку випромінювання та три-канального блоку вимірювання і забезпечує проведення вимірювань в трьох каналах. Блок обчислень запропонованої системи забезпечує визначення АПП падаючого променя φ_e та плоских КПП в горизонтальній i_{ϵ} і вертикальній i_{δ} площині, шляхом розв'язання системи з трьох рівнянь виду (3.4) з трьома невідомими. АПП падаючого променя буде визначати відносний крен АТЗ (γ_e), а плоскі кути падіння i_{ϵ} та i_{δ} будуть визначати, відповідно, кут курсу (ψ_e) та тангажу (ϑ_e) АТЗ з блоком вимірювання відносно напрямку на АТЗ з блоком випромінювання. Формули для визначення кутових параметрів відносного положення об'єктів матимуть наступний вид:

$$\psi_e = i_{\epsilon}; \quad \vartheta_e = i_{\delta}; \quad \gamma_e = \varphi_e - \varphi_0; \quad (3.11)$$

Запропонована поляриметрична модель може бути застосована для визначення кутових параметрів відносного положення об'єктів з чотирма відносними степенями руху: трьома лінійними та відносним поворотом об'єктів навколо повздовжньої осі. Зокрема для визначення кутових параметрів положення АТЗ відносно елементу ВДМ чи іншого АТЗ. При цьому, відносні лінійні переміщення АТЗ, крім переміщення об'єктів по прямій що їх сполучає, будуть призводити до зміни плоских КПП і, відповідно, до зміни кутів курсу та тангажу АТЗ *A* відносно напрямку на АТЗ *B*, а відносні повороти АТЗ навколо повздовжньої осі – до зміни відносного крену АТЗ. Також, слід відмітити, що повороти АТЗ *A* навколо поперечної чи вертикальної осей, також, будуть призводити до зміни його кутів тангажу та курсу відносно напрямку на АТЗ *B*, а повороти АТЗ *B* навколо поперечної чи вертикальної осей не реєструватимуться.

Запропоновану поляриметричну модель визначення кутових параметрів відносного положення доцільно застосовувати для визначення відносного положення рухомих АТЗ один відносно одного, рухомого АТЗ відносно нерухомого чи елементу ВДМ та двох нерухомих АТЗ один відносно одного.

3.3. Поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на вулично-дорожній мережі.

Запропоновані поляриметричні моделі визначення лінійних та кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ мають певні недоліки: поляриметрична модель визначення лінійних параметрів не враховує відносне орієнтаційне положення, а поляриметрична модель визначення кутових параметрів не враховує відносне позиційне положення АТЗ та дозволяє визначати кути курсу та тангажу лише відносно напрямку на блок випромінювання, тобто забезпечує повноцінне визначення лише відносного крену АТЗ. Усунути зазначені недоліки можливо завдяки розробці поляриметричної моделі визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ. Застосування ПМВ для визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ можливе завдяки прив'язці АПП ЛПП до напрямку його випромінювання і проведенню випромінювання в кількох каналах, які відрізняються функцією залежності АПП ЛПП від напрямку випромінювання. При цьому, для визначення відносних лінійно-кутових параметрів для АТЗ з шістьма відносними степенями руху необхідно проводити вимірювання щонайменше в п'яти каналах та додатково визначати відстань між АТЗ.

Застосування ПМВ для визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення об'єктів розглядається в роботі [103], яка присвячена питанню розробки поляриметричної системи посадки безпілотного літального апарату літакового та гвинтокрильного типу. В роботі розглядається поляриметричний метод формування глісади посадки та запропоновано поляриметричну систему посадки, яка дозволяє проводити посадку на негоризонтальну та рухому площину посадки. До складу запропонованої системи входить трьох-канальний наземний блок випромінювання та п'яти-канальний бортовий блок вимірювання. Запропонована система забезпечує визначення просторового положення безпілотного літального апарату відносно площини посадки та його кутового відхилення від траєкторії посадки по курсу та глісаді. Ще одним напрямком застосування запропонованого поляриметричного методу визначення лінійно-

кутових параметрів відносного положення об'єктів є розробка локальної поляриметричної навігаційної системи. В роботі [104] розглядається поляриметричний метод визначення пілотажно-навігаційних параметрів повітряного судна та систему, що його реалізує. До складу запропонованої системи входить трьох-канальний блок випромінювання та п'яти-канальний блок вимірювання. Запропонована система забезпечує визначення відносного орієнтаційного положення об'єктів та азимутів в горизонтальній та вертикальній площині з об'єкту з блоком випромінювання на об'єкт з блоком вимірювання.

В загальному випадку, застосування ПМВ для визначення пілотажно-навігаційних параметрів відносного положення АТЗ можливе наступним чином. Вимірювання проводяться в двох горизонтальних та одному вертикальному каналі. До складу кожного каналу входить одноканальний блок випромінювання з модулятором та блок вимірювання. До складу горизонтальних каналів входить двоканальний блок вимірювання, а до вертикального – одноканальний. Горизонтальні канали випромінювання забезпечують випромінювання розсіяного ЛПП з мінімальним кутом розходження в горизонтальній площині та максимальним кутом розходження в вертикальній площині. При цьому, забезпечується поворот діаграми випромінювання навколо вертикальної осі з одночасним поворотом площини поляризації променю. Вертикальний канал випромінювання забезпечує випромінювання розсіяного ЛПП з мінімальним кутом розходження в вертикальній площині та максимальним кутом розходження в горизонтальній площині. При цьому забезпечується поворот діаграми випромінювання навколо поперечної осі з одночасним поворотом площини поляризації променю. Графіки залежності АПП променю від напрямку випромінювання в горизонтальних ($\varphi_{e.z1} = f(\varphi_z)$ і $\varphi_{e.z2} = f(\varphi_z)$) та вертикальному ($\varphi_{e.s} = f(\theta_s)$) каналах приведені на рис. 3.8, а формули залежності мають вид (3.12).

$$\begin{aligned} \varphi_{0z} &= \frac{\varphi_{e.max.z} + \varphi_{e.min.z}}{2}; \quad \varphi_{0s} = \frac{\varphi_{e.max.s} + \varphi_{e.min.s}}{2}; \\ K_z &= \frac{\varphi_{e.max.z} - \varphi_{e.min.z}}{\Delta\varphi_z}; \quad K_s = \frac{\varphi_{e.max.s} - \varphi_{e.min.s}}{\Delta\theta_s}; \\ \varphi_{e.z1} &= \varphi_{0z} + K_z \cdot \varphi_z; \quad \varphi_{e.z2} = \varphi_{0z} - K_z \cdot \varphi_z; \quad \varphi_{e.s} = \varphi_{0s} + K_s \cdot \theta_s; \end{aligned} \quad (3.12)$$

де φ_{0z} , φ_{0v} – значення АПП променю, що випромінюється, який відповідає нульовому азимуту на блок випромінювання в горизонтальному та вертикальному каналах, °; $\varphi_{e.max.z}$, $\varphi_{e.max.v}$, $\varphi_{e.min.z}$, $\varphi_{e.min.v}$ – максимальне та мінімальне значення АПП променю, що випромінюється в горизонтальних та вертикальному каналах, °; K_z , K_v – коефіцієнти пропорційності між АПП променю та азимутом на блок випромінювання в горизонтальних та вертикальному каналах; $\Delta\varphi_z$, $\Delta\theta_v$ – діапазон зміни азимуту на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, °; φ_z , θ_v – азимут на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, °; $\varphi_{e.z1}$, $\varphi_{e.z2}$, $\varphi_{e.v}$ – значення АПП променю, що випромінюється в першому і другому горизонтальному каналах та в вертикальному каналі, °.

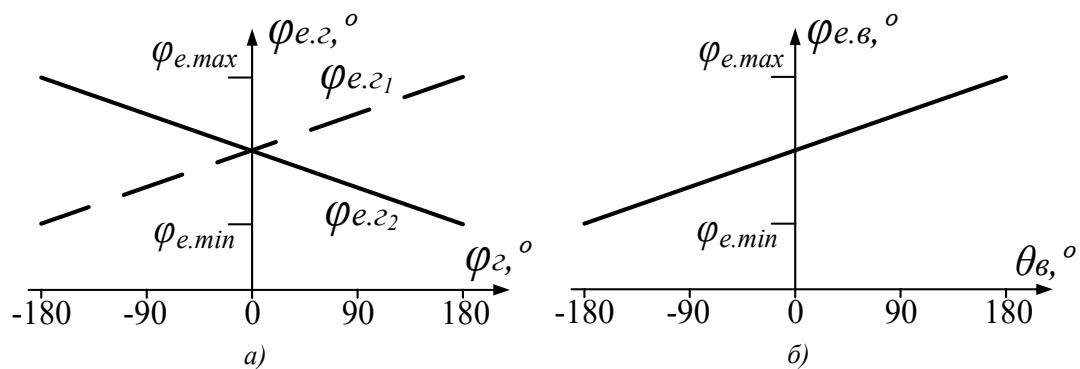


Рисунок 3.8 – Графіки залежності АПП променю, що випромінюється блоком випромінювання в горизонтальних (а) вертикальному (б) каналах від напрямку випромінювання

Таким чином, забезпечується формування п'яти ідентичних вимірювальних каналів, які складаються з блоку випромінювання 1, середовища розповсюдження 2 та каналу блоку вимірювання 3. Блок-схема одного вимірювального каналу приведена на рис. 3.9. Робота вимірювального каналу полягає в наступному. Джерело випромінювання 4 випромінює ЛПП визначеної довжини хвилі з визначеним АПП (φ_0), який падає на комірку Фарадея 6. Комірка Фарадея 6 виступає в якості модулятора і забезпечує поворот площини поляризації ЛПП у відповідності до сигналів управління, які надходять від звукового генератора 5. Звуковий генератор 5 забезпечує формування сигналів

управління у відповідності до закону залежності АПП ЛПП від напрямку випромінювання, які надходять в комірку Фарадея 6 та в систему управління обертальною платформою 9. Після проходження комірки Фарадея 6 ЛПП проходить через розсіювальну лінзу 7 та вузько-щілинну діафрагму 8, які забезпечують розсіювання ЛПП 10 з визначеними апертурами розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині. Блок випромінювання встановлюється на обертальній платформі 9, яка забезпечує його поворот навколо відповідної осі у відповідності до сигналів управління, які надходять від звукового генератора 5. ЛПП 10 проходить через середовище розповсюдження 2, яке спричинює зміну його поляризаційних властивостей в залежності від фізико-хімічного складу середовища розповсюдження та падає на блок вимірювання 3.

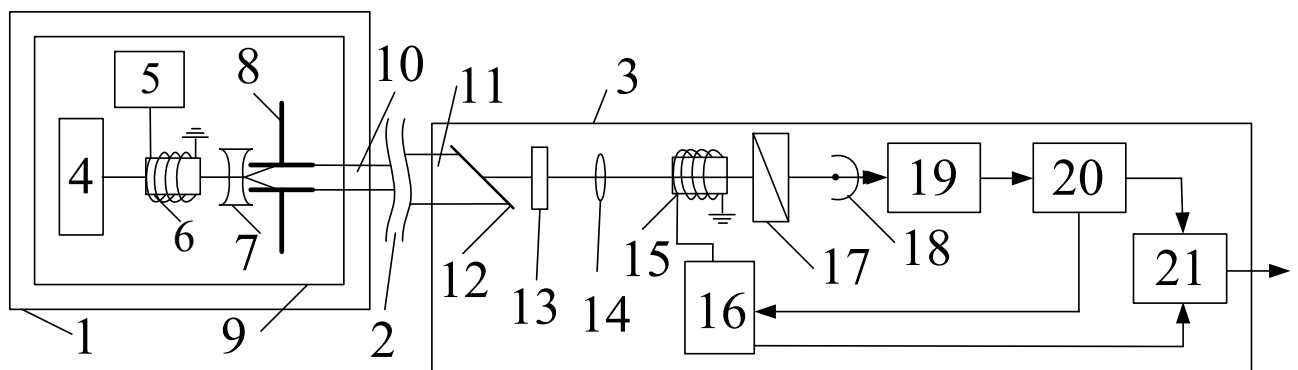


Рисунок 3.9 – Блок-схема вимірювального каналу системи вимірювання лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ

Після проходження середовища розповсюдження ЛПП 11 падає на ІДПП 12, яка забезпечує поворот площини поляризації двічізаломленого ЛПП в залежності від АПП падаючого променя φ_e та його просторового кута падіння i . Після проходження ІДПП 12 двічізаломлений ЛПП проходить через оптичний фільтр 13, який забезпечує пропускання променів з довжиною хвилі, яка відповідає довжині хвилі ЛПП, що випромінюються відповідним блоком випромінювання. Після проходження оптичного фільтру 13 двічізаломлений ЛПП проходить фокусуючу лінзу 14 та фокусується на комірці Фарадея 15. Комірка Фарадея 15 виступає в якості модулятора та забезпечує підвищення

чутливості вимірювання шляхом модуляції ЛПП в змінному магнітному полі. Управляючий сигнал на комірку Фарадея 15 формується звуковим генератором 16 на основі модулюючого сигналу та управляючого сигналу від синхронного детектора 20. Після проходження комірки Фарадея 15 двічізаломлений ЛПП проходить через аналізатор 17, який забезпечує визначення АПП падаючого на нього променя. Після проходження аналізатора 17 ЛПП падає на фотодетектор 18, який призначений для перетворення інтенсивності падаючого на нього променя в електричний сигнал. Електричний сигнал від фотодетектора 18 проходить через вузькосмуговий підсилювач 19, який забезпечує його посилення та надходить в синхронний детектор 20. Синхронний детектор 20 забезпечує методику вимірювання «по нулю сигналу», шляхом формування управляючого сигналу, який надходить до звукового генератора 16. Сигнали від звукового генератора 16 та синхронного детектора 20 надходять в обчислювальний блок 21. При цьому, управляючий сигнал від синхронного детектора 20 пропорційний зміні АПП двічізаломленого ЛПП в поточний момент вимірювання, а сигнал від звукового генератора 16 пропорційний АПП двічізаломленого ЛПП в попередній момент вимірювання. Обчислювальний блок 21 є спільним для п'яти каналів вимірювання та призначений для визначення АПП двічізаломленого ЛПП в кожному з каналів вимірювання, а також обчислення АПП трьох падаючих променів $\varphi_{e.z1}$, $\varphi_{e.z2}$, $\varphi_{e.v}$ та плоских кутів їх падіння i_z та i_v . Сигнал від обчислювального блоку 21 надходить в обчислювальну систему більш високої ієрархії, де відбувається визначення лінійно-кутових параметрів положення АТЗ з блоком випромінювання відносно АТЗ з блоком вимірювання.

Поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ, схема якого приведена на рис. 3.10, полягає в наступному. Система вимірювання забезпечує визначення відносного орієнтаційного положення АТЗ: відносного кута крену (γ_v), відносного кута тангажу (ϑ_v), відносного кута курсу (ψ_v), а також параметрів відносного позиційного положення АТЗ: азимуту з АТЗ *В* на АТЗ *А* в горизонтальній (φ_z) та вертикальній площині (θ_v). Додатково може визначатись відстань d між АТЗ.

параметри відносного позиційного положення АТЗ та параметри їх відносного орієнтаційного положення. Запропонована поляриметрична модель може бути застосована при кутомірному методі визначення позиційних параметрів відносного положення АТЗ за умови визначення азимуту в горизонтальній та вертикальній площині відносно пари маяків чи взаємопов'язаних АТЗ, відносно положення яких незмінне, а рух синхронізований. Формули для визначення позиційних параметрів відносного положення АТЗ матимуть вид (3.9) та (3.10). Запропонована модель також може бути застосована при кутомірно-далекомірному методі визначення позиційних параметрів відносного положення АТЗ за умови визначення дальності між АТЗ. Формули для визначення позиційних параметрів відносного положення АТЗ матимуть вид (3.5) та (3.6).

Запропонована поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ може бути застосована для визначення параметрів відносного положення як нерухомих, так і рухомих об'єктів, зокрема АТЗ, з шістьма відносними степенями руху: трьома лінійними та трьома кутовим. При цьому, відносні лінійні переміщення та відносні кутові повороти АТЗ будуть призводити до зміни плоских КПП та до зміни азимутів з АТЗ *A* на АТЗ *B* в горизонтальній та вертикальній площині.

Отже, запропонована поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ доцільно застосовувати для визначення відносного положення рухомих АТЗ один відносно одного, рухомого АТЗ відносно нерухомого АТЗ чи елементу ВДМ та двох нерухомих АТЗ один відносно одного чи нерухомого АТЗ відносно елементу ВДМ. При цьому, запропонована модель дозволяє визначити кутові параметри відносного орієнтаційного положення АТЗ, а для визначення параметрів відносного позиційного положення АТЗ необхідно додатково визначати дальність між АТЗ або здійснювати визначення позиційного положення АТЗ відносно пари зв'язаних об'єктів та застосовувати кутомірно-далекомірний або кутомірний підхід до визначення параметрів відносного позиційного положення АТЗ, як показано в пункті 3.1.

3.4. Вдосконалена поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ.

Запропонована поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ характеризуються певними недоліками, які обмежують область його застосування. До основних з них можна віднести відносно велику кількість каналів блоку вимірювання, несиметричність горизонтального та вертикального каналів системи, відсутність алгоритму проведення вимірювань та інші. Усунути зазначені недоліків можливо завдяки застосуванню вдосконаленого поляриметричного методу визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання, суть якого полягає в наступному. Блок випромінювання випромінює два ЛПП, АПП, яких відрізняються на визначену величину δ , а блок вимірювання проводить вимірювання АПП двох падаючих променів та здійснює розрахунки за визначеним алгоритмом. При цьому, забезпечується однозначне визначення плоских КПП в горизонтальній i_z та вертикальній i_v площині та його АПП φ_e . Вдосконалена поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів АТЗ, також, передбачає проведення вимірювань в кількох каналах, які відрізняються функцією залежності АПП променю від напрямку його випромінювання, з метою зменшення похибок вимірювання спричинених середовищем розповсюдження. Для забезпечення визначення відносних лінійно-кутових параметрів положення АТЗ також необхідно проводити вимірювання відстані між ними.

Застосування вдосконаленого поляриметричного методу визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення об'єктів запропоновано авторами в роботі [19], яка присвячена питанню розробки математичної моделі поляриметричної системи посадки повітряного судна. В роботі розглядається питання підвищення ефективності та безпеки заходу на посадку повітряного судна завдяки підвищенню точності вимірювання лінійно-кутових параметрів положення повітряного судна відносно площини посадки. В роботі запропоновано поляриметричний принцип формування глісади посадки, модель поляриметричної системи посадки та алгоритм проведення вимірювань. До

складу запропонованої системи входить курсовий та глісадний канали, які мають ідентичну структуру. До складу одного каналу системи входить блок випромінювання та двоканальний блок вимірювання. Блок випромінювання забезпечує випромінювання двох ЛПП, АПП яких відрізняються на визначену величину δ . Блок вимірювання забезпечує вимірювання АПП двічізаломленого променя в двох каналах вимірювання для двох падаючих променів та проведення розрахунків з визначення АПП падаючого променя та його плоских кутів падіння. На основі даних від блоку вимірювання відбувається визначення просторового положення повітряного судна відносно площини посадки.

Запропонований вдосконалений ПМВ лінійно-кутових параметрів відносного положення об'єктів також може бути застосованим для визначення взаємного просторового положення елементів ДТС. В роботі [1] розглядається питання розробки системи визначення взаємного просторового положення АТЗ. В роботі розглядається поляриметричний принцип визначення взаємного просторового положення АТЗ та система, що його реалізує, а також алгоритм проведення вимірювань та розрахунків. Запропонована система складається з двоканального блоку випромінювання та двоканального блоку вимірювання. Канали блоку випромінювання відрізняються законом залежності АПП променів від напрямку випромінювання, а блоку вимірювання – кутами установки ІДПП в горизонтальній та вертикальній площині. При цьому, склад системи може змінюватись в залежності від кількості ступенів свободи відносного руху.

В загальному випадку, вдосконалений поляриметричний метод визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ полягає в наступному. Вимірювання проводяться в двох каналах: горизонтальному та вертикальному. Горизонтальний канал забезпечує визначення азимуту на джерело випромінювання відносно вертикальної площини, а вертикальний канал – відносно горизонтальної площини. Горизонтальний та вертикальний канал мають ідентичний склад та включають двоканальний блок випромінювання та двоканальний блок вимірювання. Блок випромінювання горизонтального каналу забезпечує випромінювання двох розсіяних ЛПП з мінімальним кутом

розходження в горизонтальній площині та максимальним – в вертикальній, а вертикального каналу, навпаки, - з мінімальним кутом розходження в вертикальній площині та максимальним – в горизонтальній. При цьому, забезпечується поворот діаграми випромінювання горизонтального каналу навколо вертикальної осі, а вертикального каналу – навколо поперечної осі з одночасним поворотом площини поляризації променю. Канали двоканального блоку випромінювання відрізняються тим, що їх АПП відрізняються на визначену величину δ . Формули залежності АПП променів в горизонтальному ($\varphi_{e.z1} = f(\varphi_z)$ і $\varphi_{e.z2} = f(\varphi_z)$) та вертикальному ($\varphi_{e.61} = f(\theta_6)$ і $\varphi_{e.62} = f(\theta_6)$) каналах від напрямку випромінювання мають вид (3.14), а відповідні графіки залежності приведені на рис. 3.11. Блок вимірювання забезпечує вимірювання АПП двічізаломленого ЛПП, визначення плоских кутів падіння та АПП падаючого променю, здійснення розрахунків з визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ. Блок вимірювання для горизонтального та вертикального каналів має ідентичну структуру та включає два вимірювальних канали, які відрізняються кутом установки ІДПП відносно горизонтальної та вертикальної площини. Між блоком випромінювання та блоком вимірювання знаходиться середовище розповсюдження, зазвичай повітряне середовище.

$$\begin{aligned}
 \varphi_{0z} &= \frac{\varphi_{e.max.z} + \varphi_{e.min.z}}{2}; & \varphi_{06} &= \frac{\varphi_{e.max.6} + \varphi_{e.min.6}}{2}; \\
 K_z &= \frac{\varphi_{e.max.z} - \varphi_{e.min.z}}{\Delta\varphi_z}; & K_6 &= \frac{\varphi_{e.max.6} - \varphi_{e.min.6}}{\Delta\theta_6}; \\
 \varphi_{e.z1} &= \varphi_{0z} + K_z \cdot \varphi_z; & \varphi_{e.z2} &= \varphi_{e.z1} - \delta_z = \varphi_{0z} + K_z \cdot \varphi_z - \delta_z; \\
 \varphi_{e.61} &= \varphi_{06} - K_6 \cdot \theta_6; & \varphi_{e.62} &= \varphi_{e.61} + \delta_6 = \varphi_{06} - K_6 \cdot \theta_6 + \delta_6;
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

де φ_{0z} , φ_{06} – значення АПП променю, що випромінюється, який відповідає нульовому азимуту на блок випромінювання в горизонтальному та вертикальному каналах, °; $\varphi_{e.max.z}$, $\varphi_{e.max.6}$, $\varphi_{e.min.z}$, $\varphi_{e.min.6}$ – максимальне та мінімальне значення АПП променю, що випромінюється в горизонтальному та вертикальному каналах, °; K_z , K_6 – коефіцієнти пропорційності між АПП променю, що випромінюється та азимуту на блок випромінювання в

горизонтальному та вертикальному каналах; $\Delta\varphi_z, \Delta\theta_v$ – діапазон зміни азимуту на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, °; δ_r та δ_v – різниця між АПП променю в першому та другому каналі двоканального блоку випромінювання в горизонтальному та вертикальному каналі системи, °; φ_z, θ_v – значення азимуту на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, °; $\varphi_{e.z1}, \varphi_{e.z2}, \varphi_{e.v1}, \varphi_{e.v2}$ – значення АПП променю, що випромінюється в першому і другому горизонтальному та вертикальному каналі, °.

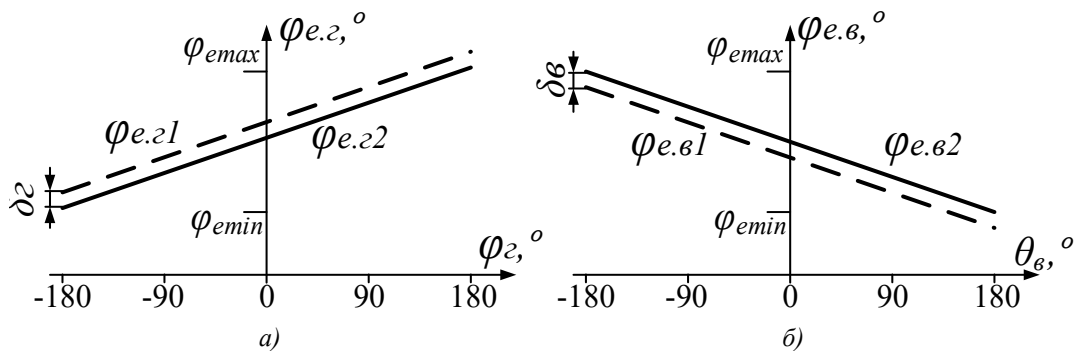


Рисунок 3.11 – Графіки залежності АПП променів, що випромінюється в горизонтальному (а) та вертикальному (б) каналах від напрямку випромінювання

Отже, забезпечується формування чотирьох вимірювальних каналів: двох горизонтальних та двох вертикальних, які попарно об'єднані. Блок-схема спареного вимірювального каналу приведена на рис. 3.12. Склад спареного вимірювального каналу включає спарений блок випромінювання І, середовище розповсюдження 8 та спарений блок вимірювання ІІ. Принцип роботи спареного вимірювального каналу полягає в наступному. Блок випромінювання І забезпечує випромінювання ЛПП в двох каналах, які відрізняються законом залежності АПП променю від напрямку випромінювання. В кожному з каналів випромінювання відбувається наступне. Джерело випромінювання 1 випромінює ЛПП визначеної довжини хвилі з визначеним АПП. ЛПП проходить через комірку Фарадея 3, яка виступає в якості модулятора, та падає на розсіювальну лінзу 4. Комірка Фарадея 3 забезпечує поворот площини поляризації ЛПП у відповідності до сигналів управління, що надходять від

звукового генератора 2. Звуковий генератор 2 забезпечує формування управляючого сигналу у відповідності до закону залежності АПП променю від напрямку випромінювання. Сигнал від звукового генератора 2 надходить також в систему управління обертання платформою 6, щоб забезпечити однозначний зв'язок між напрямком випромінювання та АПП ЛПП. Після проходження розсіювальної лінзи 4 розсіяний ЛПП проходить через вузько-щілинну діафрагму 5. Розсіювальна лінза 4 в поєднанні з вузько-щілинною діафрагмою 5 забезпечує розсіювання ЛПП з визначеними апертурами розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині. ЛПП 7_1 , який випромінюється блоком випромінювання проходить через середовище розповсюдження 8, де відбувається зміна його поляризаційних властивостей в залежності від фізико-хімічного складу середовища розповсюдження.

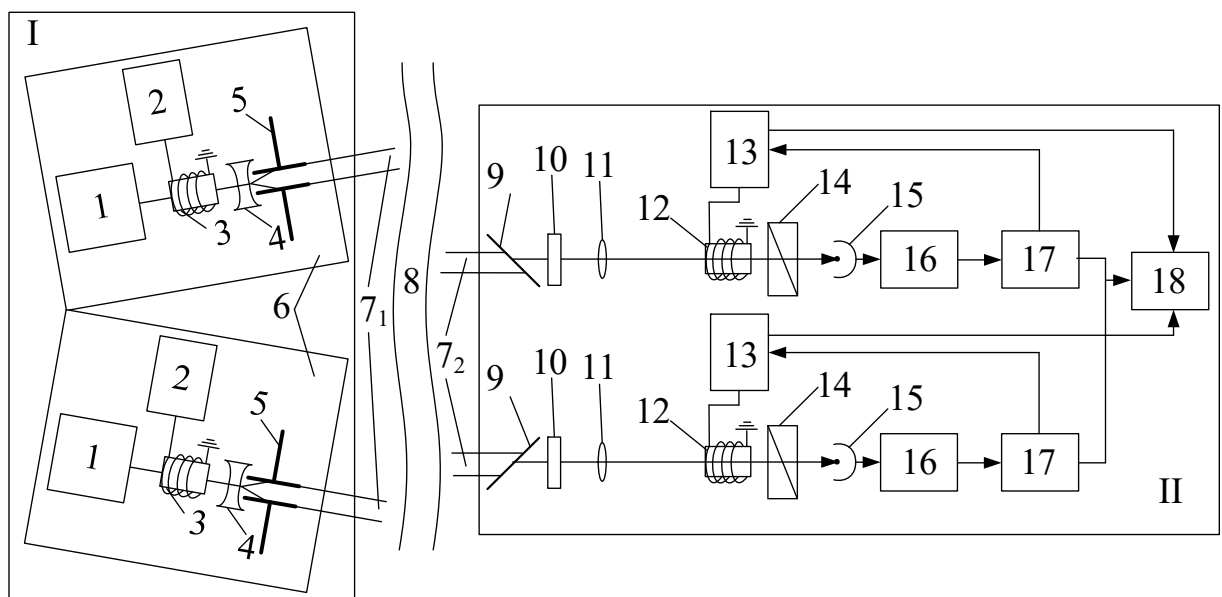


Рисунок 3.12 – Блок-схема спареного вимірювального каналу системи вимірювання лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ.

Після проходження середовища розповсюдження 8 ЛПП 7_2 падає на двоканальний блок вимірювання II, який забезпечує визначення плоских КПП та його АПП. В кожному з каналів вимірювання відбувається наступне. ЛПП 7_2 падає на ІДПП 9. ІДПП 9 забезпечує поворот площини поляризації двічізаломленого ЛПП по відношенню до падаючого ЛПП, в залежності від

просторового КПП та його АПП. Двічізаломлений ЛПП проходить через оптичний фільтр 10 і фокусуючу лінзу 11 та фокусується на комірці Фарадея 12. Оптичний фільтр 10 забезпечує пропускання променів з довжиною хвилі, яка відповідає довжині хвилі променів, що випромінюються відповідним блоком випромінювання. Комірка Фарадея 12 призначена для модуляції ЛПП в змінному магнітному полі для підвищення чутливості вимірювання та забезпеченні методу вимірювання «по нулю сигналу». Сигнал управління на комірку Фарадея 12 надходить від звукового генератора 13. Сигнал управління у звуковому генераторі 13 формується на основі модулюючого сигналу та сигналу доуправління, що надходить від синхронного детектора 17. Після проходження комірки Фарадея 12 модульований ЛПП проходить через аналізатор 14 та падає на фотодетектор 15. Аналізатор 14 забезпечує визначення АПП променю, що на нього падає. Фотодетектор 15 забезпечує перетворення інтенсивності ЛПП, що на нього падає, в електричний сигнал. Електричний сигнал від фотодетектора 15 надходить в вузько смуговий підсилювач 16, який забезпечує посилення електричного сигналу. Електричний сигнал від вузько смугового підсилювача надходить в синхронний детектор 17. Синхронний детектор 17 забезпечує формування управляючого сигналу, який надходить до звукового генератора 13 з метою забезпечення методу вимірювання «по нулю сигналу». Сигнали від звукового генератора 13 та синхронного детектора 17 надходять в обчислювальний блок 18. При цьому, сигнал від звукового генератора 13 пропорційний АПП двічізаломленого променю в попередній вимірювальний такт, а сигнал від синхронного детектора 17 – пропорційний зміні АПП променю в поточний вимірювальний такт. Обчислювальний блок 18 є спільним для всіх вимірювальних каналів та забезпечує визначення АПП двічізаломленого ЛПП в кожному з вимірювальних каналів, а також здійснює обчислення плоских кутів падіння чотирьох падаючих ЛПП та їх АПП. Сигнал від обчислювального блоку 18 надходить в обчислювальну систему вищого рівня ієрархії, яка забезпечує визначення лінійно-кутових параметрів положення АТЗ з блоком вимірювання відносно АТЗ з блоком випромінювання.

Запропонована поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ реалізує вдосконалений поляриметричний метод визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання з його алгоритмом проведення вимірювань. Система, що реалізує запропоновану модель складається з горизонтального та вертикального каналів, кожен з яких складається з спареного блоку випромінювання та спареного блоку вимірювання. Система буде забезпечувати проведення вимірювань в чотирьох каналах та визначення шести параметрів: АПП падаючого променя в горизонтальному ($\varphi_{e,z}$) та вертикальному ($\varphi_{e,\theta}$) каналі, а також плоских КПП в горизонтальній та вертикальній площині для горизонтального ($i_{z,z}, i_{\theta,z}$) та вертикального ($i_{z,\theta}, i_{\theta,\theta}$) каналів системи, відповідно.

Формули для визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned} i_z &= \frac{i_{z,z} + i_{z,\theta}}{2}; & i_\theta &= \frac{i_{\theta,z} + i_{\theta,\theta}}{2}; \\ \varphi_z &= \frac{\varphi_{e,z} - \varphi_{0,z}}{K_z}; & \theta_\theta &= \frac{\varphi_{e,\theta} - \varphi_{0,\theta}}{K_\theta}; \\ \psi &= \varphi_z + i_z; & \theta &= \theta_\theta + i_\theta. \end{aligned} \quad (3.15)$$

де i_z та i_θ – середньозважене значення плоского кута падіння в горизонтальній та вертикальній площині; φ_z та θ_θ – значення азимуту на джерело ЛПП в горизонтальній та вертикальній площині; θ та ψ – відносний кут тангажу та кут курсу АТЗ з блоком вимірювання відносно АТЗ з блоком випромінювання.

Як видно з формул (3.15) запропонована система не забезпечує визначення відносного крену між АТЗ. Також запропонована система не забезпечує зменшення похибок вимірювання спричинених середовищем розповсюдження. Для усунення цих недоліків необхідно ввести додатковий вимірювальний канал. Для прикладу розглянемо систему, яка складається з двох спарених горизонтальних та двох спарених вертикальних каналів. Формули залежності АПП ЛПП в першому ($\varphi_{e,z1} = f(\varphi_z)$, $\varphi_{e,z2} = f(\varphi_z)$) і другому ($\varphi_{e,z3} = f(\varphi_z)$ і $\varphi_{e,z4} = f(\varphi_z)$)

горизонтальних каналах та першому ($\varphi_{e.61} = f(\theta_6)$, $\varphi_{e.62} = f(\theta_6)$) і другому ($\varphi_{e.63} = f(\theta_6)$ і $\varphi_{e.64} = f(\theta_6)$) вертикальних каналах від напрямку випромінювання мають вид (3.16), а графіки залежностей приведені на рис. 3.13. Система забезпечуватиме проведення вимірювання в восьми каналах та визначення дванадцяти параметрів: АПП падаючого променя в першому та другому горизонтальному ($\varphi_{e.21}$, $\varphi_{e.23}$) та вертикальному ($\varphi_{e.61}$, $\varphi_{e.63}$) каналах, плоских КПП в горизонтальній та вертикальній площині для першого та другого горизонтального ($i_{.2.21}$, $i_{.6.21}$, $i_{.2.22}$, $i_{.6.22}$) та вертикального ($i_{.2.61}$, $i_{.6.61}$, $i_{.2.62}$, $i_{.6.62}$) каналів системи, відповідно.

$$\begin{aligned}
 \varphi_{e.21} &= \varphi_{02} + K_2 \cdot \varphi_2; & \varphi_{e.22} &= \varphi_{e.21} - \delta_2 = \varphi_{02} + K_2 \cdot \varphi_2 - \delta_2; \\
 \varphi_{e.23} &= \varphi_{02} - K_2 \cdot \varphi_2; & \varphi_{e.24} &= \varphi_{e.23} - \delta_2 = \varphi_{02} - K_2 \cdot \varphi_2 - \delta_2; \\
 \varphi_{e.61} &= \varphi_{06} + K_6 \cdot \theta_6; & \varphi_{e.62} &= \varphi_{e.61} + \delta_6 = \varphi_{06} + K_6 \cdot \theta_6 + \delta_6; \\
 \varphi_{e.63} &= \varphi_{06} - K_6 \cdot \theta_6; & \varphi_{e.64} &= \varphi_{e.63} + \delta_6 = \varphi_{06} - K_6 \cdot \theta_6 + \delta_6.
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

де $\varphi_{e.21}$, $\varphi_{e.22}$, $\varphi_{e.23}$, $\varphi_{e.24}$, $\varphi_{e.61}$, $\varphi_{e.62}$, $\varphi_{e.63}$, $\varphi_{e.64}$ — значення АПП променя, що випромінюється в першому і другому горизонтальних та вертикальних каналах, °.

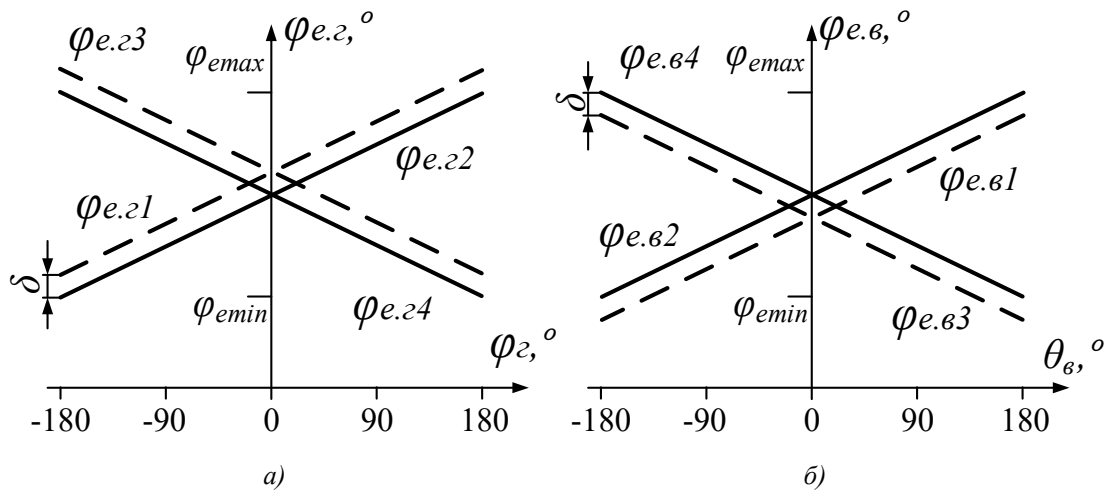


Рисунок 3.13 — Графіки залежності АПП променів, що випромінюється в горизонтальних (а) та вертикальних (б) каналах від напрямку випромінювання

З урахуванням відносного крену АТЗ та похибки вимірювання, спричиненою середовищем розповсюдження, формули (3.16) матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned}
\varphi_{e.z1} &= \varphi_{0z} + K_z \cdot \varphi_z + \gamma + \delta; & \varphi_{e.z2} &= \varphi_{0z} + K_z \cdot \varphi_z - \delta_z + \gamma + \delta; \\
\varphi_{e.z3} &= \varphi_{0z} - K_z \cdot \varphi_z + \gamma + \delta; & \varphi_{e.z4} &= \varphi_{0z} - K_z \cdot \varphi_z - \delta_z + \gamma + \delta; \\
\varphi_{e.61} &= \varphi_{06} + K_6 \cdot \theta_6 + \gamma + \delta; & \varphi_{e.62} &= \varphi_{06} + K_6 \cdot \theta_6 + \delta_6 + \gamma + \delta; \\
\varphi_{e.63} &= \varphi_{06} - K_6 \cdot \theta_6 + \gamma + \delta; & \varphi_{e.64} &= \varphi_{06} - K_6 \cdot \theta_6 + \delta_6 + \gamma + \delta.
\end{aligned}
\tag{3.17}$$

де γ – відносний крен АТЗ, °; δ – похибка вимірювання, °.

Формули для визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ матимуть наступний вид:

$$\begin{aligned}
i_z &= \frac{i_{z.z1} + i_{z.61} + i_{z.z2} + i_{z.62}}{4}; & i_6 &= \frac{i_{6.z1} + i_{6.61} + i_{6.z2} + i_{6.62}}{4}; \\
\varphi_z &= \frac{\varphi_{e.z1} - \varphi_{e.z3}}{2 \cdot K_z}; & \theta_6 &= \frac{\varphi_{e.61} - \varphi_{e.63}}{2 \cdot K_6}; \\
\psi &= \varphi_z + i_z; & \theta &= \theta_6 + i_6; \\
\gamma_z &= \frac{\varphi_{e.z1} + \varphi_{e.z3} - 2 \cdot \varphi_{0z} - 2 \cdot \delta}{2}; & \gamma_6 &= \frac{\varphi_{e.61} + \varphi_{e.63} - 2 \cdot \varphi_{06} - 2 \cdot \delta}{2}; & \gamma &= \frac{\gamma_z + \gamma_6}{2} + \delta_c.
\end{aligned}
\tag{3.18}$$

де i_z та i_6 – середньозважене значення плоского кута падіння в горизонтальній та вертикальній площині, °; φ_z та θ_6 – значення азимуту на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, °; θ та ψ – відносний кут тангажу та кут курсу АТЗ з блоком вимірювання по відношенню до АТЗ з блоком випромінювання, °; γ_z та γ_6 – значення кута відносного крену, визначене в горизонтальному та вертикальному каналі вимірювання, °; γ – середньозважене значення кута відносного крену, °; δ_c – середньозважена похибка вимірювання спричинена середовищем розповсюдження, °.

Як видно з формул (3.18) запропонована система забезпечує визначення крену між АТЗ з блоком випромінювання та АТЗ з блоком вимірювання, а також зменшення впливу похибки вимірювання, спричиненої середовищем розповсюдження, на визначення азимуту на джерело поляризованого випромінювання в горизонтальній та вертикальній площинах. При цьому, похибка вимірювання, спричинена середовищем розповсюдження, впливає на визначення відносного кута крену між АТЗ.

Таким чином, запропонована вдосконалена поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ дозволяє однозначно визначити відносне просторове положення АТЗ та азимут з АТЗ з блоком вимірювання на джерело поляризованого випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, а також зменшити вплив похибки вимірювання, спричиненої середовищем розповсюдження. Запропонована поляриметрична модель може бути застосована при кутомірно-далекомірному методі визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ за умови визначення дальності між АТЗ. При цьому, формули для визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ матимуть вид (3.5) та (3.6). Також запропонована модель може бути застосована при кутомірному методі визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ за умови визначення азимуту в горизонтальній та вертикальній площині відносно пари маяків чи взаємопов'язаних АТЗ, відносне положення яких незмінне, а рух синхронізований. Формули для визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ матимуть вид (3.9) та (3.10). Запропонована модель може бути застосованим для визначення параметрів відносного положення як нерухомих, так і рухомих об'єктів з шістьма відносними степенями руху. Зокрема, положення АТЗ відносно елементів ВДМ чи інших АТЗ. При цьому, відносні лінійні переміщення та відносні кутові повороти АТЗ будуть призводити до зміни плоских КПП та до зміни азимутів з АТЗ з блоком вимірювання на АТЗ з блоком випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині.

Загалом, запропонована вдосконалена поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ забезпечує визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ. Для забезпечення визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ необхідно здійснювати визначення кутового положення АТЗ відносно пари зв'язаних маяків чи АТЗ або додатково визначати дальність між АТЗ та застосовувати кутомірний або кутомірно-далекомірний підхід до визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ, як показано в пункті 3.1.

Висновки по розділу 3

Під відносним положенням АТЗ розуміють їх взаємне положення в просторі як матеріальних точок з урахуванням взаємного напрямку осей їх зв'язаних систем координат. Для опису відносного положення АТЗ застосовуються лінійні та кутові параметри. Лінійні параметри описують відносне положення АТЗ, як матеріальних точок та визначають відстань між АТЗ по трьом осям три-координатного простору. Кутові параметри описують відносне положення зв'язаних систем координат АТЗ та визначають відносні кути крену, тангажу та рискання АТЗ. Лінійні параметри визначають відносне положення АТЗ в просторі та застосовуються в процесі навігації, а кутові параметри визначають відносне просторове положення АТЗ та застосовуються в процесі управління. Застосування ПМВ для визначення лінійних та кутових параметрів відносного положення АТЗ полягає в визначенні напрямку на джерело поляризованого випромінювання в горизонтальній і вертикальній площині та плоских КПП на ІДПП з подальшим проведення розрахунків.

Застосування ПМВ для визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ можливе завдяки прив'язці АПП вузько-спрямованого променя, що випромінюється, до напрямку випромінювання. Завдяки цьому АПП падаючого променя буде напряму зв'язаний з азимутом на джерело випромінювання. При цьому, лінійні параметри відносного положення АТЗ можуть бути визначені з використанням кутомірного навігаційного методу завдяки визначенню напрямку на два взаємопов'язаних джерела випромінювання або кутомірно-далекомірного навігаційного методу за умови визначення напрямку на джерело випромінювання та дальності до нього.

Застосування ПМВ для визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ можливе завдяки визначенню плоских кутів падіння всенаправленого променя в горизонтальній та вертикальній площині, а також його АПП. Плоскі КПП будуть визначати відносний кут курсу та тангажу АТЗ з блоком вимірювання відносно напрямку на джерело випромінювання. А

відносний кут крену АТЗ буде визначатись як різниця АПП променю, що випромінюється та падаючого на ІДПП променю.

Застосування ПМВ для визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ можливе завдяки прив'язці АПП вузько-спрямованого променю, що випромінюється, до напрямку випромінювання та проведенню випромінювання в кількох каналах, які відрізняються функцією залежності АПП променю, що випромінюється, від напрямку його випромінювання. Поляриметрична модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ забезпечує визначення азимуту на джерело випромінювання в горизонтальній та вертикальній площині, а також плоских КПП. Це дозволяє визначати відносні кути крену, курсу та тангажу між АТЗ. А визначення дальності до джерела випромінювання чи напрямку на два взаємопов'язаних джерела випромінювання дозволяє визначати лінійні параметри відносного положення АТЗ.

Вдосконалення запропонованої поляриметричної моделі визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ можливе завдяки застосуванню вдосконаленого поляриметричного методу визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання та авторського алгоритму проведення вимірювань і полягає в випромінюванні двох ЛПП, АПП яких відрізняються на визначену величину, та вимірюванні АПП двічізаломлених променів після їх падання на ІДПП. Запропонований алгоритм проведення вимірювань дозволяє скоротити кількість каналів вимірювання на 20% та зменшити похибку вимірювання спричинену середовищем розповсюдження в процесі визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ.

РОЗДІЛ IV

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Поляриметричний метод позиціонування та моніторингу АТЗ

В контексті дисертаційного дослідження, під поляриметричним методом позиціонування та моніторингу АТЗ будемо розуміти процедуру визначення позиційних та орієнтаційних параметрів відносного положення АТЗ та відносних параметрів їх руху, що базується на використанні поляриметричних моделей визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на вулично-дорожній мережі. При цьому вважаємо, що визначення позиційних та орієнтаційних параметрів відносного положення АТЗ в певні моменти часу відбувається в процесі позиціонування. Відповідно, моніторинг АТЗ обумовлює отримання масиву даних про відносне положення АТЗ за тривалі проміжки часу, а також відносних параметрів їх руху (швидкість, прискорення). В основу запропонованого поляриметричного методу ПМ на АТ покладене використання явища повороту площини поляризації ЛПП в процесі його відбивання та заломлення після падіння на ізотропну діелектричну пластину, що розміщується на АТЗ. Запропонований поляриметричний метод позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті може бути реалізований принаймні при використанні двох блків: блоку випромінювання та блоку вимірювання.

Блок випромінювання забезпечує випромінювання ЛПП з визначеною апертурою розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині з поворотною діаграмою випромінювання. Це забезпечує поворот АПП променю в процесі зміни напрямку випромінювання. Таким чином, встановлюється однозначний зв'язок між напрямком випромінювання та АПП променю. В загальному випадку, використовується два канали випромінювання: горизонтальний та вертикальний. Горизонтальний канал випромінювання забезпечує випромінювання ЛПП з мінімальною апертурою розсіювання в горизонтальній площині та максимальною апертурою розсіювання в вертикальній площині. У

відповідності до цього, поворот діаграми випромінювання відбувається навколо вертикальної осі. Таким чином горизонтальний канал забезпечує визначення азимуту на джерело випромінювання в горизонтальній площині. Вертикальний канал випромінювання забезпечує випромінювання ЛПП з мінімальною апертурою розсіювання в вертикальній площині та максимальною апертурою розсіювання в горизонтальній площині. У відповідності до цього, поворот діаграми випромінювання відбувається навколо поперечної осі. Таким чином, вертикальний канал забезпечує визначення азимуту на джерело випромінювання в вертикальній площині. Щодо блоку вимірювання, то він забезпечує визначення АПП двічізаломленого та падаючого променя та плоских КПП в горизонтальній та вертикальній площині. При цьому, АПП падаючого променя буде визначати азимут на блок випромінювання, а плоскі кути падіння – відносно орієнтаційне положення АТЗ з блоком вимірювання та АТЗ з блоком випромінювання. Отже, в найпростішому випадку, кожному горизонтальному каналу випромінювання відповідає горизонтальний канал вимірювання, а кожному вертикальному каналу випромінювання відповідає вертикальний канал вимірювання. Загалом, блок вимірювання забезпечує визначення наступних параметрів:

- азимут на джерело випромінювання в горизонтальній площині φ_z , який визначається в горизонтальному каналі вимірювання;
- азимуту на джерело випромінювання в вертикальній площині θ_v , який визначається в вертикальному каналі вимірювання;
- плоскі кути падіння променя в горизонтальній та вертикальній площині, визначені горизонтальним каналом вимірювання $i_{z,z}$ та $i_{z,v}$;
- плоскі кути падіння променя в горизонтальній та вертикальній площині, визначені вертикальним каналом вимірювання $i_{v,z}$ та $i_{v,v}$.

Додатково блок вимірювання може забезпечувати визначення дальності d між АТЗ за допомогою імпульсного лазерного далекоміра. Визначення такої дальності d відбувається в блоці вимірювання та проводиться променем, який спрямований від АТЗ з блоком вимірювання на АТЗ з блоком випромінювання, тобто з азимутом φ_z в горизонтальній площині та з азимутом θ_v в вертикальній

площині. Формули для кутомірно-далекомірного методу визначення позиційних параметрів відносного положення АТЗ в декартовій системі (3.5), в сферичній системі координат – (3.6), наведені в розділі 3. Формули для кутомірного методу визначення позиційних параметрів відносного положення АТЗ в декартовій системі координат (3.7) – (3.9), в сферичній системі координат – (3.10), також наведені в розділі 3. Відповідно, формули для визначення відносного кута ризику та кута тангажу АТЗ матимуть наступний вид: $\psi = \phi_z + i_z$, $\theta = \theta_g + i_g$, а формула для визначення відносного кута крену АТЗ буде залежати від схеми випромінювання та процедури проведення вимірювання.

Оскільки для АТ кут крену γ та тангажу θ АТЗ визначається профілем та нерівностями дорожнього покриття і незначно впливають на процес керування АТЗ, то їхніми значеннями можемо знехтувати. З тих самих міркувань, можемо знехтувати переміщеннями АТЗ в вертикальному напрямку. З врахуванням вищезазначеного, достатньо буде використання лише горизонтального каналу випромінювання та вимірювання. При цьому, будуть визначатися наступні параметри відносного положення АТЗ:

- азимут на джерело випромінювання в горизонтальній площині ϕ_z ;
- плоскі кути падіння променю в горизонтальній та вертикальній площині, i_z та i_g .

Додатково забезпечується визначення похилої дальності d між АТЗ в напрямку з азимутом ϕ_z в горизонтальній площині.

Розглянемо визначення лінійних та кутових параметрів відносного положення АТЗ. Схема кутомірно-далекомірного визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ з використанням горизонтального та вертикального каналів вимірювання приведена в розділі 3 на рисунку 3.4. При використанні лише горизонтального каналу, схема залишиться незмінною, але замість азимуту в вертикальній площині θ_g в розрахунках буде використовуватися плоский кут падіння в вертикальній площині та i_g . В такому разі формули для визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ в декартовій системі координат матимуть наступний вид:

$$\Delta x = \frac{d \cdot \cos(\varphi_z)}{\sqrt{tg^2(i_g) \cdot \cos^2(\varphi_z) + 1}}; \quad \Delta y = \frac{d \cdot \sin(i_g)}{\sqrt{tg^2(\varphi_z) \cdot \cos^2(i_g) + 1}};$$

$$\Delta z = \frac{d \cdot \sin(\varphi_z)}{\sqrt{tg^2(i_g) \cdot \cos^2(\varphi_z) + 1}}.$$
(4.1)

Формули для визначення лінійних параметрів відносного положення АТЗ в полярній системі координат матимуть наступний вид:

$$d = d; \quad \varphi = \varphi_z.$$
(4.2)

Схема визначення кутових параметрів відносного положення АТЗ з використанням горизонтального та вертикального каналів вимірювання приведена в розділі 3 на рисунку 3.10. При використанні лише горизонтального каналу, схема залишиться незмінною, а формули для визначення відносного кута курсу ψ та танажу θ АТЗ матимуть наступний вид:

$$\psi = 180 - (\varphi_z + i_g); \quad \theta = i_g.$$
(3.13)

Таким чином, запропонований поляриметричний метод позиціонування та моніторингу АТЗ буде забезпечувати визначення параметрів відносного позиційно-орієнтаційного положення АТЗ: відстані між АТЗ в повздовжньому, поперечному та вертикальному напрямку в декартовій системі координат або відстані між АТЗ та азимуту з одного АТЗ на інший – в сферичній системі координат, а також відносного кута курсу та тангажу між АТЗ. Визначені параметри відносного позиційно-орієнтаційного положення АТЗ застосовуються для моніторингу часу та відстані руху до точки потенційного просторово-часового перетину траєкторій руху АТЗ. На рис. 4.1 приведена схема формування точки потенційного просторово-часового перетину траєкторій руху АТЗ, а формули для визначення відповідних параметрів мають наступний вид:

$$\begin{aligned}
d_1 &= \frac{d \cdot \sin i_z}{\sin \psi}; & d_2 &= \frac{d \cdot \sin \varphi_z}{\sin \psi}; \\
V_{x_i} &= \frac{d_{i-1} \cdot \cos i_{z_{i-1}} - d_i \cdot \cos i_{z_i}}{\Delta t}; & V_{z_i} &= \frac{d_{i-1} \cdot \sin i_{z_{i-1}} - d_i \cdot \sin i_{z_i}}{\Delta t}; \\
t_{x_i} &= \frac{\Delta x_i}{V_{x_i}} = \frac{d_i \cdot \cos i_{z_i}}{V_{x_i}}; & t_{z_i} &= \frac{\Delta z_i}{V_{z_i}} = \frac{d_i \cdot \sin i_{z_i}}{V_{z_i}}; \\
t_1 &= \frac{d_1}{V_1} = \frac{d \cdot \sin i_z}{\sin \psi \cdot V_1}; & t_2 &= \frac{d_2}{V_2} = \frac{d \cdot \sin \varphi_z}{\sin \psi \cdot V_2};
\end{aligned} \tag{4.1}$$

де d_1 та d_2 – відстань до точки перетину траєкторій руху АТЗ для першого та другого АТЗ, відповідно; V_{x_i} та V_{z_i} – швидкість відносного руху до точки перетину траєкторій руху АТЗ в повздовжньому та поперечному напрямках, відповідно; d_{i-1} та d_i – відстань між АТЗ в попередній і поточний момент вимірювання; $i_{z_{i-1}}$ та i_{z_i} – плоский кут падіння випромінювання в горизонтальній площині в попередній і поточний момент вимірювання, відповідно; t_{x_i} та t_{z_i} – час відносного руху АТЗ до точки перетину траєкторій їх руху в повздовжньому та поперечному напрямках, відповідно; t_1 та t_2 – час руху першого та другого АТЗ до точки потенційного перетину траєкторій їх руху, відповідно;

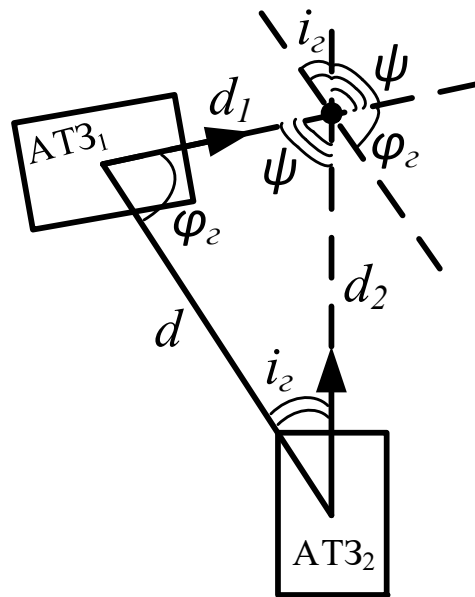


Рисунок 4.1 – Схема формування точки потенційного просторово-часового перетину траєкторій руху АТЗ

Запропонований поляриметричний метод позиціонування та моніторингу автотранспортних засобів забезпечує моніторинг часу відносного руху АТЗ до точки потенційного просторово-часового перетину траєкторій їх руху в повздовжньому tx_i та поперечному tz_i напрямках, а також відстані руху першого d_1 та другого d_2 АТЗ до точки потенційного просторово-часового перетину траєкторій їх руху. Запропонований поляриметричний метод ПМ АТЗ також може забезпечувати моніторинг часу руху першого t_1 та другого t_2 АТЗ до точки потенційного просторово-часового перетину траєкторій їх руху.

Формування темпових та орієнтаційних сигналів доуправління буде відбуватися, коли час руху першого t_1 та другого t_2 АТЗ, або час відносного руху АТЗ до точки потенційного перетину траєкторій їх руху в повздовжньому tx_i та поперечному tz_i напрямках, одночасно будуть рівні або менші за певну визначену мінімально необхідну величину, яка рівна часу здійснення безпечного маневру. Також буде відбуватися формування сигналів доуправління, коли відстані для першого t_1 та другого t_2 АТЗ до точки потенційного перетину траєкторій їх руху будуть рівні або менші за певну визначену мінімально необхідну величину, яка рівна запасу відстані на здійснення безпечного маневру. При цьому, на значення мінімально необхідної величини часу та запасу відстані на здійснення безпечного маневру будуть впливати швидкість руху АТЗ, його технічні характеристики, стан систем АТЗ та інші параметри і може бути різним для АТЗ.

При застосуванні запропонованого поляриметричного методу позиціонування та моніторингу АТЗ для здійснення автоматичного маневру без зв'язку з іншим АТЗ пропонується формувати наступні сигнали для доуправління: при зустрічному русі орієнтаційні сигнали доуправління формуються таким чином, щоб маневр здійснювався за годинниковою стрілкою; при обгоні – таким чином, щоб поворот АТЗ, що рухається попереду здійснювався за годинниковою стрілкою, а того, що рухається позаду – проти годинникової стрілки; при здійсненні маневру з метою уникнення зіткнення з елементом ВДМ – таким чином, щоб відбувалось збільшення відносного лінійного відхилення АТЗ від перешкоди по курсу.

4.2. Підвищення ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті за допомогою поляриметричного методу

Питання дослідження ефективності та якості, будь-якої, технічної системи є важливим аспектом в процесі підвищення її технічного рівня та якості виконуваних нею функцій, та з метою виявлення основних напрямків її вдосконалення і оптимізації її внутрішніх процесів. Для оцінки та порівняння систем позиціонування та моніторингу (ПМ) і для оцінки їх впливу на безпеки дорожнього руху, можуть бути застосовані показники їх якості та ефективності. Якість характеризує рівень придатності системи задовольняти визначені потреби в відповідності до призначення, а ефективність характеризує результативність процесу перетворення ресурсів системи в результат діяльності системи. Тобто ефективність характеризує процес досягнення результату, а якість – сам результат. Основну увагу зосередимо на розгляді ефективності системи, оскільки її визначення є первинним по відношенню до визначення якості системи.

По відношенню до систем ПМ, як і більшості технічних систем, розрізняють наступні основні взаємообумовлені види ефективності: технічна, конструкційно-вагова, виробнича, експлуатаційна, економічна, цільова та інші. В межах даної роботи основна увага буде зосереджена на розгляді цільової ефективності системи ПМ на АТ з врахуванням її технічної ефективності. В якості задачі за призначенням для оцінки цільової ефективності будемо розглядати здатність системи ПМ забезпечувати визначення просторового положення АТЗ відносно інших АТЗ та елементів ВДМ з метою попередження та уникнення виникнення ДТП в результаті просторово-часового перетину траєкторії руху АТЗ з іншими елементами ДТС. А в якості характеристик системи для оцінки технічної ефективності будемо розглядати точність та достовірність інформації про відносне просторове положення елементів ДТС та параметрів їх відносного руху, а також достовірність та своєчасність надходження попереджувальної інформації про можливість виникнення ДТП та шляхи її уникнення в систему автоматичного управління АТЗ чи систему підтримки прийняття рішення.

4.2.1 Критерії та показники оцінки ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті.

Загалом, під ефективністю технічної системи розуміють її пристосованість виконувати покладені на неї функції в заданих умовах експлуатації. Основним об'єктом дослідження теорії ефективності є операція, тобто цілеспрямований процес функціонування системи. При дослідженні ефективності виділяються поняття операційної системи, оточуючого середовища та операційної ситуації. Під операційною системою розуміють сукупність об'єктів, в результаті взаємодії яких реалізується операція. Операційна система включає в себе досліджувану систему та операції, які вона реалізує. Під оточуючим середовищем розуміють сукупність об'єктів, які не входять до складу операційної системи, але здійснюють вплив на цілеспрямований процес функціонування системи і його результат. Оточуюче середовище включає в себе умови та середовище проведення операції. Під операційною ситуацією розуміють стан досліджуваного об'єкту та оточуючого середовища, які визначають умови функціонування системи. Основними елементами операційної ситуації є досліджуваний об'єкт; процеси його функціонування; ресурси та оточуюче середовище. При дослідженні ефективності ПМ на АТ операційна ситуація буде включати систему АТЗ – обладнання ПМ; процеси визначення параметрів відносного просторового положення АТЗ та відносних параметрів його руху; ресурси системи ПМ та стан зовнішнього середовища.

Операція включає три компоненти: управляючу діяльність органу управління, активні засоби управління та об'єкти впливу. Передумовою ефективності операції є якісні активні засоби управління, обґрунтованість стратегії управління та розрахункові умови оточуючого середовища. Під час операції відбувається зміна параметрів об'єкту впливу за допомогою активних засобів управління у відповідності до стратегії управління. В процесі ПМ на АТ об'єктами впливу є параметри руху АТЗ, активними засобами управління – інформаційні, часові, трудові та інші ресурси, обладнання АТЗ та їх органи керування, а органом управління – водій чи система автоматичного управління.

Основне призначення системи ПМ на АТ полягає в своєчасному визначенні положення АТЗ відносно елементів ДТС та параметрів його відносного руху з високою точністю і чутливістю та формуванні попереджувальних сигналів з метою попередження та уникнення ДТП. Основним очікуваним результатом процесу ПМ на АТ є своєчасне формування попереджувальних сигналів про можливість виникнення ДТП. Таким чином, під ефективністю ПМ на АТ будемо розглядати комплексний показник, який характеризує функцію точності визначення відносних параметрів руху АТЗ та достовірність і своєчасність формування сигналу про можливість виникнення ДТП для його надходження в відповідну систему управління.

Загалом, під критерієм ефективності розуміють мірило кількісної оцінки досконалості системи, стратегії управління чи процесу перетворення ресурсів системи в цільовий ефект. Критерій ефективності операції правило, за яким відбувається порівняння стратегій та вибір раціональної стратегії використання активних засобів в процесі виконання операції. В якості критерію ефективності виступає величина, яка характеризує якість вирішення поставленої задачі. До критеріїв ефективності висуваються наступні вимоги: прогнозність, комплексність, оптимальність, індивідуальність, універсальність, простота, чисельність, конкретність, наочність, обмеженість та інші. Фізичний зміст та конкретний вид критерію ефективності визначається характером виконуваної задачі, властивостями системи чи процесу та умовами виконання задачі. При цьому, єдиного критерію, який би характеризував всі властивості досліджуваної системи чи процесу не існує: для кожної типової задачі може бути визначений власний критерій ефективності, який найкраще описує якість її вирішення.

Розрізняють якісний, кількісний, загальний, частковий, ординарний та комплексний критерії ефективності. Якісний критерій визначає якість системи чи процесу та показує міру досягнення основного результату діяльності системи і рівень відповідності результату діяльності – очікуваному. Кількісний критерій в чисельному вигляді показує ступінь досягнення результату діяльності системи. Загальний критерій використовується для оцінки всієї системи, а частковий – для

оцінки ефективності окремої підсистеми чи процесу. Ординарний критерій формується на основі одного, найбільш важливого, параметру, а комплексний – на основі кількох параметрів, які характеризують якість виконуваної задачі. Для оцінки ефективності технічних систем, зазвичай, використовуються ординарні часткові критерії, а для комплексної оцінки ефективності проводять аналіз кількох часткових критеріїв, з врахуванням взаємозв'язків між ними.

Для оцінки ефективності ПМ на АТ можуть бути використані наступні критерії: якісні – підвищення безпеки дорожнього руху, рух АТЗ без ДТП та інші, а також кількісні – точність витримання дистанцій та інтервалів руху в заданих допустимих межах, достовірність інформації про відносне положення об'єктів ДТС та відносних параметрів їх руху, своєчасність формування попереджувальних сигналів про можливість виникнення ДТП та інші.

Під показником ефективності розуміють ступінь досягнення цілі операції та ступінь відповідність реального результату – очікуваному. Показник ефективності є чисельним визначенням критерію ефективності. До показника ефективності висуваються наступні вимоги: адекватність, простота, повнота, стохастичність, критичність та інші. Окрім того, показник ефективності має враховувати психологічні особливості особи, що приймає рішення та її відношення до різноманітних ситуацій в умовах невизначеності. Оскільки в реальних умовах на систему діють зовнішні фактори, вплив яких складно визначити та спрогнозувати, то основною характеристикою ефективності функціонування системи є ймовірність досягнення цілі операції при заданих умовах, яка є найбільш інформативним комплексним показником ефективності. Форма та вид показника ефективності залежить від критерію ефективності. Показники ефективності можуть бути відносними та абсолютними, скалярними та векторними, безрозмірними та величинами з фізичним змістом і розмірністю.

В якості показника ефективності ПМ на АТ, який реалізує якісний критерій підвищення безпеки руху, може бути використаний скалярний показник частки ДТП, які спричинені похибками у позиціонуванні АТЗ відносно інших елементів ДТС та моніторингу відносних параметрів руху. До ДТП, які спричинені

низькою якістю роботи системи ПМ на АТ можна віднести наступні ДТП по причиненні виникнення: недотримання безпечних дистанцій та інтервалів руху, порушення правил маневрування, перевищення безпечної швидкості руху, порушення правил проїзду перехресть; а також по типу ДТП: попутне зіткнення, зустрічне зіткнення, бокове зіткнення, наїзд на нерухомий АТЗ, наїзд на перешкоду. Значення частки ДТП спричинених похибками у ПМ на АТ визначається за наступною формулою:

$$K_{ПМ} = \frac{N_{ПМ}}{N_{ДТП}}, \quad (4.1)$$

де $K_{ПМ}$ – значення показника ефективності частки ДТП спричинених похибками в ПМ, $N_{ПМ}$ – кількість ДТП спричинених похибками у ПМ на АТ за розрахунковий період, $N_{ДТП}$ – загальна кількість ДТП за розрахунковий період. Критерій ефективності підвищення безпеки руху буде характеризуватись зменшенням значення даного показника при зростанні безпеки руху. За даними, приведеним в розділі 1.1 значення зазначеного показника у 2021 році в Україні складає 0,933 – по причині виникнення ДТП та 0,887 – по типу ДТП.

Іншим якісним показником, який характеризує критерій руху АТЗ без ДТП, може бути використаний показник кількість ДТП на тисячу поїздок та який буде визначатись наступним чином:

$$K_{ДТП} = \frac{N_{ДТП}}{N_{1000}}, \quad (4.2)$$

де $K_{ДТП}$ – значення показника ефективності кількості ДТП на тисячу поїздок, $N_{ДТП}$ – кількість ДТП на АТ за розрахунковий період, N_{1000} – кількість тисяч поїздок на АТ за розрахунковий період. Критерій ефективності руху на АТ без ДТП буде характеризуватись зниженням значення даного показника при підвищенні безпеки руху на АТ.

Сучасні АТЗ характеризується великою кількістю параметрів, які визначають якість їх функціонування та безпеку їх руху. Для кожного з цих параметрів можна виділити область допустимих значень та функцію залежності оптимального значення параметру від стану операційної ситуації. Витримування конкретного параметру в допустимих межах може слугувати кількісним показником ефективності. На значення цих параметрів впливають два основних чинники: збурення зовнішнього середовища та управляючі впливи. Для визначення впливу цих чинників на значення параметру розглянемо схему управління параметром АТЗ, на прикладі повздовжньої відстані між АТЗ, яка зображена на рис. 4.2. Значення контрольованого параметру змінюється під впливом збурень зовнішнього середовища та управляючих впливів суб'єкту управління. А управляючі впливи суб'єкту управління формуються на основі інформації про розходження між поточним та оптимальним значенням параметру, яка надходить від системи вимірювання контрольованого параметру, в нашому випадку від системи позиціонування та моніторингу.



Рисунок 4.2 – Схема управління параметром повздовжньої відстані між АТЗ

Формули для визначення відхилення контрольованого параметру від його оптимального значення мають вид (4.3). Загалом, відхилення контрольованого параметру від його оптимального значення складається з некомпенсованого

відхилення в попередній такт вимірювання та збурення в поточний такт вимірювання. При цьому, некомпенсоване відхилення обумовлюється недосконалістю системи вимірювання параметру та системи управління.

$$\begin{aligned}
 \Delta x_i &= x_i - x_{onm_i}; \quad x_{onm_i} = x_{onm_{i-1}} + \Delta x_{onm_i}; \quad \Delta x_{ПМ_i} = (x_{i-1} - x_{onm_{i-1}}) \cdot K_{ПМ}; \\
 x_{упр_i} &= \Delta x_{ПМ_i} \cdot K_{СУ} = (x_{i-1} - x_{onm_{i-1}}) \cdot K_{ПМ} \cdot K_{СУ}; \quad x_i = x_{i-1} + x_{зб_i} - x_{упр_i}; \\
 \Delta x &= x_{i-1} + x_{зб_i} - (x_{i-1} - x_{onm_{i-1}}) \cdot K_{ПМ} \cdot K_{СУ} - x_{onm_{i-1}} - \Delta x_{onm_i}; \\
 \Delta x_i &= (x_{i-1} - x_{onm_{i-1}}) \cdot (1 - K_{ПМ} \cdot K_{СУ}) + x_{зб_i} - \Delta x_{onm_i} = \Delta x_{i-1} \cdot K_{УПР} + x_{зб_i} - \Delta x_{onm_i};
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

де Δx_i та Δx_{i-1} – відхилення контрольованого параметру від його оптимального значення в поточний та попередній такт вимірювання, x_i та x_{i-1} – значення контрольованого параметру в поточний та попередній такт вимірювання, x_{onm_i} та $x_{onm_{i-1}}$ – оптимальне значення контрольованого параметру в поточний та попередній такт вимірювання, Δx_{onm_i} – приріст оптимального значення контрольованого параметру в поточний такт вимірювання, $\Delta x_{ПМ_i}$ – значення відхилення контрольованого параметру, яке надходить до суб'єкту управління, $x_{упр_i}$ – значення зміни контрольованого параметру в результаті управління, $x_{зб_i}$ – значення зміни контрольованого параметру в результаті дії збурень, $K_{ПМ}$ – коефіцієнт ефективності системи ПМ, $K_{СУ}$ – коефіцієнт ефективності системи управління АТЗ, $K_{УПР}$ – коефіцієнт доуправління контрольованого параметру.

Таким чином, вирішення задачі витримування контрольованого параметру в допустимих межах включає забезпечення високої точності визначення відхилення контрольованого параметру від оптимального значення, забезпечення високої достовірності інформації на основі якої формуються управляючі сигнали, забезпечення високого рівня компенсування відхилення параметру від його оптимального значення.

З точки зору підвищення безпеки руху на АТ завдяки ПМ можна виділити три основних параметри: точність визначення відносного положення АТЗ та відносних параметрів їх руху, достовірність інформації про положення об'єкту

відносно елементів ДТС та своєчасність надходження інформації про можливість виникнення ДТП в контур управління. Витримування кожного з цих трьох параметрів в області допустимих значень може виступати в якості часткового кількісного показника ефективності системи ПМ.

В якості показника ефективності системи ПМ, який характеризує точність витримування відносного положення АТЗ в допустимих межах, може бути використаний скалярний показник відношення поточної відстані між об'єктами ДТС до мінімально допустимої. Для прикладу розглянемо показник витримування повздовжнього інтервалу руху між об'єктами в допустимих межах, який визначається наступною формулою:

$$K_{\text{точності}} = \frac{\Delta x}{\Delta x_{\text{доп}}}, \quad (4.4)$$

де $K_{\text{точності}}$ – показник точності витримування повздовжнього інтервалу руху в допустимих межах, Δx – поточний інтервал руху, $\Delta x_{\text{доп}}$ – мінімально допустимий інтервал руху, який визначається гальмівним шляхом АТЗ та залежить від його стану та швидкості руху, стану дорожнього покриття та характеристик зовнішнього середовища. Для забезпечення безпеки руху на АТ значення даного показника має бути більше 1. Показник точності витримування інших параметрів АТЗ визначається подібним чином.

В якості показника ефективності системи ПМ, який характеризує достовірність інформації про витримування відносного положення АТЗ в допустимих межах може бути використаний показник ймовірності правильного визначення відносного положення АТЗ. Запропонований показник буде включати умовну ймовірність події правильної сигналізації виходу відносного положення АТЗ за допустимі межі та умовну ймовірність події правильної сигналізації витримування відносного положення АТЗ в допустимих межах.

В якості показника ефективності системи ПМ, який характеризує своєчасність надходження інформації про можливість виникнення ДТП та шляхи

її уникнення в контур управління, може бути використаний показник відношення між проміжком часу до можливого зіткнення та проміжком часу необхідним для здійснення доуправління АТЗ, який визначається наступною формулою:

$$K_{\text{своєчасності}} = \frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{доп}}} = \frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{форм.сигнал}} + \Delta t_{\text{управл}} + \Delta t_{\text{реак.управл}}}, \quad (4.5)$$

де $K_{\text{своєчасності}}$ – показник своєчасності надходження управляючих сигналів в контур управління, Δt – проміжок часу до зіткнення, $\Delta t_{\text{доп}}$ – допустимий проміжок часу необхідний для уникнення ДТП, $\Delta t_{\text{форм.сигнал}}$ – проміжок часу необхідний для формування управляючого сигналу, $\Delta t_{\text{управл.}}$ – проміжок часу необхідний для здійснення управляючих впливів, $\Delta t_{\text{реак.управл.}}$ – проміжок часу необхідний для реакції АТЗ на управляючі впливи та їх реалізацію.

Ефективність реального процесу може кардинально відрізнятись від розрахункової. Це пояснюється великим діапазоном змін вхідних параметрів. Тому для забезпечення ефективності процесу чи роботи системи необхідно забезпечити підтримування значень вхідних параметрів в допустимих межах. А за умови, якщо вхідні параметри не можуть контролюватись, то необхідно здійснити розрахунок ефективності для різних діапазонів вхідних параметрів. В такому разі, у випадку виходу вхідних параметрів за межі певного діапазону – система має переходити в інший режим роботи. При цьому, необхідно забезпечити суб'єкта управління інформацією про режим роботи системи та значення контрольованих параметрів у конкретних умовах експлуатації.

У випадку дослідження ефективності ПМ на АТ вхідними параметрами є експлуатаційно-технічні характеристики АТЗ, характеристики зовнішнього та внутрішнього середовища та інші. А контрольованими параметрами – відносні відстані та інтервали руху між АТЗ та іншими елементами ДТС, швидкості та прискорення зближення, просторове положення та напрямок руху АТЗ, час та відстань до точки перетину траєкторій руху, режими роботи функціональних систем АТЗ та інші.

4.2.2. Підвищення достовірності інформації в системі позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті

Під достовірністю інформації розуміють її властивість описувати дійсний стан справ, а оцінка достовірності інформації полягає в визначенні ступеню відповідності отриманих знань про досліджуваний об'єкт його реальному стану. Досліджуваним об'єктом в системах ПМ на АТ є АТЗ і його просторове положення та параметри руху відносно інших елементів ДТС. А основним досліджуваним параметром – відстань та інтервал часу до потенційної точки зіткнення. При цьому, основною контрольованою подією є досягнення рекомендованої чи мінімально допустимої відстані або інтервалу часу до потенційної точки зіткнення. Після виявлення контрольованої події мають здійснюватися активні дії, щодо попередження та уникнення зіткнення.

Інформація в системах ПМ, як і інших інформаційно-управляючих системах (IUC), формується на основі даних від датчиків інформації (ДІ), які в силу технічних та конструктивних особливостей, мають скінченну точність та достовірність вимірювання контрольованого ними параметру. В залежності від наявності чи відсутності контрольованої події розрізняють чотири ситуації при визначенні контрольованого параметру [105]: правильного визначення наявності контрольованої події, правильного визначення відсутності контрольованої події, невиявлення наявності контрольованої події, помилкове виявлення наявності контрольованої події, які характеризуються ймовірністю виникнення P_d , P_a , P_p , P_f , відповідно. Розглянемо схему виникнення зазначених ситуацій, яка схематично зображена на рис. 4.3, на прикладі повздовжньої відстані між АТЗ ΔX . Існує певне критичне значення контрольованого параметру $\Delta X_{кр}$ при досягненні якого приймається рішення про настання контрольованої події. В залежності від фізичного змісту та виду контрольованого параметру його критичне значення може залежить від певних факторів, таких як параметри руху та стан АТЗ, стану дорожнього покриття та інших, і визначатися в кожен момент руху, або бути сталою величиною. При цьому, розрізняють функцію в часі дійсного значення контрольованого параметру $\Delta X_{дій.}(t)$ та функцію в часі

вимірюваного значення контрольованого параметру $\Delta X_{вим.}(t)$. За умови настання контрольованої події, тобто $\Delta X_{дій.} \leq \Delta X_{кр}$ (рис. 4.3 а), можуть виникати наступні дві ситуації: правильного визначення наявності контрольованої події (detection), за умови коли $\Delta X_{вим.} \leq \Delta X_{кр}$, та невиявлення наявності контрольованої події (pass), за умови коли $\Delta X_{вим.} > \Delta X_{кр}$. За умови відсутності контрольованої події, тобто при $\Delta X_{дій.} > \Delta X_{кр}$ (рис. 4.3 б), можуть виникати наступні дві ситуації: помилкове виявлення наявності контрольованої події (false), за умови коли $\Delta X_{вим.} \leq \Delta X_{кр}$, та правильного визначення відсутності контрольованої події (absent), за умови коли $\Delta X_{вим.} > \Delta X_{кр}$.

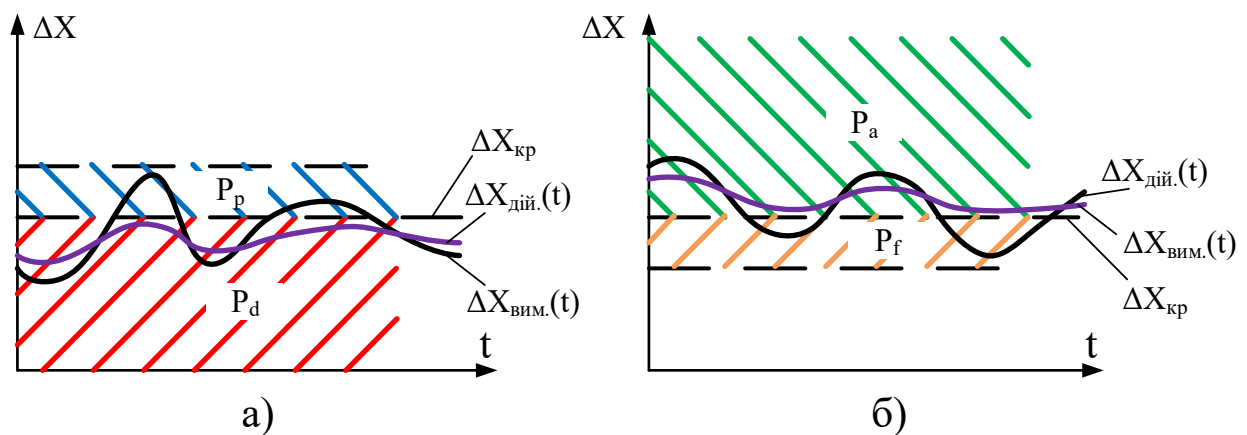


Рисунок 4.3 – Схема визначення контрольованого параметру при наявності (а) та відсутності (б) контрольованої події

Для визначення ймовірностей виникнення зазначених ситуацій розглянемо граф станів системи контролю, який приведено на рис. 4.4. Розглянемо дві події, які складають повну групу подій: настання та ненастання контрольованої події з ймовірністю появи P_{ep} та P_{ea} , відповідно, конкретні значення яких будуть залежати від характеристик та стану ДТС. При розгляді роботи системи вимірювання буде розрізняти дві події, які складають повну групу подій: правильного та неправильного вимірювання контрольованого параметру з ймовірностями появи P_{cd} та P_{wd} , відповідно, конкретні значення яких будуть залежати від характеристик системи вимірювання та можуть бути різними за умови настання та ненастання контрольованої події.

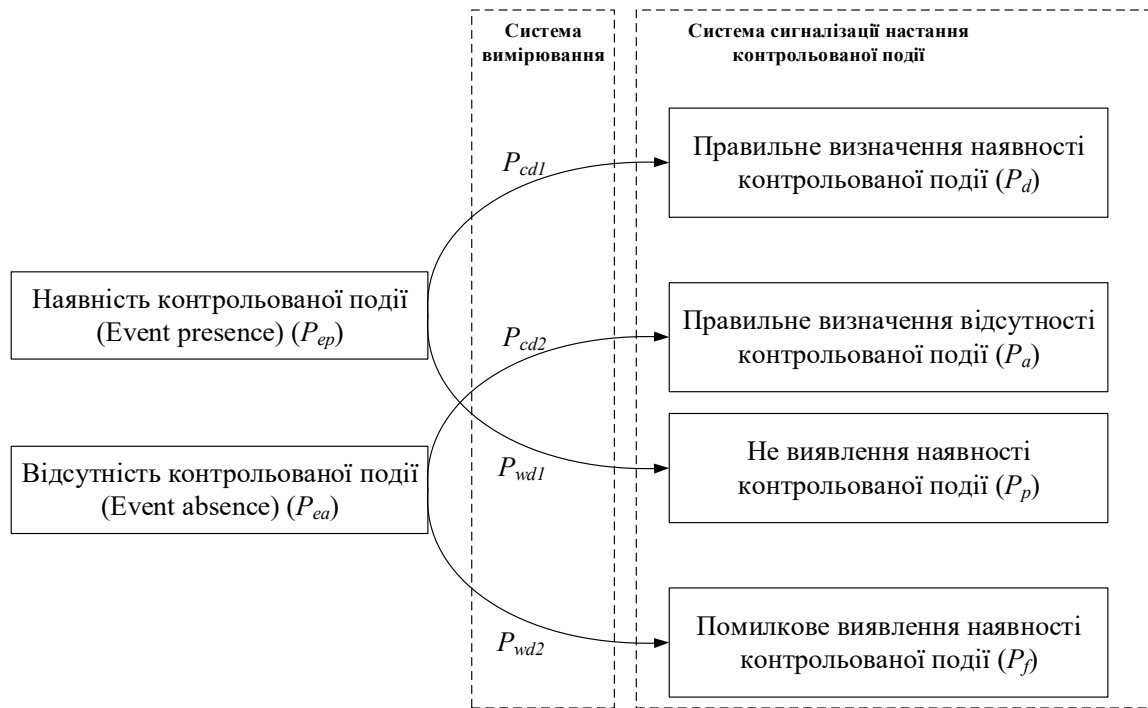


Рисунок 4.4 – Граф станів системи визначення контрольованого параметру

Таким чином, у процесі функціонування системи сигналізації настання контрольованої події можливі наступні події, які складають повну групу подій:

- правильного визначення наявності контрольованої події з ймовірністю появи P_d , яка виникає в результаті правильного вимірювання контрольованого параметру за умови настання контрольованої події;
- правильного визначення відсутності контрольованої події з ймовірністю появи P_a , яка виникає в результаті правильного вимірювання контрольованого параметру за умови ненастання контрольованої події;
- невиявлення наявності контрольованої події з ймовірністю появи P_p , яка виникає в результаті неправильного вимірювання контрольованого параметру за умови настання контрольованої події;
- помилкове виявлення наявності контрольованої події з ймовірністю появи P_f , яка виникає в результаті неправильного вимірювання контрольованого параметру за умови ненастання контрольованої події.

Оскільки події правильного вимірювання контрольованого параметру та настання контрольованої події є незалежними подіями, то формули для визначення ймовірностей P_d , P_a , P_p , P_f будуть мати наступний вид:

$$\left. \begin{aligned} P_d &= P_{cd1} \cdot P_{pe} \\ P_a &= P_{cd2} \cdot P_{ae} \\ P_p &= P_{wd1} \cdot P_{pe} \\ P_f &= P_{wd2} \cdot P_{ae} \end{aligned} \right\}. \quad (4.6)$$

де P_{cd1} та P_{cd2} – ймовірність правильного вимірювання контрольованого параметру за умови наявності та відсутності контрольованої події, відповідно; P_{wd1} та P_{wd2} – ймовірність неправильного вимірювання контрольованого параметру за умови наявності та відсутності контрольованої події, відповідно.

Для підвищення своєчасності, достовірності та точності інформації в ІУС застосовують різні підходи: покращення характеристик підсистеми обробки інформації, покращення характеристик підсистеми вимірювання та контролю параметрів функціонування ІУС [106], [107], оцінка та підвищення надійності ІУС [3], [108], [109], оцінка та підвищення достовірності інформації в ІУС [4], оцінка та підвищення ефективності роботи ІУС. Одним із шляхів підвищення достовірності та точності інформації в ІУС, і зокрема в системах ПМ на АТ, є застосування інформаційного резервування (ІР) з подальшою обробкою інформації. Застосування ІР, також дозволяє, підвищити якість та ефективність функціонування ІУС. ІР полягає в статистичній обробці інформації, що надходить від кількох джерел інформації (ДІ). В залежності від джерел інформації, що застосовуються при інформаційному резервуванні розрізняють послідовне, паралельне, модульне та комбіноване ІР.

Послідовне ІР полягає в статистичній обробці інформації, яка послідовно надходить з заданим інтервалом часу ν від одного джерела інформації n раз, а рішення про наявність контрольованої події приймається за мажоритарним принципом « m із n » [110]. До переваг послідовного ІР можна віднести наступне: дозволяє знизити ймовірність помилкового виявлення контрольованої події; незначно впливає на вартість, габарити та масу системи контролю, оскільки не передбачає встановлення додаткових ДІ, а до недоліків – зниження достовірності інформації при зниженні технічної надійності ДІ та в результаті зміни контрольованої ситуації, тобто старіння інформації. Застосування послідовного

ІР в системах контролю в режимі реального часу, якою є система ПМ на АТ, обмежене в зв'язку із старінням інформації.

Паралельне ІР полягає в статистичній обробці інформації, яка надходить одночасно від n ДІ, а рішення про наявність контрольованої події приймається за мажоритарним принципом « m із n ». До його переваг можна віднести наступне: дозволяє знизити ймовірність невиявлення контрольованої події; зниження технічної надійності окремого ДІ не значно знижує достовірність інформації від системи контролю; можливість забезпечувати підвищення достовірності інформації в режимі реального часу, а до недоліків – підвищення вартості, габаритів та маси системи в результаті встановлення додаткових ДІ.

Модульне ІР полягає в поетапній статистичній обробці інформації, яка надходить одночасно від n модулів ІР, а рішення про наявність контрольованої події на кожному з етапів приймається за мажоритарним принципом « m із n » [111], [112]. Модуль першої ієрархії реалізує паралельне ІР з мажоритарним принципом « m із n » і забезпечує статистичну обробку інформації від n ДІ, а ДІ для кожної наступної ієрархії є модулі попередньої ієрархії. Модульне ІР має спільні переваги та недоліки з паралельним ІР. Окрім цього, модульне ІР, порівняно з паралельним ІР, передбачає встановлення більшої кількості ДІ, що збільшує вартість, габарити та масу системи; забезпечує незначне старіння інформації, за рахунок використання кількох ієрархій ІР та дозволяє знизити ймовірність невиявлення та помилкового виявлення контрольованої події.

Комбіноване ІР полягає в статистичній обробці інформації, яка надходить від n елементів послідовного ІР, кожен з яких забезпечує статистичну обробку інформації за мажоритарним принципом « k із l », яка послідовно надходить з заданим інтервалом часу ν від одного джерела інформації l раз. При цьому, рішення про наявність контрольованої події приймається на основі інформації від паралельно з'єднаних елементів послідовного ІР за мажоритарним принципом « m із n ». До переваг комбінованого ІР можна віднести наступне: дозволяє одночасно знизити ймовірності невиявлення та помилкового виявлення контрольованої події; зниження технічної надійності окремого ДІ знижує

достовірність інформації від відповідного елементу послідовного ІР та незначно знижує достовірність інформації від системи контролю, а до недоліків – неможливість забезпечувати підвищення достовірності інформації в режимі реального часу за рахунок використання елементів послідовного ІР; необхідність розробки оптимальної структури системи комбінованого резервування; підвищення вартості, габаритів та маси системи за рахунок встановлення додаткових ДІ. Старіння інформації та застосування елементів послідовного ІР обмежує застосування комбінованого ІР в системах контролю в режимі реального часу, якою є система ПМ на АТ.

Таким чином, для підвищення достовірності інформації в системах контролю в режимі реального часу, до яких відноситься система ПМ, може бути застосована система паралельного ІР. Система комбінованого, модульного або послідовного ІР теж можуть бути застосовані, але лише за умови, що їх структура забезпечує допустимий час старіння інформації.

У відповідності до схеми визначення контрольованого параметру, яка зображена на рис. 4.3, реальний ДІ може знаходитись в одному з двох несумісних випадкових станів: правильного та неправильного вимірювання контрольованого параметру, з ймовірностями появи P_{cd} та P_{wd} , відповідно. Система вимірювання, яка реалізує паралельне інформаційне резервування та складається з n ДІ може перебувати в одному з несумісних випадкових станів з наступними ймовірностями появи: $P_{1, n}, P_{2, n}, \dots, P_{n-1, n}, P_{n, n}$, де $P_{i, n}$ визначає ймовірність появи події, що i з n ДІ правильно, а $n-i$ ДІ – неправильно виміряли контрольований параметр. Ймовірність перебування системи вимірювання в кожному з зазначених станів можна визначити на основі виразу, який описує біноміальний розподіл і визначається наступним чином:

$$P_{i, n} = C_n^i P_{cd}^i \cdot P_{wd}^{n-i}. \quad (4.7)$$

де коефіцієнт C_n^i визначає кількість комбінацій з n ДІ, таких що i ДІ правильно, а $n-i$ ДІ – неправильно виміряли контрольований параметр.

Для системи вимірювання, яка реалізує паралельне ІР з мажоритарним принципом « m із n » ймовірність P_{cd} , при наявності контрольованої події, буде визначатись сумою ймовірностей настання подій $P_{m, n}, \dots, P_{n, n}$, а ймовірність P_{wd} – сумою ймовірностей настання подій $P_{0, n}, \dots, P_{m-1, n}$. Це пояснюється тим, що при наявності контрольованої події система вимірювання виявить її наявність, якщо m і більше ДІ правильно виміряють значення контрольованого параметру. При відсутності контрольованого параметру ймовірність P_{cd} буде визначатись сумою ймовірностей настання подій $P_{n-m+1, n}, \dots, P_{n, n}$, а ймовірність P_{wd} – сумою ймовірностей настання подій $P_{0, n}, \dots, P_{n-m, n}$. Це пояснюється тим, що при відсутності контрольованої події система вимірювання помилково виявить її наявність, якщо m і більше ДІ неправильно виміряють значення контрольованого параметру. Тобто, для системи вимірювання, яка реалізує паралельне ІР з мажоритарним принципом « m із n » формули (4.6) з врахуванням формули (4.7) можуть бути записані наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} P_d &= P_{pe} \cdot \sum_{q=m}^n \left(C_n^q \cdot P_{cd1}^q \cdot P_{wd1}^{n-q} \right) \\ P_a &= P_{ae} \cdot \sum_{q=n-m+1}^n \left(C_n^q \cdot P_{cd2}^q \cdot P_{wd2}^{n-q} \right) \\ P_p &= P_{pe} \cdot \sum_{q=0}^{m-1} \left(C_n^q \cdot P_{cd1}^q \cdot P_{wd1}^{n-q} \right) \\ P_f &= P_{ae} \cdot \sum_{q=0}^{n-m} \left(C_n^q \cdot P_{cd2}^q \cdot P_{wd2}^{n-q} \right) \end{aligned} \right\}. \quad (4.8)$$

Подальше дослідження можливості застосування паралельного ІР для підвищення достовірності інформації проведемо на прикладі системи вимірювання повздовжньої відстані між АТЗ ΔX , що складається з 4 однотипних ДІ та реалізує мажоритарний принцип прийняття рішення « m із 4». Розглянемо 4 системи, які реалізують наступні мажоритарні принципи прийняття рішення «1 із 4», «2 із 4», «3 із 4» та «4 із 4». Для запропонованих систем вимірювання визначимо формули для визначення ймовірностей P_d, P_a, P_p, P_f та побудуємо графіки їх залежності від якості ДІ та побудуємо блок-схему системи

паралельного ІР на основі елементів логіки, які зображено на рис. 4.5. Під якістю ДІ будемо розглядати його ймовірність правильного вимірювання контрольованого параметру P_{cd} . Будемо вважати, що при $P_{cd} \leq 0.5$ ДІ характеризуються низькою якістю, а при $P_{cd} > 0.5$ – високою якістю.

Для спрощення виду розрахункових формул будемо вважати, що ймовірності правильного та неправильного вимірювання контрольованого параметру за умови наявності та відсутності контрольованої події рівні між собою, тобто $P_{cd1} = P_{cd2} = P_{cd}$ та $P_{wd1} = P_{wd2} = P_{wd}$.

Система паралельного ІР з мажоритарним принципом «1 із 4» забезпечує подачу сигналу $S_{1,4}$ про наявність контрольованої події, за умови, коли її виявив хоча б один ДІ. Формули для визначення ймовірностей P_d , P_a , P_p , P_f для даної системи паралельного ІР мають наступний вид:

$$\left. \begin{aligned} P_d &= P_{pe} \cdot (P_{cd}^4 + 4 \cdot P_{cd}^3 \cdot P_{wd} + 6 \cdot P_{cd}^2 \cdot P_{wd}^2 + 4 \cdot P_{cd} \cdot P_{wd}^3) \\ P_a &= P_{ae} \cdot P_{cd}^4 \\ P_p &= P_{pe} \cdot P_{wd}^4 \\ P_f &= P_{ae} \cdot (4 \cdot P_{cd}^3 \cdot P_{wd} + 6 \cdot P_{cd}^2 \cdot P_{wd}^2 + 4 \cdot P_{cd} \cdot P_{wd}^3 + P_{wd}^4) \end{aligned} \right\}. \quad (4.9)$$

Система паралельного ІР з мажоритарним принципом «2 із 4» забезпечує подачу сигналу про наявність контрольованої події $S_{2,4}$, за умови, що її виявили не менше двох ДІ. Формули для визначення ймовірностей P_d , P_a , P_p , P_f для даної системи паралельного ІР мають наступний вид:

$$\left. \begin{aligned} P_d &= P_{pe} \cdot (P_{cd}^4 + 4 \cdot P_{cd}^3 \cdot P_{wd} + 6 \cdot P_{cd}^2 \cdot P_{wd}^2) \\ P_a &= P_{ae} \cdot (P_{cd}^4 + 4 \cdot P_{cd}^3 \cdot P_{wd}) \\ P_p &= P_{pe} \cdot (4 \cdot P_{cd} \cdot P_{wd}^3 + P_{wd}^4) \\ P_f &= P_{ae} \cdot (6 \cdot P_{cd}^2 \cdot P_{wd}^2 + 4 \cdot P_{cd} \cdot P_{wd}^3 + P_{wd}^4) \end{aligned} \right\}. \quad (4.10)$$

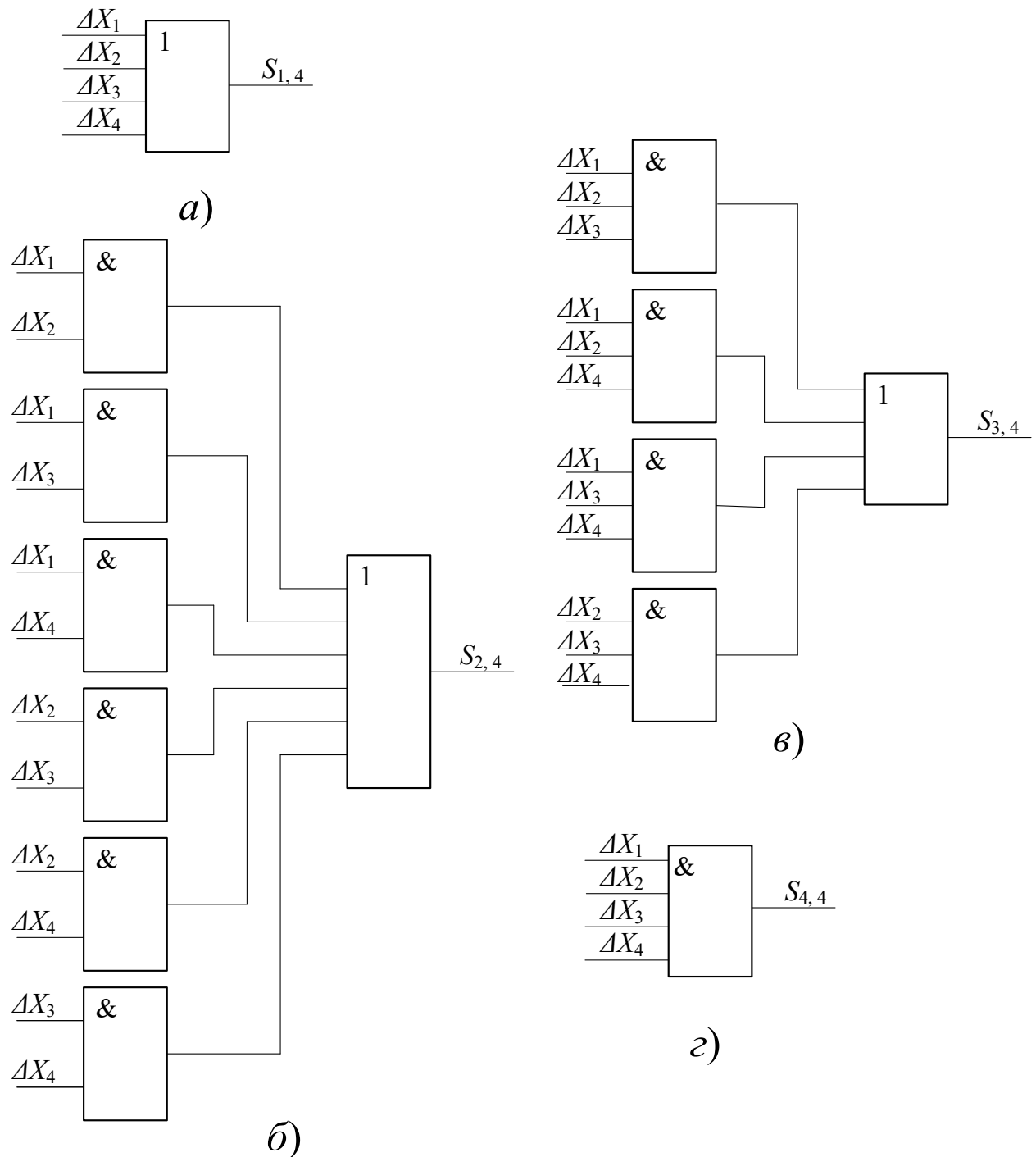


Рисунок 4.5 – Блок-схеми систем паралельного інформаційного резервування: а) з мажоритарним принципом «1 із 4», б) з мажоритарним принципом «2 із 4», в) з мажоритарним принципом «3 із 4», г) з мажоритарним принципом «4 із 4».

Система паралельного ІР з мажоритарним принципом «3 із 4» забезпечує подачу сигналу про наявність контрольованої події $S_{3,4}$, за умови, що її виявили не менше трьох ДІ. Формули для визначення ймовірностей P_d, P_a, P_p, P_f для даної системи паралельного ІР мають наступний вид:

$$\left. \begin{aligned} P_d &= P_{pe} \cdot (P_{cd}^4 + 4 \cdot P_{cd}^3 \cdot P_{wd}) \\ P_a &= P_{ae} \cdot (P_{cd}^4 + 4 \cdot P_{cd}^3 \cdot P_{wd} + 6 \cdot P_{cd}^2 \cdot P_{wd}^2) \\ P_p &= P_{pe} \cdot (6 \cdot P_{cd}^2 \cdot P_{wd}^2 + 4 \cdot P_{cd} \cdot P_{wd}^3 + P_{wd}^4) \\ P_f &= P_{ae} \cdot (4 \cdot P_{cd} \cdot P_{wd}^3 + P_{wd}^4) \end{aligned} \right\}. \quad (4.11)$$

Система паралельного ІР з мажоритарним принципом «4 із 4» забезпечує подачу сигналу про наявність контрольованої події $S_{4,4}$, за умови, що її виявили всі чотири ДІ. Формули для визначення ймовірностей P_d , P_a , P_p , P_f для даної системи паралельного ІР мають наступний вид:

$$\left. \begin{aligned} P_d &= P_{pe} \cdot P_{cd}^4 \\ P_a &= P_{ae} \cdot (P_{cd}^4 + 4 \cdot P_{cd}^3 \cdot P_{wd} + 6 \cdot P_{cd}^2 \cdot P_{wd}^2 + 4 \cdot P_{cd} \cdot P_{wd}^3) \\ P_p &= P_{pe} \cdot (4 \cdot P_{cd}^3 \cdot P_{wd} + 6 \cdot P_{cd}^2 \cdot P_{wd}^2 + 4 \cdot P_{cd} \cdot P_{wd}^3 + P_{wd}^4) \\ P_f &= P_{ae} \cdot P_{wd}^4 \end{aligned} \right\}. \quad (4.12)$$

Побудову графіків залежності ймовірностей P_d , P_a , P_p , P_f від якості датчика, здійснимо для різних ймовірностей наявності контрольованої події. Розглянемо три ситуації: з високою ймовірністю наявності контрольованої події ($P_{pe} = 0,9$ та $P_{ae} = 0,1$); з рівною ймовірністю наявності та відсутності контрольованої події ($P_{pe} = P_{ae} = 0,5$); з високою ймовірністю відсутності контрольованої події ($P_{pe} = 0,1$ та $P_{ae} = 0,9$). Проаналізувавши побудовані графіки, які приведені на рис. 4.6, можемо зробити наступні висновки.

При зростанні якості ДІ P_{cd} спостерігається підвищення ймовірностей правильного визначення наявності P_d і відсутності P_a контрольованої події та зниження ймовірностей невиявлення P_p і помилкового виявлення P_f наявності контрольованої події. При цьому, для ситуацій з високою ймовірністю наявності контрольованої події ($P_{pe} > 0,5$) спостерігається переважання P_d над P_a , та P_p над P_f , а для ситуацій з високою ймовірністю відсутності контрольованої події ($P_{ae} > 0,5$), навпаки – спостерігається переважання P_a над P_d та P_f над P_p .

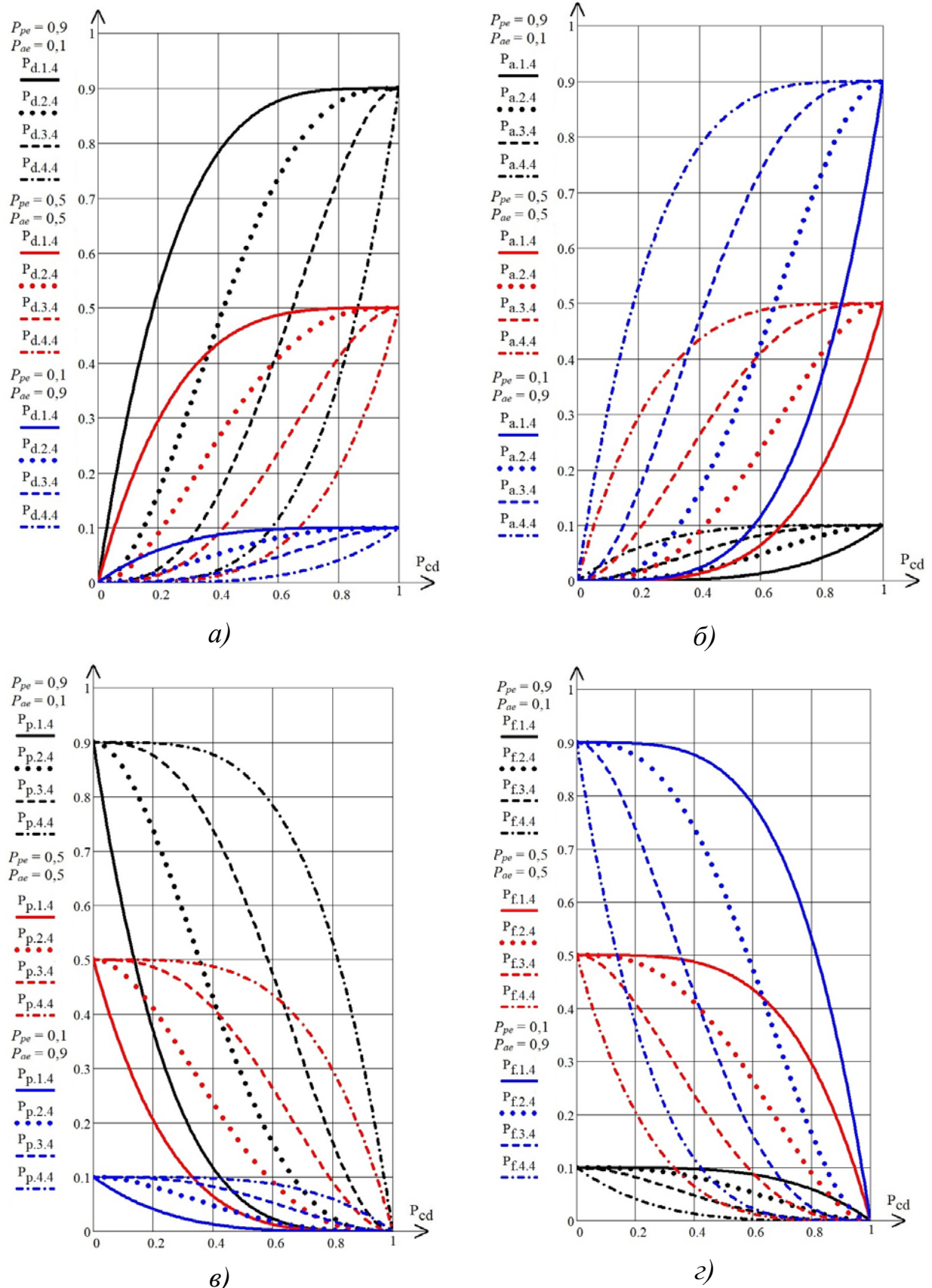


Рисунок 4.6 – Графіки залежності ймовірностей а) правильного визначення наявності контрольованої події P_d ; б) правильного визначення відсутності контрольованої події P_a ; в) невиявлення наявності контрольованої події P_p ; г) помилкове виявлення наявності контрольованої події P_f від якості датчиків для різних ймовірностей наявності контрольованої події

При зниженні ймовірності настання контрольованої події P_{pe} спостерігається зниження ймовірностей P_d та P_p та підвищення ймовірностей P_a та P_f . Тобто, для ситуацій з високою ймовірністю наявності контрольованої події ($P_{pe} > 0,5$) основною проблемою є невиявлення наявності контрольованої події, а для ситуацій з високою ймовірністю відсутності контрольованої події ($P_{ae} > 0,5$) – помилкове виявлення наявності контрольованої події. Для ситуації, коли $P_{pe} = P_{ae} = 0,5$ ситуації невиявлення та помилкового виявлення наявності контрольованої події є рівноймовірними подіями. Слід відмітити, що при зростанні індексу мажоритарності спостерігається зниження ймовірностей правильного P_d та помилкового P_f визначення наявності контрольованої події, а також зростання ймовірностей невиявлення P_p наявності та правильного визначення відсутності P_a контрольованої події. Тобто, для ситуацій з високою ймовірністю наявності контрольованої події ($P_{pe} > 0,5$) доцільно застосовувати системи паралельного ІР з низьким індексом мажоритарності, оскільки вони характеризуються високою ймовірністю правильного P_d визначення наявності та низькою ймовірністю невиявлення P_p контрольованої події. А для ситуацій з високою ймовірністю відсутності контрольованої події ($P_{ae} > 0,5$) доцільно застосовувати системи паралельного ІР з високим індексом мажоритарності, оскільки вони характеризуються високою ймовірністю правильного P_a визначення відсутності та низькою ймовірністю помилкового виявлення наявності P_f контрольованої події.

Розглянемо графіки залежності ймовірності правильної $P_{cd.s}$ та неправильної $P_{wd.s}$ роботи системи паралельного ІР від від якості датчика P_{cd} для ситуації з різною ймовірністю наявності контрольованої події, які приведені на рис. 4.7. Під ймовірністю правильної роботи системи паралельного ІР будемо розуміти суму ймовірностей правильного визначення наявності P_d та відсутності P_a контрольованої події, а під ймовірністю неправильної роботи системи паралельного ІР – суму ймовірностей невиявлення P_p та помилкового виявлення наявності P_f контрольованої події.

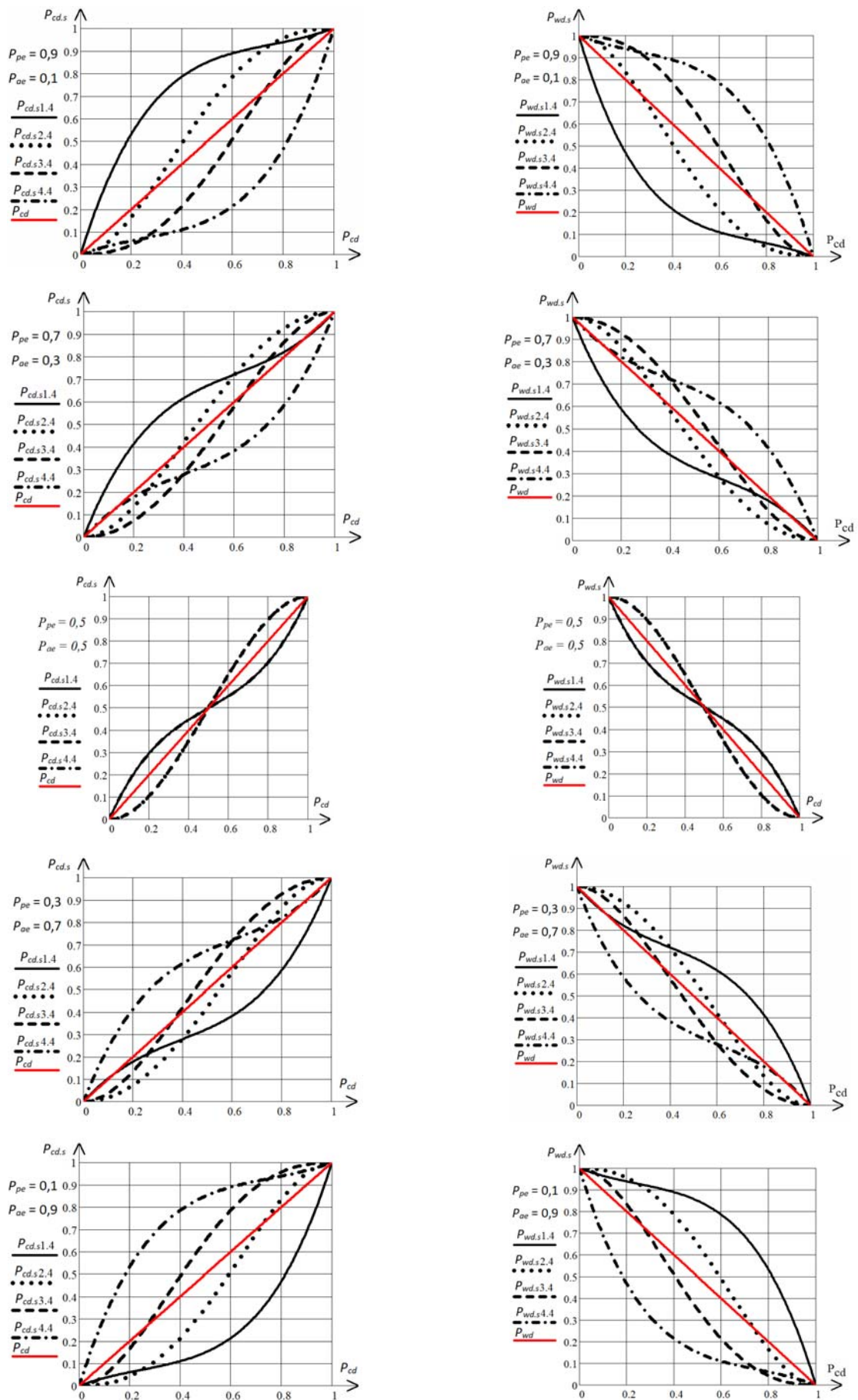


Рисунок 4.7 – Графік залежності ймовірності правильної та неправильно роботи системи паралельного ІР від якості датчика P_{cd}

Проаналізувавши графіки, які приведені на рис. 4.7, можемо зробити наступні висновки. При зростанні якості ДІ P_{cd} спостерігається підвищення ймовірності правильної $P_{cd.s}$ роботи та зниження ймовірності неправильної $P_{wd.s}$ роботи системи паралельного ІР. При цьому, зі зменшенням ймовірності настання контрольованої події P_{pe} спостерігається зниження ймовірності правильної $P_{cd.s}$ роботи для систем паралельного ІР з низьким індексом мажоритарності, та її зростання для систем паралельного ІР з високим індексом мажоритарності. Також зі зменшенням ймовірності настання контрольованої події P_{pe} спостерігається зростання ймовірності неправильної $P_{wd.s}$ роботи для систем паралельного ІР з низьким індексом мажоритарності, та її зменшення для систем паралельного ІР з високим індексом мажоритарності.

При порівнянні ймовірності правильної роботи ДІ P_{cd} та ймовірності правильної роботи $P_{cd.s}$ системи паралельного ІР можемо зробити наступні висновки. $P_{cd.s}$ більше P_{cd} , переважно, для систем паралельного ІР з низьким індексом мажоритарності за умови високої ймовірності наявності контрольованої події, а також для систем паралельного ІР з високим індексом мажоритарності за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події.

При порівнянні ймовірності неправильної роботи ДІ P_{wd} та ймовірності неправильної роботи $P_{wd.s}$ системи паралельного ІР можемо зробити наступні висновки. $P_{wd.s}$ менше P_{wd} , переважно, для систем паралельного ІР з низьким індексом мажоритарності за умови високої ймовірності наявності контрольованої події, а також для систем паралельного ІР з високим індексом мажоритарності за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події.

Таким чином, за умови високої ймовірності наявності контрольованої події доцільно застосовувати системи паралельного ІР з низьким індексом мажоритарності, а за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події - системи паралельного ІР з високим індексом мажоритарності.

Для дослідження впливу індексу мажоритарності та кількості ДІ на ймовірність правильної та неправильної роботи системи паралельного ІР розглянемо відповідні графіки, які зображені на рис. 4.8.

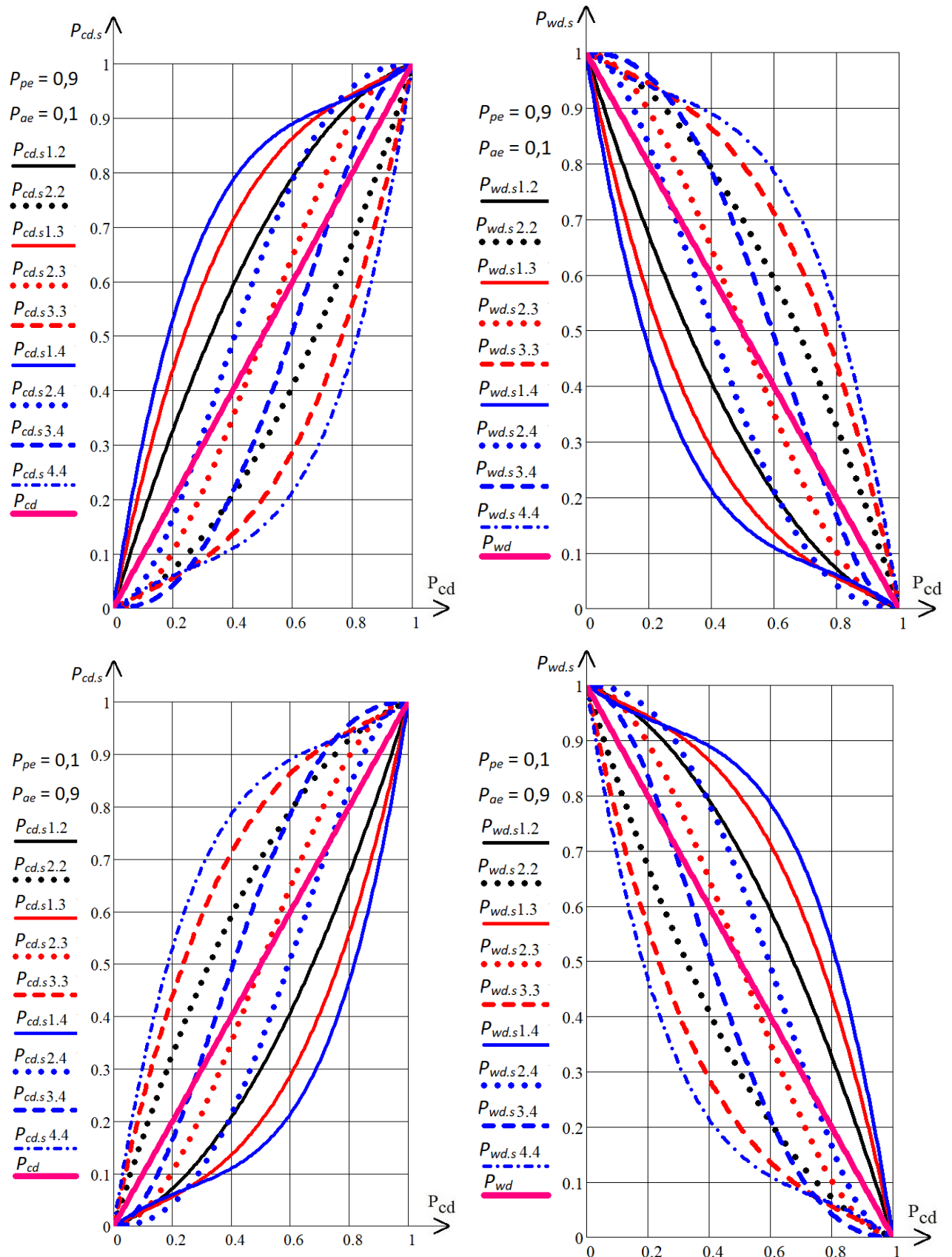


Рисунок 4.8 – Графік залежності ймовірності правильної та неправильно роботи системи паралельного ІР від індексу мажоритарності

Проаналізувавши графіки, які приведені на рис. 4.8, можемо зробити наступні висновки. При зростанні індексу мажоритарності спостерігається зменшення ймовірності правильної роботи системи паралельного ІР $P_{cd.s}$ за умови високої ймовірності наявності контрольованої події та її зростання за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події. Також при зростанні індексу мажоритарності спостерігається зростання ймовірності неправильної роботи системи паралельного ІР $P_{wd.s}$ за умови високої ймовірності наявності контрольованої події та її зменшення за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події. При зростанні кількості датчиків, за умови незмінного значення показника мажоритарності m , спостерігається зростання ймовірності правильної роботи системи паралельного ІР $P_{cd.s}$ за умови високої ймовірності наявності контрольованої події та її зменшення за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події. Також при зростанні кількості датчиків спостерігається зменшення ймовірності неправильної роботи системи паралельного ІР $P_{wd.s}$ за умови високої ймовірності наявності контрольованої події та її зростання за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події.

Загалом, для підвищення достовірності інформації в ІУС які працюють в режимі реального часу, до яких відноситься система ПМ на АТ, з використанням ІР доцільно застосовувати системи паралельного ІР з мажоритарним принципом « m із n ». На якість системи паралельного ІР впливає велика кількість параметрів: якість ДІ, кількість датчиків n , показник мажоритарності m та інші, а підбір їх оптимальних значень потребує додаткового дослідження. При цьому, на даному етапі дослідження можна виділити наступні тенденції. Зі зростанням якості ДІ зростає якість системи паралельного ІР. За умови високої ймовірності наявності контрольованої події доцільно застосовувати системи паралельного ІР з великою кількістю ДІ n та низьким показником мажоритарності m , а за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події – системи паралельного ІР з невеликою кількістю ДІ n та високим показником мажоритарності m .

4.3. Інтелектуальна система управління автотранспортним засобом щодо попередження виникнення дорожньо-транспортної пригоди

Впровадження запропонованого поляриметричного методу визначення напрямку на джерело поляризованого оптичного випромінювання та запропонованих моделей визначення лінійних, кутових та лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на вулично-дорожній мережі для вирішення задач позиціонування та моніторингу АТЗ на ВДМ можливе шляхом розробки поляриметричної системи ПМ на АТ. Запропонована система ПМ на АТ складається зі спареного чотирьох-канального блоку випромінювання, який розміщується на даху АТЗ та спареного восьмиканального блоку вимірювання.

Блок випромінювання забезпечує випромінювання чотирьох попарно об'єднаних ЛПП в передній напівсфері АТЗ та чотирьох ЛПП – в задній напівсфері. При цьому, промені, що випромінюються, відрізняються залежністю АПП від напрямку випромінювання, а АПП попарно об'єднаних променів відрізняються на величину δ , яка рівна 5° . Відповідні графіки залежності приведені на рис. 4.9. Схематичне представлення діаграми випромінювання блоку випромінювання приведене на рис. 4.10.

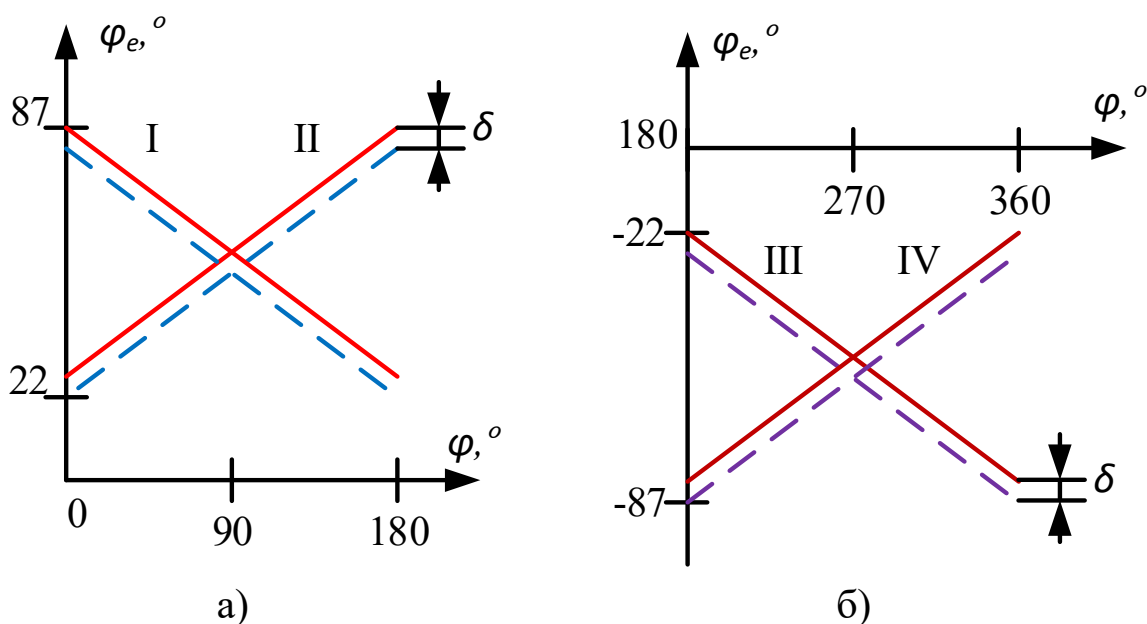


Рисунок 4.9 – Графіки залежності АПП променів, що випромінюється φ_e в передній (а) і задній (б) напівсфері від напрямку випромінювання φ .

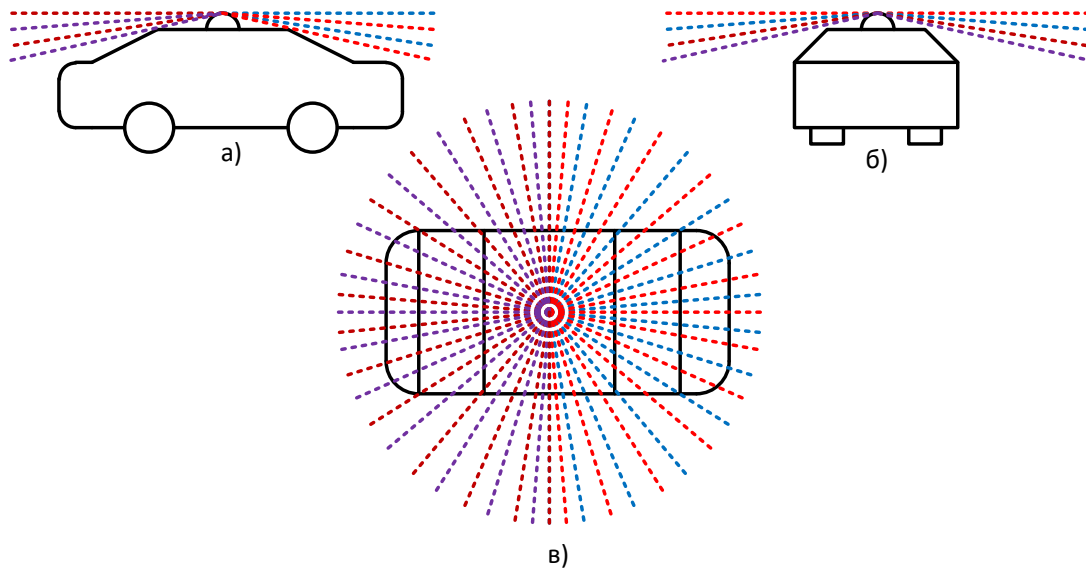


Рисунок 4.10 – Схематичне зображення діаграми випромінювання блоку випромінювання: а) вид збоку; б) вид спереду; в) вид зверху.

Блок-схема одного каналу блоку випромінювання приведена на рис. 4.11. Канал блоку випромінювання складається з двох підканалів, які мають ідентичну структуру, та забезпечує випромінювання двох ЛПП, АПП яких відрізняється на визначену величину δ . Підканали блоку випромінювання також відрізняються законом залежності АПП променю, що випромінюється, φ_e від напрямку випромінювання φ , як це показано на рис. 4.9.

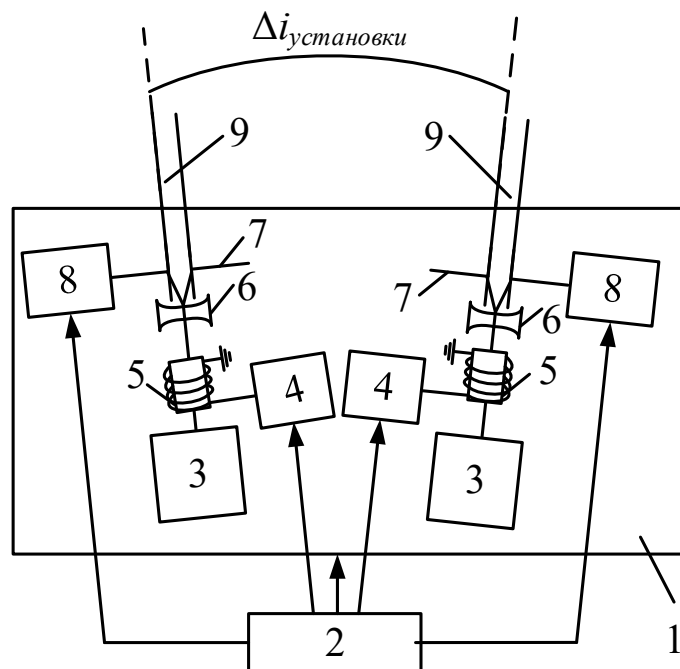


Рисунок 4.11 – Блок-схема спареного каналу блоку випромінювання.

Принцип роботи каналу блоку випромінювання полягає в наступному. Блок випромінювання встановлюється на обертальній платформі 1, яка забезпечує його поворот навколо повздовжньої осі у відповідності до сигналів, які надходять від блоку управління 2. Джерело лінійно-поляризованого випромінювання 3 випромінює ЛПП визначеної довжини хвилі з визначеним АПП, який проходить через комірку Фарадея 5. Комірка Фарадея 5 виступає в якості модулятора і забезпечує поворот площини поляризації променю, що крізь неї проходить, у відповідності до сигналів управління, які надходять від звукового генератора 4. Звуковий генератор 4 забезпечує формування сигналів управління у відповідності до закону залежності АПП променю, що випромінюється, від напрямку випромінювання на основі сигналів, які надходять з блоку управління 2. Після проходження комірки Фарадея 5 промінь проходить через розсіювальну лінзу 6 та вузько-щілинну діафрагму 7, які забезпечують розсіювання променю 9 з визначеною апертурою розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині. Відкриття та закриття вузько-щілинної діафрагми 7 відбувається блоком керування діафрагмою 8 на основі сигналів, які надходять з блоку управління 2. Завдяки застосуванню блоку управління 2, сигнали від якого надходять в блок керування діафрагмою 8, звукові генератори 4 та в обертальну платформу 1, забезпечується однозначний зв'язок між АПП променю, що випромінюється та напрямком його випромінювання, а також період випромінювання T , як це показано на рис. 4.12. Підканали блоку випромінювання розміщені на обертальній платформі 1 таким чином, що напрямки їх випромінювання формують кут Δi установки. Це дозволяє уникнути інтерференції променів, що випромінюються, та забезпечити формування паузи тривалістю ΔT_1 між випромінюванням променів одного каналу випромінювання в одному напрямку. Застосування вузько-щілинної діафрагми 7 та блоку керування діафрагмою 8 забезпечує просторово-часове рознесення випромінювання променів блоком випромінювання, формування паузи тривалістю ΔT_2 між випромінюванням променів різних каналів випромінювання та паузи тривалістю T_n між випромінюванням променів блоком випромінювання.

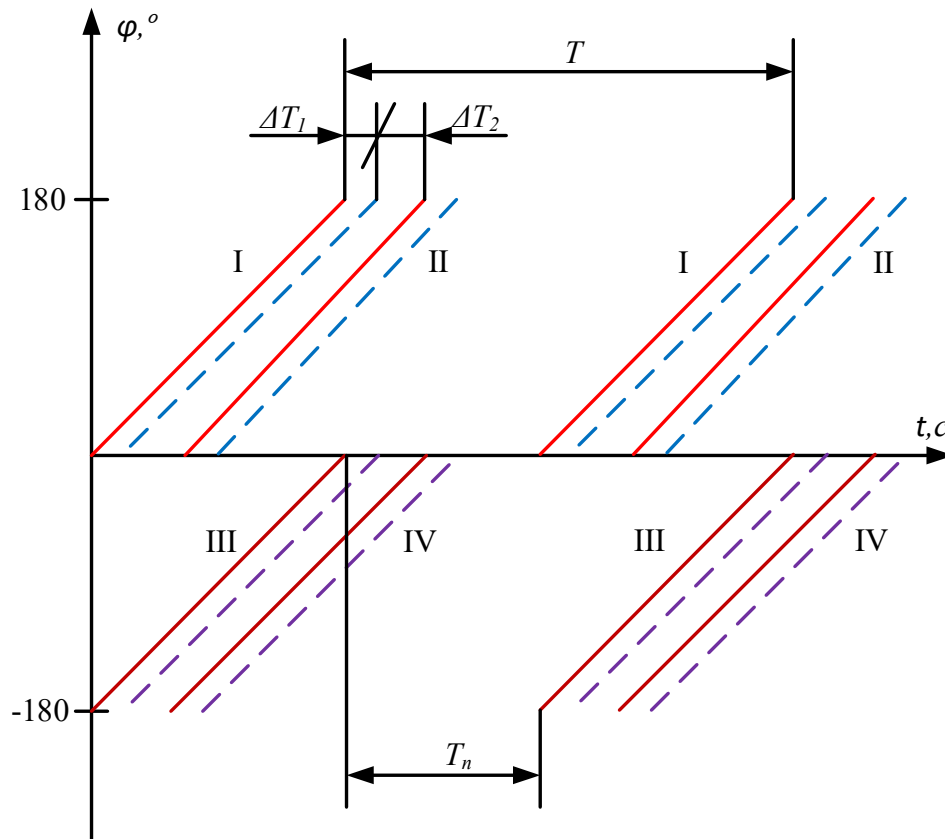


Рисунок 4.12 – Графік залежності напрямку випромінювання φ променів в часі

Блок вимірювання забезпечує визначення азимуту площини поляризації падаючого на нього променя та його плоских кутів падіння в восьми каналах. Схематичне розміщення спарених каналів блоку вимірювання на АТЗ представлено на рис. 4.13, а блок-схема спареного каналу вимірювання – на рис. 4.14. Спарений канал вимірювання складається з двох підканалів, які мають ідентичну структуру та відрізняються кутом установки ІДПП в горизонтальній та вертикальній площині.

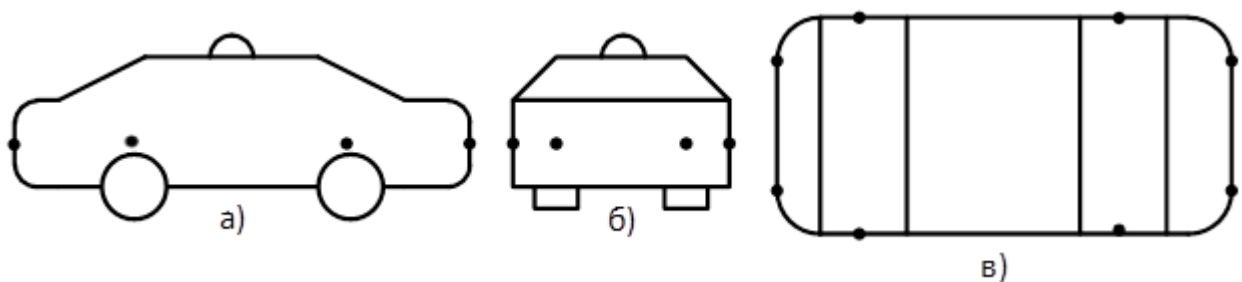


Рисунок 4.13 – Схематичне зображення розміщення спарених каналів блоку вимірювання: а) вид збоку; б) вид спереду; в) вид зверху.

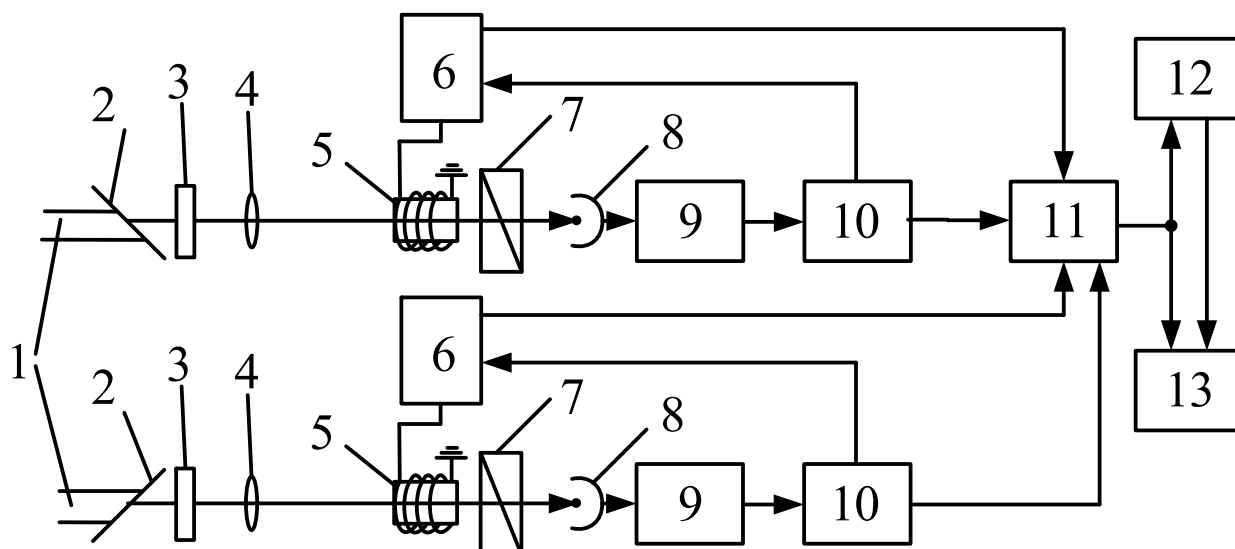


Рисунок 4.14 – Блок-схема спареного каналу блоку вимірювання.

Принцип роботи каналу блоку вимірювання полягає в наступному. Промінь 1 падає на ІДПП 2, яка забезпечує поворот площини поляризації двічі заломленого променя по відношенню до падаючого променя, в залежності від його АПП та просторового КПП. Після проходження ІДПП двічі заломлений промінь проходить через оптичний фільтр 3, який забезпечує пропускання променів з довжиною хвилі, яка відповідає довжині хвилі променів, що випромінюються відповідним блоком випромінювання, і фокусуючу лінзу 4 та фокусується на комірці Фарадея 5. Комірка Фарадея 5 забезпечує модуляцію поляризованого променя в змінному магнітному полі для підвищення чутливості вимірювання на основі сигналу управління, що надходить від звукового генератора 6, та забезпеченні методу вимірювання «по нулю сигналу». Сигнал управління у звуковому генераторі 6 формується на основі модулюючого сигналу та сигналу доуправління, що надходить від синхронного детектора 10. Після проходження комірки Фарадея 6 модульований ЛПП проходить через аналізатор 7, який забезпечує визначення АПП променя та падає на фотодетектор 8. Фотодетектор 8 забезпечує перетворення інтенсивності падаючого на нього випромінювання в електричний сигнал. Електричний сигнал від фотодетектора 8 надходить в вузько смуговий підсилювач 9, який забезпечує посилення електричного сигналу. Електричний сигнал від вузько смугового

підсилювача надходить в синхронний детектор 10, який забезпечує формування управляючого сигналу, що надходить до звукового генератора 6 з метою забезпечення методу вимірювання «по нулю сигналу». Сигнали від звукового генератора 6 та синхронного детектора 10 надходять в обчислювальний блок 11. При цьому, сигнал від звукового генератора 6 пропорційний АПП двічізаломелного променю в попередній такт вимірювання, а сигнал від синхронного детектора 10 – пропорційний зміні АПП променю в поточний такт вимірювання. Обчислювальний блок 11 забезпечує визначення АПП двічізаломленого променю та обчислення АПП і плоских кутів падіння променю на спарений канал блоку вимірювання. Сигнал від обчислювального блоку 11 надходить в вузькоспрямований лазерний далекомір 12 та в блок позиціонування системи попередження виникнення ДТП 13. Вузькоспрямований лазерний далекомір забезпечує визначення дальності до відповідного АТЗ з блоком випромінювання. Сигнал від далекоміру 12 надходить в блок позиціонування системи попередження виникнення ДТП 13, який на основі інформації від обчислювального блоку 11 про плоскі кути падіння променю та його АПП і інформації від лазерного далекоміра 12 про дальність до АТЗ забезпечує визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ.

Для розгляду схеми інтелектуальної системи управління АТЗ щодо попередження виникнення ДТП, загальна блок схема якої приведена на рис. 4.15, виділимо виокремлений інтелектуальний автотранспортний засіб та зовнішнє, по відношенню до нього, середовище. Інтелектуальна система управління щодо попередження виникнення ДТП виокремленого АТЗ працює наступним чином. Інформація про положення АТЗ від різного роду датчиків, які об'єднані в блок вимірювання, надходять в блок позиціонування, а про параметри руху АТЗ – в блок моніторингу. При цьому, блок вимірювання, окрім інших датчиків, включає блок вимірювання поляриметричної системи ПМ на АТ. Дані про лінійно-кутові параметри відносного положення АТЗ з блоку позиціонування надходять в блок моніторингу та до далекомірної обладнання. Далекомірне обладнання забезпечує визначення відстані до, відповідного, АТЗ з блоком випромінювання.

Інформація про відстань до АТЗ надходить в блок моніторингу. Блок моніторингу забезпечує формування сигналів про параметри відносного положення та відносного руху АТЗ, які надходять в аналітичний блок. В аналітичному блоці відбувається визначення відстані та часу руху до потенційних точок просторово-часового перетину траєкторії руху АТЗ з іншими АТЗ. Аналітичний блок забезпечує формування темпових і орієнтаційних сигналів доуправління для попередження виникнення ДТП, які надходять в систему індикації та сигналізації АТЗ для відображення водієві інформаційних та попереджувальних сигналів, а також в виконавчий блок АТЗ. Виконавчий блок АТЗ забезпечує реалізацію темпових та орієнтаційних команди для попередження та уникнення ДТП. Додатково, виконавчий блок забезпечує керування роботою блоку випромінювання. При цьому, може забезпечуватися зміна періоду випромінювання та тривалості відповідних пауз.

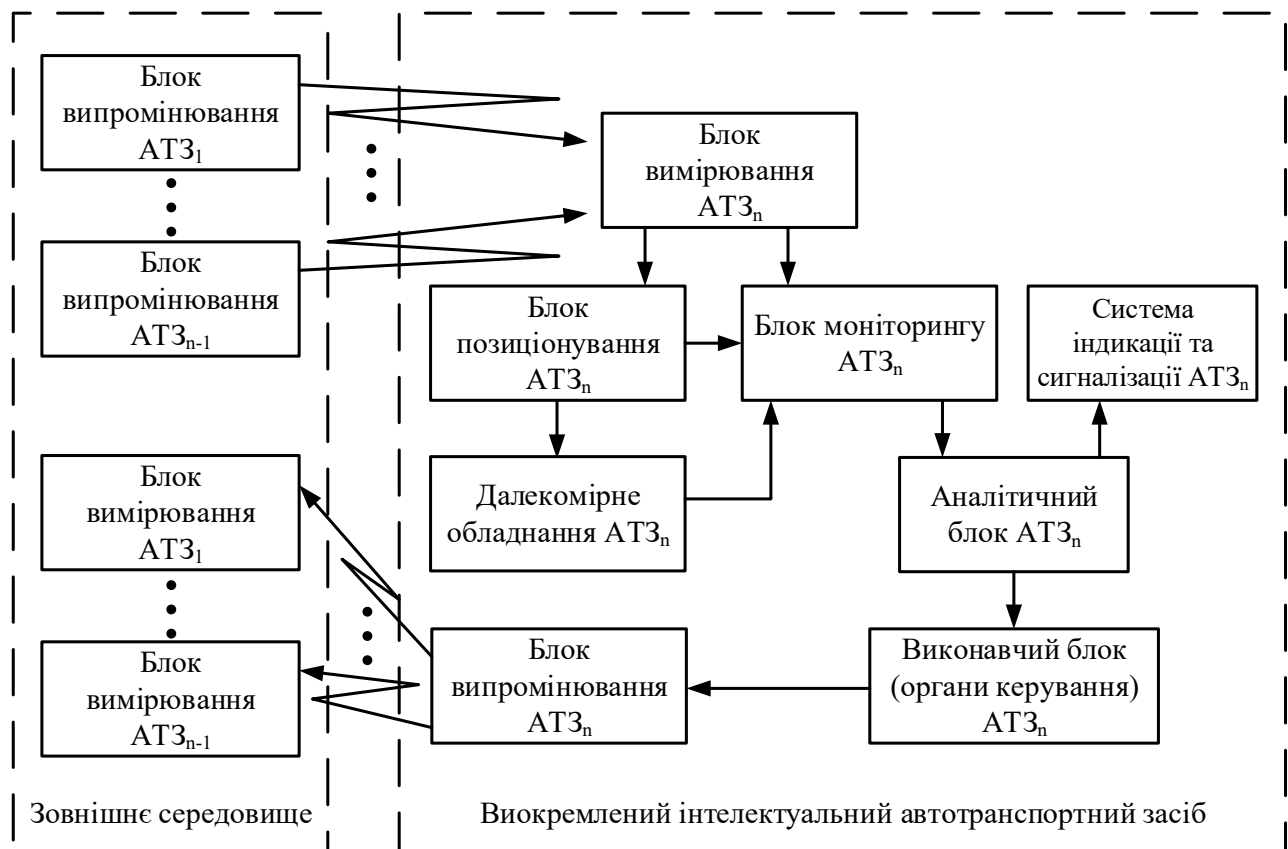


Рисунок 4.15 – Загальна блок схема інтелектуальної системи управління АТЗ щодо попередження виникнення ДТП

Робота зовнішнього, по відношенню до виокремленого АТЗ, середовища інтелектуальної системи управління АТЗ щодо попередження виникнення ДТП працює наступним чином. Блок випромінювання виокремленого АТЗ забезпечує випромінювання ЛПП з визначеною апертурою розсіювання в горизонтальній та вертикальній площині і з поворотною діаграмою випромінювання. ЛПП від блоку випромінювання виокремленого АТЗ проходить через повітряне середовище розповсюдження та падає на блоки вимірювання АТЗ, які знаходяться в ближньому оточенні навколо виокремленого АТЗ. Кожен з цих АТЗ, на основі інформації від поляриметричної системи ПМ на АТ, визначає лінійно-кутові параметри власного положення відносно виокремленого АТЗ, формує та реалізує темпові та орієнтаційні сигнали доуправління для попередження виникнення ДТП. Блоки випромінювання АТЗ, які знаходяться в ближньому оточенні навколо виокремленого АТЗ випромінюють ЛПП, які проходять через повітряне середовище розповсюдження та падають, в тому числі, на блок вимірювання виокремленого АТЗ.

Загалом, запропонована інтелектуальна система управління АТЗ щодо попередження виникнення ДТП працює наступним чином. АТЗ випромінює ЛПП, АПП якого пов'язаний з азимутом на АТЗ. ЛПП, що випромінюються АТЗ сприймаються блоками вимірювання АТЗ з ближнього оточення. При цьому, відбувається визначення АПП падаючого променя та його плоских кутів падіння, які визначають просторове положення АТЗ з блоком вимірювання відносно АТЗ з блоком випромінювання. Інформація про відносне просторове положення АТЗ надходить в аналітичний блок, де формуються сигнали доуправління АТЗ з метою попередження виникнення ДТП. Після доуправління АТЗ відбувається зміна його положення в просторі, на основі якого в наступний такт вимірювання відбувається формування нових сигналів доуправління.

Таким чином, запропонована інтелектуальна система управління АТЗ може бути використана в якості джерела інформації про орієнтаційне та позиційне положення АТЗ відносно інших елементів ДТС в ІТС, а також як бортова інтелектуальна система попередження виникнення та уникнення ДТП.

Висновки по розділу 4

Для порівняння та оцінки систем ПМ на АТ можуть бути застосовані показники їх ефективності. Загалом, під ефективністю ПМ на АТ розглядають комплексний показник, що характеризує функцію точності визначення відносних параметрів руху АТЗ та достовірність і своєчасність формування сигналу про можливість виникнення ДТП. Під критерієм ефективності системи розуміють правило, за яким відбувається оцінка досконалості перетворення ресурсів системи в цільовий ефект. Для оцінки ефективності системи ПМ на АТ можуть бути використані наступні якісні та кількісні критерії: підвищення безпеки руху на АТ, скорочення кількості ДТП на АТ, точність витримування дистанцій та інтервалів руху в допустимих межах, достовірність інформації про відносне положення об'єктів ДТС та відносних параметрів їх руху, своєчасність формування попереджувальних сигналів про можливість виникнення ДТП та інші. Під показником ефективності розуміють чисельне визначення ступеню досягнення критерію ефективності. В якості показника ефективності, який реалізує якісний критерій підвищення безпеки руху може бути застосований показник частки ДТП спричинених похибками у ПМ. В якості показника ефективності, який реалізує критерій руху АТЗ без ДТП, може бути використаний показник кількості ДТП на тисячу поїздок. В якості показника ефективності, який реалізує критерій точності може бути застосований показник відношення різниці поточного та оптимального значення досліджуваного параметру до мінімально допустимої. В якості показника ефективності, який реалізує критерій достовірність інформації може бути використаний показник ймовірності правильного визначення значення досліджуваного параметру. В якості показника ефективності, який реалізує критерій своєчасності може бути використаний показник відношення між поточним та мінімально необхідним проміжком часу для здійснення доуправління АТЗ з метою уникнення ДТП.

Для підвищення достовірності інформації в системі ПМ на АТ може бути застосоване інформаційне резервування. Оскільки система ПМ на АТ є системою контролю в режимі реального часу, то для підвищення достовірності інформації

доцільно застосовувати паралельне ІР або послідовне, модульне чи комбіноване за умови, що їх структура забезпечує допустимий час старіння інформації. Дослідження системи паралельного ІР, з точки зору чотирьох-параметричного графу станів системи визначення контрольованого параметру, яке запропоноване в роботі, дозволяє визначити ймовірності коректного визначення наявності та відсутності контрольованої події. Якість роботи систем паралельного ІР залежить від наступних параметрів: кількість датчиків n , показник мажоритарності m , якість ДІ, а підбір їх оптимальних значень потребує додаткового дослідження. На даному етапі дослідження можна виділити наступні тенденції щодо визначення оптимальних параметрів системи паралельного ІР. Зі зростанням якості ДІ зростає якість системи паралельного ІР. За умови високої ймовірності наявності контрольованої події доцільно застосовувати системи паралельного ІР з великою кількістю ДІ n та низьким показником мажоритарності m , а за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події – системи паралельного ІР з невеликою кількістю ДІ n та високим показником мажоритарності m .

Реалізація запропонованого методу визначення напрямку на джерело лінійно-поляризованого випромінювання та запропонованих в роботі моделей визначення лінійних, кутових та лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ для вирішення задач позиціонування та моніторингу АТЗ можливе шляхом розробки поляриметричної системи ПМ на АТ. В роботі запропонована поляриметрична система ПМ на АТ з чотирьох-канальним блоком випромінювання та спареним восьми-канальним блоком вимірювання. Для запропонованої системи приведена діаграма випромінювання блоку випромінювання, блок-схема спареного каналу блоку випромінювання та спареного каналу блоку вимірювання. Запропонована поляриметрична системи ПМ на АТ може бути застосована в ІТС в якості джерела інформації про орієнтаційне та позиційне положення АТЗ відносно інших елементів ДТС.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого науково-практичного завдання, яке полягає в підвищенні ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті з метою підвищення безпеки руху, шляхом розробки поляриметричного методу позиціонування та моніторингу автотранспортних засобів, який на відміну від більшості існуючих дозволяє визначати їх не лише позиційне, але й орієнтаційне положення.

Основні наукові та практичні результати полягають в наступному:

1. На підставі проведеного аналізу визначено основні напрямки підвищення безпеки дорожнього руху в сучасних умовах, найбільш актуальним з яких є розробка та застосування автоматизованих систем попередження та уникнення зіткнень АТЗ, що базується на використанні систем ПМ на АТ. Між тим, аналіз існуючих підходів, методів та засобів ПМ на АТ показує, що системи ПМ на АТ, які використовуються в сучасних умовах, не забезпечують одночасне визначення відносного позиційного і орієнтаційного положення АТЗ та відносних параметрів їх руху.

2. Обґрунтована перспективність розробки та використання поляриметричного методу вимірювання орієнтаційних і позиційних параметрів положення АТЗ. Зокрема показано, що застосування поляриметричних методів вимірювання для підвищення ефективності ПМ на АТ можливе завдяки застосуванню ізотропної діелектричної плоскопаралельної пластини в оптичному каналі вимірювання, яка забезпечує поворот площини поляризації ЛПП в залежності від кута падіння. Крім того, за результатами математичного моделювання обґрунтовано вибір алмазу в якості матеріалу ІДПП, а також визначено, що максимальна чутливість вимірювання забезпечується при АПП падаючого променю $\varphi_e = 67,5^\circ$, для якого оптимальний КПП складає 56° . Відповідно для побудови поляриметричних систем ПМ АТЗ пропонується застосовувати Nd:YAG (імпульсний алюмо-ітревий гранат)– лазер (довжина хвилі $\lambda=1,064$ мкм), який широко використовуються для дистанційного зондування.

3. Розроблено поляриметричний спосіб визначення напрямку на джерело випромінювання лінійно поляризованого когерентного світла, який полягає в вимірюванні АПП двічізаломленого променя, з подальшим визначенням АПП падаючого променя та його плоских кутів падіння в горизонтальній та вертикальній площині. На основі розробленого поляриметричного способу запропоновано систему вимірювання АПП двічізаломленого променя та визначення АПП падаючого променя і його плоских кутів падіння. Представлений поляриметричний спосіб використовується для створення поляриметричних моделей визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ.

4. Розроблено поляриметричний метод позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті, в основу якого покладено використання явища повороту площини поляризації падаючого променя в процесі його відбивання та заломлення, і відповідно, використання запропонованих поляриметричних моделей визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ. Це дозволяє визначати як позиційні так і орієнтаційні параметри відносного положення АТЗ на ВДМ. Представлена в дисертації роботі вдосконалена модель визначення лінійно-кутових параметрів відносного положення АТЗ на ВДМ забезпечує скорочення кількості каналів вимірювання на 20% та зменшення відносної похибки вимірювання азимуту на АТЗ з блоком випромінювання в горизонтальній та вертикальній площинах, спричинену середовищем розповсюдження.

5. На основі розробленого поляриметричного методу визначені напрямки підвищення ефективності процесу ПМ на автомобільному транспорті, а саме за рахунок: підвищення точності витримування параметрів відносного положення та параметрів руху АТЗ в допустимих межах, підвищення достовірності інформації про відносне положення та параметри руху АТЗ. Зокрема, для підвищення достовірності інформації в системі ПМ на АТ запропоноване використання системи паралельного ІР з певною кількістю датчиків інформації. Було визначено, що за умови високої ймовірності наявності контрольованої події

доцільно застосовувати системи паралельного ІР з відносно великою кількістю ДІ n та низьким показником мажоритарності m , а за умови високої ймовірності відсутності контрольованої події – системи паралельного ІР з невеликою кількістю ДІ n та високим показником мажоритарності m . При цьому система паралельного ІР, порівняно з системою вимірювання без резервування, в залежності від якості датчика інформації, забезпечує підвищення ймовірності коректного виявлення контрольованої події на 5 – 40 % та зниження ймовірності некоректного виявлення контрольованої події на 5 – 40%.

6. Розроблена інтелектуальна система управління автотранспортним засобом щодо попередження виникнення ДТП. Ця система містить в собі аналітичний блок, виконавчий блок, систему індикації та сигналізації, а також поляриметричну систему ПМ на АТ, яка об'єднує блок випромінювання, блок вимірювання, блок позиціонування та моніторингу. Відповідна запропонована поляриметрична система ПМ на АТ складається зі спареного чотириканального блоку випромінювання, який розміщується на даху АТЗ та спареного восьмиканального блоку вимірювання. В такій конфігурації, запропонована інтелектуальна система управління АТЗ може бути застосована в ІТС, як джерело інформації про орієнтаційне та позиційне положення АТЗ відносно інших елементів ДТС, а також як бортова інтелектуальна система попередження виникнення та уникнення ДТП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аль-Амморі А., Ключан А. Застосування поляриметричного методу вимірювання для визначення взаємного просторового положення транспортних засобів. *Актуальні напрямки розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки* : монографія / ред.: В. Пінчук, Г. Прокудін. Дніпро, 2021. С. 219–233. ISBN 978-617-518-399-1. URL: <https://drive.google.com/file/d/12zFHpMg33GRegRJS5woGi8FSPOVQT5tl/view> (дата звернення: 19.09.2023).
2. Aviation Navigation with Use of Polarimetric Technologies / A. Klochan et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2017. Vol. 2, no. 3. P. 67–72. URL: <https://doi.org/10.25046/aj020310> (date of access: 01.10.2023).
3. Probabilistic models reliability of information and control systems / A. Al-Ammouri et al. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2018. Vol. 3, no. 1. P. 60–69. URL: <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2018.3-1.6> (date of access: 01.10.2023).
4. Methods for improving the data reliability in information and control systems / A. Al-Ammouri et al. *Electronics and control systems*. 2018. Vol. 4, no. 58. P. 107–114. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.58.13506> (date of access: 01.10.2023).
5. Малиш М., Куліш М., Ключан А. Віддалене керування транспортом. *Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки"*. 2022. Т. 1, № 51. С. 275–280. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-275-280> (дата звернення: 02.10.2023).
6. Klochan A., Al-Ammouri A., Dmytrychenko A. Polarimetric Technologies for Object's Attitude Sensing. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference*, Kyiv, 16–18 April 2019. Kyiv, 2019. P. 712–717.
7. Fundamentals of the Polarimetric UAV Landing System / A. Klochan et al. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)*:

Proceedings of 2019 IEEE 5th International Conference, Kyiv, 22–24 October 2019. Kyiv, 2019. P. 712–717. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8943830> (date of access: 02.10.2023).

8. Способи підвищення достовірності інформації в системах управління/ А. Аль-Амморі та ін. *Інформаційні технології та взаємодії* : V МНПК, м. Київ, 20–21 листоп. 2018 р. Київ, 2018. С. 25–26.

9. Аль-Амморі А., Ключан А. Поляриметрична система вимірювання пілотажно-навігаційних параметрів. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM* : Науково-техн. конф., м. Київ, 21–23 листоп. 2018 р. Київ, 2018. С. 60.

10. Ключан А., Тимченко О., Суботіна В. Поляриметричний метод визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання. *73-я науково-практична конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів*, м. Одеса, 12 груд. 2018 р. – 14 груд. 2018 р. Одеса, 2018. С. 44–46.

11. Ключан А., Абдулсалам Х. І., Верховецька І. Поляриметричні технології в інтелектуальних робототехнічних комплексах. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018)* : Одинадцята міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 22–23 трав. 2018 р. Київ, 2018. С. 79–80.

12. Klochan A., Al-Ammouri A., Tronko V. Polarimetric Technologies for Determination the Moving Objects Relative Position. *Electronics and Applied Physics* : XV International Conference, Kyiv, 22–26 October 2019. Kyiv, 2019. P. 132–133.

13. Ключан А., Аль-Амморі А. Підвищення безпеки безпілотного транспорту з використанням поляриметричних методів вимірювання. *Сучасний стан та перспективи розвитку IoT* : Всеукр. науково-техн. конф., м. Київ, 3 квіт. 2020 р. Київ, 2020. С. 135–137. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/1_2028_80879534.pdf (дата звернення: 02.10.2023).

14. Ключан А., Верховецька І. Алгоритм визначення взаємного просторового положення двох об'єктів з використанням поляриметричних технологій. *LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу*,

аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, м. Київ, 13–15 трав. 2020 р. Київ, 2020. С. 94. URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWlv/view> (дата звернення: 02.10.2023).

15. Ключан А., Заварзіна В., Гончар П. Місце позиціонування та моніторингу у підвищенні безпеки дорожнього руху. Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт : Міжнар. наук. конф., м. Київ, 29–30 листоп. 2022 р. Київ, 2022. С. 169–172. URL: <https://sites.google.com/ntu.edu.ua/its-esqc-ua/матеріали-конференції> (дата звернення: 02.10.2023).

16. Ключан А., Заварзіна В. Показники оцінки ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті. *LXXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 17–19 трав. 2023 р. Київ, 2023. С. 99-100. URL: <https://drive.google.com/file/d/1ZP8ANZsGcZTzASczTixpto6w2MKfDwt5/view> (дата звернення: 02.10.2023).

17. Поляриметричний спосіб визначення напрямку на джерело поляризованого оптичного випромінювання : пат. 118499 Україна : G01S 17/00, G01S 17/06. № u201702129 ; заявл. 06.03.2017 ; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 4 с.

18. Комп'ютерна програма «Розрахунок просторового положення повітряного судна в процесі посадки за допомогою поляриметричної системи посадки» (“CAPLS”)) : а. с. 96562 Україна / А. Ключан., Аль-Амморі Алі.

19. Ключан А. Математична модель поляриметричної системи посадки повітряних суден. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2020. Vol. 3, no. 2.1. Р. 128–141. URL: <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2020.3.2-1.12> (date of access: 02.10.2023).

20. Ключан А. Математична модель розподілу інтенсивності лінійно поляризованого випромінювання при падінні на діелектричну пластину. *LXXV*

наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету, м. Київ, 15–17 трав. 2019 р. Київ, 2019. С. 94. URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjrjsf/view> (дата звернення: 02.10.2023).

21. Ключан А. Дистанційне визначення взаємного просторового положення елементів транспортної системи з використанням поляриметричних методів вимірювання. *LXXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 12–14 трав. 2021 р. Київ, 2021. С. 68–69. URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view (дата звернення: 02.10.2023).

22. Ключан А. Поляриметричні методи визначення пілотажно-навігаційних параметрів відносного положення об'єктів. *LXXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 02–04 листоп. 2022 р. Київ, 2022. С. 66. URL: <https://drive.google.com/file/d/1yhVlySe-r3EHbJt98UoRZEW94NhxOzk7/view> (дата звернення: 02.10.2023).

23. Ключан А. Поляриметричний метод визначення взаємного просторового положення транспортних засобів. *Сучасний стан та перспективи розвитку IoT: Всеукр. науково-техн. конф.*, м. Київ, 7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 157–159. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2626_10735028.pdf?file=p_2626_10735028.pdf (дата звернення: 02.10.2023).

24. Обґрунтування факторів впливу на безпеку руху / А. Каськів et al. *Дороги і мости*. 2021. Vol. 2021, no. 23. Р. 205–213. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.205> (date of access: 02.10.2023).

25. European regional status report on road safety 2019. <https://apps.who.int>. URL: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/336584/9789289054980-eng.pdf> (date of access: 28.09.2023).

26. Обсяги перевезених вантажів за видами транспорту за 2021 рік. <https://www.ukrstat.gov.ua/>. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/tr/opv/arh_opv_u.htm (дата звернення: 28.09.2023).

27. Кількість перевезених пасажирів за видами транспорту 2021 рік. <https://www.ukrstat.gov.ua/>. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/tr/kpp/arh_kpp_u.htm (дата звернення: 28.09.2023).

28. Аналіз стану безпеки руху, польотів, судноплавства та аварійності на транспорті в Україні за 2015 рік. <https://mtu.gov.ua>. URL: <https://mtu.gov.ua/files/АНАЛІЗ%20-%202015.pdf> (дата звернення: 28.09.2023).

29. Аналіз аварійності на транспорті України за 2016-2017 рр. <https://mtu.gov.ua>. URL: [https://mtu.gov.ua/files/АНАЛІЗ%20за%202017%20рік%20\(кінцева%20редакція\).pdf](https://mtu.gov.ua/files/АНАЛІЗ%20за%202017%20рік%20(кінцева%20редакція).pdf) (дата звернення: 28.09.2023).

30. Аналіз аварійності на транспорті України за 2017-2018 рр. <https://mtu.gov.ua>. URL: <https://mtu.gov.ua/files/bezpeka/Стан%20аварійності%20на%20транспорті%20за%202017-2018%20рр.pdf> (дата звернення: 28.09.2023).

31. Аналіз аварійності на транспорті України за 2018-2019 рр. <https://mtu.gov.ua>. URL: <https://mtu.gov.ua/files/bezpeka/Стан%20аварійності%20на%20транспорті%20за%202019%20рік.pdf> (дата звернення: 28.09.2023).

32. Аналіз аварійності на транспорті України за 2020 рік. <https://mtu.gov.ua>. URL: mtu.gov.ua/files/bezpeka/Аналіз%20аварійності%20на%20транспорті%20України%20за%202020%20рік.pdf (дата звернення: 28.09.2023).

33. Аналіз стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні за 2022 рік. <https://dsbt.gov.ua>. URL: https://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2023/analiz_avariynosti_2022_1.pdf (дата звернення: 01.10.2023).

34. Аналіз стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні за 2021 рік. <https://dsbt.gov.ua>. URL: https://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2022/analiz_avariynosti_2021.pdf (дата звернення: 01.10.2023).

35. Аналіз стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні за 2020 рік. <https://dsbt.gov.ua>. URL: https://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2021/analiz_avariynosti_2020.pdf (дата звернення: 01.10.2023).

36. Аналіз стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні за 2019 рік. <https://dsbt.gov.ua>. URL: https://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2020/analiz_avariynosti_2019_rik.pdf (дата звернення: 01.10.2023).

37. Аналіз стану безпеки руху та аварійності на автомобільному, міському електричному та залізничному транспорті в Україні за 2018 рік. <https://dsbt.gov.ua>. URL: https://dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2019/Analiz_avariynosti_2018.pdf (дата звернення: 01.10.2023).

38. Стратегія підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2024 року. <https://zakon.rada.gov.ua> URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1360-2020-%D1%80#Text> (дата звернення: 03.03.2021).

39. Nazif-Munoz J. I., Nikolic N. The effectiveness of child restraint and seat belt legislation in reducing child injuries: The case of Serbia. *Traffic Injury Prevention*. 2018. Vol. 19, sup1. P. S7–S14. URL: <https://doi.org/10.1080/15389588.2017.1387254> (date of access: 02.09.2023).

40. Ackaah W., Apuseyine B. A., Afukaar F. K. Road traffic crashes at night-time: characteristics and risk factors. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*. 2020. Vol. 27, no. 3. P. 392–399. URL: <https://doi.org/10.1080/17457300.2020.1785508> (date of access: 12.09.2023).
41. Dalai B., Landge V. S. Risky zones in urban area: an analysis using fault tree and risk matrix method. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2021. Vol. 7, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00696-6> (date of access: 02.09.2023).
42. Danchuk V., Comi A., Kunytska O. Effective Functioning of Intelligent Transport Systems as One of the Main Factors for Supporting Sustainable Urban Development. *Smart Technologies in Urban Engineering*. Cham, 2022. P. 729–739. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_65 (date of access: 13.09.2023).
43. The impact of road alignment characteristics on different types of traffic accidents / Z. Liu et al. *Journal of Transportation Safety & Security*. 2019. Vol. 12, no. 5. P. 697–726. URL: <https://doi.org/10.1080/19439962.2018.1538173> (date of access: 14.09.2023).
44. Wang D., Huang Y., Cai Z. A two-phase clustering approach for traffic accident black spots identification: integrated GIS-based processing and HDBSCAN model. *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*. 2023. P. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1080/17457300.2022.2164309> (date of access: 13.09.2023).
45. Tan H., Zhao F., Liu Z. Impact of adaptive cruise control (ACC) system on fatality and injury reduction in China. *Traffic Injury Prevention*. 2021. Vol. 22, no. 4. P. 307–312. URL: <https://doi.org/10.1080/15389588.2021.1896715> (date of access: 12.09.2023).
46. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. Identifying Optimal Location and Necessary Quantity of Warehouses in Logistic System Using a Radiation Therapy Method. *Transport*. 2019. Vol. 34, no. 3. P. 175–186. URL: <https://doi.org/10.3846/transport.2019.8546> (date of access: 12.09.2023).
47. Projecting of Urban Transport Infrastructure Considering the Human Factor / Y. Davidich et al. *Communications - Scientific letters of the University of*

Zilina. 2020. Vol. 22, no. 1. P. 84–94. URL: <https://doi.org/10.26552/com.c.2020.1.84-94> (date of access: 11.10.2023).

48. Improving the Safety of Urban Freight Deliveries by Organization of the Transportation Process Considering Driver's State / A. Galkin et al. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 39. P. 54–63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.007> (date of access: 13.10.2023).

49. Improving of Urban Public Transportation Quality via Operator Schedule Optimization / A. Galkin et al. *Journal of Urban and Environmental Engineering*. 2019. P. 23–33. URL: <https://doi.org/10.4090/juee.2019.v13n1.23-33> (date of access: 03.10.2023).

50. Nordfjærn T., Jørgensen S. H., Rundmo T. Safety attitudes, behaviour, anxiety and perceived control among professional and non-professional drivers. *Journal of Risk Research*. 2012. Vol. 15, no. 8. P. 875–896. URL: <https://doi.org/10.1080/13669877.2012.670132> (date of access: 05.10.2023).

51. Developing a National Integrated Road Traffic Injury Registry System: A Conceptual Model for a Multidisciplinary Setting / H. Sadeghi-Bazargani et al. *Journal of Multidisciplinary Healthcare*. 2020. Volume 13. P. 983–996. URL: <https://doi.org/10.2147/jmdh.s262555> (date of access: 03.10.2023).

52. Кисельов В., Доля О. Ризик функціонування міських пасажирських транспортних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. Т. 2, № 2. С. 160–163. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-2/27> (дата звернення: 10.10.2023).

53. Кисельов В., Доля В., Доля О. Особливості методів управління проектами пасажирських транспортних систем у міському середовищі. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. Т. 2, № 3. С. 98–101. URL: <https://doi.org/10.32838/tnu-2663-5941/2020.3-2/17> (дата звернення: 09.10.2023).

54. Шапенко Є., Гульчак О., Білановська Л. Дослідження методів оцінки напруженості роботи водіїв на міських автобусних маршрутах. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія:*

технічні науки. 2020. № 5. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.5/40> (дата звернення: 15.09.2023).

55. Поліщук В., Кунда Н. Інформаційне забезпечення учасників дорожнього руху : навч. посіб. Київ : ІЗМН, 1998. 132 с.

56. Development of Vehicle Speed Forecasting Method for Intelligent Highway Transport System / G. Prokudin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4, no. 3 (100). P. 6–14. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174255> (date of access: 13.10.2023).

57. Васильєв В. Радіонавігаційні системи : підручник. Київ : Вид-во «Політехніка», 2023. 338 с.

58. Мухіна М. Методологія комплексної кореляційно-екстремальної навігації безпілотних авіаційних систем в умовах ризику : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.13. Київ, 2016. 309 с.

59. Галіцин В., Ус Р. Моніторинг та аудит інформаційних технологій у системі управління організації. *Моделювання та інформаційні системи в економіці*. 2012. № 86. С. 256–262.

60. Мигаль В. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів : монографія. Х.: Майдан, 2018. 262 с.

61. Інерціально-супутникові навігаційні системи : навч. посіб. / М. Філяшкін та ін. Київ : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. 272 с.

62. Бабак В., Конін В., Харченко В. Супутникова радіонавігація. К.: Техніка, 2004. 328 с.

63. Bowler A. L., Pound M. P., Watson N. J. A review of ultrasonic sensing and machine learning methods to monitor industrial processes. *Ultrasonics*. 2022. Vol. 124. P. 106776. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2022.106776> (date of access: 16.10.2023).

64. Immoreev I. I., Fedotov D. Ultra Wideband Radar Systems: Advantages and Disadvantages. *2002 IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies*, Baltimore, MD, USA. Baltimore, 2002. URL: <https://doi.org/10.1109/uwbst.2002.1006348> (date of access: 19.10.2023).

65. Positioning and perception in LIDAR point clouds / C. Benedek et al. *Digital Signal Processing*. 2021. P. 103193. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103193> (date of access: 19.10.2023).
66. Dilek E., Dener M. Computer Vision Applications in Intelligent Transportation Systems: A Survey. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 6. P. 2938. URL: <https://doi.org/10.3390/s23062938> (date of access: 18.10.2023).
67. Гульчак О., Ткаченко І., Шапенко Є. Використання методів системного аналізу при дослідженні проблем інтелектуальних транспортних систем. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Т. 1, № 51. С. 134–140. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-134-140> (дата звернення: 15.09.2023).
68. Моделювання розподілу транспортних потоків на мережі автомобільних доріг / В. Поліщук та ін. *Дороги і мости*. 2023. Т. 2023, № 27. С. 253–266. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.27.253> (дата звернення: 22.09.2023).
69. Лановий О., Кисельов В., Виговська І. Новітня оцінка умов руху транспортних потоків автомобільними дорогами «Тріада дорожнього руху». *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2021. Т. 1, № 48. С. 166–177. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-166-177> (дата звернення: 20.08.2023).
70. Інтелектуальні транспортні системи в Україні / А. Р. Гайков та ін. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування*. 2014. Т. 9, № 1052. С. 106–112. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/d4801948-f065-4dc7-b00d-83aeeb1c225b/content> (дата звернення: 20.10.2023).
71. Інтелектуальні транспортні системи як один з головних факторів реалізації концепції Smart Logistics / В. Данчук та ін. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2023. Т. 1, № 55. С. 89–97. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2023-1-55-089-097> (дата звернення: 13.09.2023).

72. Intelligent Decision Support System for Modeling Transport and Passenger Flows in Human-Centric Urban Transport Systems / N. Davidich et al. *Energies*. 2022. Vol. 15, no. 7. P. 2495. URL: <https://doi.org/10.3390/en15072495> (date of access: 05.10.2023).

73. Поліщук В., Янішевський С., Гуменюк О. Організація перехоплюючих автостоянок (система паркування "Park&Ride") в м. Києві. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2020. Т. 1, № 46. С. 264–273. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2020-1-46-264-273> (дата звернення: 13.09.2023).

74. Поліщук В., Нагребельна Л. Проблеми сучасного міста. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2019. Т. 1, № 43. С. 136–142. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2019-1-43-136-142> (дата звернення: 11.10.2023).

75. Simulation of Processes for Optimizing the Delivery Routes of Goods on Urban Road Networks by a Synergetic Approach / V. Danchuk et al. *Lecture Notes in Networks and Systems*. Cham, 2021. P. 175–196. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71771-1_12 (date of access: 13.09.2023).

76. Данчук В., Сватко В., Богданець Є. Метод оптимізації маршруту вантажних перевезень в містах з використанням інформаційних технологій на основі модифікованого мурашиного алгоритму. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Т. 3, № 53. С. 127–137. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-3-53-127-137> (дата звернення: 13.09.2023).

77. Shaping the Optimal Technology for Servicing the Long-Distance Deliveries of Packaged Cargo by Road Transport / V. Naumov et al. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 12. P. 7283. URL: <https://doi.org/10.3390/su14127283> (date of access: 22.10.2023).

78. Application of information technologies for the optimization of itinerary when delivering cargo by automobile transport / G. Prokudin et al. *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, no. 3 (92). P. 51–59. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.128907> (date of access: 10.10.2023).

79. Structural Optimization of Multimodal Routes for Cargo Delivery / I. Taran et al. *Archives of Transport*. 2023. Vol. 67, no. 3. P. 49–70. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.7076> (date of access: 12.10.2023).

80. Прокудін Г., Ремех І. Теоретичні основи організації вантажних перевезень на транспортних мережах. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Т. 3, № 53. С. 312–321. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-3-53-312-321> (дата звернення: 13.09.2023).

81. Логістичний підхід до організації незбалансованих вантажних перевезень на транспортних мережах / Г. Прокудін та ін. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Т. 1, № 51. С. 323–331. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-323-331> (дата звернення: 13.09.2023).

82. Організація незбалансованих вантажних перевезень на транспортних мережах / В. Кисельов та ін. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 2, № 1. С. 100–106. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-2/17> (дата звернення: 11.09.2023).

83. Ширяєва С., Дяченко І. Застосування елементів інтелектуальних транспортних систем у перевезеннях вантажів. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Т. 1, № 51. С. 430–437. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-430-437> (дата звернення: 22.10.2023).

84. Бакуліч О., Гребельник М., Самойленко Є. Управління екологічною безпекою мегаполісу. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Т. 1, № 51. С. 20–27. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-020-027> (дата звернення: 10.09.2023).

85. Бакуліч О., Самойленко Є. Динаміка рівня забруднення урбанізованих територій. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2021. Т. 1, № 48. С. 12–19. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2021-1-48-012-019> (дата звернення: 10.09.2023).

86. Optimization of vehicle speed forecasting horizon on the intercity highway / M. Olishevych et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3, no. 3 (105). P. 57–68. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.204273> (date of access: 12.10.2023).

87. Інформаційний підхід до визначення маршрутів руху водіями транспортних засобів у містах. Наука та прогрес транспорту. / Ю. Давідіч та ін. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2020. № 4(88). С. 51–60. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2020/203456> (дата звернення: 10.10.2023).

88. Інформаційний підхід щодо визначення закономірностей вибору водіями маршрутів руху. / Ю. Давідіч та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2020. Т. 2, № 15. С. 11–19. URL: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i15.387> (дата звернення: 10.10.2023).

89. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. Building Optimal Routes for Cargo Delivery in Megacities. *Transport and Telecommunication Journal*. 2019. Vol. 20, no. 2. P. 142–152. URL: <https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0013> (date of access: 13.09.2023).

90. V2V and V2I Communications for Traffic Safety and CO2 Emission Reduction: A Performance Evaluation / F. Outay et al. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 151. P. 353–360. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.049> (date of access: 12.10.2023).

91. Савенков С. М. Обернена задача поляриметриї на основі матричного методу Мюллера : дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.04.05. Київ, 2013. 376 с.

92. Фізичні основи поляриметриї високої інформативної здатності : монографія / Г. Бекетов та ін. ; ред. Б. Сердега. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 252 с.

93. Лінчевський І., Пономаренко Л., Чурсанова М. Модуляційна поляриметрія : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 116 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/55605/1/Poliarymetriia.pdf> (дата звернення: 06.09.2023).
94. Сердега Б. Модуляційна поляриметрія : монографія. Київ : Наук. Думка, 2011. 238 с.
95. Савенков С., Клімов О., Оберемок Є. Стокс-поляриметр на рідкокристалічних комірках: аналіз похибок. *Вісник Київського університету. Серія: фізико-математичні науки*. 2009. № 1. С. 215–220.
96. Скрипець А., Тронько В., Асанов М. Спосіб реєстрації кута обертання площини поляризації світлового променя з використанням оптично прозорих феримагнітних кристалів. *Український фізичний журнал*. 2012. Т. 57, № 10. С. 993–999. URL: <http://archive.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/57/10/571001pu.pdf> (дата звернення: 15.08.2023).
97. Прецизійний пристрій фіксації зміни температури на феримагнітному кристалі / А. Скрипець та ін. *Автошляховик України, Вісник ТАУ*. 2010. № 13. С. 106–108.
98. Pohl R. *Optic und atomphysik*. Berlin – Gottingen – Heidelberg : Springer-Verlag, 1963.
99. Azzam R. M. A., Bashara N. M. *Ellipsometry and polarized light*. New York : North-Holland Pub. Co. Elsevier North-Holland, 1977.
100. Aviation Navigation System based on Polarimetric Technology / A. E. Klochan et al. *Electronics and Control Systems*. 2016. Vol. 3, no. 49. P. 26–32. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.49.11233> (date of access: 08.09.2023).
101. Dual-Channel Polarimetric Device For Fixed-Wing UAV Attitude Determination During Landing Approach / A. E. Klochan et al. *Electronics and Control Systems*. 2015. Vol. 4, no. 46. P. 31–39. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.46.9927> (date of access: 08.09.2023).

102. Ключан А. Фізичні основи поляриметричної системи посадки. *Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті*. 2016. № 4. С. 77–89.
103. Polarimetric Unmanned Aerial Vehicle Landing System / A. E. Klochan et al. *Electronics and Control Systems*. 2017. Vol. 4, no. 54. P. 50–58. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.54.12316> (date of access: 08.09.2023).
104. Local Polarimetric System for Measuring Aircraft's Navigation and Piloting Parameters / A. E. Klochan et al. *Electronics and Control Systems*. 2018. Vol. 3, no. 57. P. 107–114. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.57.13246> (date of access: 13.09.2023).
105. Al-Ammori A., Dmytrychenko A. N., Al-Ammori H. A. Probabilistic-Mathematical Models for Formation of Information Flows in Aircraft Fire Alarm System. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2019. Vol. 51, no. 7. P. 67–80. URL: <https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v51.i7.60> (date of access: 21.09.2023).
106. Ensuring Reliability of Control Data in Engineering Systems / A. Dychko et al. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. Vol. 56, no. 6. P. 57–69. URL: <https://doi.org/10.2478/lpts-2019-0035> (date of access: 05.10.2023).
107. Development of a mathematical model of reliable structures of information-control systems / A. Al-Ammouri et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, no. 9(119). P. 68–78. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265953> (date of access: 05.10.2023).
108. Аль-Амморі А., Цуканов О. Інформаційна технологія дослідження ймовірнісної моделі надійності складних систем. *Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті*. 2016. № 4. С. 3–16.
109. Дмитрієв М., Аль-Амморі А., Цуканов І. Реалізація стохастичної моделі надійності систем засобами інформаційних технологій. *Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті*. 2015. № 3. С. 16–25.
110. Al-Ammouri A., Dyachenko P., Degtiarova A. Development of a mathematical model of information serial redundancy of management information

systems of the aircraft fire alarm. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2, no. 9 (86). P. 4–10. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96296> (date of access: 19.09.2023).

111. Estimation the Information Reservation Effectiveness of Unmanned Aerial Vehicle Information-Control Systems / A. Al-Ammouri et al. *Electronics and Control Systems*. 2017. Vol. 4, no. 54. P. 18–26. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.54.12293> (date of access: 07.09.2023).

112. Development of structures of the aircraft fire alarm system by means of nested modules / A. Al-Ammouri et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, no. 9 (98). P. 14–23. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.163022> (date of access: 22.09.2023).

ДОДАТОК А

Список основних праць здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Монографії:

1. Аль-Амморі А., Ключан А. Застосування поляриметричного методу вимірювання для визначення взаємного просторового положення транспортних засобів. *Актуальні напрямки розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки* : монографія / ред.: В. Пінчук, Г. Прокудін. Дніпро, 2021. С. 219–233. ISBN 978-617-518-399-1. URL: <https://drive.google.com/file/d/12zFHpMg33GRegRJS5woGi8FSPOVQT5tI/view> (дата звернення: 19.09.2023).

Публікації у наукових періодичних виданнях, які включені до наукометричних баз Scopus або Web of Science:

2. Aviation Navigation with Use of Polarimetric Technologies / A. Klochan et al. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*. 2017. Vol. 2, no. 3. P. 67–72. URL: <https://doi.org/10.25046/aj020310> (date of access: 01.10.2023).

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

3. Probabilistic models reliability of information and control systems / A. Al-Ammouri et al. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2018. Vol. 3, no. 1. P. 60–69. URL: <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2018.3-1.6> (date of access: 01.10.2023).

Публікації в наукових фахових виданнях України:

4. Methods for improving the data reliability in information and control systems / A. Al-Ammouri et al. *Electronics and control systems*. 2018. Vol. 4, no. 58. P. 107–114. URL: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.58.13506> (date of access: 01.10.2023).

5. Ключан А. Математична модель поляриметричної системи посадки повітряних суден. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2020. Vol.

3, no. 2.1. P. 128–141. URL: <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2020.3.2-1.12> (date of access: 02.10.2023).

6. Малиш М., Куліш М., Ключан А. Віддалене керування транспортом. *Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки"*. 2022. Т. 1, № 51. С. 275–280. URL: <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-275-280> (дата звернення: 02.10.2023).

Наукові праці апробаційного характеру, які включені до наукометричних баз Scopus або Web of Science

7. Klochan A., Al-Ammouri A., Dmytrychenko A. Polarimetric Technologies for Object's Attitude Sensing. *Electronics and Nanotechnology (ELNANO): Proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference*, Kyiv, 16–18 April 2019. Kyiv, 2019. P. 712–717.

8. Fundamentals of the Polarimetric UAV Landing System / A. Klochan et al. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD): Proceedings of 2019 IEEE 5th International Conference*, Kyiv, 22–24 October 2019. Kyiv, 2019. P. 712–717. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8943830> (date of access: 02.10.2023).

Наукові праці апробаційного характеру

9. Способи підвищення достовірності інформації в системах управління/ А. Аль-Амморі та ін. *Інформаційні технології та взаємодії* : V МНПК, м. Київ, 20–21 листоп. 2018 р. Київ, 2018. С. 25–26.

10. Аль-Амморі А., Ключан А. Поляриметрична система вимірювання пілотажно-навігаційних параметрів. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM* : Науково-техн. конф., м. Київ, 21–23 листоп. 2018 р. Київ, 2018. С. 60.

11. Ключан А., Тимченко О., Суботіна В. Поляриметричний метод визначення напрямку на джерело поляризованого випромінювання. *73-я науково-практична конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів*, м. Одеса, 12 груд. 2018 р. – 14 груд. 2018 р. Одеса, 2018. С. 44–46.

12. Ключан А., Абдулсалам Х. І., Верховецька І. Поляриметричні технології в інтелектуальних робототехнічних комплексах. *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018)* : Одинадцята міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 22–23 трав. 2018 р. Київ, 2018. С. 79–80.

13. Ключан А. Математична модель розподілу інтенсивності лінійно поляризованого випромінювання при падінні на діелектричну пластину. *LXXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 15–17 трав. 2019 р. Київ, 2019. С. 94. URL: <https://drive.google.com/file/d/16Vrd9t8qiaZrTaTmPzz5lqtihzjtrjsf/view> (дата звернення: 02.10.2023).

14. Klochan A., Al-Ammouri A., Tronko V. Polarimetric Technologies for Determination the Moving Objects Relative Position. *Electronics and Applied Physics* : XV International Conference, Kyiv, 22–26 October 2019. Kyiv, 2019. P. 132–133.

15. Ключан А., Аль-Амморі А. Підвищення безпеки безпілотного транспорту з використанням поляриметричних методів вимірювання. *Сучасний стан та перспективи розвитку IoT* : Всеукр. науково-техн. конф., м. Київ, 3 квіт. 2020 р. Київ, 2020. С. 135–137. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/l_2028_80879534.pdf (дата звернення: 02.10.2023).

16. Ключан А., Верховецька І. Алгоритм визначення взаємного просторового положення двох об'єктів з використанням поляриметричних технологій. *LXXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 13–15 трав. 2020 р. Київ, 2020. С. 94. URL: <https://drive.google.com/file/d/1Hlm8obLCicsOsLCs-eL7N7VIKdi7PWIV/view> (дата звернення: 02.10.2023).

17. Ключан А. Дистанційне визначення взаємного просторового положення елементів транспортної системи з використанням поляриметричних методів вимірювання. *LXXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних*

підрозділів університету, м. Київ, 12–14 трав. 2021 р. Київ, 2021. С. 68-69. URL: https://drive.google.com/file/d/1ueDfCu-mBO1oTk1-nKHgyDCsnBy_sab5/view (дата звернення: 02.10.2023).

18. Ключан А. Поляриметричні методи визначення пілотажно-навігаційних параметрів відносного положення об'єктів. *LXXVIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 02–04 листоп. 2022 р. Київ, 2022. С. 66. URL: <https://drive.google.com/file/d/1yhVlySe-r3EHbJt98UoRZEW94NhXOzk7/view> (дата звернення: 02.10.2023).

19. Ключан А., Заварзіна В., Гончар П. Місце позиціонування та моніторингу у підвищенні безпеки дорожнього руху. Інтелектуальні Транспортні Системи: Екологія, Безпека, Якість, Комфорт : Міжнар. наук. конф., м. Київ, 29–30 листоп. 2022 р. Київ, 2022. С. 169–172. URL: <https://sites.google.com/ntu.edu.ua/its-esqc-ua/матеріали-конференції> (дата звернення: 02.10.2023).

20. Ключан А. Поляриметричний метод визначення взаємного просторового положення транспортних засобів. *Сучасний стан та перспективи розвитку IoT* : Всеукр. науково-техн. конф., м. Київ, 7 квіт. 2023 р. Київ, 2023. С. 157–159. URL: https://duikt.edu.ua/uploads/p_2626_10735028.pdf?file=p_2626_10735028.pdf (дата звернення: 02.10.2023).

21. Ключан А., Заварзіна В. Показники оцінки ефективності позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті. *LXXIX наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету*, м. Київ, 17–19 трав. 2023 р. Київ, 2023. С. 99-100. URL: <https://drive.google.com/file/d/1ZP8ANZsGcZTzASczTixpto6w2MKfDwt5/view> (дата звернення: 02.10.2023).

Патенти та свідоцтва авторського права

22. Поляриметричний спосіб визначення напрямку на джерело поляризованого оптичного випромінювання : пат. 118499 Україна : G01S 17/00, G01S 17/06. № u201702129 ; заявл. 06.03.2017 ; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. 4 с. URL: <https://uapatents.com/6-118499-polyarimetrichnijsposib-viznachennya-napryamku-na-dzherelo-polyarizovanogo-optichnogo-viprominyuvannya.html> (дата звернення: 12.10.2023).

23. Комп'ютерна програма «Розрахунок просторового положення повітряного судна в процесі посадки за допомогою поляриметричної системи посадки» (“CAPLS”)) : а. с. 96562 Україна / А. Клочан., Аль-Амморі Алі.

ДОДАТОК Б

Патент на корисну модель та свідоцтво авторського права на комп'ютерну програму



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 96562

Комп'ютерна програма "Розрахунок просторового положення повітряного судна в процесі посадки за допомогою поліриметричної системи посадки" ("CAPLS")

(вид, назва службового твору)

Автор(и) Клочан Арсен Євгенійович, Аль-Амморі Алі

(повне ім'я, позовнім (за наявності))

Авторські майнові права належать Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, 01010

(повне ім'я фізичної та/або повне офіційне найменування юридичної особи, адресою)

Дата реєстрації 06.03.2020

Заступник Міністра розвитку економіки,
торгівлі та сільського господарства
України Д. О. Романович




ДОДАТОК В

Акти та довідки про впровадження результатів дисертаційної роботи

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з навчальної роботи
Національного транспортного університетупроф. Харута В.С.
«05» вересня 2023 р.

АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів
дисертаційної роботи здобувача наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 275 – транспортні технології
(на автомобільному транспорті)“Поляриметричний метод позиціонування та моніторингу на автомобільному
транспорті”

Клочана Арсена Євгенійовича

Починаючи з 2018-2019 навчального року по теперішній час в навчальному процесі кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету використовуються науково-методичні матеріали і практичні рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології» Клочана А. Є.

Так при проведенні навчального процесу з студентами спеціальностей 131 “Прикладна механіка”, 132 “Матеріалознавство”, 152 “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка”, 192 “Будівництво та цивільна інженерія” та 274 “Автомобільний транспорт” з дисципліни «Фізика», на кафедрі інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки розглядаються теоретичні і прикладні аспекти застосування поляриметричного методу вимірювання для визначення взаємного положення об’єктів, зокрема положення автотранспортних засобів один відносно одного, шляхом застосування поляриметричного способу визначення напрямку на джерело лінійно поляризованого випромінювання.

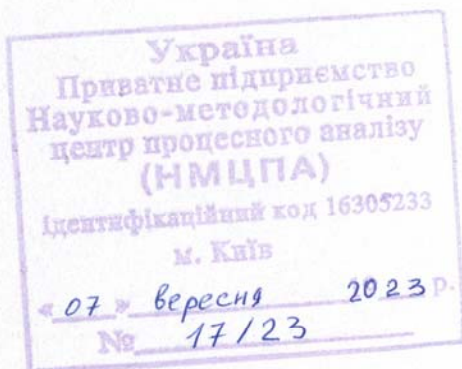
Також, при проведенні навчального процесу з студентами спеціальностей 133 “Галузеве машинобудування” і 142 “Енергетичне машинобудування” з дисципліни «Автоматизація виробничих процесів і робототехніка» на кафедрі інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки розглядаються теоретичні і прикладні аспекти питання застосування поляриметричного методу вимірювання для визначення позиційного та орієнтаційного положення елементів робототехнічних систем.

Включення матеріалів і результатів дисертаційної роботи Клочана А.Є., які мають певну новизну і практичну цінність у навчальний процес кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету сприяють його поліпшенню і подальшому удосконаленню.

Завідуючий кафедри інформаційно-аналітичної
діяльності та інформаційної безпеки
д.т.н., професор



/Аль-Амморі Алі/



АКТ

щодо впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 275 «Транспортні технології»
Клочана Арсена Євгенійовича
на тему «Поляриметричний метод позиціонування та моніторингу на автомобільному транспорті»

Даний акт підтверджує, що отримані автором дисертаційної роботи Клочаном А. Є. наукові результати, а саме поляриметричні моделі визначення лінійних, кутових та лінійно-кутових параметрів відносного положення об'єктів, а також спосіб оцінки достовірності інформації систем паралельного інформаційного резервування з використанням чотирьох-параметричного графу станів інформаційної системи були впроваджені в науково-дослідну діяльність Науково-методологічного центру процесного аналізу.

Впровадження зазначених результатів дозволило: вдосконалити підходи до визначення відносного просторового положення об'єктів, зокрема транспортних засобів один відносно одного та транспортного засобу відносно елементів транспортної інфраструктури.

Впровадження зазначених результатів дозволяє вдосконалити процедуру визначення відхилення транспортного засобу від оптимальної траєкторії руху, а також удосконалити процедуру визначення ймовірності коректного визначення наявності та відсутності контрольованої події.

Президент Науково-методологічного центру процесного аналізу (НМЦПА)



Хохлов Є.М.

Довідка

впровадження наукових розробок аспіранта Національного транспортного університету кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Клочана Арсена Євгенійовича

Дана довідка підтверджує, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри інформаційно-аналітичної діяльності та інформаційної безпеки Національного транспортного університету Клочана Арсена Євгенійовича були впроваджені в Центрі безпеки дорожнього руху ДП «ДерждорНДІ» при виконанні науково-дослідної роботи.

За результатами наукової роботи були запропоновані критерії та показники оцінки ефективності моніторингу дорожньо-транспортних пригод з метою прогнозування та попередження їх виникнення.

Начальник Центру

безпеки дорожнього руху

ДП «ДерждорНДІ», Ph.d

 Людмила НАГРЕБЕЛЬНА

Людмила Нагребельна
центру безпеки дорожнього руху
Сл. інспектор з кадрів
Мельченко А.П.

