

Національний авіаційний університет  
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Авер'янова Юлія Анатоліївна**

УДК 656.7:551:621.3.095

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**Методологічні засади метеорологічного забезпечення  
аеронавігації з використанням поляриметричних засобів  
дистанційного зондування**

05. 22. 13 – Навігація та управління рухом

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

Ю.А. Авер'янова

Науковий консультант - Яновський Фелікс Йосипович, доктор технічних наук,  
професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

Київ 2017

## АНОТАЦІЯ

*Авер'янова Ю.А.* Методологічні засади метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням поляриметричних засобів дистанційного зондування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю «навігація та управління рухом» (05.22.13), Національний авіаційний університет, МОН України. Київ, 2017.

Дисертація спрямована на вирішення актуальної наукової проблеми створення методології метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням засобів оперативного виявлення та розповсюдження інформації. Проблема вирішена за рахунок використання в рамках розробленої концепції удосконалення метеорологічного забезпечення міжнародної аеронавігації з використанням мережі мобільних платформ для розміщення систем одержання оперативної метеорологічної інформації з різних шарів атмосфери на базі літаків, що виконують регулярні та нерегулярні рейси, розробки нових поляриметричних радіолокаційних підходів та методів дистанційного одержання інформації про небезпечні метеорологічні явища, а також розробки структури комплексної глобальної інтерактивної мережі одержання та поширення метеорологічної інформації, що відповідає принципам глобальності, доступності (включаючи доступність за запитом), системності, захищеності, персоніфікованості та сумісності систем. Ефект від використання нових методів і підходів посилюється шляхом урахування поляризаційних характеристик відбитої електромагнітної хвилі для одержання більш детальної та надійної інформації про метеорологічні явища та процеси.

В роботі одержало подальшого розвитку концепція метеорологічного забезпечення міжнародної аеронавігації, що за рахунок теоретично обґрунтованих можливостей використання поляриметричних засобів для одержання інформації про динамічні атмосферні явища, що є небезпечними для навігації повітряних суден, дозволяє:

1.1. Реалізувати оперативне одержання більш детальної інформації про зони небезпечних метеорологічних явищ за маршрутом польоту з борту ПС.

1.2. Розширити зону діяльності служб спостереження за рахунок використання ПС у якості мобільного датчика для одержання оперативної інформації.

1.3. Реалізувати автоматичну передачу інформації про небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту всім учасникам повітряного руху та авіаційному диспетчеру.

1.4. Збільшити ситуативну обізнаність одночасно всіх учасників повітряного руху та авіаційного диспетчера.

1.5. Підвищити безпеку і покращити економічні показники польоту при навігації в складних метеорологічних умовах.

1.6. Сприяти реалізації новітніх авіаційних концепцій (Free Flight та CNS ATM) на якісному рівні з урахуванням вимог безпеки, регулярності та економічності польотів.

В рамках запропонованої концепції уперше сформульовано та запропоновано підхід щодо дистанційного одержання інформації про небезпечні динамічні атмосферні явища, який на відміну від існуючих використовує поляризаційні характеристик відбитої електромагнітної хвилі, що дозволить оперативно одержувати більш повну та якісну інформацію про характер та інтенсивність небезпечного явища. Досліджено можливості поляриметричного методу щодо оцінки інтенсивності опадів, вимірювання розподілу крапель за розміром, оцінки динамічних атмосферних (турбулентності, вітру) явищ тощо.

В роботі обґрунтовано та введено поняття поляризаційного спектру радіолокаційного сигналу відбитого від метеорологічного утворення, оцінка якого дозволяє запобігти часовому та просторовому усередненню радіолокаційної інформації та фіксувати «миттєві» зміни в атмосфері, що є важливим для виявлення швидкоплинних динамічних атмосферних явищ. Розроблено поляриметричний метод та алгоритм дистанційного оцінювання

поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів за допомогою розробленої та запатентованої системи з багатопроменевим прийманням. Досліджено можливості поляриметричного методу щодо оцінки інтенсивності опадів, вимірювання розподілу крапель за розміром, оцінки динамічних атмосферних (турбулентності, вітру) явищ тощо.

В роботі уперше фізично та математично обґрунтовано зв'язок зміни поляризації при відбитті електромагнітної хвилі від метеоутворень з динамічними характеристиками атмосфери в хмарах та опадах та методом математичного моделювання продемонстровано зв'язок поляризаційних характеристик електромагнітної хвилі з турбулентністю, вітром та розмірами крапель. Одержано математичні вирази для розрахунку енергії, що приймається антенами, які налаштовані на сигнали з різними кутами поляризації для математичного обґрунтування зв'язку зміни поляризації при відбитті електромагнітної хвилі від метеоутворень з динамічними характеристиками атмосфери в хмарах та опадах. Результати проведеного математичного та комп'ютерного моделювання запропонованого методу дистанційної оцінки динамічних явищ (турбулентності та вітру) за допомогою поляризаційного спектра підтвердили можливість виключення внеску вібраційної складової в відбитий сигнал, або навпаки, можливість оцінити тільки внесок вібраційної компоненти за рахунок підбору кута поляризації приймальної антени радіолокатора. Результати моделювання продемонстрували зв'язок поляризаційних характеристик електромагнітної хвилі з турбулентністю, вітром та розмірами крапель та довели працездатність запропонованого методу дистанційної оцінки швидкості вітру за допомогою поляризаційних характеристик відбитого радіолокаційного сигналу.

В роботі уперше розроблено поляриметричний енергетичний метод дистанційного одержання інформації про атмосферну турбулентність, що на відміну від існуючих здійснює сепарацію зміни НЧ обвідної, яка викликана атмосферою турбулентністю від інших факторів, що впливають на процес зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів та базується на

оцінюванні деполаризації відбитої електромагнітної хвилі за характером зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів, які знаходяться під впливом динамічних атмосферних процесів та дозволяє підвищити інформативність сучасних доплерівських методів одержання інформації про небезпечні для польотів атмосферні явища. Проведене моделювання і отримана статистична оцінка інформативного параметру – дисперсії зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів, запропоновано та досліджено статистичний алгоритм виявлення та класифікації турбулентності за ознакою її інтенсивності. Оцінка сумарної похибки за даним методом показала, що її ймовірність має порядок 0.1, а це відповідає результатам, які були одержані іншими методами, зокрема, стандартним методом виявлення і класифікації турбулентності за шириною доплерівського спектру відбитої від гідрометеорів електромагнітної хвилі.

В роботі уперше розроблено поляриметричний метод дистанційного визначення швидкості вітру за моментом роздвоєння крапель, що на відміну від інших методів базується на оцінюванні поляризаційного спектра відбитого від метеорологічної цілі радіолокаційного сигналу та дозволяє підвищити інформативність та зменшити обмеження сучасних доплерівських методів одержання інформації про динамічні атмосферні явища. Проаналізовано випадки роздвоєння крапель за різних процесів в атмосфері та запропоновані шляхи вирішення протиріччя в інтерпретації радіолокаційної інформації при визначення модуля швидкості вітру.

В цілому результати моделювання показали можливість та доцільність використання поляризаційних методів не тільки для аналізу мікроструктури хмар та опадів, що є відомим на наш час, а також і для визначення характеристик атмосферних явищ пов'язаних з вітром, зокрема виявлення зон небезпечної турбулентності та визначення абсолютного значення швидкості вітру, що в комбінації з доплерівськими методами дозволить оперативно визначати повний вітер та удосконалити системи виявлення атмосферної турбулентності.

В роботі удосконалено процес метеорологічного забезпечення аеронавігації, що на відміну від існуючого використовує ПС у якості динамічної платформи для перспективних систем дистанційного одержання оперативної інформації про небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту та можливістю оперативного цільового доступу до інформації. Розроблено та запатентовано комплексну глобальну інтерактивну мережу одержання, розподілу і обміну метеорологічної інформації та рекомендації щодо модернізації метеорологічного забезпечення аеронавігації. Мережа відповідає принципам глобальності, доступності (включаючи доступність за запитом), системності, захищеності, персоніфікованості та сумісності систем, що є вимогою сучасної авіації, а також програм та концепцій ICAO і EUROCONTROL, зокрема SESAR, NexGen, Free Flight, SWIM. Обробка даних, що одержуються за допомогою запропонованої динамічної мережі забезпечує якісно новий рівень метеорологічної інформації необхідної для метеорологічного обслуговування аеронавігації реалізує спосіб оцінювання поляризаційного спектра відбитої електромагнітної.

В роботі отримали подальшого розвитку методологічні засади метеорологічного забезпечення аеронавігації, що базуються на використанні нових поляриметричних методів одержання інформації та можливостей сучасних систем обміну та розповсюдження даних.

Запропоновані в даній дисертаційній роботі методи та підходи використані при виконанні комплексної фундаментальної держбюджетної НДР «Розроблення першого вітчизняного наземного когерентного метеорологічного радіолокатора» (ХНУРЕ, ХНУ імені Каразіна, НАУ) та у навчальному процесі НАУ, що підтверджено актами впровадження.

*Ключові слова:* навігація, метеорологічне обслуговування, дистанційне зондування, радіолокаційна поляриметрия, методологія, турбулентність, вітер, гідрометеори, поляризація.

*Список публікацій здобувача**Статті в закордонних наукових журналах*

1. Averyanova Yu. Doppler Polarization Radar Methods for Meteorological Applications/ Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky// IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine - USA, 2014. – Volume 29, Number 7. – P. 64–73. (Scopus)
2. Averyanova Yu. Turbulence intensity classification based on estimating statistical polarimetric parameters of radar reflections from rain / Yu. Averyanova, F. Yanovsky, A. Averyanov//Telecommunications and Radio Engineering. – 2012. – 71(4). – P. 379–385. (Scopus)
3. Averyanova Yu., Analysis of the possibility to determine wind parameters ahead the aircraft by using polarimetric airborne radar/ Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky. //Telecommunications and Radioengineering. – 2007. Vol. 66, Issue 12. – P. 1103–1112. (Scopus)
4. Averyanova Yu. Reflected signal depolarization estimate with single transceiving antenna / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J.Yanovsky // Proc. SPIE. – 2009. Vol. 7502, 75021X (Aug. 5, 2009). (Scopus)
5. Yanovsky F. Doppler- polarimetric radar meteorological applications / F. J. Yanovsky, Yu. Averyanova // Telecommunications and RadioEngineering – DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i7.20. – P. 577–581. (Scopus)
6. Averyanova Yu. Correction of Radar Signal on Elevation Angle when Reflecting from Turbulent Zone / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. J. Yanovsky. // Proceedings SPIE. – 2007. Issue 12. – P. 191–196. (Scopus)

*Статті у наукових фахових виданнях*

7. Аверьянова Ю. А. Динамічна інтерактивна система отримання та поширення метеорологічної інформації / Ю. А. Аверьянова, Ф. Й. Яновський // Електроніка та системи управління. – К. : 2011. – № 2(28). – С. 95–99.
8. Аверьянова Ю. А. Динамічна складова глобальної інтерактивної мережі одержання та обміну метеорологічними даними / Ю. А. Аверьянова, Ф. Й. Яновський // Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2011. – Т. 4. – С. 36–41.
9. Авер'янова Ю. А. Алгоритм оцінювання швидкості вітру поляриметричним радіолокатором / Ю. А. Авер'янова // Вісник. – К. : НАУ, 2013. – Т. 2. – С. 44–49.
10. Averyanova Yu. In-flight weather data obtaining and exchange for operative flight path correction / Yu. Averyanova // Наукоємні Технології. – К. : НАУ, 2014. – Т. 21, № 1. – С. 86–100.
11. Аверьянова Ю. А. Можливості використання поляриметричних радіолокаційних параметрів для визначення характеристик вітру / Ю. А. Аверьянова, А. А. Аверьянов, Ф. И. Яновский // Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2005. – Т. 4. – С. 34–39.
12. Авер'янова Ю. А. Оцінка інтенсивності турбулентності в до критичному режимі оборотної деформації рідких гідрометеорів/ Ю. А. Авер'янова, А. О. Аверьянов, Ф. Й. Яновський // Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2012. – Т. 1. – С. 56–60.
13. Авер'янова Ю. А. Просторова оцінка розподілу енергії за складовими поляризаційного спектра відбитого від метеоутворення радіолокаційного сигналу/ Ю. А. Авер'янова // Електроніка та системи управління. – К., 2012. – №1(31).– С. 109–112.
14. Авер'янова Ю. А. Інтерактивна глобальна мережа отримання, обміну та поширення метеорологічних даних / Ю. А. Авер'янова // Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2012. – Т. 4. – С. 26–30.



15. Аверьянова Ю. А. Оцінка інтенсивності атмосферної турбулентності за допомогою поляриметричного радіолокатора / Ю. А. Аверьянова, А. О. Аверьянов, Ф. Й. Яновський // Вісник НАУ. – 2006. – № 2. – С. 38–40.

16. Комп'ютерне моделювання аеродинаміки рідких гідрометеорів / Ю. А. Аверьянова, А. О. Аверьянов // Журнал «Технологические системы». – 2006. – № 3. – С. 43–45.

17. Averyanova Yu. The possibility to use polarimetric radar for atmospheric turbulence intensity estimate / Yu. Averyanova // Proc. of the National Aviation University. – 2006. – № 3(29). – P. 46–48.

18 Аверьянова Ю. Корекція радіолокаційного променя за кутом місця поляриметричного метеорологічного радіолокатора / Ю. А. Аверьянова, А. О. Аверьянов // Вісник НАУ. – 2008. – Т. 4. – С. 33–36.

19. Аверьянова Ю. А. Алгоритм оцінювання турбулентності поляриметричними метеорологічними радіолокаторами / Ю. А. Аверьянова, А. О. Аверьянов, Ф. Й. Яновський // Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2009. – Т. 2. – С. 69–73.

20. Авер'янова Ю. А. Оцінювання ступеня деполяризації відбитих від гідро метеорів радіохвиль амплітудним методом / Ю. А. Авер'янова, А. О. Аверьянов, Ф. Й. Яновський // Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2010. – Т. 1. – С. 100–104.

21. Авер'янова Ю. А. Статистична оцінка впливу турбулентності на зміну кута поляризації відбитих від гідрометеорів радіохвиль / Ю. А. Авер'янова, А. О. Аверьянов, Ф. Й. Яновський // Електроніка та системи управління. – К. : «НАУ-друк», 2010. – № 2(24). – С. 5–11

22. Авер'янова Ю. А. Концепція застосування поляризаційно-чутливих антен для локації об'єктів нестабільної форми / Ю. А. Авер'янова, А. О. Аверьянов, Ф. Й. Яновський // Вісник НАУ. – К. : НАУ, 2011. – Т. 1. – С. 27–33.

*Патенти*

23. ПАТЕНТ на корисну модель № 34917 Україна. МПК (2006) П01І 13\00. Поляриметричний радіолокатор / Авер'янова Юлія Анатоліївна, Аверьянов Анатолій Олексійович, Яновський Фелікс Йосипович; Власник Національний авіаційний університет (м. Київ). – № и 2008 04248; заявл.04.04.2008; опубл. 26.08.2008. Бюл. № 16.

24. ПАТЕНТ на корисну модель № 106864 Україна. МПК (2016.01). Система одержання та поширення метеорологічних даних / Авер'янова Юлія Анатоліївна, Яновський Фелікс Йосипович; Власник Національний авіаційний університет.–№ и 2015 11020; заявл.11.11.2015; опубл. 10.05.2016. Бюл. № 9.

*Статті у виданнях, які включено до наукометричної бази Scopus*

25. Averyanova Yu. Dynamics of Drop Polarization Basis under Atmospheric Factors Influence [Електронний ресурс] : Proceedings of Signal Processing Symposium SPS-2015 / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky / 10-12. 2015, Warsaw, Poland – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus)

26. Averyanova Yu. Statistical Algorithm for Turbulence Detection using Polarization Features of Radar Reflections from Rain / Yu. Averyanova // International Radar Symposium (IRS 2015), June 24–26, 2015, Dresden, Germany : Conference proc. – P. 593–596. (Scopus)

27. Averyanova Yu. An approach to hydrometeors discrimination with similar polarization properties within the resolution volume / Yu. Averyanova. F. Yanovsky // International Radar Symposium (IRS 2016), May 10–12, Krakow, Poland : Conference proc. – 2016. – P. 1–4. (Scopus)

28 Averyanova Yu. Polarimetric Method to Discriminate the Drops on Sizes within the Resolution Volume / Yu. Averyanova, F. Yanovsky // International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Lviv, Ukraine : Conference proc. – 2016. – P. 176–179 . (Scopus)

29 Averyanova Yu. Principle of drops discrimination on sizes and shapes within the resolution volume with radar polarimetry / Yu. Averyanova, O.

Averianova // The 3rd Radar Methods and Remote Sensing Symposium (RMSW 2016), 27–28 September, Kyiv, Ukraine : Conference proc. – 2016. – P. 44–47. (Scopus)

30. Averyanova Yu. Analysis of the possibility to determine wind parameters ahead the aircraft by using polarimetric airborne radar / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky // International Workshop on Microwaves, Radar and Remote Sensing, Kiev, 2005 : Proc. of Conference. – 09.2005. – P. 81–86. (Scopus)

31. Averyanova Yu. Polarization signal components estimate in weather radar / Yu. A. Averyanova, A. A. Averyanov, F. J. Yanovsky // 12th Intern.Conf. on Mathematical methods in electromagnetic theory, Odesa, 2008 : Proc. of Conference. – 07.2008. – P. 360–362. (Scopus)

32. Yanovsky F. Classification Algorithms for Weather Radar / F. Yanovsky Ya. Ostrovsky, V. Marchuk, Yu. Averyanova // 12th International Conference on Mathematical methods in electromagnetic theory, Odesa 2008 : Proc. of the Conference – 07.2008. – P. 366–368. (Scopus)

33. Averyanova Yu. The Estimate of Instantaneous Power of Polarization Spectrum Components in Polarmetric Weather Radar / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. J Yanovsky // 2nd Intern.Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS-2008), 22–24 September, Kiev : Conference proc. 09.2008. – P. 179–181. (Scopus)

34. Yanovsky F. Doppler-Polarimetric Meteorological Radar Design Concept [Електронний ресурс]: Proc. of Signal Processing Symposium SPS-2009 / F. J. Yanovsky, Yu. A. Averyanova / 05. 2009, Warsaw, Poland – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus)

35. Averyanova Yu. Reflected Signal Depolarization Estimate with Single Transceiving Airborne Antenna [Електронний ресурс] : Proc. of Signal Processing Symposium SPS-2009 / Yu. Averyanova, F. Yanovsky, / 05.2009, Warsaw, Poland – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus)

36. Yanovsky F. New Concept of Multifunctional Weather Radar / F. Yanovsky Yu. Averyanova // Interational Radar Symposium (IRS 2009), 09–11

September, 2009, Hamburg, Germany, Conference proceedings. – 10.2009. – P. 449–455. (Scopus)

37. Averyanova Yu. A. Polarization selective antennas for reflected wave depolarization determination / Yu. A. Averyanova, F. J. Yanovsky, A. A. Averyanov // Antenna Theory and Techniques (ICATT 2009), 06–09 October, 2009, Lviv, Ukraine, Conference proceedings. – X. 2009. – P. 256–258. (Scopus)

38. Averyanova Yu. A. Influence of Turbulence onto Depolarization of Signal Reflected from Hydrometeors / Yu. A. Averyanova, F. J. Yanovsky, A. A. Averyanov // International Radar Symposium (IRS 2010), 14–18 June, 2010, Vilnius, Lithuania, Conference proceedings. – 07.2010. – P. 501–504. (Scopus)

39. Averyanova Yu. Statistical Estimation of Polarimetric Method Potential for Dangerous Turbulence Detection in Rain / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. J. Yanovsky // 13th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kiev 2010, Ukraine : Conference proc. – 2010. – P. 1–4 (Scopus)

40. Averyanova Yu. Connection of Reflected Radar Signal with Liquid-Hydrometeor Deformation Rate / Yu. Averyanova, F. Yanovsky, A. Averyanov // The 3d Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS 2011), Kiev, Ukraine, August 25–27 : Conference proc. – 2011. – P. 217–219. (Scopus)

41. Averyanova Yu. Echo-Signal from Hydrometeors. Spatial and Temporal Estimation of Polarization Spectrum Components / Yu. Averyanova // International Radar Symposium (IRS 2011), 7–9 September, Leipzig, Germany : Conference proc. – 2011. – P. 263–266. (Scopus)

42. Yanovsky F. J. Meteorological Applications of Multiparameter Polarimetric Radar / F. J. Yanovsky, Yu. A. Averyanova // European Radar Conference (EuRAD-2011), Manchester, UK : Conference proc. – 2011. – P. 158–161. (Scopus)

43. Averyanova Yu. The approach to estimating critical wind speed in liquid precipitation using radar polarimetry / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky // 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic

Theory, Kiev 2012, August 28–30, Ukraine : Conference Proc. – 09.2012. – P. 517–520. (Scopus)

44. Averyanova Yu. Ambiguity of Droplet Fission and its Resolution Using Doppler-Polarimetric Signal Processing in Meteorological Radar [Электронний ресурс]: Proc. of Signal Processing Symposium SPS-2013 / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky / – 06.20013, Warsaw, Poland – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus)

45. Averyanova Yu. Estimating Drop Size via the Polarization Spectrum Components for Wind Speed Calculation / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky // International Radar Symposium (IRS 2013), June 19–21, Dresden, Germany : Conference proc. – 2013. – P. 805–809. (Scopus)

46. Averyanova Yu. An approach to improve interpretation of polarimetric radar measurements for meteorological applications / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky // International Radar Symposium (IRS 2012), June 16–18, Gdansk, Poland: Conference proc. – 2014. – P. 230–233. (Scopus)

47. Averyanova Yu. Polarimetric Approach to Improve Estimation of Drop Size Distribution and Wind Related Phenomena / Yu. Averyanova, F. Yanovsky // 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, August 26–28, Dnepropetrovsk, Ukraine : Conference proc. – 2014. – P. 243–246. (Scopus)

48. Yanovsky F. J. Copula Analysis of Full Polarimetric Weather Radar Complex Signals / F. J. Yanovsky, A. N. Rudiakova, R. B. Sinitsyn, Yu. A. Averyanova // EuRad, 3–7 October, London, UK : Conference proc. 2016. – P. 197–200. (Scopus)

49. Averyanova Yu. Some features of a Radar Measuring Polarization Spectrum/ Yu. Averyanova, F. Yanovsky // The 4th Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing, September 23–25, Kiev, Ukraine : Conference proc. – 2014. – P. 31–34. (Scopus)

*Матеріали конференцій*

50. Averyanova Yu. Correction of Radar Signal on Elevation Angle when Reflecting from Turbulent Zone [Електронний ресурс]: Proc. of Signal Processing Symposium SPS-2007 / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. J. Yanovsky / – 05.2007, Warsaw, Poland – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера.

51. Аверьянова Ю. А., Аверьянов А. О. Комп'ютерне моделювання аеродинаміки рідких гідро метеорів // Доповідь на науково-практичній конференції «Проблеми підтримки та контролю державного експорту продукції наукоємного виробництва». 5-ий Міжнародний авіа космічний салон «АВІАСВІТ XXI». Гостоміль, 11–12 червня 2006 р.

52. Averyanova Yu. Simulation of depolarized signal energy redistribution when reflection from weather target / Yu. A. Averyanova, Ya. I. Puzanov // Міжнародна науково-технічна конференція «ПОЛІТ», НАУ 2009.

53. Аверьянова Ю. А. Возможности использования радиолокационной поляриметрии для выявления небезопасных для авиации атмосферных явлений / Ю. А. Аверьянова, А. О. Аверьянов // IX Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2009», 21–23 вересня, Київ, Україна, Матеріали конференції. – 09.2009. С. 6.37–6.40.

54. Averyanova Yu. A. Polarization Selective Antennas For Radar Application / Yu. A. Averyanova, F. J. Yanovsky // The Forth World Congress “Safety in Aviation – Space Technologies” (Radar Methods and Systems Symposium (RMSW 2010)), Kiev, Ukraine, September 11–23, 2010 : Conference proc. – Vol. 2. – 2010. – P. 22.89–22.92.

55. Yanovsky F. J. Doppler-Polarimetric Radar Meteorological Applications / F. J. Yanovsky, Yu. A. Averyanova // The Forth World Congress “Safety in Aviation – Space Technologies”, Radar Methods and Systems Symposium (RMSW 2010), Kiev, Ukraine, September 11–23, 2010 : Conference proc. – Vol. 2. – 2010. – P. 22.11–22.15.

56. Averyanova Yu. Turbulence Intensity Classification Based on Estimating Statistical Polarimetric Parameters / Yuliya Averyanova, Felix Yanovsky, Anatoly

Averyanov // International Conference on Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP-2010), Kiev, Ukraine, October 13–14 : Conference proc. – 2010. – P. 95–98.

57 Averyanova Yu. Modern and Prospective Methods for Dangerous Meteorological Phenomena Observation / Yu. Averyanova // The Fifth World Congress “Safety in Aviation – Space Technologies”, Radar Methods and Systems Symposium (RMSW-2012), Kiev, Ukraine, September 25–27 : Conference proc. – 2012.–Vol.2.–P. 3.7.89–3.7.93.

### ANNOTATION

*Averyanova Yu. A. Methodological foundation of meteorological service of air navigation with polarimetric tools of remote sensing. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.*

The thesis for a doctor of technical Science degree in the speciality 05.22.13 – “Navigation and traffic control” – National Aviation University, 03058, Komarova av. 1, Kiev, Ukraine.

The thesis is directed on the decision of an actual scientific task of making methodology provision of air navigation meteorological service using tools for operative hazards detection and information dissemination as well as at the development new polarimetric methods for atmospheric dynamic phenomena detection.

The stated problem solution is the creation of the network of mobile platforms for the location of systems for operative meteorological information obtaining from the different layers of atmosphere. It is proposed to use commercial aircrafts as the mobile platforms.

The problem solution is also based on the development of new polarimetric and radar methods of remote obtaining information about meteorological phenomena.

The next step of problem solution implies the development of the structure of complex global interactive network for obtaining and sharing meteorological information. This approach corresponds to the principles of globality, availability

(including address access), systematic, security, personification and system compatibility.

The benefits of new methods application are increased by using polarization characteristics of electromagnetic wave for obtaining more detailed and reliable information about meteorological phenomena and processes.

In the thesis the concept of meteorological service of international aviation has obtained the further development. The concept is based on theoretically proved possibility to use polarimetric tools for obtaining information about dynamic phenomena that are dangerous for aircraft flights. The concept allows:

- 1.1. To realize the onboard operative obtaining more detailed information about areas of dangerous meteorological phenomena along the flight route.
- 1.2. To widen the surveillance areas using the aircrafts as a mobile sensors to obtain operative information.
- 1.3. To realize automated information transmission about dangerous meteorological conditions and phenomena along the flight path to all participants of air traffic including air traffic controllers.
- 1.4. To increase the simultaneous situational acquaintance for all participants of air traffic.
- 1.5. To increase the flight safety and economical indices of flight when navigation under complex meteorological conditions.
- 1.6. To contribute into realization of novel aviation concepts (Free Flight and CNS ATM) at quality level taking into account requirements of aviation safety, regularity and economy.

In the frame of proposed concept it is formulated and proposed the approach of remote obtaining information about dangerous dynamic atmospheric phenomena that is differentiated from the existed by use of the polarization characteristics of reflected electromagnetic wave. This approach allows operative obtaining more versatile information about phenomena character and intensity. It is studied the potentials of polarimetric method to estimate the precipitation intensity, to measure the drop size



distribution and to estimate dynamic atmospheric phenomena including wind and turbulence.

In the thesis the concept of polarization spectrum of radar signal reflected from meteorological formation is substantiated and introduced. The estimate of polarization spectrum allows to avoid temporal and spatial averaging of radar information and to fix the “instantaneous” changes in atmosphere. This fact is important for detection of short-term dynamic atmospheric phenomena. The polarimetric method and algorithm of remote estimation of polarization component of radar signal reflected from hydrometeor assemble are proposed and developed. The method is realized with the proposed and patented system with multipolarization receiving. The potentials of polarimetric method to estimate the rain intensity, dropsize distribution, turbulence and wind are studied.

In the thesis it is physically and mathematically substantiated the connection between polarization variation of electromagnetic wave when reflection from meteorological formation and dynamic characteristics of atmosphere in clouds and precipitation. It is demonstrated with mathematical simulation the connection of polarization characteristics of electromagnetic wave with turbulence, wind and drop sizes. The mathematical expression for calculating energy that is received with antennas with different polarization angles is obtained. The expressions are used to ground mathematically the polarization variation when electromagnetic wave reflection from meteorological formation with dynamic characteristics of atmosphere in clouds and precipitation. The results of mathematical and computer simulation of proposed method of remote estimation of dynamic phenomena (turbulence and wind) using the polarization spectrum have proved the ability to exclude the impact of vibration component into reflected signal, or vice versa to evaluate the vibration component only. This is realized by selection of polarization angle of receiving antenna of polarimetric radar. The simulation results have demonstrated the connection of polarization characteristics of electromagnetic wave with turbulence, wind and drop sizes. The simulation results have proved the efficiency of proposed

method of remote estimate of wind speed using the polarization characteristics of reflected radar signal.

In the thesis the energetic polarimetric method of remote obtaining information about atmospheric turbulence is developed. The method is differentiated from the existed by possibility to separate the low frequency component change that is caused by atmospheric turbulence from other factors that influence onto the process of drop vibration. The method is based on electromagnetic wave depolarization estimation using the information about character of change of low frequency component of radar signal reflected from hydrometeors assemble that are under influence of atmospheric turbulence. The method allows increasing informativity of modern Doppler methods of information obtaining about dangerous atmospheric phenomena. The simulation was made and statistical estimate of informative parameter – variance of low frequency component of radar signal reflected from hydrometeors assemble was obtained. Statistical algorithm for turbulence detection and turbulence intensity classification was proposed. The integral error estimate of the method has the order 0.1 that corresponds to the results of other method, for example method of turbulence detection using the Doppler spectrum width of reflected from hydrometeors electromagnetic wave.

In the thesis the polarimetric method of remote determination of wind speed using the moment of drop fission is developed. The method is differentiated from the known by estimating polarization spectrum of radar signal reflected from meteorological target. The atmospheric conditions for drop fission are analyzed. The resolution of contradictions in the conditions of drop fission is proposed when interpretation of radar information for wind speed determination.

In the thesis the process of meteorological service of international air navigation is proposed to improve using the aircrafts as dynamic platforms for placement the prospective systems of remote obtaining information about dangerous meteorological phenomena along the flight route and providing the possibility of operative and target access to the information. The complex global interactive network for meteorological information obtaining, dissemination and exchange is developed and patented. The

recommendations on meteorological service of air navigation modernization and improvement are given.

*Keywords:* navigation, meteorological service, remote sensing, radar polarimetry, methodology, turbulence, wind, hydrometeors, polarization

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	26
РОЗДІЛ 1 ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СУЧАСНОЇ СИСТЕМИ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЕРОНАВІГАЦІЇ .....	44
1.1 Наземні системи метеорологічного спостереження.....	45
1.2 Радіолокаційні системи та методи спостереження за станом атмосфери..	53
1.2.1 Некогерентні метеорологічні радіолокаційні системи.....	54
1.2.2 Доплерівські метеорологічні радіолокаційні системи.....	55
1.2.3 Поляриметричні радіолокаційні системи.....	58
1.2.4 Акустичні методи зондування атмосфери.....	61
1.2.5 Оптичні локаційні метеорологічні системи .....	61
1.3 Супутникові системи та методи спостереження за станом атмосфери.....	63
1.4 Можливості використання повітряного судна у якості динамічної складової системи метеорологічного забезпечення аеронавігації.....	68
1.5 Сучасні системи розповсюдження метеорологічних даних.....	74
1.6 Постановка завдань досліджень.....	79
Висновки до розділу 1.....	84
РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПЦІЯ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЖНАРОДНОЇ АЕРОНАВІГАЦІЇ.....	88
Висновки до розділу 2.....	94
РОЗДІЛ 3 ПОЛЯРИМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ОДЕРЖАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО НЕБЕЗПЕЧНІ МЕТЕОРОЛОГІЧНІ ЯВИЩА.....	96
3.1 Фізичні основи виявлення атмосферних явищ та процесів мікрохвильовими засобами дистанційного одержання інформації.....	96
3.2 Використання поляриметричних методів для вирішення задач виявлення зон граду та обледеніння.....	107

3.2.1	Принципи та алгоритми виявлення зон граду.....	107
3.2.2	Принципи та алгоритми виявлення зон небезпечного обледеніння.....	111
3.3	Рідкі гідрометеори, як об'єкти нестабільної форми.....	113
3.4	Зв'язок відбитого поляризованого сигналу з характеристиками рідких гідрометеорів, які знаходяться під дією вітру. Формування поляризаційного спектра.....	115
3.5	Спосіб оцінювання енергії поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів .....	118
3.6	Поляриметрична радіолокаційна система для оцінювання енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів сигналу.....	122
3.7	Енергетична оцінка складових поляризаційного спектра: алгоритм оцінювання турбулентності за складовими поляризаційного спектра.....	127
3.8	Метод одержання інформації про вітрові явища в атмосфері за допомогою радіолокаційної системи з антеною фіксованої поляризації.....	135
3.9	Метод розрахунку швидкості вітру за критерієм Вебера для режиму критичної деформації краплі.....	138
3.9.1	Розрахунок швидкості деформації рідких гідрометеорів та критичної швидкості вітру.....	138
3.9.2	Зв'язок поляризаційних характеристик відбитого радіолокаційного сигналу з критичною швидкістю вітру.....	143
3.9.3	Алгоритм розрахунку критичної швидкості вітру поляриметричним радіолокатором.....	144
3.9.4	Оцінка розподілу крапель за розмірами за допомогою поляризаційного спектра відбитого радіолокаційного сигналу.....	145
3.10	Протиріччя в інтерпретації інформації: випадки, що призводять до роздвоєння крапель.....	149

3.10.1 Роздвоєння рідких гідрометеорів у випадку гравітаційного падіння.....	150
3.10.2 Роздвоєння рідких гідрометеорів у випадку дії висхідних або спадних потоків повітря.....	151
3.10.3 Роздвоєння рідких гідрометеорів у випадку дії вітру.....	152
3.11 Вирішення протиріччя в інтерпретації інформації.....	152
3.11.1 Вирішення протиріччя для випадку гравітаційного падіння.....	152
3.11.2 Вирішення протиріччя для випадку ділення крапель за умови впливу вертикальних рухів повітря та горизонтального вітру.....	153
Висновки до розділу 3.....	155
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ .....	166
4.1 Моделювання розподілу енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу.....	166
4.1.1 Вплив об'єктів нестабільної форми на відбитий радіолокаційний сигнал.....	166
4.1.2 Моделювання енергетичного розподілу складових поляризаційного спектра сигналу, відбитого від гідрометеорів.....	170
4.1.3 Моделювання часового розподілу складових поляризаційного спектра сигналу, відбитого від гідрометеорів.....	191
4.2 Моделювання процесу відбиття енергії деполяризованого сигналу за допомогою однієї антени та її оцінювання.....	195
4.2.1 Моделювання процесу формування поляризаційної модуляції.....	195
4.2.2 Оцінка характеристик випадкового процесу впливу турбулентності на ансамбль гідрометеорів.....	205
4.2.3 Статистична оцінка можливостей поляриметричного метода.....	207

4.2.4 Статистичний алгоритм виявлення зон небезпечної для польотів турбулентності.....	216
Висновки до розділу 4.....	219

## РОЗДІЛ 5 УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОРИСТАННЯ

МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	226
5.1 Психофізичні особливості сприйняття інформації пілотом в процесі прийняття рішень.....	226
5.2 Оцінка пріоритетності метеорологічної інформації для пілота в процесі прийняття рішень.....	231
5.2.1 Оцінка пріоритетності метеорологічної інформації під час виконання польоту методом вагового ранжування.....	233
5.2.2 Оцінка пріоритетності метеорологічної інформації методом експертних оцінок.....	238
5.3 Удосконалення систем розподілу метеорологічної інформації.....	248
5.3.1 Аналіз ризиків при одержанні та розповсюдженні інформації в процесі прийняття та реалізації рішення.....	249
5.3.2 Удосконалення процесу інформаційного забезпечення для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень.....	256
Висновки до розділу 5.....	260

## РОЗДІЛ 6 МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЕРОНАВІГАЦІЇ.....	264
6.1 Структурна схема модернізованого метеорологічного забезпечення аеронавігації.....	264
6.2 Цільовий вибір та використання оперативної метеорологічної інформації.....	272
6.3 Порівняльний аналіз глобальної системи метеорологічного забезпечення аеронавігації з існуючою.....	274

6.4 Розширення функціональних можливостей метеорологічного обслуговування.....	281
6.5 Рекомендації щодо модернізації метеорологічного забезпечення аеронавігації.....	284
Висновки до розділу 6.....	288
ВИСНОВКИ.....	292
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	296
ДОДАТКИ.....	311
ДОДАТОК А Результати моделювання.....	311
ДОДАТОК В Акт впровадження результатів дисертаційної роботи та патенти .....	324



**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АД –	Аерологічний датчик;
АП –	Авіаційна подія;
АПЦ –	Аналітично-прогностичні центри;
БП –	Банк погоди;
ВМО –	Всесвітня метеорологічна організація (WMO);
ВСЗП –	Всесвітня система зональних прогнозів;
ДВ –	Диференціальна відбиваність;
ДФ –	Диференційна фаза;
ІМЦ –	Інформаційні метеорологічні центри
ІП –	Інформаційний параметр;
ЛДВ –	Лінійне деполяризаційне ідношення;
МНМС –	Мережа наземних метеорологічних станцій;
МР –	Метеорологічний датчик;
МС –	Метеорологічний супутник;
НПМІ –	Наземні приймачі метеорологічної інформації;
ОПР –	Обслуговування повітряного руху;
ПР –	Повітряний рух;
ПС –	Повітряне судно;
ПТЗ –	Повітряні транспортні засоби;
РВ –	Радіолокаційна відбиваність (Z );
РЛС –	Радіолокаційна станція;
СЗ –	Супутник зв'язку;
ШМСЗ –	Штучні метеорологічні супутники землі;
ADS-B –	Automated Depended Surveillance-Broadcast;
AMDAR –	Aircraft Meteorological Data Relay (АМДАР);
SWIM –	System Wide Information Management.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Оперативна та надійна метеорологічна інформація за маршрутом польоту є одною з основних складових, необхідних для безпечної навігації повітряних суден (ПС) [1,2,3]. Це відзначається в документах міжнародних авіаційних організацій ICAO, EUROCONTROL та відображується статистикою авіаційних подій (АП), відповідно до якої найчастішою причиною АП є людський фактор, тобто помилки пілотів, і найчастіше в складних метеорологічних умовах.

Сучасні тенденції розвитку авіаційної галузі:

– підвищення інтенсивності повітряного руху (ПР) з урахуванням концепцій нового покоління Free Flight та CNS ATM, які замість централізованого управління повітряним рухом (наприклад, авіадиспетчерський контроль та управління) роблять ставку на технологічне зростання та можливість автоматичного та динамічного доступу до інформації саме командою ПС;

– збільшення завдань і експлуатаційних аспектів, що покладені на авіацію, потребують швидкого вирішення широкого кола завдань, які пов'язані з питанням безпеки повітряного руху. За таких тенденцій, до всесвітньої авіаційної транспортної системи висуваються принципово нові вимоги в рамках сучасних технічних можливостей [4]. Отже, постає питання глобалізації та підвищення функціональності сучасних систем спостереження, поширення, одержання й доступу до оперативної інформації під час виконання польоту. В програмах розвитку авіації нового покоління країн Європи та Америки (CESAR, NEXTGEN, 4DWxCube) увага приділяється створенню глобальної мережі одержання та обміну даними з використанням систем ADS-B (Automated Depended Surveillance-Broadcast) та SWIM (System Wide Information Management, що можна перекласти, як системне управління інформацією) та використанню новітніх систем одержання, обміну та розповсюдження інформації.

Процес глобалізації та підвищення функціональності сучасних систем спостереження та розповсюдження метеорологічної інформації має на меті модернізацію сучасної системи метеорологічного забезпечення аеронавігації.

Розв'язання питання щодо модернізації системи метеорологічного забезпечення аеронавігації потребує наукового обґрунтування, та технічного застосування певних концепцій, форм і методів одержання, передавання та розповсюдження метеорологічної інформації. В цьому процесі дослідження та розробки важливим постає питання методологічних засад побудови системи метеорологічного забезпечення аеронавігації, оскільки воно залежить від застосованих методів, методик та засобів, що мають використовуватись в процесі одержання та поширення метеорологічної інформації.

Покращення метеорологічного забезпечення аеронавігації, відповідність якості одержання та поширення метеорологічної інформації сучасним вимогам потребує дослідження, обґрунтування та розвитку нових концепцій, методів та засобів одержання інформації, що дозволять оперативно одержати, обробити інформацію та сигналізувати зацікавленим учасникам повітряного руху про наявність небезпечних метеорологічних явищ за маршрутом польоту, а також з використанням новітніх автоматичних систем для розповсюдження і поширення інформації.

Авіаційні концепції нового покоління Free Flight та CNS ATM, перспективне глобальне управління Повітряними Суднами (ПС) потребують переходу від централізованої командної системи управління повітряним рухом до розподіленої. Така система дозволяє учасникам повітряного руху з урахуванням критеріїв ефективності та економічності гнучко змінювати траєкторію польоту відповідно до умов, що склалися, а також зменшити вплив людського фактору при прийнятті рішення. Удосконалюючи систему одержання та поширення метеоінформації потрібно враховувати, що повітряний рух істотно залежить від стану та процесів повітряного середовища – атмосфери, а також характеризується інерційністю, тобто неможливістю раптового припинення чи зміни характеристик повітряного руху. За таких умов

оперативна та надійна метеорологічна інформація за маршрутом польоту є одною з основних складових.

У сучасних умовах пілот працює з великимобсягом інформації, що надається йому в різних формах. Надмірність доступної метеорологічної інформації заважає пілоту ігнорувати незначні дані та сфокусувати свою увагу на ключових фактах. Як наслідок пілот не завжди може коректно та вірно оцінити ризик викликаний певним збігом обставин [5]. . Треба зазначити, що більшість інформаційних даних пілот одержує перед польотом. Це інформація про поточний метеорологічний стан, який може доволі швидко змінитися та прогностична інформація, яка має часові обмеження та не завжди виправдовується під час польоту.

В умовах новітніх авіаційних концепцій ключовою фігурою є пілот, який повинен приймати остаточне рішення в надзвичайних і непередбачених ситуаціях і несе відповідальність за наслідки цього рішення. Для високого рівня ймовірності прийняття вірного рішення пілот потребує оперативної, достовірної та якомога більш повної інформації. Отже, для забезпечення потреб сучасної авіації, для вдосконалення систем забезпечення безпеки та економічності польотів є необхідною розробка та впровадження нових методів одержання інформації. Останнім часом увага приділяється підходам та методам, що дозволяють підвищити функціональні можливості систем дистанційного одержання інформації про небезпечні атмосферні явища за рахунок використання систем, які проводять вимірювання в різних частотних діапазонах, а також оперують з різними характеристиками електромагнітної хвилі (амплітуда, частота, поляризація тощо). Увага цим питанням приділяється в роботах Д. Вавріва, Д. Зрніча (D. Zrnich), О. Краснова, Д. Леховицького, В. Павлікова, Г. Хлопова, Ф. Яновського.

Поляриметрія використовується переважно для ідентифікації типів гідрометеорів, але поляризаційні параметри є чутливими до форми, орієнтації, щільності та водності атмосферних формувань. На орієнтацію та форму гідрометеорів, в свою чергу, впливають динамічні атмосферні явища, а отже

існує можливість виявлення та оцінки інтенсивності атмосферних явищ, що пов'язані з вітром за допомогою поляриметричних характеристик електромагнітної хвилі.

Порівняно недавно, для спостережень за станом атмосфери та одержання інформації про деякі небезпечні явища стали використовуватися комерційні літаки, що обладнанні апаратурою для автоматичного вимірювання параметрів атмосфери та передачі цієї інформації авіаційним диспетчерам і, за необхідності, відповідним наземним метеорологічним структурам. Така система має назву АМДАР з (англійської AMDAR – Aircraft Meteorological Data Relay). Вартість інформації одержаної за допомогою такої системи відповідно до [6] складає тільки 1 % від вартості інформації, що одержується за допомогою кулепілотних спостережень, що доводить економічну доцільність використання комерційних літаків для одержання та передавання інформації за маршрутом польоту.

В цьому контексті, слід згадати науковців, які в своїх наукових працях приділяли увагу питанню розвитку глобальної системи одержання, поширення інформації та доступу до неї, а також удосконаленню інформаційного забезпечення учасників повітряного руху: Жан-Луї Бренго (Jean-Louis Brenguier), С.Дарр (S. Darr), К. Лемос (K.Lemos), В. Рікс (W. Ricks), Ф. Соліна (F. Solina), М.Храстовец (M. Hrastovec), Ф. Яновський (Felix Yanovsky).

Істотний внесок у розвиток та удосконалення методів, систем та процедур одержання та поширенні інформації для забезпечення безпеки авіації зробили також вітчизняні вчені та науковці національного авіаційного університету: В.Конін, К. Сундучков, Б. Фішман, В. Харченко, Ф.Яновський.

Необхідно зазначити, що система АМДАР характеризується стандартним обмеженим набором датчиків – вимірювачів параметрів атмосфери, які не дають інформації про наявність небезпечних атмосферних явищ за маршрутом польотів. Сучасний рівень технологічних досягнень дозволяє використовувати ПС не тільки як платформу для набору пристроїв стандартних параметрів атмосфери, але також і як інтегрований елемент для оперативного одержання,

обробки та відображення інформації про складні метеорологічні явища [7]. Таким чином доцільним та важливим постає питання розробки та використання багатофункціональних систем, що здатні оперативно визначати, сигналізувати про наявність небезпечних метеорологічних явищ за маршрутом польоту та автоматично передавати інформацію всім зацікавленим учасникам повітряного руху.

За таких вимог щодо метеорологічного забезпечення аеронавігації стає можливим покращити обізнаність екіпажу ПС про метеорологічне оточення та делегувати певну відповідальність за наслідки прийняття рішення саме пілоту ПС. Обізнаність екіпажу ПС про повітряний стан, в свою чергу дозволить реалізувати новітні авіаційні концепції на якісному рівні з урахуванням вимог безпеки, регулярності та економічності польотів. Але метеорологічне забезпечення сьогодні не використовує в належній мірі нові сучасні технічні можливості і не забезпечує в повному обсязі потреби аеронавігації.

Таким чином, існує проблема, що полягає в протиріччі між можливостями існуючого метеорологічного забезпечення та зростаючими потребами міжнародної аеронавігації, причому це протиріччя з часом стає все гострішим. Отже створення методології метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням засобів оперативного виявлення небезпечних для польотів явищ та розповсюдження інформації є актуальною проблемою, вирішення якої становить основу даної роботи. Для вирішення цієї проблеми постає завдання удосконалення процесу одержання та поширення метеорологічної інформації, що дозволяє покращити можливості літаків виконувати політ безпечно та ефективно за будь-яких погодних умов.

Питанням удосконалення процесу метеорологічного забезпечення для побудови глобальної системи спостереження та поширення метеорологічної інформації значну увагу приділяють програми та концепції розвитку авіаційної галузі такі, як CESAR, NEXTGEN, SWIM, 4DWxCube та інші.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема роботи відповідає Програмі розвитку державної системи використання

повітряного простору України на 2010-2014 роки в частині вдосконалення метеорологічного забезпечення польотів на маршрутах, передпольотної підготовки екіпажів шляхом удосконалення системи централізованого метеорологічного забезпечення аеронавігації та відповідному плану заходів, затвердженими Кабінетом Міністрів України у 2010 р., фундаментальній держбюджетній НДР № 685-ДБ-10 «Теоретико-експериментальне обґрунтування шляхів розширення функціональних можливостей метеорологічного радіолокатора та підвищення ефективності виявлення небезпечних метеорологічних явищ за рахунок використання поляризаційних властивостей зондувальних і відбитих сигналів», (номер держреєстрації 0104U000674), 2010-2013 рр. (автор був виконавцем роботи) та НДР № 1058 – ДБ 16 «Методологія синтезу інтегрованої авіоніки для навігації і синергетичного управління аерокосмічними динамічними об'єктами» (номер держреєстрації 0116U004634), (автор був виконавцем роботи).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка методологічних засад метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням засобів оперативного виявлення та розповсюдження інформації для розширення функціональних можливостей інформаційного забезпечення учасників повітряного руху і, як наслідок, для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень під час польотів.

Поставлена мета дисертаційного дослідження досягається вирішенням наступних завдань:

1. Провести аналіз особливостей сучасного метеорологічного забезпечення аеронавігації та його можливостей щодо метеорологічного забезпечення аеронавігації в умовах втілення новітніх авіаційних концепцій та стратегії розвитку аеронавігаційної галузі;

2. Розробити концепцію удосконалення метеорологічного забезпечення аеронавігації;

3. Розробити поляриметричні методи дистанційного одержання інформації про небезпечну атмосферну турбулентність та дослідити їх

можливості щодо оперативного виявлення зон небезпечної турбулентності для конкретного повітряного судна в процесі польоту.

4. Розробити поляриметричний метод дистанційного визначення швидкості вітру та дослідити його можливості при оперативному визначенні швидкості вітру, а також його напрямку за допомогою комбінації з доплерівськими методами.

5. Удосконалити оперативні методи одержання інформації про розподіл крапель за розмірами (інтенсивністю опадів) в процесі польоту ПС за рахунок використання радіолокаційної поляриметрії.

6. Перевірити і довести працездатність нових поляриметричних методів шляхом математичного та комп'ютерного моделювання;

7. Удосконалити процес інформаційного забезпечення екіпажів ПС для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень;

8. Розробити і дослідити структуру глобальної мережі одержання та розповсюдження інформації з використанням ПС як динамічних елементів системи з використанням поляриметричних засобів ДЗ;

9. Розробити рекомендації щодо побудови модернізованої системи метеорологічного забезпечення аеронавігації.

**Об'єктом дослідження** є процес одержання, обміну та розповсюдження метеорологічної інформації для удосконалення системи метеорологічного забезпечення аеронавігації.

**Предметом дослідження** є дистанційні методи одержання та розповсюдження оперативної інформації для метеорологічного забезпечення аеронавігації.

#### **Методи дослідження.**

Проведені теоретичні дослідження базуються на сучасних теоріях: радіолокації, поляризації електромагнітних хвиль, аеродинаміки газу та рідких середовищ, прийняття рішень, передавання інформації, динамічних систем.

При розв'язанні задач використані методи теорії сигналів, теорії ймовірностей, математичної статистики, математичного моделювання,



сучасних комп'ютерних технологій. Результати теоретичних досліджень підтверджені результатами комп'ютерного моделювання та експерименту.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Одержало подальшого розвитку концепція метеорологічного забезпечення міжнародної аеронавігації, що за рахунок теоретично обґрунтованих можливостей використання поляриметричних засобів для одержання інформації про динамічні атмосферні явища, що є небезпечними для навігації повітряних суден, дозволяє:

1.1. Реалізувати оперативне одержання більш детальної інформації про зони небезпечних метеорологічних явищ за маршрутом польоту з борту ПС.

1.2. Розширити зону діяльності служб спостереження за рахунок використання ПС у якості мобільного датчика для одержання оперативної інформації.

1.3. Реалізувати автоматичну передачу інформації про небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту всім учасникам повітряного руху та авіаційному диспетчеру.

1.4. Збільшити ситуативну обізнаність одночасно всіх учасників повітряного руху та авіаційного диспетчера.

1.5. Підвищити безпеку і покращити економічні показники польоту при навігації в складних метеорологічних умовах.

1.6. Сприяти реалізації новітніх авіаційних концепцій (Free Flight та CNS ATM) на якісному рівні з урахуванням вимог безпеки, регулярності та економічності польотів.

2. Уперше сформульовано та запропоновано підхід щодо дистанційного одержання інформації про небезпечні динамічні атмосферні явища, який на відміну від існуючих використовує поляризаційні характеристик відбитої електромагнітної хвилі, що дозволить оперативно одержувати більш повну та якісну інформацію про характер та інтенсивність небезпечного явища.

3. Уперше обґрунтовано та введено поняття поляризаційного спектру радіолокаційного сигналу відбитого від метеорологічного утворення, оцінка

якого дозволяє запобігти часовому та просторовому усередненню радіолокаційної інформації та фіксувати «миттєві» зміни в атмосфері, що є важливим для виявлення швидкоплинних динамічних атмосферних явищ. Розроблено поляриметричний метод та алгоритм дистанційного оцінювання поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів за допомогою системи з багатопроменевим прийманням. Досліджено можливості поляриметричного методу щодо оцінки інтенсивності опадів, вимірювання розподілу крапель за розміром, оцінки динамічних атмосферних (турбулентності, вітру) явищ тощо.

4. Уперше фізично та математично обґрунтовано зв'язок зміни поляризації при відбитті електромагнітної хвилі від метеоутворень з динамічними характеристиками атмосфери в хмарах та опадах та методом математичного моделювання продемонстровано зв'язок поляризаційних характеристик електромагнітної хвилі з турбулентністю, вітром та розмірами крапель.

5. Уперше розроблено поляриметричний енергетичний метод дистанційного одержання інформації про атмосферну турбулентність, що на відміну від існуючих здійснює сепарацію зміни НЧ обвідної, яка викликана атмосферою турбулентністю від інших факторів, що впливають на процес зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів та базується на оцінюванні деполіризації відбитої електромагнітної хвилі за характером зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів, які знаходяться під впливом динамічних атмосферних процесів та дозволяє підвищити інформативність сучасних доплерівських методів одержання інформації про небезпечні для польотів атмосферні явища.

6. Уперше розроблено поляриметричний метод дистанційного визначення швидкості вітру за моментом роздвоєння крапель, що на відміну від інших методів базується на оцінюванні поляризаційного спектра відбитого від метеорологічної цілі радіолокаційного сигналу та дозволяє підвищити

інформативність та зменшити обмеження сучасних доплерівських методів одержання інформації про динамічні атмосферні явища.

7. Удосконалено процес метеорологічного забезпечення аеронавігації, що на відміну від існуючого використовує ПС у якості динамічної платформи для перспективних систем дистанційного одержання оперативної інформації про небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту та можливістю оперативного цільового доступу до інформації.

8. Отримали подальшого розвитку методологічні засади метеорологічного забезпечення аеронавігації, що базуються на використанні нових поляриметричних методів одержання інформації та можливостей сучасних систем обміну та розповсюдження даних.

**Практичне значення одержаних результатів.** Виконані дослідження забезпечують досягнення практично важливих результатів, а саме:

1. Уперше розробити та запатентувати радіолокаційну систему з багатопроменевим прийманням для вимірювання поляризаційного спектру та інших поляризаційних характеристик відбитої від метеоутворення електромагнітної хвилі.

2. Уперше розробити алгоритм визначення швидкості вітру за критерієм Вебера для режиму критичної деформації краплі, що в комбінації з доплерівськими методами дозволить одержати інформацію про повну швидкість вітру.

3. Уперше розробити статистичний алгоритм виявлення зон небезпечної для польотів атмосферної турбулентності за енергетичними характеристиками відбитого від метеоутворення радіолокаційного сигналу.

4. Розробити та запатентувати комплексну глобальну інтерактивну мережу одержання, розподілу і обміну метеорологічної інформації, яка відповідає принципам глобальності, доступності (включаючи доступність за запитом), системності, захищеності, персоніфікованості та сумісності систем, що є вимогою сучасної авіації, а також програм та концепцій ICAO і EUROCONTROL

5. Надати рекомендації відносно формулювання науково обґрунтованих вимог до глобальної системи одержання та розповсюдження метеорологічної інформації та її складових частин.

6. На стадії попереднього дослідження замінити натурний експеримент комп'ютерним моделюванням та заощадити значні кошти за рахунок зниження витрат на НДР і ДКР.

Результати роботи можуть бути використані для розробки глобальної системи одержання та розповсюдження метеорологічної інформації для забезпечення навігації та управління повітряним рухом в умовах роботи новітніх авіаційних концепцій, а також у подальших наукових дослідженнях в галузі підвищення ефективності методів та засобів інформаційного забезпечення аеронавігації для підвищення керування повітряним рухом та безпеки польотів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати роботи повною мірою висвітлені у публікаціях [1–57]. Усі результати, подані у дисертаційній роботі, здобувачем отримані особисто. У наукових працях, написаних у співавторстві, здобувачу належить: В роботі [23] – розробка поляриметричного радіолокатора. В роботі, [24] – розробка узагальненої структурної схеми глобальної мережі одержання та обміну метеорологічними даними з використанням динамічної інтерактивної складової для одержання та розповсюдження інформації. [6] – розробка методики корекції радіолокаційного сигналу від кута нахилу при відбитті від турбулентних зон в опадах та хмарах. В роботі [3] – розробка методу визначення повної швидкості вітру як суми радіальної та тангенціальної складових, що визначаються комбінованим доплерівсько-поляриметричним методом. В роботі [18] – оцінювання сигналу корекції за кутом місця променя поляриметричного метеорадіолокатора, розрахунок залежності коефіцієнта корекції за кутом місця. В роботі [31] – розробка алгоритму оцінювання потужності турбулентних складових поляризаційного спектра в метеорологічних поляриметричних радіолокаторах, моделювання процесу зміни струму в

приймальній антені, що скоординована приймати відбиті сигнали з різною поляризацією, аналіз результатів моделювання. Введення та обґрунтування концепції поляризаційного спектру, розробка підходу щодо одержання інформації про інтенсивність турбулентності в рідких опадах за допомогою параметрів поляризаційного спектру, розрахунок параметрів сканування простору для визначення статистичних характеристик відбитого поляризаційного сигналу. В роботі [32] – обґрунтування параметрів, що використовуються в класифікаторі, аналіз результатів моделювання. В роботі [33] – опис гідрометеорів як об'єктів нестабільної форми, аналіз впливу об'єктів нестабільної форми на відбивання радіолокаційного сигналу, аналіз можливостей поляриметричних систем. У роботі [34] – аналіз перспективних напрямків розвитку технічних засобів для одержання більш надійної, достовірної та деталізованої інформації стосовно метеоумов за маршрутом польоту для ефективного впровадження та роботи глобальної мережі одержання та розповсюдження інформації, опис та представлення у вигляді структурної схеми концепції використання повітряних суден, як динамічних елементів для одержання та обміну метеорологічними даними з можливістю їх вибіркового та цільового використання. В роботі [35] – аналіз нового підходу для оцінки інтенсивності турбулентності, який дозволяє оцінити деполаризацію відбитої електромагнітної хвилі за характером зміни НЧ обвідної радіосигналу, відбитого від гідрометеорів, що знаходяться під впливом динамічних атмосферних процесів, опис фізики процесу модуляції зондувальної електромагнітної хвилі частотним спектром турбулентності, моделювання процесу зміни обвідної відбитого від ансамблю гідрометеорів радіолокаційного сигналу за наявності турбулентності різної інтенсивності, аналіз результатів моделювання. В роботі [4] – розробка алгоритму моделювання процесів формування поляризаційної модуляції та оцінювання зміни кута поляризації відбитих сигналів, моделювання процесів, аналіз зв'язку статистичних характеристик випадкового процесу зміни НЧ обвідної відбитого від ансамблю гідрометеорів сигналу з інтенсивністю турбулентності. В роботі [36] –

обґрунтування низки функцій перспективних багатофункціональних радіолокаційних систем. В роботі [37] – аналіз можливостей сучасних поляризаційних систем, аналіз методів виявлення динамічних явищ за допомогою поляризаційно-чутливих антенних систем. В роботі [38] – розробка методики оцінки ступеня зміни поляризації відбитої від опадів електромагнітної хвилі, що викликана турбулентністю з використанням радіолокаційної системи з одною антеною фіксованої поляризації. В роботі [39] – розробка алгоритму класифікації турбулентності за ознакою її інтенсивності на основі оцінки статистичних поляриметричних параметрів при відбитті від опадів та дощу. В роботі [5] – розробка низки вимог до поляриметричної складової доплерівсько-поляриметричних радіолокаційних систем, обґрунтування можливостей радіолокаційних систем щодо поляризаційних вимірювань. [40] – комп’ютерне моделювання залежності коефіцієнта корекції від кута нахилу антени, аналіз результатів моделювання. В роботі [42] – аналіз вимог до поляриметричної радіолокаційної системи з декількома приймальними антенами, обґрунтування деяких параметрів поляриметричної радіолокаційної системи з декількома приймальними антенами. В роботі [2] – моделювання розподілу інформаційного параметру для випадків різної інтенсивності турбулентності, розробка класифікатора інтенсивності атмосферної турбулентності. В роботі [43] – аналіз умов в атмосфері для розриву крапель, обґрунтування зв’язку поляризаційного спектру відбитого радіолокаційного сигналу з моментом розриву крапель. В роботі [44] – аналіз різних атмосферних ситуацій, що призводять до розриву рідких гідрометеорів. Опис та аналіз можливих протиріч в інтерпретації інформації при аналізі відбитого радіолокаційного сигналу. В роботі [45] – розробка підходу щодо оцінювання швидкості вітру за критерієм Вебера, розрахунок критичної швидкості вітру, як функції діаметру крапель. В роботі [45] – обґрунтування можливості оцінювання та оцінювання розподілу крапель за розмірами за допомогою поляризаційного спектру відбитого радіолокаційного сигналу. В роботі [1] – моделювання просторового та часового розподілу складових

поляризаційного спектру відбитого радіолокаційного сигналу, аналіз результатів моделювання. Вирішення протиріч в інтерпретації інформації при аналізі відбитого радіолокаційного сигналу. В роботі [47] – обґрунтування переваг використання поляризаційного спектру для вирішення низки метеорологічних задач. В роботі [49] - аналіз сил та атмосферних процесів, що призводять до деформації та вібрації рідких гідрометеорів; виведення виразу, який дозволяє визначити розподіл енергії відбитого від гідрометеорів радіолокаційного сигналу між ортогональними антенами доплерівсько-поляриметричного радіолокатора; обґрунтування граничних значень змін півосей краплі-сфероїда за рахунок впливу атмосферних динамічних процесів. В роботі [25] – обґрунтування зв'язку поляризаційного базису відбивача електромагнітної хвилі з характеристиками відбитої електромагнітної хвилі за допомогою поляриметричної радіолокаційної системи. В роботі [27] – фізичне обґрунтування та розробка методу визначення швидкості вітру за моментом розділення крапель з однаковими поляризаційними властивостями в об'ємі, що відбиває. В роботі [28] – математичне обґрунтування та розробка принципу визначення кількості гідрометеорів з однаковим розміром та формою в об'ємі, що відбиває. В роботі [29] – розробка поляриметричного методу визначення відносної кількості крапель певного розміру. В роботі [48] – аналіз результатів моделювання. В роботі [11] – перевірка фізичної моделі зв'язку поляриметричних параметрів радіолокаційного сигналу з характеристиками вітру за допомогою комп'ютерного моделювання. Аналіз результатів моделювання. В роботі [16] – моделювання поведінки крапель різних розмірів під дією вітру різної швидкості. Аналіз результатів моделювання. В роботі [15] – аналіз поляриметричних параметрів щодо можливості вміщувати інформацію про вітрові явища, розробка методу розрахунку тангенціальної складової швидкості вітру за допомогою поляриметрії. В роботі [18] – порівняння розрахунків за аналітичним виразом залежності коефіцієнта корекції радіолокаційного сигналу за кутом місця з відомими експериментальними даними. Розробка структурної схеми автоматичної корекції та видалення

гравітаційної складової під час оцінювання інтенсивності турбулентності. В роботі [19] – розробка алгоритму оцінювання турбулентності поляриметричним метеорологічним радіолокатором. В роботі [20] – пояснення та обґрунтування природи формування поляризаційного спектру, запропоновано вирішення невизначеності при оцінюванні швидкості вітру за моментом розриву краплі. В роботі [50] – розрахунок швидкості деформації рідких гідрометеорів під дією атмосферних явищ, обґрунтування зв'язку швидкості деформації рідких гідрометеорів з відбитим радіолокаційним сигналом. В роботі [21] – аналіз результатів моделювання поведінки крапель різних розмірів під дією вітру різної швидкості. Оцінювання ступеня деполіризації відбитих від сукупності гідрометеорів радіохвиль. В роботі [22] – моделювання розподілу поляризаційних складових радіолокаційного сигналу при відбиванні від опадів. В роботі [7] – аналіз можливостей сучасної авіації щодо створення глобальної мережі одержання та обміну даними з можливістю їх вибіркового та цільового використання, розробка узагальненої можливої структурної схеми глобальної мережі одержання та обміну метеорологічними даними з використанням динамічної інтерактивної системи одержання та розповсюдження інформації. В роботі [8] – аналіз перспективних напрямків розвитку технічних засобів для одержання оперативної інформації про метеорологічні умови за маршрутом польоту. Розробка структурної схеми глобальної мережі одержання та поширення метеорологічної інформації з використанням повітряних суден, як динамічних інтерактивних елементів мережі. В роботі [12] – одержання математичної моделі для оцінювання зміни поляризації відбитого від рідких гідрометеорів сигналу за допомогою однієї приймальної антени з фіксованою поляризацією. Розробка алгоритму. В роботі [30] – аналіз можливостей радіолокаційної поляриметрії щодо виявлення небезпечних для авіації атмосферних явищ. проведено дослідження впливу вітру на параметри руху та форму гідрометеорів, розроблено модель зв'язку поляриметричних параметрів радіолокаційного сигналу з характеристиками вітру (з урахуванням аеродинамічних сил, теореми Гейльмгольца та рівнянь Стокса). В роботі [51] –



Комп'ютерне моделювання аеродинаміки рідких гідрометеорів. Аналіз результатів моделювання. В роботі [52] – моделювання розподілу енергії відбитого радіолокаційного сигналу на приймальних антенах, що налаштовані приймати сигнал з різними кутами поляризації. Аналіз результатів моделювання. В роботі [53] – огляд та аналіз сучасних та перспективних поляриметричних методів. В роботі [54] – аналіз можливостей сучасних поляризаційно чутливих антен. В роботі [55] – обґрунтування низки можливостей перспективних радіолокаційних систем для вирішення метеорологічних задач. Опис та аналіз можливостей доплерівсько-поляриметричних систем для вирішення метеорологічних завдань. В роботі [56] – статистичне оцінювання можливості поляриметричного методу виявлення турбулентності та визначення її інтенсивності; розрахунки ймовірностей хибної тривоги, виявлення турбулентності, а також сумарної похибки.

**Апробація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях: “Microwaves, Radar and Remote Sensing” (MRRS 2005), вересень 2005, Київ, Україна; 5-му Міжнародному авіакосмічному салоні «АВІАСВІТ XXI». Гостоміль, 11–12 червня 2006 р.; Signal Processing Symposium SPS-2007, 24–27 May 2007, Jachranka near Warsaw, Poland; Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (ММЕТ) міжнародна конференція, 2008, Одеса, Україна; другій міжнародній конференції “Radar and Remote Sensing” (MRRS 2008), вересень 2008, Київ, Україна; Signal Processing Symposium SPS-2009, May 2009, Jachranka near Warsaw, Poland; International Radar Symposium (IRS 2009), 09–11 September, 2009, Hamburg, Germany; 9 міжнародна науково-технічна конференція (АВІА 2009), Київ, вересень, 2009, Україна; International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT 2009), міжнародна конференція, жовтень, 2009, Львів, Україна; International Radar Symposium (IRS 2010), 14-18 June, 2010, Vilnius, Lithuania; 13th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, міжнародна конференції, вересень 2010, Київ, Україна; Четвертий всесвітній конгрес “Safety in Aviation – Space Technologies” (Radar

Methods and Systems Symposium (RMSW 2010)), Київ, Україна, вересень, 2010; International Conference on Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP-2010), міжнародна конференція, жовтень 2010, Київ, Україна; Третій міжнародний симпозиум «Microwaves, Radar and Remote Sensing» (MRRS 2011), серпень, 2011, Київ, Україна; International Radar Symposium (IRS 2011), 7–9 September, 2011, Leipzig, Germany; European Radar Conference (EuRAD-2011), 12–14 October, 2011, Manchester, UK; 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, міжнародна конференція, серпень 2012, Харків, Україна; П'ятий всесвітній конгрес "Safety in Aviation – Space Technologies", Radar Methods and Systems Symposium (RMSW 2012), вересень, 2012, Київ, Україна; Signal Processing Symposium SPS-2013, 5–7 June 2013, Jachranka near Warsaw, Poland; International Radar Symposium (IRS 2013), June 19–21, 2013, Dresden, Germany; International Radar Symposium (IRS 2012), June 16–18, 2014, Gdansk, Poland; 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, міжнародна конференція, серпень 2014, Дніпропетровськ, Україна; 4th Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium, September 2014, Kyiv, Ukraine; Signal Processing Symposium SPS-2015, 10–12 June 2015, Debe near Warsaw, Poland; International Radar Symposium (IRS 2015), June 24–26, 2015, Dresden, Germany; International Radar Symposium (IRS 2016), May 10–12, 2016, Krakow, Poland; 16th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, міжнародна конференція, липень 2016, Львів, Україна.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 57 наукових праць, у тому числі 15 статей у фахових наукових журналах і збірниках, які входять до переліку ВАК України (у тому числі 5 статей без співавторів), 6 статей в міжнародних фахових журналах за кордоном, два патенти, а також 34 роботи у збірниках матеріалів і праць міжнародних конференцій. В наукометричній реферативній базі Scopus 31 наукова праця (Scopus hindex= 5).

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота викладена на сторінках машинописного тексту, складається з вступу, шести розділів, загальних

висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 294 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 5 таблицями і 92 рисунками. Список використаних джерел містить 138 найменувань, з них 62 кирилицею та 76 латиницею.

## РОЗДІЛ 1

### ПРИНЦИПИ СУЧАСНОГО МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЕРОНАВІГАЦІЇ

Метою метеорологічного забезпечення аеронавігації відповідно до [1,2,3] є сприяння безпечній, ефективній та регулярній аеронавігації. Метеорологічне забезпечення міжнародної аеронавігації виконується в рамках всесвітньої системи зональних прогнозів (ВСЗП) через всесвітні центри зональних прогнозів (ВЦЗП), іноді, через районні центри зональних прогнозів (РЦЗП). Взаємодія та узгодження метеорологічного забезпечення на міжнародному рівні координується міжнародною організацією цивільної авіації ІСАО, всесвітньою метеорологічною організацією (WMO) та європейською організацією EUROCONTROL.

Метеорологічне забезпечення польотів цивільної авіації є комплексом заходів, що спрямовані на забезпечення безпеки, регулярності та економічної ефективності польотів ПС та вміщують в себе одержання та своєчасне доведення до користувачів метеорологічної інформації, яка є необхідною для виконання службових обов'язків. До комплексу заходів належать:

- метеорологічні (навколосемні), аерологічні, радіолокаційні та супутникові спостереження;
- складання та поширення відповідним користувачам авіаційної метеорологічної інформації, авіаційних прогнозів погоди, попередження про особливі явища по аеродрому та маршрутам польотів;
- дії щодо своєчасного надання метеорологічної інформації для планування, організації та виконання польотів.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу сучасних систем одержання та розповсюдження метеорологічної інформації, їх можливостей та обмежень. В розділі відокремлені невирішені раніше частини щодо забезпечення оперативного одержання метеорологічної інформації та її

глобального розповсюдження зацікавленим користувачам, поставлена мета та завдання дослідження.

### **1.1 Наземні системи метеорологічного спостереження**

Основа сучасної мережі спостереження за станом атмосфери - метеорологічні станції наземного базування. На станціях проводять як навколотемні спостереження, так і аерологічні – досліджують високі шари атмосфери. Спостереження за станом атмосфери здійснюється одночасно в певні години за місцевим часом усією мережею метеорологічних станцій. Результати спостережень передаються до бюро прогнозів — установ, які завбачують погоду в даній місцевості. Прогностична, або поточна метеорологічна інформація для авіаційних потреб складається на основі даних метеорологічних станцій включно з аеродромними, автоматичними метеорологічними станціями та даними Air Route Traffic Control Center (ARTCC). Більшість сучасних станцій обладнано автоматичними системами спостереження за погодою. Вони є складовими частинами автоматичної мережі навколотемних погодних спостережень [7].

Відомі сучасні автоматичні системи спостереження за погодою, такі, як системи (AWOS – Automated Weather Observing Systems), мережі систем приземного спостереження (Automated Surface Observing Systems ASOS) та автоматичні системи метеорологічних сенсорів (Automated Weather Sensor System AWSS), що є сертифікованими федеральною авіаційною адміністрацією у сполучених штатах Америки (FAA – Federal Aviation Administration) для використання на аеродромах [8].

Автоматична система спостереження за погодою AWOS є одною з старіших систем, що використовуються у наш час і має шість реалізацій. Найпотужніший варіант такої автоматичної системи дозволяє одержати інформацію про напрямок та швидкість вітру, пориви вітру, змінний напрямок вітру, температуру та точку роси, тиск, барометричні установки, барометричну

висоту за щільністю повітря, видимість, стан неба, кількість хмар, явища погоди, тип опадів, грози та блискавки. Система проводить вимірювання кожні двадцять хвилин і не фіксує швидкоплинні погодні явища.

Автоматична система ASOS проводить приземні спостереження за погодою кожну годину, та додатково до можливостей системи AWOS, може робити спеціальні спостереження і фіксувати зміни в стані атмосфери, які перевищують авіаційні робочі мінімуми. Додаткові можливості системи ASOS – це можливість одержувати інформацію про поточні явища погоди, обледеніння, тиск на рівні моря та кількість опадів.

Основне завдання систем ASOS – забезпечити потреби кліматологічних вимірювань та досліджень. Отже станції не завжди розміщуються на аеродромах, часто їх розташування обираються виключно для забезпечення проведення кліматичних досліджень. Цілі та обладнання систем ASOS майже співпадають з автоматичними системи метеорологічних сенсорів (AWSS).

Основу аеродромних автоматичних метеорологічних станцій складає доволі широкий спектр обладнання. Першим керуючим документом з автоматичних систем метеорологічного спостереження на аеродромах став документ ICAO Doc 9837 [7], виданий ICAO в 2006 році. Документ надає інформацію щодо методів вимірювання параметрів атмосферних характеристик, алгоритмів одержання даних, оповіщення, джерел похибок, калібрування та технічного обслуговування вимірювальної апаратури, місць вимірювання тощо.

*Швидкість та напрямок вітру* на багатьох станціях відповідно до [7] вимірюється за допомогою стандартних флюгерів та анемометрів (чашкових). Недолік цих звичних приладів - залежність їх роботи від умов погоди, наприклад, замерзання за наявності низької температури. Розвиток технологій дозволив використовувати для вимірювання параметрів вітру на найновіших станціях (таких, як ASOS) нові системи, наприклад ультразвукові, або акустичні анемометри, що переважно вимірюють горизонтальну складову вектору вітру.

*Видимість* на автоматичних аеродромних станціях вимірюється за допомогою приладів прямого розсіювання світлових променів, що визначають прозорість атмосфери. Передавач випромінює промінь, а набір приймачів, встановлених на прямій лінії та під кутом 45 градусів, приймають промені та оцінюють світловий потік, порівнюючи його з тим, що був переданий. Зменшення світлового потоку обумовлюється наявністю часточок в повітрі, що відхиляють, або відбивають світло, та є причиною зниження видимості в атмосфері. Можливість приймачів обмежується спроможністю давачів вимірювати видимість менше ніж 200 м та більше 10 миль. Більш того, треба зазначити, що видимість визначається не тільки прозорістю атмосфери, а й іншими факторами, такими як контрастність, яскравість та, навіть, психофізичні особливості людини, яка має працювати за зазначених умов. Крім того, в умовах зниженої видимості, ускладненої наявністю вітрових явищ, треба звернути увагу на можливу раптову зміну умов, що можуть не бути врахованими за період осереднення спостережень. Такий факт є важливим для роботи авіації, тому що час виконання маневру може бути менший, ніж період оновлення даних.

Для визначення *наявності та типу опадів* автоматичні метеорологічні станції використовують ідентифікатор на базі світлодіодів. Для ідентифікації пристрої враховують швидкість падіння, розмір та мерехтіння часточок. Звичайно, за таких ознак сучасні системи не ідентифікують всі типи опадів. Перехідні типи опадів та, навіть, такі небезпечні, як град, льодовий дощ, або крупа не можуть бути достовірно ідентифіковані сучасними автоматичними системами. В таких випадках, пілот та авіаційний диспетчер знаходять скорочення (up) unknown precipitation в авіаційних повідомленнях про погоду.

*Кількість та інтенсивність опадів* на метеорологічних станціях вимірюються стандартними вимірювачами опадів. Вимірювачі опадів - це ємності фіксованого діаметру. Деякі вимірювачі обладнані пристроями, що здійснюють підігрів твердих типів опадів. На автоматичних метеорологічних станціях тиск потоку рідини, створений певним рівнем опадів в вимірювачі

активує перемикач, що посилає електричний сигнал. Найчастіше, це один сигнал на 0,01 дюйма або 0,25 мм накопичених опадів. Такі системи мають доволі велику похибку при вимірюванні твердих опадів. Для зменшення похибки в деяких ASOS системах використовується датчик, що має назву All Weather Precipitation Accumulation Gauge (AWPAG) [9], який реагує на вагу будь-яких опадів, що збираються в ємності.

*Кількість та висота хмар* вимірюються за допомогою пристрою, що має назву сейлометр. Основу сейлометра складає передавач лазерного променя та приймач відбитого променя. Висота хмар та ceiling розраховується за часом, що знадобився для повернення лазерного зондувального сигналу. Обмеженням таких систем є їх здатність вимірювати висоту хмар лише приблизно до 4000 метрів, та оцінювати стан неба вертикально над місцем розміщення. Звичайно, у випадку швидкої зміни стану неба, особливо за наявності небезпечних для польотів хмар, з урахуванням періоду осереднення, така інформація не може бути достатньою. Більш того, система не проводить ідентифікації типу хмар.

*Температура* на метеорологічних станціях вимірюється звичайними термометрами, яких на наш час існує багато видів. Це і ртутні або спиртові на звичайних станціях, і електричні на автоматичних. Для одержання характеристик вологості може вимірюватися, як *точка роси*, а *відносна вологість* розраховуватись, так і навпаки - відносна вологість з подальшим розрахунком температури точки роси. Пряме вимірювання точки роси є доволі складним процесом і пов'язано зі значною похибкою, отже модернізовані сучасні системи в більшості використовують датчики для вимірювання відносної вологості з подальшим розрахунком значення точки роси [10].

Інформація про *обледеніння* складається та передається, як наявність *переохолодженого дощу*. Для цього автоматичні системи враховують дані світлодіодних ідентифікаторів, що мають надати інформацію про наявність дощу або не ідентифікованих опадів, та датчика, що вимірює резонансну частоту стрижня (resonant frequency of a vibrating rod), що вібрує. Резонансна



частота зменшується відповідно зі збільшенням відкладень льоду, паморозі, мокрого снігу, мряки чи туману. У випадку ідентифікації світлодіодним ідентифікатором твердих опадів – снігу, інформація про резонансну частоту ігнорується системою.

Відповідно до [7] *тиск* на автоматичних метеорологічних станціях вимірюється на абсолютній висоті установа барометра. Виміряна таким чином величина використовується для розрахунку QNH та QFE. При такому безпосередньому вимірюванні можливі похибки, що викликані динамічними атмосферними процесами. Для мінімізації їх впливу рекомендується використовувати приймачі статичного тиску.

Інформація про *грозову активність* на аеродромі на звичайних метеорологічних станціях визначалась за часовим інтервалом між спалахом блискавки та розклатом грому. Для фіксації явища грози на аеродромі (метеорологічній станції) інтервал не має перевищувати 5 секунд (1 секунда відповідає відстані в 1 кілометр від спостерігача) [11].

Деякі сучасні автоматичні станції інформацію про грозову активність одержують за допомогою датчиків, що реагують на спалах світла та моментальну зміну електричного поля, яка викликана цим спалахом. У випадку, якщо часовий інтервал між спалахом та зміною електричного поля складає декілька мілісекунд, станція повідомляє про можливий грозовий розряд. Якщо розряди фіксуються з інтервалом 15 хвилин, станція видає повідомлення про грозу.

Для повідомлення про грозову діяльність деякі сучасні автоматичні метеорологічні станції, переважно в США обладнані автоматичними системами виявлення та повідомлення про блискавки (ALDARS), та об'єднані в національну мережу виявлення блискавок (NLDN). Мережа використовує більше сотні датчиків, інформація з яких поступає до автоматичних систем виявлення блискавок, які, в свою чергу, передають повідомлення автоматичним

аеродромним станціям про близькість розрядів. У випадку фіксації розрядів в радіусі 8 кілометрів від станції (аеродрому), фіксується та передається інформація про грозу на аеродромі (станції). У випадку фіксації розрядів в радіусі від 8 до 16 кілометрів передається інформація про грозу на околиці аеродрому (станції) (*in the vicinity of, VCTS*). У ряді випадків можливе повідомлення про грозу на відстані (LTG DSNT), якщо розряди фіксуються в радіусі від 16 до 48 кілометрів.

Як уже зазначалося, на базі метеорологічних станцій проводяться і спостереження за станом атмосфери на різних висотних рівнях – це так звані аерологічні дослідження. Існує багато методів аерологічних досліджень, які умовно можна поділити на контактні та дистанційні [12]. Контактні (або прямі) - засновані на використанні приладів, що піднімаються на ту висоту, на якій необхідно провести вимірювання тієї чи іншої величини. Дистанційні методи дозволяють вивчати явища на відстані. Вони поділяються на активні і пасивні. Пасивні методи базуються або на прийомі сигналів (наприклад, від радіозонду) або на візуальних спостереженнях. При використанні активних методів із Землі або з літального апарату в атмосферу посилаються різні сигнали: звукові (акустичний метод), світлові (лазерний метод), радіосигнали (метеорологічна радіолокація).

Основним методом аерологічних досліджень є зондування, тобто вимірювання метеорологічних величин за допомогою приладів, що піднімаються в атмосферу, або зондувальних сигналів.

Запуск першого радіозонда було здійснено 30 січня 1930 року професором Павловської аерологічної обсерваторії П.А. Молчановим [13], а з 1935 розпочала свою діяльність перша мережа станцій регулярного радіозондування атмосфери. За 80 років свого розвитку радіозондування атмосфери якісно змінювалось і характеризувалось збільшенням висоти проведення досліджень, автоматизацією досліджень та обробки даних, що

обумовлювалось технікою, методами та технологіями. Глобальна світова мережа радіозондування є невід'ємною частиною Всесвітньої служби погоди [14]. Аерологічні спостереження проводяться відповідно до вимог нормативних документів Всесвітньої Метеорологічної Організації (ВМО), яка сприяє стандартизації спостережень. ВМО періодично приймає Технічний регламент, який прописує країнам-членам ВМО процедури та порядок метеорологічних вимірювань. Технічні комісії ВМО розробили вимоги щодо точності вимірювання параметрів. Для забезпечення зіставлення даних з різних типів апаратури, за рішенням комісії з приладів та методів спостереження, ВМО періодично проводяться Міжнародні порівняння систем радіозондування, що використовуються в різних країнах. Контроль за якістю даних світової мережі радіозондування здійснює Європейський центр середньострокових прогнозів погоди (ЄЦСПП) за допомогою проведення автоматизованого моніторингу результатів радіозондових вимірювань в різних регіонах.

На наш час найпоширеніші наступні види зондувань:

- Вітрове – вимірювання швидкості і напрямку вітру;
- Температурно-вітрове – вимірювання температури, швидкості і напрямку вітру;
- Радіозондування – використовуються радіозонди
- Літакове – за допомогою апаратури, встановленої на літаках;
- Ракетне – за допомогою апаратури, що встановлюється на метеорологічних ракетах
- Супутникове – за допомогою приладів на метеорологічних супутниках.

Найпоширенішими аерологічними приладами на наш час є:

- *Метеорографи* - самописні прилади, що реєструють тиск, температуру, та вологість повітря; їх підіймають на літаках, аеростатах або кулях-зондах.
- *Радіозонди* – прилади що вимірюють основні метеорологічні елементи і автоматично за допомогою коду передають ці дані по радіо. Радіозонди підіймають у повітря на кулях, заповнених воднем і пускають у вільний політ.
- *аерологічні теодоліти* - за їхньою допомогою вимірюють кутові координати вільного польоту кулі з метою визначення швидкості та напрямку вітру на різних висотах.
- *Радіотеодоліти* – це радіоприймачі з напрямленою антеною, що служать для визначення кутових координат радіозонда або передавача, який підіймається на кулі-пілоті, особливо за умов відсутності видимості, коли спостереження за допомогою аеротеодолітів неможливе.
- Локатори – активні системи, що більш детально розглянуті в пункті 1.2 цього розділу.

Більш детальний огляд активних методів та методів одержання інформації за допомогою давачів, що розміщені на пересувних платформах (ракетах, супутниках, літаках тощо) зроблено в підрозділах 1.2, 1.3 та 1.4 цього розділу.

Не зважаючи на доволі широкий спектр можливостей щодо виявлення та визначення метеорологічних умов, автоматичні метеорологічні станції не фіксують та не надають інформацію про наступні метеорологічні явища, що є важливими для виконання польотів та роботи авіаційної техніки: низький, або нерегулярний туман (*shallow or patchy fog*); пил, що підіймається (*blowing dust*); дим; опади вулканічного попелу (*falling ash*); виверження вулканів; торнадо; деякі типи опадів такі, як град, льодовий дощ (льодова крупа), снігові зерна (*hail, ice pellets and snow grains*); змішані опади; висота свіжого шару снігу; загальний шар снігу; розряди блискавок в хмарах чи між хмарами; хмари, що

знаходяться не вертикально над станцією; типи хмар; хмари вище ніж 12 000 футів над рівнем землі. Фіксація цих умов людиною-оператором пов'язана з помилками та персональними особливостями сприйняття явищ. Отже, необхідно продовжувати дослідження щодо надання нових можливостей автоматичним метеорологічним станціям у виявленні та ідентифікації складних метеорологічних умов. Інше питання пов'язано зі значною кількістю механічних зіпсувань та технічних дефектів, які є причиною нерепрезентативних чи помилкових даних, що потребує досліджень та покращень – це розробка більш надійних систем для автоматичного одержання метеорологічної інформації [15].

Дані метеорологічних станцій використовуються переважно для синоптичних цілей. В авіації інформація з аеродромних метеорологічних станцій використовується для аналізу можливостей здійснити виліт або посадку в конкретному аеродромі. Дані навколосемних спостережень неможливо використовувати в якості джерел оперативної інформації за маршрутом польоту.

## **1.2 Радіолокаційні системи та методи спостереження за станом атмосфери**

Використання радіолокаційних систем для вирішення питань метеорології розпочало свій розвиток в сорокових роках двадцятого століття. Метод радіолокаційного виявлення та спостереження за траєкторією зливових опадів та гроз, що був запропонований В.В. Костаревим в 1946 році [13] реалізувався на початку 50-х років 20-го століття в першу в Радянському Союзі мережу радіолокаційних сантиметрових станцій для оперативного штормовиявлення та оповіщення. Раніше в Сполучених Штатах Америки та Англії були розроблені та створені перші робочі метеорологічні радіолокаційні станції [16, 17] і вже з початку 50-х років 20 століття радіолокаційні системи, що вимірюють інтенсивність та місцезнаходження метеоявища, розпочали свою роботу в багатьох країнах світу. З початку 60-х років 20 століття розпочато

експериментальні дослідження щодо вивчення поляризаційних характеристик хмар та опадів [17], а також щодо використання доплерівського ефекту для одержання інформації про динамічні властивості метеорологічних цілей. З 80-х років 20 століття мережі радіолокаційних систем широко використовуються в розвинутих країнах для забезпечення метеорологічною інформацією відповідних служб та структур. З цього ж часу відбувається поступова заміна некогерентних радіолокаційних систем на доплерівські, які додатково до інтенсивності вимірюють і радіальну швидкість розсіювачів електромагнітної хвилі. В США- створення мережі доплерівських радіолокаційних станцій розпочато з 1988 року, вона отримала назву (NEXRAD або WSR-88D) [18]. На рубежі 20 і 21 століть розпочато дослідження щодо використання поляриметричних технологій у різних діапазонів хвиль для вирішення метеорологічних задач. З цього часу використання радіолокаційних систем з дуальною поляризацією знаходить своє практичне впровадження [19] в таких країнах, як США, Франція, Канада, Нідерланди та Велика Британія.

Сучасні радіолокаційні системи дозволяють

- оперативно одержати інформацію про наявність, інтенсивність та кількість опадів,
- надати штормове оповіщення, розрізнити деякі типи опадів (дощ, сніг, град),
- визначити окремі вітрові характеристики в хмарах та опадах.

### **1.2.1 Некогерентні метеорологічні радіолокаційні системи**

Традиційний некогерентний локатор вимірює потужність відбитого від метеорологічної цілі сигналу, осереднену за деякий час [20]. Вимірювана величина, яка використовується для оцінки небезпечних явищ, називається радіолокаційна відбиваність  $Z$  (РВ) і залежить від кількості крапель в об'ємі, що відбиває, їх розміру та діелектричної проникності речовини. Формула, яка визначає РВ записується наступним чином [20]:

$$Z = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N D_i^6, \quad (1.1)$$

де  $D$  – діаметр краплі,  $V$  - об'єм, що відбиває (роздільний об'єм),  $N$  - кількість гідрометеорів в одиниці об'єму.

За допомогою звичайного некогерентного радіолокатора оцінюється інтенсивність опадів, відстань до них. Висока РВ є також непрямую ознакою ймовірної наявності небезпечних явищ без точного визначення місця знаходження небезпечного явища у хмарності [21]. Треба зазначити, що зв'язок інтенсивності опадів та типу гідрометеорів з радіолокаційною відбиваністю не є однозначним.

### 1.2.2 Допплерівські метеорологічні радіолокаційні системи

Сучасні метеорологічні радіолокаційні станції додатково до величини радіолокаційної відбиваності вимірюють радіальні швидкості цілі відносно РЛС. Така можливість базується на використанні ефекту Доплера, який проявляється в тому, що частота прийнятих коливань  $f$  відрізняється від частоти коливань, які було випромінено  $f_0$ , якщо розсіювач і приймач рухаються відносно один одного. Прийнятий радіолокатором сигнал, відбитий від цілі, характеризується частотним Допплерівським зсувом  $\Delta f$ :

$$\Delta f = \frac{2v}{\lambda}, \quad (1.2)$$

де  $v$  – радіальна швидкість руху розсіювача,  $\lambda$  – довжина хвилі.

Використовуючи ефект Доплера можна отримати інформацію про мікроструктуру опадів, динамічні процеси, які відбуваються в хмарах та одержати інформацію про турбулентні процеси чи зсув вітру [22,23,24,25].

Для повноцінних доплерівських вимірювань необхідний когерентний локатор, амплітуда і початкова фаза випроміненого коливання, в якому в кожному періоді повторення відомі або постійні. При зондуванні метеооб'єкта, необхідно мати на увазі його статистичну природу. В реальному випадку відбитий сигнал формується від безлічі частинок, які знаходяться у роздільному

об'ємі. Отже, прийнятий сигнал містить цілий спектр Допплерівських частот, які пов'язані з радіальними швидкостями розсіювачів. Поняття доплерівського спектру широко використовується на практиці для інтерпретації даних, отриманих за допомогою мікрохвильового дистанційного зондування атмосфери і враховує енергетичну сторону сигналу, який сформовано комплексом розсіювачів, що рухаються і потужність відбивання від яких залежить від їх розмірів [20]. Для зручності на практиці, щоб зробити аналіз, частіше використовують статистичні моменти, що описують спектр [25].

Допплерівські методи виявлення зон небезпечних метеоутворень базуються на припущенні, що розсіювачі захоплюються повітряними потоками. Виявлення зон небезпечної турбулентності зводиться до вимірювань характеристик руху гідрометеорів за допомогою РЛС. У якості оцінюваних характеристик руху може бути використано вимірювання різних параметрів за допомогою як когерентних, так і звичайних РЛС.

В Україні на наш час встановлено п'ять (Київ, Харків, Донецьк, Львів, Симферопіль) доплерівських метеорологічних радіолокатора. Основними функціями автоматизованого метеорологічного радіолокаційного комплексу «МЕТЕОР-МетеоЯчейка» на базі доплерівського метеорологічного радіолокатора МЕТЕОР 500С, що встановлено в а/п Бориспіль є [26]:

- Створення радіолокаційних архівів за типами даних:
  - відбиваність,
  - радіальна швидкість
- Обробка інформації для одержання радіолокаційних характеристик у вигляді карт:
  - метеоявищ, висот «радіоехо», небезпечних явищ, кількості опадів, швидкості шквалів, вертикального перерізу хмарності, зон обледеніння, радіальних та відтворених швидкостей, ширини доплерівського спектра, кількості опадів
- Передавання даних користувачам .



В США мережа доплерівських метеорологічних станцій (NEXRAD) використовується також для одержання інформації та попереджень про торнадо, швидкості пересування штормових хмар, тропічних циклонів тощо [27]. Треба зазначити, що доплерівські системи мають деякі обмеження при вимірюванні динамічних характеристик метеорологічних явищ, а саме:

- інтерпретація даних базується на багатьох гіпотезах про атмосферу та метеорологічні цілі, які не завжди відповідають конкретній ситуації;
- неможливість одержання інформації безпосередньо поблизу поверхні землі.

Метеорологічні доплерівські радіолокаційні системи можуть мати наземне розташування, а можуть розміщуватись на борту ПС для одержання інформації за маршрутом польоту та оперативного попередження екіпажів ПС про небезпечні явища. При доплерівських вимірюваннях бортовими РЛС виникають деякі труднощі [20], а саме:

- При горизонтальному скануванні антени вимірюються горизонтальні складові швидкостей.
- Оцінюються тільки середні швидкості розсіювачів
- У випадку бортової РЛС до спектру доплерівських частот додається складова, яка викликана радіальною швидкістю повітряного судна відносно гідрометеорів, які знаходяться у відбивному об'ємі.
- Гармонійний сигнал може вимірювати з високою точністю радіальну складову, але не здатен вимірювати дальність.
- Реальний сигнал має кінцеву тривалість. А це робить важким досягнення достатнього розділення цілей по радіальній швидкості.
- Неможливо досягти водночас високу точність і роздільну здатність як по дальності, так і по швидкості. Вимірювання ж треба проводити одночасно по дальності і по швидкості в роздільному об'ємі.
- Обробку сигналів необхідно виконувати в реальному масштабі часу по всій дальності  $R_{\max}$  для кожного роздільного об'єму  $\Delta R$ , тобто для всіх  $n$

елементів дальності. Згідно до технічних характеристик бортового метеорологічного радіолокатора, який спроможний виявляти зсув вітру Aginc-708A [28], кількість чарунок повинна бути  $n = 512$ .

Необхідно мати на увазі технічні труднощі, пов'язані зі створенням бортових пристроїв генерування стабільних когерентних коливань НВЧ достатньої потужності. Виміряти швидкість гідрометеорів відносно радіолокатора можливо тільки за допомогою когерентної РЛС.

### 1.2.3 Поляриметричні радіолокаційні системи

Для забезпечення користувачів метеорологічної інформації більш повними та детальними даними про характер, поведінку та наявність небезпечних явищ, в багатьох розвинутих країнах світу мережі метеорологічних станцій доповнюються новими можливостями з використанням поляриметричних технологій [18].

Такий підхід дозволяє одержати більш детальну інформацію про мікроструктуру хмар та опадів, розміри, форму, просторову орієнтацію, термодинамічний стан, а також оцінити кількість опадів. У випадку зондування атмосфери за допомогою доплерівської РЛС, припускається, що гідрометеори мають сферичну форму. Однак, більшість розсіювачів не є сферичної форми. Наприклад, краплі дощу сплюснені, кристали льоду можуть бути або сплюсненими, або витягнутими, сніжинки взагалі не мають чітко вираженої форми. Зворотне розсіювання від несферичного розсіювача залежить від поляризації електричного поля зондувального імпульсу. Якщо змінювати поляризацію антен РЛС, то можна отримати інформацію про форму гідрометеора. Сучасні поляриметричні радіолокатори відрізняються змінною поляризацією випроміненого і/або прийнятого сигналу та забезпечують прийом двох ортогонально поляризованих радіохвиль [22].

В сучасних радіолокаційних системах вимірювання поляризаційних параметрів найчастіше реалізується за наступними схемами:

1. Передавач і приймач налаштовані на горизонтальну поляризацію (со-поляризаційні вимірювання).
2. Передавач і приймач налаштовані на вертикальну поляризацію (со-поляризаційні вимірювання).
3. Передавач випромінює горизонтально (або вертикально) поляризований сигнал, а приймач налаштований на приймання ортогональної компоненти відбитого сигналу (крос-поляризаційні вимірювання).

Для керування поляризацією радіолокаційного сигналу використовують антени з керованою поляризацією. Відомі два основних типи поляриметричних РЛС – одноканальні та двоканальні. У двоканальних РЛС кожний з ортогональних компонентів сигналу обробляється паралельно у своєму каналі. Це дозволяє швидше одержати необхідну сукупність поляризаційних параметрів. Але для точної роботи двоканальної РЛС необхідна підтримка високої ідентичності каналів. Інакше, розходження в поляризації можуть бути наслідком не особливостей хмар і опадів, а розходженням критичних характеристик паралельних каналів.

В одноканальних РЛС цього недоліку не існує. Однак у таких РЛС для оцінки вимірюваних поляризаційних параметрів необхідно вдвічі більше часу для випромінювання та прийому необхідного набору сигналів.

В сучасних поляриметричних системах найчастіше вимірюють радіолокаційну відбиваність при різних поляризаціях при цілком певних поляризаційних параметрах системи на передачу і прийом (вертикальній (1.3) чи горизонтальній (1.4)), диференціальну відбиваність (1.5) або лінійне деполіризаційне відношення (1.6) та (1.7): [20].

Радіолокаційна відбиваність при горизонтальній поляризації

$$Z_v = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \left\langle |S_{vv}|^2 \right\rangle. \quad (1.3)$$

Радіолокаційна відбиваність при вертикальній поляризації

$$Z_h = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} \left\langle |S_{hh}|^2 \right\rangle. \quad (1.4)$$

Диференціальна відбиваність

$$Z_{DR} = 10 \log \frac{|S_{hh}|^2}{|S_{vv}|^2}. \quad (1.5)$$

Лінійне деполаризаційне відношення

$$LDR = 10 \log \frac{|S_{hv}|^2}{|S_{vh}|^2}. \quad (1.6)$$

або

$$LDR = 10 \log \frac{|S_{vh}|^2}{|S_{vv}|^2}. \quad (1.7)$$

де  $S$  та  $S$  з різними індексами – це комплексні амплітуди матриці зворотного розсіювання  $[S]$ . Ця матриця зв'язує електричне поле зворотного розсіювання в антені з падаючим електричним полем.

Індекси комплексних амплітуд означають дві ортогональні поляризації відповідно ( $h$  - індекс горизонтальної лінійної поляризації,  $v$  – індекс вертикальної лінійної поляризації).

$K=2\pi/\lambda$  – хвильове число,  $\lambda$  - довжина хвилі.

Для сукупності гідрометеорів, які є взаємооберненим середовищем  $S_{hv} = S_{vh}$ .

Відмінність оцінки РВ в даному випадку є в тому, що оцінювання виконується при цілком певних поляризаційних параметрах системи на передачу і прийом. Вимірювання лінійного деполаризаційного відношення з

необхідною точністю викликає певні труднощі, тому що це досить мала величина.

На практиці гідрометеори часто являють собою достатньо різномірну суміш. Вони не мають певної форми та їхні поляриметричні сигнатури не є визначеними. Також зв'язки між параметрами розсіювачів і вимірних величин є нелінійними або досить завуальованими. Для виключення деяких характеристик властивостей гідрометеорів і виділення інших використовуються комбінації вимірюваних величин, що пов'язано із складністю алгоритмів обробки та часом їх реалізації.

#### 1.2.4 Акустичні методи зондування атмосфери SoDar

Локаційні системи, які використовують у якості зондувального сигналу електромагнітні хвилі звукового діапазону – Содари - використовуються в метеорології у якості інструментів, що дозволяють вимірювати швидкість вітру на різних висотах, температурний градієнт атмосфери, зсув вітру та атмосферну турбулентність [29]. Швидкість та напрямок вітру в содарах оцінюється за доплерівським зсувом. Параметри турбулентності оцінюються і за амплітудою розсіяного сигналу [30]. В содарах, як правило, використовуються прості немодульовані вузькосмугові сигнали. В якості антенних систем використовуються як апертурні, так і фазовані антенні решітки.

Обмеженнями у використанні звукових систем дистанційного одержання інформації є їх діапазон дальності – декілька кілометрів, та суттєвий вплив завад на звукові хвилі. Отже, на теперішній час, використання содарів обмежується їх застосуванням для зондування атмосферного шару поблизу земної поверхні.

### 1.2.5 Оптичні локаційні метеорологічні системи LiDar

Локаційні системи, які використовують у якості зондувального сигналу електромагнітні хвилі оптичного діапазону – Лідари – використовуються в метеорології у якості інструментів, що дозволяють:

- вимірювати висоту нижньої межі хмар;
- вимірювати дальність видимості - трансміссометри;
- вимірювати швидкість та напрям повітряних рухів – доплерівські лідари;
- вимірювати температуру атмосфери.

В 2000 роках лідари використовують на борту супутників для спостереження за рухом повітряних мас на значних територіях. Також лідари використовуються у якості інструментів для спостереження за забрудненістю атмосфери завдяки їх спроможності визначати концентрацію різних газів за оптичними показниками, що залежать від довжини хвилі.

Принцип роботи оптичних метеорологічних локаторів базується на розсіюванні світлових хвиль часточками атмосферних газів та аерозолів [31, 32, 33].

Лідари можна використовувати для дослідження як високих шарів атмосфери та процесів в ній, так і низьких шарів атмосфери. Для досліджень високих шарів атмосфери використовують ультрафіолетовий діапазон випромінювання. Для дослідження низьких шарів атмосфери використовують видимий чи інфрачервоний діапазони.

До переваг лідарних систем можна віднести високу просторову роздільну здатність та одержання інформації зі значних територій та висот. До обмежень у використанні лідарних систем можна віднести залежність результатів вимірювань від ступеню забрудненості атмосфери, а також неможливість одержання детальної інформації з приземного шару повітря [29].

Радіолокаційні системи добре себе зарекомендували не тільки як потужний засіб виявлення та стеження за відносно макромасштабними

атмосферними формуваннями з земної поверхні, але і як засоби виявлення небезпечних для польотів зон з борту повітряного судна. Отже розробка нових методів одержання оперативної інформації про небезпечні атмосферні явища з борту повітряного судна є важливим завданням, яке спрямоване на підвищення функціональних можливостей бортових систем щодо виявлення небезпечних для польотів метеорологічних явищ, а також в глобальному процесі одержання та розповсюдження метеорологічної інформації.

### **1.3 Супутникові системи та методи спостереження за станом атмосфери**

Глобалізація авіаційних перевезень, створення регулярних авіаліній в найвіддаленіші пункти нашої планети, організація міжконтинентальних перельотів, включно до Антарктиди, потребували прогнозування погоди на тривалий термін, що неможливо без систематичних метеорологічних спостережень по всій поверхні планети. За допомогою метеостанцій, яких на планеті налічується порядку 10 тисяч, неможливе спостереження за великомасштабними явищами, їх еволюцією та траєкторіями. Одержання багатьох різноманітних характеристик складних метеорологічних явищ також неможливо за допомогою стандартного обладнання метеорологічних станцій. Більш того, в важкодоступних районах нашої планети не забезпечується стандартне спостереження за станом атмосфери. Треба зазначити також, що неконтрольована частина атмосфери не тільки велика за розмірами, але і розташована над районами, що грають найважливішу роль у формуванні погодних явищ [34].

Тому ще в середині 20 століття були сконструйовані принципово нові засоби дистанційного одержання метеорологічної інформації, такі, як метеорологічні ракети, що в змозі зондувати атмосферу на висотах до 500 км, та метеорологічні супутники. Їх використання збільшило у багато разів інформацію про погоду на нашій планеті, доступну для повсякденного аналізу.

З появою метеорологічних ракет можливість зондування атмосфери в різних кліматичних зонах та за різних погодних умов значно збільшилась. Більш того, з'явилась можливість організувати пересувні пункти дистанційного ракетного зондування, як над континентами, так і над океанами - на морських кораблях. За допомогою метеорологічних ракет проводилися регулярні спостереження за температурою, тиском, щільністю, іонним та нейтральним газовим складом атмосфери, потоком мікрометеорної речовини та інших параметрів різних шарів газової оболонки нашої планети.

Передача інформації здійснюється за допомогою радіотелеметричних каналів зв'язку з борту ракети, що знаходиться в польоті безперервно в темпі вимірювань, або дані в записаному вигляді повертаються на землю. Інформація з борту ракети чітко асоціюється з шарами атмосфери, де проводяться вимірювання. Час польоту ракети складає приблизно 7-8 хвилин.

До недоліків метеорологічних ракет можна віднести той факт, що вони не забезпечують необхідну повноту інформації порівняно з мережею аерологічного спостереження, що обумовлено невеликою кількістю пунктів ракетного зондування та невеликою інформативністю кожного з ракетних експериментів. До інших недоліків можна віднести обмеження часу спостереження за атмосферними явищами та процесами, що відбуваються на великих висотах, а також високу ціну запуску ракети, що унеможливило створення глобальної мережі ракетних спостережень [35].

Якісно нову інформацію про стан погоди дозволили одержати штучні метеорологічні супутники Землі (ШМС). Метеорологічні супутники показують загальний розподіл ряду метеорологічних елементів всієї Земної кулі. Широта огляду супутника сягає більше 1000 кілометрів.

Метеорологічні супутники оснащені оглядовою і вимірювальною апаратурою. Основа оглядової апаратури – це, так звані телевізійні, інфрачервоні та мікрохвильові системи супутника, що дозволяють у комплексі виконувати фотографування хмар і земної поверхні не тільки на денній (освітленій Сонцем), але і на нічній (тіньовій) стороні нашої планети.



Звичайна висота орбіт сучасних метеорологічних супутників близько 900 км, форма орбіт - майже кругова, орбіти близькі в напрямку до полярних. Ширина смуги огляду понад 2000 км (2400 км для телевізійної і 2600 км - для інфрачервоної апаратури). Метеорологічні супутники розташовуються і на геостаціонарних орбітах екваторіальних широт на висоті близько 36000 км. Вони призначені для менш детального, але постійного огляду земної поверхні. Обертаючись разом із Землею з постійною кутовою швидкістю, вони здатні забезпечити спостереження однієї дуже великої ділянки земної поверхні.

Використання штучних супутників Землі дозволяє отримати багато додаткової оперативної інформації, наприклад:

- про межі сніжного покриву і всі їх зміни,
- про хмарність атмосферних фронтів і циклонів, доповнюючи й уточнюючи дані мережі наземних метеорологічних станцій,
- про стан підстильної поверхні нашої планети;
- дані про температуру землі та поверхні моря;
- про склад радіаційного балансу системи атмосфера-Земля;
- про загальне вологовміщення атмосфери;
- про атмосферні забруднення в планетарних і регіональних масштабах: про димові хмари над промисловими районами і над лісовими масивами, що виникають у результаті індустріального забруднення повітря і лісових пожеж; про вогнища забруднень над промисловими центрами, їх переміщення, особливості структури, що дозволяють судити про концентрацію домішок і висоти їх поширення;
- про еволюцію тропічних циклонів і хмарних систем в низьких широтах в районах можливого зародження тропічних штормів;
- простежувати лінії шквалів над океаном і виявляти торнадо;
- за допомогою геостаціонарних супутників можна стежити за переміщенням хмар і визначати швидкість і напрям вітру на висоті хмарності;
- виявляти тайфуни та урагани;

- за допомогою мікрохвильової радіометричної апаратури на ШСЗ можна вивчати стан земної поверхні крізь хмарність, так як для розповсюдження хвиль сантиметрового діапазону вона не є перешкодою. Крім того, така апаратура дає можливість більш детально дослідити процеси, що протікають у самих хмарах;

- вимірювання теплового радіовипромінювання над мало освітленими ділянками земної кулі, наприклад над океанами, дозволяє визначити наявність і потужність хмарного покриву, виявити зони випадання опадів і оцінити інтенсивність останніх.

Телевізійна зйомка хмарності проводиться у видимій частині сонячного спектру. При звичайній висоті польоту метеорологічного супутника (близько 900 км) роздільна здатність апаратури становить приблизно 1-2 км. Фотографування в інфрачервоній частині спектру в діапазоні хвиль довжиною 8-12 мкм здійснено і в нічний час; роздільна здатність апаратури - приблизно 8 км. Сучасні супутники обладнанні камерами, що дозволяють одержувати та передавати кольорові зображення. Обладнання метеорологічних супутників дозволяє вести роботу в режимах як безпосередньої передачі інформації, так і запам'ятовування її, з наступним зчитуванням за командою з Землі.

В основі мікрохвильового дослідження атмосфери за допомогою ШСЗ лежить здатність усіх тіл в природі випромінювати і поглинати енергію. Зі зміною температури земної поверхні, її вологовмісту, наявності на ній води, снігу, опадів, кількості розчиненої у воді солі та інших показників її стану змінюються теплові потоки, які виходять від земної поверхні. Вимірюючи теплові потоки високочутливою апаратурою, що працює в діапазоні мікрохвиль, можна судити про багато процесів, що відбуваються на поверхні океану, суші, в хмарах і в атмосфері. Вимірювання теплового радіовипромінювання над мало освітленими ділянками земної кулі, наприклад над океанами, дозволяє визначити наявність і потужність хмарного покриву, виявити зони випадання опадів і оцінити інтенсивність останніх. Це пов'язано зі

здатністю крапельно-рідкої води, що міститься в хмарах і опадах, активно поглинати радіовипромінювання з довжиною хвилі менше 1 см. Таким чином, за інтенсивністю фіксованого супутником випромінювання можна судити про стан погоди над поверхнею океану.

Досліджуються можливості існуючих супутникових технологій для метеорологічних цілей. Наприклад, GPS-приймачі пропонуються до використання на метеорологічних станціях в США з 1993 року для вимірювання водяної пари [36]. У випадку наземного розташування такі системи забезпечують автономне, недороге та ефективне за багатьох погодних умов вимірювання кількості водяної пари. Їх недоліками є те, що вони не надають інформацію про вертикальний розподіл водяної пари, тобто вимірюють водяну пару безпосередньо над антеною приймача та характеризуються низькою просторовою роздільною здатністю.

Таким чином, головною перевагою використання мережі метеорологічних супутників можна зазначити можливість оперативного забезпечення служб погоди фоною інформацією про стан атмосфери в глобальному масштабі. Однак лишаються питання, що пов'язані з покращенням точнісних характеристик атмосферних явищ і параметрів та їх деталізацією. Наприклад, супутники вимірюють водяну пару за допомогою інфрачервоних (ІЧ) та мікрохвильових датчиків. Оцінка за допомогою ІЧ датчиків можлива тільки за відсутності хмар, а дані мікрохвильових датчиків доступні тільки над водною поверхнею та менш надійні ніж дані одержані за допомогою ІЧ датчиків [36].

В [35] зазначається, що в перспективі на борту космічного метеорологічного корабля має знаходитися людина – метеоролог - спостерігач для всебічної оцінки того чи іншого явища, а також для виділення і передачі відповідним службам та користувачам першочергової інформації. Такі функції не завжди можна реалізувати тільки за допомогою технічних засобів, наявність людини на борту уможливить налагодження, регулювання та ремонт апаратури, що також розширить можливість використання ШМС для вирішення метеорологічних питань.

Незважаючи на значний внесок супутникових систем спостереження в формування інформаційного потоку про макромасштабні атмосферні явища, а також про стан атмосфери та різних земних поверхонь, а також її важливість для дослідницьких та синоптичних цілей, інформація з таких систем не є ефективною для використання в якості оперативних даних про небезпечні явища за маршрутом польоту.

#### **1.4 Можливості використання повітряного судна у якості динамічної складової системи метеорологічного забезпечення аеронавігації**

Для дослідження атмосфери літаки почали використовуватися вперше в 40х роках двадцятого століття [13]. Пізніше в Радянському Союзі була створена перша мережа літакового зондування атмосфери, що налічувала 31 пункт на території колишнього СРСР. Дані одержані за допомогою літаків-лабораторій використовуються і є важливими для різних аспектів діяльності людини і особливо авіації. Деякі явища в атмосфері, наприклад, струменеві течії чи повітряні річки (вузькі атмосферні регіони, що задіяні в переносі великої кількості водяної пари) було виявлено та стало можливо дослідити за допомогою саме літакового спостереження.

На наш час спостереження за станом атмосфери та складними метеорологічними явищами за допомогою літаків та супутників є невід'ємною частиною різних світових програм з метеорологічного спостереження та прогнозування [37]. На відміну від супутників, літаки-лабораторії дозволяють виконувати прямі вимірювання та дослідження атмосферних процесів, параметрів та явищ. Сучасні літаки-лабораторії мають доволі широкий спектр наукових та практичних задач та оснащені найсучаснішим літаковим метеорологічним обладнанням: мікрофізичними та актинометричними приладами, локаторами для дистанційного зондування, сучасними навігаційними системами та ін. За допомогою сучасних літаків-лабораторій

вивчаються та досліджуються багато явищ та характеристик атмосфери, що не обмежується наведеним списком:

- термічні та динамічні параметри атмосфери,
- мікроструктура хмар,
- кількість водяної пари в атмосфері,
- атмосферні аерозолі,
- атмосферні річки,
- грозові явища,
- тропічні шторми,
- можливість проведення дослідно-виробничих робіт з активного впливу на хмари та опади, та інші.

Використання спеціальних літаків є потужним інструментом для прямих досліджень складних явищ в атмосфері. Явища досліджуються цілеспрямовано з просторовим та часовим обмеженням повної картини про стан та параметри атмосфери та, в більшості випадків, для наукових цілей. Отже використовувати такі дані для безперервного інформування авіаційних та інших структур про стан атмосфери та наявність небезпечних явищ неможливо.

Порівняно недавно, для спостережень за станом атмосфери та одержання інформації про деякі небезпечні явища стали використовуватися комерційні літаки, що обладнані апаратурою для автоматичного вимірювання параметрів атмосфери та передачі цієї інформації авіаційним диспетчерам і, за необхідності, відповідним наземним метеорологічним структурам. Така система була запропонована до використання Всесвітньою Метеорологічною Організацією (ВМО) в 70-х роках двадцятого століття, сприймаючи до уваги широке зональне покриття комерційних польотів та їх можливості щодо одержання оперативних даних про стан атмосфери там, де це неможливо за допомогою куле-пілотних та інших спостережень. Така система одержала назву АМДАР з (англійської AMDAR – Aircraft Meteorological Data Relay). Важливо зазначити, що спостереження за метеорологічними параметрами за допомогою

системи АМДАР проводиться на висотах, де виконуються польоти. Система працює таким чином, що метеорологічні дані одержуються за допомогою різноманітних датчиків характеристик атмосфери, таких як тиск та температура додатково до навігаційної інформації. Після попередньої обробки дані передаються на землю за допомогою високочастотних ліній зв'язку, або супутникових ліній зв'язку. За якістю даних, що передаються, постійно стежать, і за необхідності, літаку, дані з якого ідентифікували, як ненадійні, рекомендують обстежити, відкалібрувати чи відремонтувати датчики.

На Рис.1.1 наведено приклад сумісного використання даних АМДАР та даних авіаційного метеорологічного радіолокаційного комплексу («Метеор-МетеоЯчейка») для визначення вертикального зсуву вітру та турбулентності [26].

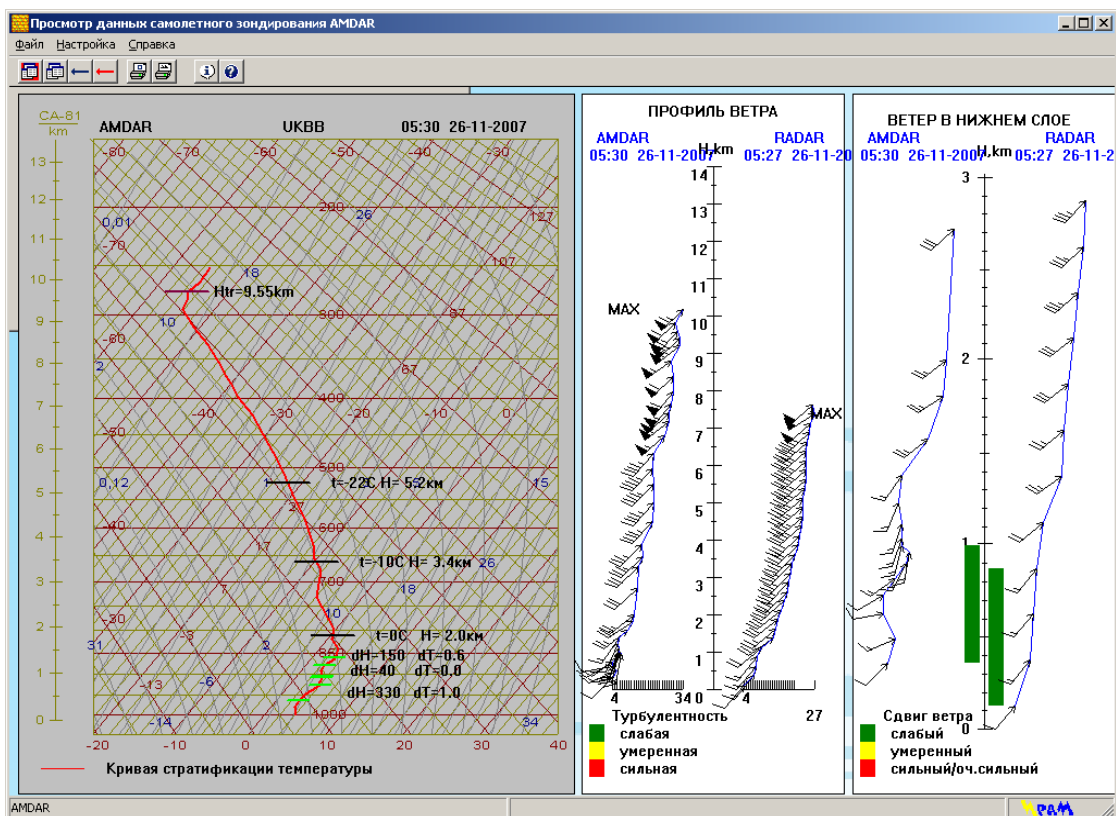


Рис. 1.1 Дані АМДАР та дані авіаційного метеорологічного радіолокаційного комплексу для визначення вертикального зсуву вітру та турбулентності

З даних, що представлені на Рис.1.1, та інших даних спостереження можна зробити висновки про наявність та високу якість інформації про температуру повітря, швидкість вітру, а також про доступність такої інформації в реальному часі. Цікаво відмітити також включення даних про турбулентність та вологість повітря (dT) в сучасні повідомлення системи AMDAR.

Вартість інформації одержаної за допомогою комерційних літаків відповідно до [6] складає тільки 1% від вартості інформації, що одержується за допомогою куле-пілотних спостережень.

Система АМДАР характеризується стандартним обмеженим набором датчиків-вимірювачів параметрів атмосфери, які не дають інформації про наявність небезпечних атмосферних явищ за маршрутом польотів. Стандарти стосовно методів вимірювання можуть бути різними у різних виробників авіаційного електронного обладнання. Також треба зазначити, що відповідно до [38] в Європі в проекті АМДАР задіяне тільки близько 400 літаків. В [39] зазначено, що в 2014 році в світі здійснювали свою роботу 10 національних та регіональних програм АМДАР. В цих проектах задіяне 39 авіаційних компаній та більше 3000 літаків. Разом за добу здійснюється більше 450 000 спостережень за температурою та вітром (невелика кількість здійснює спостереження за вологістю). На сайті NOAA/ESRL/GSD представлено (рис.1.2) моментальне зображення спостережень, що здійснюються за один типовий день (31 січня 2014 року) На цьому зображенні показано тільки 5 % з можливого об'єму даних. Синім кольором зображено вимірювання, що здійснюються на ешелонах польотів. Червоним кольором показано вимірювання, що здійснюються на етапах зльоту або заходу на посадку.

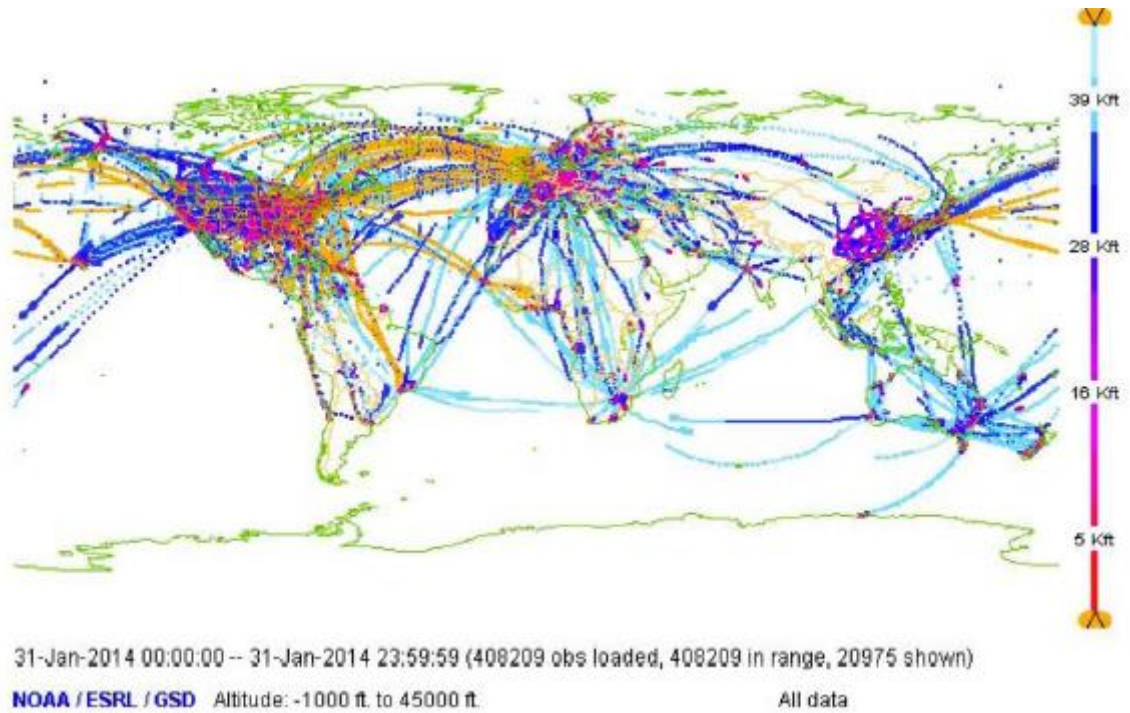


Рис. 1.2 Глобальне спостереження за допомогою системи АМДАР

З рис.1.2 можна сказати, що в деяких регіонах проводиться значна кількість літакових спостережень, що відповідає вимогам ВМО, а в деяких регіонах спостерігається їх повна відсутність, або незначна кількість. Потрібно зазначити, що регіони з відсутністю даних літакового спостереження мають значний потенціал для розширення можливостей системи літакового спостереження.

На етапах зльоту та заходу на посадку, або зниження та набору висоти одержується вертикальний профіль атмосферних характеристик. На рис.1.3 показано кількість вимірювань вертикальних профілів температури та вітру за добу за допомогою системи АМДАР.



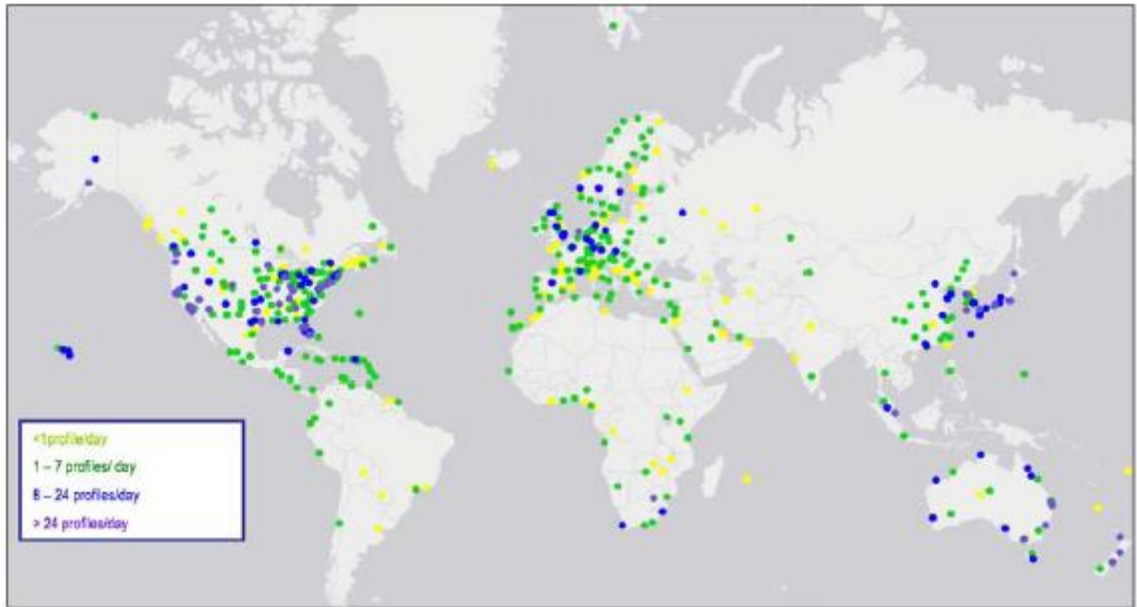


Рис. 1.3 Кількість вимірювань вертикальних профілів температури та вітру за добу за допомогою системи АМДАР в різних частинах світу

Зелений колір – одержання від 1 до 7 профілів за добу,

Синій колір – 8-24 профілів за добу,

Фіолетовий колір – більше 24 профілів за добу.

Можливість одержання вертикальних профілів атмосферних характеристик містить потужний потенціал для синоптичної метеорології, а також для специфічних авіаційних потреб.

Схожа концепція використання оперативних даних про метеорологічні умови за допомогою ПС була запропонована раніше у роботі [40], де наведено приклад реалізації з увагою на спостереженнях за атмосферною електрикою. Концепція [40] знайшла повну підтримку Академії наук [41], але робота створеної тоді робочої групи для її реалізації припинилася після розпаду СРСР. Досвід [40] і [41] використано в роботі [42], в якій запропоновано систему одержання та розповсюдження метеорологічних даних з використанням системи ADS-B та використанням ПС, як динамічного елемента системи управління повітряним рухом. Цікаво, що саме такий підхід пропонує реалізовувати стратегія авіаційної безпеки наступного покоління [43].

До недоліків системи можна віднести деякі обмеження стосовно вимірювання різних параметрів атмосфери, вимірювання впродовж маршрутів польотів, а також необхідності сертифікації вимірювальної апаратури для її встановлення на комерційні літаки.

Тенденція розвитку літакових систем спостереження передбачає збільшення кількості ПС, що мають відповідно обладнання та виконують регулярні польоти, та стандартизації відповідно обладнання. Але сучасний рівень технологій в галузі систем одержання, обробки та передачі даних дозволяє вирішити і більшість інших з існуючих проблем. Наприклад, встановлення новітніх систем оперативного одержання інформації з борту ПС дозволяє не тільки вимірювати стандартні параметри атмосфери, а й досить оперативно одержувати, обробляти та інтерпретувати інформацію про складні небезпечні атмосферні явища.

### **1.5 Сучасні системи розповсюдження метеорологічних даних**

Сучасні авіаційні синоптично-прогностичні служби використовують інформацію з наступних джерел:

- дані метеорологічних станцій;
- дані мережі радіозондування;
- дані мережі авіаційних станцій;
- дані аеродромних метеорологічних станцій;
- інформація з мережі метеорологічних радіолокаторів;
- інформація всесвітніх прогностичних центрів;
- інформація центрів стеження за хмарами вулканічного попелу (VAACs) та інформація центрів стеження за тропічними циклонами (TCACs);
- дані літакового зондування (AMDAR, донесення з борту ПС та інш.);
- дані метеорологічних супутників.

Для вчасного та якісного забезпечення оперативною метеорологічною інформацією усіх користувачів кожен аеродром має бути забезпеченим ефективними засобами електрозв'язку. Для розповсюдження метеорологічної інформації за межами аеродрому використовуються [44]:

- мережі авіаційного фіксованого зв'язку (AFTN) – для розповсюдження оперативної інформації в літерно-цифровій формі,
- супутникові системи радіотрансляції фіксованої служби (AFS) для розповсюдження глобального повідомлення ОРМЕТ, прогнозів ВЦЗП, інформації центрів стеження за хмарами вулканічного попелу (VAACs) та інформації центрів стеження за тропічними циклонами (TCACs),
- інші мережі (публічна мережа Internet, для використання некритичної інформації; глобальні системи телекомунікації ВМО (МЕКОМ); супутникові канали (SADIS 2G та інші).

Взагалі процес забезпечення користувачів повітряного простору послугами системи управління повітряним рухом регламентується документом ІКАО (Doc 9854 Global Air Traffic Management Operational Concept) [45]. Робоча концепція (Doc 9854), а також Глобальний аеронавігаційний план (Doc 9750) [46] зазначають ті фактори, які потрібні для збільшені пропускнуої спроможності та підвищення ефективності роботи майбутньої системи управління повітряним рухом, а саме - підвищення гнучкості в інформаційному забезпеченні та збільшення робочої ефективності системи [47].

Забезпечення екіпажів повітряних суден метеорологічною інформацією починається з одержання польотної документації та, за запитом, проведення інструктажу чи консультації. Протягом інструктажу чи консультації аеродромні метеорологічні органи виконують показ метеорологічної інформації за допомогою систем метеорологічної інформації або автоматизованих систем передпольотної інформації для самостійного інструктажу. Такі автоматизовані системи зазвичай підключені до мережі Internet та мають доступ до інших засобів зв'язку (телефон, факс і т. інше). Наприклад, автоматизована система

IMS AWOS може надати користувачам метеорологічної інформації дані за допомогою інтерфейсу в мережі Internet.

Потрібно зазначити, що інформація, яку одержують екіпажі на даному етапі є 1) інформацією про поточний метеорологічний стан, який може доволі швидко змінитися та 2) є прогностичною інформацією, яка має часові обмеження та не завжди виправдовується під час польоту.

Інформація з автоматизованих метеорологічних станцій для ПС, що відлітають розповсюджується за допомогою послуги ATIS (Automatic Terminal Information Service). Деякі з автоматизованих метеорологічних станцій мають дискретні телефонні номери для одержання даних про спостереження в реальному часі за допомогою телефону чи модему.

Інформація для повітряних суден, що знаходяться в польоті, розповсюджується від метеорологічного органу до пов'язаного з ним органу ОПП за допомогою високочастотної радіомовної трансляції VOLMET, а далі пілоту по лінії зв'язку «земля-повітря», «диспетчер-пілот», а також за допомогою радіомовної трансляції D-VOLMET або VOLMET.

На наш час впроваджуються і розвиваються системи автоматичного залежного спостереження (Automatic Dependent Surveillance - ADS) в яких, на відміну від незалежних систем спостереження, місцезнаходження ПС визначається навігаційною системою літака з використанням GPS технологій, а надалі передається органу ОПП.

Концепція ADS базується на передачі даних за допомогою ліній «повітря-земля», по яких інформація автоматично передається на землю відповідному повноважному органу ОПП. Зміст інформації, частота передачі даних та інші параметри визначаються на основі контракту, що встановлюється між наземним і бортовим обладнанням. Система, що одержала назву ADS-B та її найцікавіший варіант IN/OUT [48] дозволяє досить оперативно проводити обмін даними між ПС та землею, ПС та іншим ПС і, навіть, використовувати інформацію вибірково, наприклад, відбирати інформацію про наявність та інтенсивність небезпечного явища за маршрутом польоту тільки від того

сенсора - ПС, місцезнаходження якого відповідає майбутньому місцезнаходженню іншого ПС, та за необхідності видавати попередження. Використання ADS ефективно за межами зони дії радіолокаційних засобів, наприклад, у віддалених районах, місцевостях з гірським ландшафтом, в зонах Free Flight. Необхідною умовою використання інформації за допомогою ADS є оснащення ПС відповідним обладнанням для експлуатації в умовах надання обслуговування ADS. Відповідні дані ADS представляються диспетчерові у формі, прийнятній для виконання функцій керування. Зазвичай, узагальнені дані мають передаватися до метеорологічних центрів і, в подальшому стандартно використовуватися для наукових, метеорологічних і синоптичних цілей.

Такі системи необхідні для впровадження системного, комплексного та глобального підходу щодо реалізації спостережень за станом атмосфери та метеорологічними явищами з використанням даних наземних, повітряних та супутникових технологій відповідно до рекомендацій ВМО [49].

За допомогою системи ADS-B можна передавати дані не тільки диспетчеру, а і екіпажам ПС, а також забезпечити можливість запиту та одержання поточної цільової інформації в найбільш цікавій зоні для пілотів або авіаційних диспетчерів.

Доцільно також приділити увагу передачі сигналів на випадок появи оперативної інформації про небезпечні явища за маршрутом польоту для того, щоб додатково звернути увагу команди ПС на наявність складної метеорологічної ситуації для даного етапу польоту на маршруті.

Для реалізації концепції глобальних спостережень з можливістю оперативного та вибіркового доступу до потрібної інформації саме командою ПС необхідний розвиток та впровадження сучасних засобів зв'язку з використанням супутникових технологій, систем автоматичного спостереження за метеорологічними даними та дистанційного одержання метеорологічної інформації. Саме для цього FAA (Federal Aviation Administration)

запропонувало програму використання супутників зв'язку для більш ефективного обміну інформацією про робочий статус аеропортів, метеорологічний стан, польотні дані та інші спеціальні дані використання повітряного простору. Програма одержала назву SWIM (System Wide Information Management) та має за мету забезпечення відповідних структур гнучкою та безпечною інформацією, а також підкреслює перехід від використання наземних систем управління повітряним рухом до супутникових в рамках концепції розвитку авіації наступного покоління. В програмі зазначається, що використання SWIM є основою для більш ефективного забезпечення інформацією про стан повітряного простору, включно з метеорологічною інформацією для управління повітряним рухом. Ключовою послугою SWIM має стати можливість запиту та одержання поточної цільової інформації в найбільш цікавій зоні для пілотів або авіаційних диспетчерів.

Основними принципами розповсюдження інформації в рамках проекту SWIM є:

- інформація, що поширюється, має бути захищеною та розповсюджуватися системно;
- інформація, що потрібна користувачу, має бути доступною в будь-який час та в будь-якому місці;
- інформація має бути персоналізованою, відфільтрованою та доступною за запитом;
- система має дотримуватись можливості захищеної взаємодії мереж.

ІКАО зазначає, що перехід існуючої системи управління повітряним рухом до стандартів проекту SWIM потребує чималих фінансових коштів, часових затрат та пов'язаний із значними робочими ризиками. Отже постає питання рівномірного та безперешкодного впровадження стандартів SWIM.

Обмеження сучасних систем обміну інформацією сповільнюють розвиток та втілення сучасних концепцій. До основних обмежень відносять [47]:

- склад інформації, що передається не є уніфікованим на міжнародному рівні, що може призвести до непорозуміння, втрати або виключення інформації з повідомлення;
- інтерфейси, що використовуються, не забезпечують необхідної гнучкості системи;
- обмеження розміру повідомлення в сучасних системах;
- обмеження в доступі до оперативної інформації;
- низький рівень захисту інформації, що передається, зменшує кількість учасників, які б могли поширювати інформацію.

Тенденція розвитку сучасних систем обміну та передавання інформації передбачає підвищення ефективності систем передавання, тобто можливість збільшення інформаційного потоку та його надійність, безпеку тощо. Одночасно втілення сучасних концепцій потребує розвитку систем обміну інформацією нового покоління, що здатні знаходити інформацію за конкретним запитом в залежності від обставин, а не оперувати великою кількістю даних для простого попереднього ознайомлення. Отже необхідно створювати можливість взаємодії мереж, що дозволить системі справлятися з усіма складнощами оперативного обміну інформацією.

## **1.6 Постановка завдань досліджень**

Аналіз складових метеорологічного забезпечення польотів цивільної авіації показав, що сучасний процес одержання та своєчасного доведення до користувачів метеорологічної інформації сконцентрований на складанні та поширенні відповідним користувачам авіаційної метеорологічної інформації на аеродромах, авіаційних прогнозів погоди, діях щодо своєчасного надання метеорологічної інформації для планування та організації польотів. Більшість інформаційних даних пілот одержує перед польотом. Це інформація про поточний метеорологічний стан, який може доволі швидко змінитися та прогностична інформація, яка має часові обмеження та не завжди

виправдовується під час польоту. Але повітряний рух істотно залежить від стану та процесів повітряного середовища – атмосфери, а також характеризується інерційністю, тобто неможливістю раптового припинення чи зміни характеристик повітряного руху. За таких умов оперативна та надійна метеорологічна інформація за маршрутом польоту є одною з основних складових.

Тенденції розвитку метеорологічного забезпечення польотів з урахуванням новітніх концепцій враховують важливість оперативної та надійної метеорологічної інформації за маршрутом польоту, що підтверджує факт впровадження систем літакового спостереження (AMDAR) та широкого використання бортових радіолокаційних систем.

Тенденція розвитку літакових систем спостереження передбачає:

- збільшення кількості ПС, що мають відповідно обладнання та виконують регулярні польоти;
- стандартизації відповідно обладнання.

Але сучасний рівень технологій в галузі систем одержання, обробки та передачі даних дозволяє вирішити і більшість інших з існуючих проблем. Наприклад, встановлення новітніх систем оперативного одержання інформації з борту ПС дозволяє не тільки вимірювати стандартні параметри атмосфери, а й досить оперативно одержувати, обробляти та інтерпретувати інформацію про складні небезпечні атмосферні явища.

Тенденції розвитку сучасних бортових систем спостереження передбачають багатофункціональність бортових засобів, наприклад, використання радіолокаційних систем для навігаційних та метеорологічних цілей, а також покращення алгоритмів обробки сигналів доплерівських радіолокаторів для поліпшення визначення радіальної складової швидкості вітру та визначення і ідентифікації явищ, що пов'язані з вітром.

В свою чергу технічний розвиток дозволяє підвищити функціональні можливості систем дистанційного одержання інформації про небезпечні атмосферні явища за рахунок використання систем, що оперують з різними



характеристиками електромагнітної хвилі (амплітудою, частотою, поляризацією тощо). В сучасних дослідженнях в галузі радіолокації поляриметрію використовують переважно для ідентифікації типів гідрометеорів, але поляризаційні параметри є чутливими до форми, орієнтації, щільності та водності атмосферних формувань. На орієнтацію та форму гідрометеорів, в свою чергу, впливають динамічні атмосферні явища, а отже існує можливість виявлення та оцінки інтенсивності атмосферних явищ, що пов'язані з вітром за допомогою поляриметричних характеристик електромагнітної хвилі.

Для забезпечення користувачів оперативною та надійною метеорологічною інформацією за маршрутом польоту важливим є питання передавання інформації. Тенденція розвитку сучасних систем обміну та передавання інформації передбачає наступні принципи:

- інформація, що поширюється, має бути захищеною та розповсюджуватися системно;
- інформація, що потрібна користувачу, має бути доступною в будь-який час та в будь-якому місці;
- інформація має бути персоналізованою, відфільтрованою та доступною за запитом;
- система має дотримуватись можливості захищеної взаємодії мереж.

Отже, тенденція розвитку сучасних систем обміну та передавання інформації передбачає підвищення ефективності систем передавання, тобто можливість збільшення інформаційного потоку та його надійність, безпеку тощо. Одночасне втілення сучасних концепцій потребує розвитку систем обміну інформацією нового покоління, що здатні знаходити інформацію за конкретним запитом в залежності від обставин, а не оперувати великою кількістю даних для простого попереднього ознайомлення. Таким чином необхідно створювати можливість взаємодії мереж, що дозволить системі справлятися з усіма складнощами оперативного обміну інформацією.

Метою дослідження даної роботи, в якій об'єктом дослідження є процес одержання, обміну та розповсюдження метеорологічної інформації для удосконалення метеорологічного забезпечення аеронавігації, а предметом дослідження є дистанційні методи одержання та розповсюдження оперативної інформації для метеорологічного забезпечення аеронавігації є розширення функціональних можливостей інформаційного забезпечення учасників повітряного руху для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень під час польотів. Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступне:

10. Провести аналіз особливостей сучасного метеорологічного забезпечення аеронавігації та його можливостей щодо метеорологічного забезпечення аеронавігації в умовах втілення новітніх авіаційних концепцій та стратегії розвитку аеронавігаційної галузі;

11. Розробити концепцію удосконалення метеорологічного забезпечення аеронавігації;

12. Розробити поляриметричні методи дистанційного одержання інформації про небезпечну атмосферну турбулентність та дослідити їх можливості щодо оперативного виявлення зон небезпечної турбулентності для конкретного повітряного судна в процесі польоту.

13. Розробити поляриметричний метод дистанційного визначення швидкості вітру та дослідити його можливості при оперативному визначенні швидкості вітру, а також його напрямку за допомогою комбінації з доплерівськими методами.

14. Удосконалити оперативні методи одержання інформації про розподіл крапель за розмірами (інтенсивністю опадів) в процесі польоту ПС за рахунок використання радіолокаційної поляриметрії.

15. Перевірити і довести працездатність нових поляриметричних методів шляхом математичного та комп'ютерного моделювання;

16. Провести аналіз процесу інформаційного забезпечення екіпажів ПС для його удосконалення та зменшення ризиків в процесі прийняття рішень;

17. Розробити і дослідити структуру глобальної мережі одержання та розповсюдження інформації з використанням ПС як динамічних елементів системи з використанням поляриметричних засобів ДЗ;

18. Розробити рекомендації щодо удосконалення метеорологічного забезпечення аеронавігації.

## Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз сучасних систем спостереження за станом атмосфери, передавання та розподілу даних. В результаті аналізу виділено наступні обмеження, можливі недоліки, а також потенційні можливості сучасних систем одержання та поширення метеорологічної інформації:

- Незважаючи на доволі широкий спектр можливостей щодо виявлення та визначення метеорологічних умов, автоматичні метеорологічні станції не фіксують та не надають інформацію про цілу низку метеорологічних явищ, що є важливими для виконання польотів та роботи авіаційної техніки. Фіксація таких умов людиною-оператором пов'язана з помилками та персональними особливостями сприйняття явищ. Отже, необхідно продовжувати дослідження щодо надання нових можливостей автоматичним метеорологічним станціям у виявленні та ідентифікації складних метеорологічних умов.

- Значна кількість механічних зіпсувань та технічних дефектів є причиною нерепрезентативних чи помилкових даних та потребує досліджень та покращення – це розробка більш надійних систем для автоматичного одержання метеорологічної інформації

- Сучасні системи спостереження дозволяють проводити, як правило, тільки спостереження за характеристиками чи станом атмосфери в навколосемному просторі, дистанційно з різних шарів атмосфери, з мобільних датчиків та ШМСЗ. Обробка інформації, складання прогнозів та попереджень про небезпечні явища – це відокремлена задача, на вирішення якої потрібен певний час.

- Багато станцій знаходяться у важкодоступних районах земної кулі. Збір та ретрансляція інформації з таких пунктів, що розкидані по всій земній кулі іноді викликає труднощі. Засобом для безперервного збору та передачі даних з

таких станцій зацікавленим користувачам можуть служити супутникові системи.

- За допомогою сучасних супутникових систем зв'язку та спостереження інформацію про виникнення небезпечного явища та його розвиток можна безперервно передавати не тільки до метеорологічних центрів для її подальшої обробки і створення прогнозів, а і кінцевому зацікавленому користувачу, що може знаходитись в небезпечній зоні.

- Сучасні комерційні літаки, що задіяні в системі АМДАР проводять регулярне спостереження тільки за вітром та температурою повітря (незначна кількість за вологістю повітря), в той час коли сучасні регулярні літаки містять апаратуру для вимірювання параметрів атмосфери, а деякі з них і апаратуру для одержання інформації про небезпечні метеорологічні явища; отже доцільно їх розглядати, як додаткові засоби для одержання інформації про стан атмосфери з різних її шарів.

- Розробка нових методів одержання та обробки інформації про небезпечні явища погоди, включно з тими, що визначаються впродовж траєкторії польоту, зниження та набору висоти, та їх імплементація в системи глобального літакового спостереження дозволить значно підвищити можливості сучасної авіації щодо виявлення та запобігання потраплянню повітряних суден у зони небезпечних для польоту метеорологічних явищ.

- Сучасні системи зв'язку дозволяють проводити безперервний оперативний обмін інформацією між усіма сегментами (наземні метеостанції, супутникові станції, літаки) спостереження за атмосферою, а отже сприяють повноті одержаної інформації та можливості її цільового використання.

- Кожний з сегментів спостереження за станом атмосфери не є універсальним і його не доцільно розглядати, як відокремлений елемент, а тільки як частину глобальної системи спостереження за станом атмосфери.

2. Беручи до уваги розвиток та можливості сучасних систем одержання метеорологічної інформації, її розповсюдження та обміну між

зацікавленими учасниками повітряного руху, можна сказати, що існує проблема, що впливає з протиріччя між можливостями сучасних систем метеорологічного забезпечення та зростаючими потребами міжнародної аеронавігації, яка полягає у необхідності створення методології метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням засобів оперативного виявлення небезпечних для польотів явищ та розповсюдження інформації. Для вирішення цієї проблеми є актуальним вирішення завдань розробки та впровадження концепції удосконалення метеорологічного забезпечення аеронавігації, розробки нових методів одержання оперативної інформації та розробки рекомендації щодо удосконалення метеорологічного забезпечення аеронавігації для покращення можливості літаків виконувати політ безпечно та ефективно за будь-яких погодних умов.

#### Список публікацій здобувача за матеріалами першого розділу

1. Yanovsky F. Doppler-Polarimetric Meteorological Radar Design Concept [Електронний ресурс]: Proc. of Signal Processing Symposium SPS-2009. / F.J.Yanovsky, **Yu. A. Averyanova** / - 05. 2009, Warsaw, Poland - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: аналіз перспективних напрямків розвитку технічних засобів для одержання більш надійної, достовірної та деталізованої інформації стосовно метеоумов за маршрутом польоту для ефективного впровадження та роботи глобальної мережі одержання та розповсюдження інформації, опис та представлення у вигляді структурної схеми концепції використання повітряних суден, як динамічних елементів для одержання та обміну метеорологічними даними з можливістю їх вибіркового та цільового використання.*

2. Yanovsky F.J. Doppler-Polarimetric Radar Meteorological Applications/ F.J. Yanovsky, **Yu.A. Averyanova** // The Forth World Congress “Safety in Aviation – Space Technologies”, Radar Methods and Systems Symposium (RMSW 2010), Kiev, Ukraine, September 11-23, 2010.:Conference proc. - Vol. 2. – 2010. - P.22.11-22.15.

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування низки можливостей перспективних радіолокаційних систем для вирішення метеорологічних задач. Опис та аналіз можливостей доплерівсько-поляриметричних систем для вирішення метеорологічних завдань.*

3. Averyanova Yu. Modern and Prospective Methods for Dangerous Meteorological Phenomena Observation / Yu. Averyanova // The Fifth World Congress “Safety in Aviation – Space Technologies”, Radar Methods and Systems Symposium (RMSW 2012), Kiev, Ukraine, September 25-27.: Conference proc. - 2012. - Vol. 2. -P. 3.7.89-3.7.93.

## РОЗДІЛ 2

### КОНЦЕПЦІЯ УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЖНАРОДНОЇ АЕРОНАВІГАЦІЇ

Компонентами метеорологічного забезпечення міжнародної авіонавігації є підсистема одержання метеорологічної інформації та підсистема забезпечення метеорологічною інформацією учасників повітряного руху (ПР). Система одержання метеорологічних даних, що складається з мереж наземних станцій, мережі радіолокаційних станцій, супутників спостереження та літакових спостережень має низку обмежень, а саме:

- автоматичні метеорологічні станції не фіксують та не надають інформацію про цілу низку метеорологічних явищ (що відображено в розділі 1.1), що є важливими для виконання польотів та роботи авіаційної техніки. Фіксація таких умов людиною-оператором пов'язана з помилками та персональними особливостями сприйняття явищ.
- Значна кількість механічних зіпсувань та технічних дефектів є причиною нерепрезентативних чи помилкових даних та потребує досліджень та покращення – це розробка більш надійних систем для автоматичного одержання метеорологічної інформації
- Сучасні системи спостереження дозволяють проводити, як правило, тільки спостереження за характеристиками чи станом атмосфери в навколосемному просторі, дистанційно з різних шарів атмосфери, з мобільних датчиків та ШМСЗ, для подальшої її обробки у відокремлених підрозділах. Обробка інформації, складання прогнозів та попереджень про небезпечні явища – це відокремлена задача, на вирішення якої потрібен певний час.
- Багато станцій знаходяться у важкодоступних районах земної кулі. Збір та ретрансляція інформації з таких пунктів, що розкидані по всі



земній кулі іноді викликає труднощі. Засобом для безперервного збору та передачі даних з таких станцій зацікавленим користувачам можуть служити супутникові системи.

- Сучасні регулярні літаки, що задіяні в системі АМДАР, проводять регулярне спостереження тільки за вітром та температурою повітря (незначна кількість за вологістю повітря та турбулентністю), в той час коли сучасні регулярні літаки містять апаратуру для вимірювання параметрів атмосфери, а деякі з них і апаратуру для одержання інформації про небезпечні метеорологічні явища; отже доцільно їх розглядати, як додаткові засоби для одержання інформації про стан атмосфери з різних її шарів.

Складова системи метеорологічного забезпечення міжнародної аеронавігації, що відповідає за розповсюдження метеорологічної інформації також потребує удосконалення для збільшення пропускнуєї спроможності та підвищення ефективності роботи майбутньої системи управління повітряним рухом, а саме - підвищення гнучкості в інформаційному забезпеченні та збільшення робочої ефективності системи, як це зазначається в Робочій концепції ІКАО (Doc 9854), а також в Глобальному аеронавігаційному плані (Doc 9750). В документах зазначається, що для більш ефективного забезпечення інформацією про стан повітряного простору, включно з метеорологічною інформацією для управління повітряним рухом, має стати можливістю запиту та одержання поточної цільової інформації в найбільш цікавій зоні для пілотів або авіаційних диспетчерів.

На наш час інформація, що передається пілотам, або диспетчерам ПР через мережі, Інтернет, супутникові системи радіотрансляції фіксованої служби (AFS), глобальні системи телекомунікації ВМО (МЕКОМ); супутникові канали (SADIS 2G та інші) є інформацією про поточний метеорологічний стан, який може доволі швидко змінитися та є

прогностичною інформацією, яка має часові обмеження та не завжди виправдовується під час польоту.

Отже існують проблемні питання, що впливають з протиріччя між можливостями існуючої системи метеорологічного забезпечення та зростаючими потребами міжнародної авіонавігації. Для вирішення цих питань постає завдання удосконалення процесу одержання та розповсюдження метеорологічної інформації, що дозволяє покращити можливості літаків виконувати політ безпечно та ефективно за будь-яких погодних умов.

Передбачається створення мережі мобільних платформ для розміщення систем одержання оперативної метеорологічної інформації з різних шарів атмосфери на базі літаків, що виконують регулярні та нерегулярні рейси; удосконалення бортових систем спостереження за станом атмосфери та виявлення небезпечних метеорологічних явищ за рахунок втілення методів, що оперують з різними характеристиками електромагнітної хвилі для одержання більш повної та якісної інформації про атмосферні процеси та явища; створення єдиного інформаційного простору, що забезпечує можливість надання адресного доступу до інформації, що є найнеобхіднішою для виконання польотів в конкретній зоні, тобто надання потрібної інформації потрібному користувачу; ефективне використання функціональних та технічних можливостей сучасних систем передавання інформації для інтеграції даних, що одержуються за допомогою бортових систем спостереження та виявлення небезпечних явищ в єдиний інформаційний простір.

Принцип удосконалення метеорологічного забезпечення: спільне використання метеорологічної інформації від давачів, що розміщені в наземному, повітряному та космічному просторах. Використання літаків, що виконують регулярні та нерегулярні рейси у якості джерел метеорологічної інформації, з можливістю розміщення на її базі удосконалених систем одержання інформації. Розробка та впровадження нових методів дистанційного одержання інформації. Використання супутникових каналів зв'язку не тільки для передавання інформації до метеорологічних центрів для її подальшої

обробки і створення прогнозів, а також для обміну оперативною інформацією між різними учасниками повітряного руху, що можуть знаходитись в небезпечній зоні та диспетчеру. Розширення функціональних можливостей системи літакового спостереження AMDAR за рахунок збільшення кількості інформації, що автоматично передається з борту ПС та за рахунок виділення додаткових розрядів для включення оперативної інформації про небезпечні метеорологічні явища за маршрутом конкретного польоту. В процесі інформаційного забезпечення використовується навігаційна супутникова та радіолокаційна інформацію для ідентифікації місцезнаходження літака та розрахунку місця існування небезпечного явища. Обмін інформацією здійснюється за стандартними каналами зв'язку, а також за допомогою супутникових систем зв'язку та систем ADSB, що дозволяє автоматично продублювати інформацію та запобігти її втраті, а також акцентувати увагу на найбільш небезпечних для виконання польотів ситуацій.

Удосконалення метеорологічного забезпечення призначене для вирішення задач забезпечення метеорологічною інформацією відповідних користувачів, зокрема для авіації в рамках концепцій FreeFlight, NextGen, CNS/ATM, вимог організацій ІКАО та Євроконтроль, а також пріоритетів міжнародної аеронавігації.

Задачі та функції метеорологічного забезпечення:

- Регулярне спостереження за станом атмосфери та процесами в ній з повітряного простору;
- Забезпечення ПС оперативною інформацією за маршрутом польоту;
- Виключення втрати інформації, що виникають за рахунок неналежного функціонування системи передавання, або завад;
- Забезпечення оперативного обміну оперативною інформацією між учасниками ПР;
- Цільове надання інформації для виконання польоту в конкретній зоні чи регіоні польоту.

Як показано в Розділі 6 даної дискртаційної роботи, в процесі метеорологічного забезпечення задіяно дванадцять основних компонент: мережа наземних метеорологічних станцій, мережа аерологічних датчиків, мережа система наземних метеорадіолокаторів, наземні приймачі метеорологічної інформації, авіаційні метеорологічні служби, авіаційні диспетчерські служби, інформаційні метеорологічні центри та банки погоди, аналітично-прогностичні центри, супутники зв'язку, супутники навігаційні, супутники спостереження, мережа літаків з відповідним обладнанням для спостереження та передавання інформації, основною задачею яких є одержання якісної інформації про стан атмосфери та процеси в ній, а також про небезпечні метеорологічні явища та забезпечення цією інформацією зацікавлених користувачів включно з екіпажами ПС.

Алгоритм функціонування метеорологічного забезпечення вміщує основні процедури та функції:

- Одержання оперативної інформації з власних систем спостереження та виявлення небезпечних явищ;
- Одержання оперативної інформації від систем ПС, що виконує політ на суміжному ешелоні, або на тому ж самому ешелоні раніше
- Корекція маршруту з урахуванням одержаної оперативної інформації;
- Передача корегувальної інформації відповідним службам та іншим учасникам ПР, що виконують політ в суміжній зоні, наприклад, за допомогою систем ADSB, AMDAR;
- Передавання інформації відповідним наземним службам за допомогою каналів зв'язку Повітря-Земля та автоматично за допомогою супутникових систем, систем ADSB, AMDAR тощо;
- Корегування прогностичної інформації.

Засоби, що розміщуються на борту ПС дозволяють одержати інформацію про стандартні характеристики атмосфери (температура, вологість, тиск, вітер),

а також інформацію про небезпечні явища включно гроза, град, обледеніння, турбулентність, повний вітер, зсув вітру, спадні та висхідні потоки повітря з використанням радіолокаційної поляриметрії.

Сертифікація апаратури систем спостереження, систем зв'язку, апаратури користувачів та послуг з надання метеорологічної інформації є обов'язковою та регламентується відповідними авіаційними організаціями.

## Висновки до розділу 2

3. Представлено концепцію удосконаленої системи метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням поляриметричних засобів дистанційного зондування, що дозволяє забезпечити наступні переваги:

- Пілот, як і авіаційний диспетчер, одночасно володіє не тільки прогностичною інформацією, яка має часові та просторові обмеження, а й оперативною інформацією чітко за маршрутом польоту конкретного ПС (Можливість продублювати пілоту цільову інформацію про виникнення чи існування небезпечного явища в атмосфері за маршрутом його польоту додатково до попереджень автоматичних бортових систем);

- Одночасна передача та обмін метеорологічною інформацією між усіма учасниками повітряного руху ( можливість виявити порушення в роботі систем зв'язку та джерела помилкової інформації, а отже, зменшити ризики загублення інформації або втрати каналу зв'язку);

- Додатково до автоматичного надання оперативної інформації має сигналізувати пілоту звернути увагу на ті зони, де значення параметрів перевищують критичні для даного ПС і його режиму роботи. Такий режим роботи системи є найбільш актуальним при виконанні польотів за концепцією Free Flight.

- Однакова ситуативна обізнаність команд ПС, що виконують політ в одній зоні, та авіаційного диспетчера сприятиме усуненню інформаційного непорозуміння між декількома учасниками повітряного руху та зменшенню ймовірності різного бачення ситуації командами ПС при розв'язанні ситуації пілотом та диспетчером, або пілотами різних ПС, та ефективної реалізації обраного плану .

**Список публікацій здобувача за матеріалами другого розділу**

1. Yanovsky F. New Concept of Multifunctional Weather Radar/ F. Yanovsky **Yu. Averyanova** // Interational Radar Symposium (IRS 2009), 09-11 September, 2009, Hamburg, Germany, Conference proceedings. – 10.2009. - P.449-455. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування низки функцій перспективних багатофункціональних радіолокаційних систем.*

2. Yanovsky F. Doppler-polarimetric radar meteorological applications/ F. J. Yanovsky, **Yu. Averyanova**// Telecommunications and RadioEngineering - DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i7.20. - P. 577-581. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: розробка низки вимог до поляриметричної складової доплерівсько-поляриметричних радіолокаційних систем, обґрунтування можливостей радіолокаційних систем щодо поляризаційних вимірювань.*

3. Yanovsky F.J. Meteorological Applications of Multiparameter Polarimetric Radar/ F.J. Yanovsky, **Yu.A. Averyanova**// European Radar Conference (EuRAD-2011), Manchester, UK.: Conference proc. – 2011. – P.158-161 (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: аналіз вимог до поляриметричної радіолокаційної системи з декількома приймальними антенами, обґрунтування деяких параметрів поляриметричної радіолокаційної системи з декількома приймальними антенами.*

4. Averyanova Yu., Analysis of the possibility to determine wind parameters ahead the aircraft by using polarimetric airborne radar/ Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky. //Telecommunications and Radioengineering. – 2007. Vol. 66, Issue 12. P. 1103-1112. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: розробка методу визначення повної швидкості вітру як суми радіальної та тангенціальної складових, що визначаються комбінованим доплерівсько-поляриметричним методом.*

### РОЗДІЛ 3

## ПОЛЯРИМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ДИСТАНЦІЙНОГО ОДЕРЖАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО НЕБЕЗПЕЧНІ МЕТЕОРОЛОГІЧНІ ЯВИЩА

Третій розділ дисертаційної роботи присвячений питанням розробки нових поляризаційних методів, що дозволять підвищити функціональні можливості систем дистанційного та оперативного одержання інформації про небезпечні атмосферні явища. В розділі проаналізовано фізичні основи виявлення атмосферних явищ та процесів поляризаційними мікрохвильовими засобами. Рідкі гідрометеори запропоновано розглядати як об'єкти нестабільної форми. Розглянуті нові поляризаційні методи виявлення небезпечних для авіації зон граду та обледеніння, показано можливість використання поляриметричних характеристик електромагнітної хвилі для виявлення та оцінювання небезпечних для авіації явищ, що пов'язані з вітром, а також вперше запропоновані поляриметричні методи виявлення та оцінювання таких атмосферних динамічних явищ як турбулентність та зсув вітру.

### **3.1 Фізичні основи виявлення атмосферних явищ та процесів поляризаційними мікрохвильовими засобами дистанційного одержання інформації**

Поляризація є загальною властивістю електромагнітних хвиль [50]. Ця властивість встановлює характер часової зміни просторового взаємозв'язку між напрямком поширення хвилі та напрямком вектора її електричної або магнітної напруженості, що спостерігається в фіксованій точці простору. Відповідно до фізичних результатів Максвелла, електромагнітна хвиля, що рухається в просторі являє собою просторово-часову періодичну зміну взаємно перпендикулярних векторів електричного та магнітного полів, що змінюються в однаковій фазі та є ортогональними до напрямку поширення. Систему рівнянь



Максвела для опису електромагнітного поля можна записати визначивши чотири вектора (3.1):

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div}B = 0$$

$$\operatorname{div}D = \rho$$

$E$  – напруженість електричного поля,

$H$  – Напруженість магнітного поля,

$B$  - магнітна індукція,

$D$  – електрична індукція,

$J$  – щільність електричного струму.

Для аналізу поляризаційних властивостей електромагнітного поля достатньо проаналізувати поведінку вектора електричного поля [50]. Це базується на тому факті, що при взаємодії між електромагнітною хвилею та речовиною сила, що діє на електрони визначається вектором електричної напруженості поля. Сторонні електричні поля викликають поляризацію речовини, що можна описати векторами поляризації  $P$  речовини. Поляризація викликана появою зв'язаних зарядів та струмів. Поляризація пов'язана з векторами напруженості та індукції електричного поля наступним співвідношенням:

$$D = \varepsilon_0 \vec{E} + P \quad (3.2)$$

Математичний опис поляризації прийнято проводити для плоских монохроматичних хвиль, часова зміна вектора електричного поля яких є синусоїдальною [50]. В дійсності плоски монохроматичні хвилі існують в теорії, але є обставини, що дозволяють широко використовувати такі хвилі в якості головної моделі у випадку аналізу поляризаційного стану. По перше, аналітичні результати, що одержані з використанням плоскої монохроматичної

хвилі в якості моделі співпадають з даними експериментів. По друге, електромагнітні хвилі, що випромінює радіолокатор, та які є обмеженими в просторі та часі можна представити як результат суперпозиції плоских монохроматичних хвиль, що одержані за допомогою просторового та часового розкладання.

Просторово-ортогональні складові монохроматичних хвиль в декартовій системі координат записують наступним чином:

$$E_x = a \cos(\omega t + \varphi_x), \quad (3.3)$$

$$E_y = b \cos(\omega t + \varphi_y). \quad (3.4)$$

$a, b$ - амплітуди;  $\varphi_x, \varphi_y$ - фазові кути ортогональних складових. Напрямок хвильового вектору вважаємо таким, що співпадає з позитивним напрямом вісі  $OZ$  прямокутної системи  $XYZ$ . Характер кривої, що описує кінець електричного вектора хвилі в фіксованій точці простору є геометричним місцем точок з координатами, що визначаються за формулами 3.3 та 3.4 і є еліпсом, головні вісі якого не співпадають з осями  $OX$  та  $OY$ . Такий еліпс називають еліпсом поляризації [51], а електромагнітна хвиля в такому випадку має назву еліптично поляризованою хвилею. Якщо розглядати напрям обертання вектора електричного поля з точки зору спостерігача, тобто проти напрямку поширення, то у випадку обертання вектору  $E$  за часовою стрілкою має місце правий напрямок обертання, а у випадку обертання вектору  $E$  проти часової стрілки має місце лівий напрямок обертання.

Для повного визначення еліптичної поляризації необхідно мати інформацію про його наступні характеристики.

### 1. Просторова орієнтацію еліпса поляризації.

Орієнтація визначається визначенням напрямку поширення плоскої хвилі, що визначається вектором  $\vec{k}$ . В нашому випадку напрямок вектора  $\vec{k}$  співпадає з позитивним напрямком осі  $OZ$ .

### 2. Орієнтація власної системи координат еліпсу відносно опорної системи

визначається азимутом  $\beta$ , що є кутом між більшою піввіссю еліпсу та позитивним напрямком осі  $OX$ .

### 3. Форма еліпсу, або еліптичність.

Еліптичність визначається відношенням малої півосі еліпса  $b$  до більшої  $a$ :

$$K = \frac{b}{a} = \operatorname{tga}. \quad (3.5)$$

### 4. Амплітуда, або розмір еліпсу.

Амплітуда визначається довжиною його півосей :

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}. \quad (3.6)$$

Амплітуда визначається тільки енергією хвилі і не пов'язан з геометрією еліпсу [50].

### 5. Абсолютна часова фаза – кут між початковим положенням електричного

вектора в момент часу  $t=0$  та більшою піввіссю еліпсу. Абсолютна часова фаза також не пов'язана з геометричними параметрами еліпсу, а її реєстрація неможлива в задачах радіолокаційного спостереження [50].

Отже в сучасних дослідженнях при аналізі використовують значення еліптичності еліпсу поляризації та його орієнтації.

Математичний зв'язок між амплітудно-фазовими співвідношеннями просторово-ортогональних складових та параметрами еліпсу поляризації для аналізу поляризації розсіяних сигналів або поляризації випромінювання радіолокатора характеризують деякими параметрами, що мають розмірність інтенсивності, та мають назву параметрів Стокса [52]:

$$S_0 = E_x^2 + E_y^2; S_1 = E_x^2 - E_y^2; S_2 = 2E_x E_y \cos \Delta \varphi; S_3 = 2E_x E_y \sin \Delta \varphi \quad (3.7)$$

Параметри Стокса пов'язані між собою та звичайно об'єднуються в вектор стовпчик, або вектор-строку. Часто використовують нормований вектор Стокса до величини  $S_0$ , що відповідає хвилі з одиничною інтенсивністю.

Зв'язок нормованих параметрів Стокса з геометричними характеристиками еліпса поляризації визначається наступними співвідношеннями [51, 52]:

$$S_{1N} = \cos 2\alpha \cos 2\beta; S_{2N} = \cos 2\alpha \sin 2\beta; S_{3N} = \sin 2\alpha.$$

(3.8) Де  $\alpha$  та  $\beta$  є відповідно кутами еліптичності та орієнтації еліпсу поляризації.

Нормовані параметри Стокса можна розглядати, як координати деякої точки на сфері одиничного радіусу рівняння якої можна записати у вигляді [50]:

$$S_{1N}^2 + S_{2N}^2 + S_{3N}^2 = 1 \quad (3.8)$$

Величини  $2\alpha$  та  $2\beta$ , що пов'язані з нормованими параметрами Стокса є сферичні кутові координати точки на одиничній сфері. Отже, кожному з можливих станів поляризації плоскої повністю поляризованої хвилі відповідає одна точка на такій сфері і навпаки. Граничні стани еліптичної поляризації – лінійні та кругові – відповідають екваторіальним та полюсовим точкам сфери.

Вперше розглядати поляризацію за допомогою точок на сфері запропонував Пуанкаре і така сфера одержала назву сфера Пуанкаре [52].

Для вирішення задач, що пов'язані з радіолокаційним вимірюванням, вибір математичної моделі залежить від характеру задачі, що вирішується дослідником. Процес перетворення електромагнітних хвиль в каналі радіолокатора можна представити з використанням деякої визначеної математичної моделі поля та його перетворень. В якості моделі можна обрати представлення самої електромагнітної хвилі або елементів радіолокаційного каналу, що перетворюють електромагнітну хвилю. В [53] пласку однорідну електромагнітну хвилю представлено за допомогою вектору Джонса, вектор електричної напруженості якої для випадку довільної еліптичної поляризації можна записати а прій декартовій системі координат наступним чином:

$$\vec{E}(z, t) = \left[ E_x \cos \left( \omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_x \right) \right] \vec{x} + \left[ E_y \cos \left( \omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_y \right) \right] \vec{y} \quad (3.9)$$

$\vec{x}$  та  $\vec{y}$  одиничні орти, що визначають орієнтацію електричних векторів лінійно поляризованих хвиль:

$$E_x \cos \left( \omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_x \right) \text{ та } E_y \cos \left( \omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_y \right).$$

Суперпозиція таких хвиль, що мають різні фази та амплітуди призводить до еліптичної поляризації результуючої хвилі. Для аналізу поляризації хвилі та її перетворення в радіолокаційному каналі немає необхідності у повному використанні рівняння (3.9). Орієнтацію складових  $\dot{E}_x$  та  $\dot{E}_y$  доцільно враховувати за допомогою вектора-стовпчика:

$$\dot{\vec{E}}(z, t) = \begin{Bmatrix} E_x \cos \left( \omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_x \right) \\ E_y \cos \left( \omega t - \frac{2\pi z}{\lambda} + \varphi_y \right) \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

Верхня строчка відповідає проекції вектора поля, що аналізується на вісь  $OX$ , а нижня на вісь  $OY$ .

Гармонічна часова залежність, постійний фазовий набіг, що є однаковим для обох складових можна виключити з розгляду, як такі, що не вміщують інформацію про стан поляризації [50] та представити вираз (3.10) у вигляді, що має назву Вектор Джонса:

$$\dot{\vec{E}} = \begin{Bmatrix} E_x \exp(j\varphi_x) \\ E_y \exp(j\varphi_y) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

Повна інтенсивність хвилі, що представлена вектором Джонса (3.11) дорівнює сумі інтенсивності проекцій електричного вектора на ортогональні вісі  $OX$  та  $OY$

Комплексні елементи вектора Джонса (3.11) можуть незалежно приймати будь-які значення, що дає можливість одержати будь-які стани поляризації електромагнітної хвилі.

Лінійно поляризовані хвилі одиничної інтенсивності, електричні вектори яких орієнтовані впродовж вісі  $OX$  або  $OY$ , можна представити вектором Джонса, як пару ортогональних поляризованих хвиль:

$$\vec{E}_x = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \vec{E}_y = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

У випадку, коли електричний вектор плоскої хвилі лінійно поляризований впродовж деякого вільного напрямку, що складає кут  $\theta$  з позитивним напрямом вісі  $OX$ , вектор Джонса має вигляд:

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Лінійна поляризована хвиля, що ортогональна до хвилі (3.13) може бути записана наступним чином:

$$\vec{E} = \begin{pmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Ортонормальна пара векторів Джонса формує деяку базисну координатну систему в якій можна проводити аналіз будь-якого стану електромагнітної хвилі. Відповідна пара ортогональних векторів Джонса має назву поляризаційного базису розкладання електромагнітної хвилі. В радіолокаційній споляриметрії завжди реалізується той чи інший поляризаційний базис. Технічною реалізацією лінійного поляризаційного базису може бути опромінювач антени НВЧ діапазону у вигляді двох ортогональних диполів, або квадратного хвильовода з розділенням лінійних вертикально та горизонтально поляризованих складових. Лінійний поляризаційний базис є найбільш поширеним у практиці радіолокаційних метеорологічних вимірювань. Також використовується круговий поляризаційний базис. Використання еліптичного ортогонального базису в радіолокаційних антенах викликає певні труднощі [50].

Поляризація відбитої електромагнітної хвилі у випадку мікрохвильового дистанційного зондування залежить від форми, розміру, орієнтації типу частинок, що розсіюють електромагнітні хвилі. Різні типи хмар та опадів характеризуються різною мікроструктурою. Наприклад слоїсті або купчасто-слоїсті хмари, що притаманні стійкій атмосфері та характерні для них типи опадів мають у своєму складі значну кількість рідких часточок форма яких близька до сферичних. В такому випадку потужності прийнятого сигналу ортогональними антенами споляриметричного радіолокатора будуть майже дорівнювати одна одній, а крос-поляризаційна компонента відбитої

електромагнітної хвилі буде дорівнювати майже нулю і, таким чином, поляриметричний параметр  $LDR$ , що можна розрахувати за формулами (1.6) або (1.7) буде незначним, а диференційна відбиваність  $Z_{DR}$  (1.5) близька до одиниці. Збільшення крапель, що притаманно слоїсто-купчастим хмарам, призводить до їх сплюснення, а отже буде спостерігатися незначне збільшення параметру радіолокаційної відбиваності при горизонтальній поляризації  $Z_h$  (1.4) відповідно до радіолокаційної відбиваності при вертикальній поляризації  $Z_v$  (1.3).

Слоїсто-дошові хмари та обложний дощ, що є для них характерним характеризуються порівняно упорядкованою орієнтацією крапель та збільшеним розміром за рахунок великої водності хмар. В такому випадку буде спостерігатися значне перевищення поляриметричного параметру радіолокаційної відбиваності (РВ) при горизонтальній поляризації  $Z_h$  (1.4) над радіолокаційною відбиваністю при вертикальній поляризації  $Z_v$  (1.3). Значення диференційної відбиваності (ДВ) досягає максимальних значень у випадку горизонтального зондування дощу, коли проекція краплі на площину, що є перпендикуляром до діаграми спрямованості променя антени має форму еліпсу. Експериментальні дані [54] наводять значення  $Z_{DR} = 0.5$  дБ для випадку слабкого дощу (інтенсивність дощу є меншою за 0.5 мм за год.), та значення  $Z_{DR} = 3.5...4$  дБ для випадку сильного дощу (інтенсивність дощу є більшою за 4 мм за год.) [55].

Купчасті, купчасто-дошові хмари та характерні опади в більшості випадків мають змішану мікроструктуру завдяки значному вертикальному розвитку та суттєвій динаміці в самих хмарах. Треба зазначити, що хмари цього типу є найнебезпечнішими для польотів повітряних суден, тому що саме з ними пов'язано формування небезпечних для авіацій метеорологічних явищ – грози, граду, обледеніння, зливових опадів, турбулентності, зсуву вітру, сильного та поривчастого вітру, шквалу, смерчу тощо. З аналізу експериментальних даних дистанційного зондування атмосфери доплерівсько-

поляриметричним радіолокатором [54] можна сказати, що при близькому до горизонтального зондуванню спостереження величин ДВ, що значно перевищують 0 дБ свідчить про переважну присутність сплюснених гідрометеорів. Переважна присутність сферичних гідрометеорів обумовлює близькі до нуля величини ДВ, а негативні обмірювані величини ДВ свідчать про відбивання від витягнутих гідрометеорів. Отже поляриметричні параметри є чутливими до форми гідрометеорів.

Величини поляриметричного параметру Диференційної відбиваності вимірювані в об'єкті, який складається із суміші різного типу гідрометеорів (такі, як купчасто-дощові хмари), виявляються зміщеними у бік форми тих гідрометеорів, що характеризуються більшою відбиваністю. Наприклад, в суміші дощу і граду вимірювана ДВ виявляється ближче до значення, яке було б у випадку граду. Ця особливість ускладнює поділ між градом і сумішшю при використанні лише пари параметрів Радіолокаційної відбиваності і Диференційної відбиваності [54,56].

Істотні відмінності при радіолокації граду і дощу забезпечує параметр Лінійне деполяризаційне відношення (ЛДВ)  $LDR$ , що визначається за формулами (1.6) та (1.7). Результати експерименту [22] показують навіть більші відмінності в значеннях ЛДВ між об'єктами з градом і без граду, ніж результати розрахунків. Об'єкти з градом характеризуються більшими значеннями ЛДВ, ніж дощ через неправильність форми і хаотичність орієнтації. Це забезпечує переваги ЛДВ як інформаційного параметру ІІ. Однак проблемою є те, що значення ЛДВ часто є малою величиною, що ускладнює подальшу її обробку.

Наявність великого граду супроводжується дуже високими значеннями РВ, близькими до нуля або негативними значеннями ДВ. Великий град може викликати значне ослаблення сигналу. У табл. 3.1.1, наведено відомості про характерні значення п'яти основних поляризаційних параметрів, що можуть забезпечити ефективне використання поляриметричного радіолокатора для класифікації за типами гідрометеорів. Результати зібрані на основі аналізу



даних з урахуванням результатів розрахунку і моделювання, що наведені в [54].

В таблиці 3.1 додатково до широкосмукових поляриметричних параметрів РВ, ДВ, ЛДВ наведені ще і Коефіцієнт взаємної кореляції КК та параметр Диференціальної фаза ДФ.

Таблиця 3.1

**Величини поляриметричних ІІ для гідрометеорів різного типу**

Тип гідро- метеорів	РВ , дБZ	ДВ, дБ	ЛДВ, дБ	КК	ДФ, °/км
Дощ	25 ... 60	0,5 ... 4,2	-35 ... -15	0,97 ... 1	0 ... 10
Град	48 ... 70	-2 ... 0,5	-20 ... -5	0,95 ... 1	-1,5 ... 1,5
Суміш	48 ... 70	-1,2 ... 1,2	-21 ... -8	0,87 ... 1	0 ... 10

На відміну від РВ, ДВ і ЛДВ, поляризаційний параметр ДФ  $\phi_{DP}$  пов'язаний з особливостями поширення радіохвиль у середовищі. У процесі розсіювання на гідрометеорах може виникати додатковий диференціальний фазовий зсув ( $\varphi_\alpha$ ), пов'язаний не з поширенням, а з розсіюванням. Звичайно він обумовлений розсіювачами великого діаметра. Розмір  $\varphi_\alpha$  вносить вклад у повну вимірювану ДФ. Тому вимірювані величини  $\phi_{DP}$  будуть більше нуля, навіть якщо всі розсіювачі мають сферичну форму, але серед них присутні великі частинки, що розсіюють в області Мі. У роботі [55] вказується, що  $\varphi_\alpha$  не тільки впливає на ДФ  $\phi_{DP}$ , але і знижує величину коефіцієнта взаємної кореляції КК  $\rho_{hv}(0)$ .

Кореляційний коефіцієнт при нульовому зсуві визначається за формулою

$$\rho_{hv}(0) = \frac{\langle S_{vv} S_{hh}^* \rangle}{\sqrt{\langle |S_{hh}|^2 \rangle} \sqrt{\langle |S_{vv}|^2 \rangle}}, \quad (3.15)$$

де  $S$  та  $S$  з різними індексами – це комплексні амплітуди відбитого поля матриці зворотного розсіювання  $[S]$ . Ця матриця зв'язує електричне поле зворотного розсіювання в антені  $[E]_{зв}$  з падаючим електричним полем  $[E]_n$ :

$$\begin{bmatrix} \hat{A}_1 \\ \hat{A}_2 \end{bmatrix}^{\zeta \hat{a}} = \begin{bmatrix} S_{hh} S_{hv} \\ S_{vh} S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{A}_1 \\ \hat{A}_2 \end{bmatrix}^i \frac{e^{-jKr}}{r}. \quad (3.16)$$

Індекси комплексних амплітуд означають дві ортогональні поляризації відповідно.  $K=2\pi/\lambda$  – хвильове число.

Для сукупності гідрометеорів, які є взаємооберненим середовищем  $S_{hv} = S_{vh}$ .

Ортогональні поля з круговою поляризацією виражаються в термінах лінійно поляризованих полів через перетворення:

$$\begin{bmatrix} E_r \\ E_l \end{bmatrix}^n = [G] \begin{bmatrix} E_h \\ E_v \end{bmatrix}^i, \quad (3.17)$$

$$\text{де } [G] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} j & 1 \\ -j & 1 \end{bmatrix};$$

$r, l$  – індекси правої та лівої кругових поляризацій,

$h, v$  – індекси горизонтальної та вертикальної лінійних поляризацій.

В таблиці наведені дані вимірів Параметру диференціальної фази ПДФ  $K_{DP}$ , КК  $\rho_{hv}(0)$  та інших поляриметричних характеристик, що отримані за допомогою радіолокатора S-pol у вигляді каліброваних радіолокаційних іміджів [56].

## 3.2 Використання поляриметричних методів для вирішення задач виявлення зон граду та обледеніння

### 3.2.1 Принципи та алгоритми виявлення зон граду

Можливість використання поляриметрії для ідентифікації типів гідрометеорів дозволила розробити методи та алгоритми виявлення зон градової активності [57, 58]. В якості прикладу можна привести алгоритмів виявлення зон граду, що наведені в роботі [59].

Синтез першого параметричного алгоритму зроблено на основі багатопараметричної задачі виявлення небезпечних метеорологічних явищ [60]. За такого підходу гіпотеза про наявність граду розглядається як альтернатива випадку відсутності граду на основі виміряного інформаційного параметру  $\Pi$ . В якості дискримінантної функції використовується логарифм відношення правдоподібності

$$F(x, y) = \ln \frac{p(x, y / \omega_{\text{град}})}{p(x, y / \omega_{\text{дощ}})}, \quad (3.18)$$

де  $p(x, y / \omega_i)$  це біваріантний розподіл інформаційних параметрів  $x$  та  $y$  у випадку граду ( $i = \text{град}$ ) та дощу ( $i = \text{дощ}$ ). Дискримінантна (вирішувальна) функція розраховується для різних моделей з використанням експериментальних даних для того, щоб знайти оцінки параметрів розподілу.

Статистичний алгоритм виявлення граду відповідно до [54] приводиться до розрахунку дискримінантної (вирішувальної) функції  $F(x, y)$  з пороговим значенням  $F_0$

$$\begin{cases} F \geq F_0 \Rightarrow \text{А} \\ F < F_0 \Rightarrow \text{Б} \end{cases} \quad (3.19)$$

Значення порогу  $F$  обирається відповідно до критерію якості. В якості критерію можна обрати задовільне відношення ймовірності виявлення до ймовірності хибної тривоги. Як зазначається в [54], даний метод виявлення зон

граду, на відміну від традиційних [61- 66] параметричних методів не потребує знання виду щільності розподілу інформативних параметрів радіолокаційних відбитків та виконує оцінку параметрів незалежно від конкретної метеорологічної ситуації.

Розподіл щільності ймовірності вимірювальних величин при зондуванні складних та динамічних цілей (до яких відносяться і метеорологічні цілі) можуть бути різними як для двох різних об'єктів, так і для одного об'єкту в різні проміжки часу. Отже, статистичний аналіз, що базується на стійких статистичних моделях не є адекватним для вирішення цієї проблеми. В такому разі перевага надається адаптивним або інваріантним до відношення сигнал/завада моделям та непараметричним методам. В роботі [67] наведено непараметричний алгоритм виявлення зон граду за допомогою поляриметричних параметрів. Сутність методу полягає в наступному. Оцінки багатопараметричної щільності ймовірності інформаційних параметрів відбитого від метеорологічної цілі сигналу надано для всього метеорологічного формування, а також для локальної зони, що потенційно може виявитися зоною граду. У випадку двох інформаційних параметрів оцінка щільності ймовірності одержується за допомогою методу потенційної функції [68] та може бути записана наступним чином:

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{X_s \in X} \kappa(x, y, X'), \quad (3.20)$$

де  $X' = x', y'$  є вимірним вектором інформаційних параметрів;

$x$  це площина оцінювання щільності розподілу;

$\kappa(\cdot)$  це нормована потенційна функція;

$s = 1$  у випадку граду та  $s = 0$  для випадку відсутності граду.

В якості потенційної функції використовується багатопараметрична Гаусіва щільність розподілу з постійною пропорційністю, що забезпечує умови нормалізації. Оцінки щільності ймовірності  $\hat{f}(x, y)$  зроблено як для окремих зон

в конкретному атмосферному утворенні, в яких є ймовірність наявності граду, так і для решти атмосферного утворення. Оцінки використовуються для побудови вирішальної функції

$$L(\hat{f}_1(X'), \hat{f}_0(X')) > C,$$

де  $\hat{f}_1(X')$ ,  $\hat{f}_0(X')$  - це оцінки щільності ймовірності для окремої зони та для всієї зони атмосферного утворення. В даному випадку в якості вирішувальної функції використовується відношення правдоподібності, але можна використовувати й інші функції. Рішення приймається як порівняння з пороговим рівнем  $C$ .

Отже, в даному алгоритмі зони з градом в метеоутворенні розглядаються як неоднорідності на фоні решти однорідного метеорологічного утворення. Відповідно до [68] процедура виявлення граду як неоднорідних зон базується на перевірці гіпотези про функцію щільності ймовірності інформативних параметрів відбитого сигналу, а потім зводиться до перевірки гіпотези про однорідність розподілу трансформованої статистики  $y = (y_1, y_2)$ . Відношення правдоподібності зводиться до функції правдоподібності тієї самої статистики та замінюється її оцінкою. Оцінки одержуються за допомогою методу потенційних функцій.

Для порівняння алгоритмів представимо моделі щільності ймовірності сигналу у випадку граду як біваріантний нормальний закон з коефіцієнтом кореляції  $r=0.5$  та дисперсією  $W_0 = \sigma^2$ . Градова хмара характеризується щільністю ймовірності сигналу, що формується як сума радіолокаційних відбитків від хмари та від граду з дисперсією  $W_1$  та кореляцією  $r=0$ . Статистична модель, що відповідає ситуації «Град» можна записати наступним виразом:

$$f(x_1, x_2, q) = \exp \left\{ - \frac{x_1^2 + x_2^2 - 2 \frac{r}{(1+q)} x_1 x_2}{2 \left(1 - \frac{r^2}{(1+q)^2}\right) \sigma^2 (1+q)} \right\} / \left( 2\pi \sigma^2 (1+q) \sqrt{1 - \frac{r^2}{(1+q)^2}} \right). \quad (3.21)$$

$q = W_1/W_0$  - відношення дисперсій, що характеризують відношення сигнал/завада.

Оцінки ймовірності виявлення граду  $D$  та ймовірності хибної тривоги  $F$  одержані за допомогою методу Монте Карло. Моделювання за непараметричним алгоритмом було зроблено для різних значень сигнал/завада  $q = W_1/W_0$ . В якості інформативних параметрів використовувалися різні пари з трьох поляриметричних параметрів:  $\lg Z$ ,  $Z_{DR}$ ,  $Z_{dBZ}$ . Результати моделювання для  $x_1 = L_{DR}$  та для  $x_2 = Z_{dBZ}$ , а також для функції  $D = f(F)$  для параметричного алгоритму показано на Рис.3. 1.

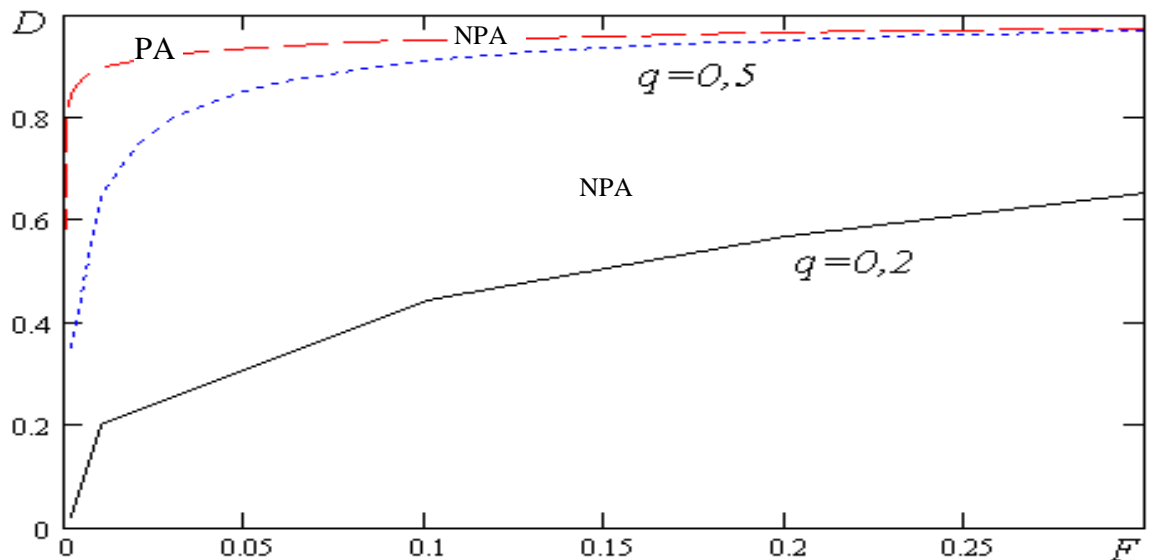


Рис. 3.1 Порівняння параметричного та непараметричного алгоритмів

Параметричний алгоритм характеризується більш повним використанням апріорної інформації і є більш надійним у випадку цілковитої відповідності прийнятої статистичної моделі до реальної ситуації.

Наведений непараметричний алгоритм, що було розроблено на базі потенційних функцій не потребує апріорної інформації про статистичні характеристики інформаційних параметрів (функції щільності ймовірності) відбитого від метеорологічної цілі сигналу. Отже оцінюються параметри реальних сигналів, що забезпечує стійкість виявлення, а також стійку ймовірність похибки першого типу (хибна тривога) за рахунок постійного порогу прийняття рішення.

### **3.2.2 Принципи та алгоритми виявлення зон небезпечного обледеніння**

Можливість використання поляриметричних параметрів для попередження про обледеніння ПС базується на тому факті, що поляриметричні параметри є дуже чутливими до форми та орієнтації гідрометеорів. Це дає можливість розрізнити зони рідких гідрометеорів та зони гідрометеорів, що знаходяться в твердому стані (кристали та сніжинки) та характеризуються більш хаотичною просторовою орієнтацією. Кристалічні хмари є безпечними для польотів ПС з точки зору обледеніння. Найнебезпечнішими є хмари, що складаються з переохолоджених крапель порівняно великого розміру. Таким чином радіолокаційна інформація про мікроструктуру хмар сумісно з інформацією про температуру можна використовувати для розробки алгоритму оперативного виявлення зон небезпечного обледеніння ПС.

Результати розрахунків поляриметричних параметрів для кристалічних хмар наступні [69]:  $Z_{DR}$  змінюється від 9 дБ (вертикально орієнтовані кристали) до -9дБ (горизонтально орієнтовані кристали);  $LDR$  може змінюватись в діапазоні -14...-16 дБ (рівномірний розподіл орієнтації вісі кристалів) та -40...-

50 дБ (у випадку постійної орієнтації впродовж вертикальної або горизонтальної осей).

В роботі [70] представлено алгоритм виявлення зон небезпечного обледеніння, що має достатньо простий принцип роботи, тому що базується на вимірюванні лише поляриметричного параметру ЛДВ. Якщо вимірний параметр ЛДВ знаходиться в межах  $-33\dots-32$  дБ, то це означає, що в хмарі присутні кристали льоду, а отже немає передумов для обледеніння ПС. У випадку, якщо вимірний параметр ЛДВ значно менше ніж  $-32$  дБ та температура оточуючого повітря є негативною, то приймається рішення про наявність переохолоджених крапель в метеорологічному формуванні, а отже є суттєва небезпека обледеніння ПС.

Треба зазначити, що незважаючи на інформативність параметру ЛДВ він має доволі малі значення, а отже його досить складно виміряти з достатньою для подальшої обробки точністю. Цей факт сприяв пошуку нових алгоритмів виявлення зон небезпечного обледеніння в процесі польоту ПС.

В роботах [58,69,70] представлено поляриметричний логічний алгоритм, що оперує як з кросполяризаційною складовою відбитого від метеорологічного утворення сигналу, так і з сополяризаційною складовою. В основі алгоритму є вибір порогових значень для параметрів ЛДВ та  $Z_{DR}$  таким чином, щоб вони найменше відповідали ситуації несферичності гідрометеорів, тобто ситуації наявності кристалів льоду.

В роботі [71] представлено складніший за свою реалізацією алгоритм, що враховує шість вимірювальних параметрів: горизонтальну відбиваність, диференціальну відбиваність, диференційний фазовий зсув, лінійне деполаризаційне відношення, коефіцієнт кореляції та висоту. Алгоритм реалізовано з використанням нечіткої логіки та нейронних мереж. За допомогою нечіткої логіки робиться припущення про тип гідрометеорів. Алгоритм вивчення нейронної мережі використовується для автоматичного корегування параметрів нечіткої множини в системі нечіткої логіки відповідно



до відомого знання. На виході нейронно-нечіткої системи одержуємо один з багатьох варіантів тип гідрометеору: мряка, дощ, сухий нещільний сніг, сухі щільні кристали; сніг, що тане; сухі, або вологі зерна; невеликий град, великий град, суміш граду з дощем тощо.

Зазначені алгоритми працюють у випадку однорідного середовища. Якщо хмара складається з суміші переохолоджених крапель та кристалів льоду, що кількісно превалюють, такі алгоритми можуть виявити наявність кристалів льоду, а отже залишається небезпека попадання в зону обледеніння. В роботі [72] було запропоновано скорегувати алгоритми таким чином, щоб виявити більше варіантів можливого обледеніння ПС під час польоту. Для цього було запропоновано враховувати додатково температуру поверхні ПС, а також температуру повітря в метеоутворенні за маршрутом польоту. У випадку, коли температура поверхні ПС негативна, та менша за пороговий рівень - хмара з наявними рідкими часточками розглядається, як небезпечна. Рівень ризику в такому випадку залежить від оцінки водності хмари.

Важливо зазначити, що алгоритми дистанційного виявлення зон небезпечного обледеніння в процесі польоту ПС за допомогою поляриметричних параметрів радіолокаційного сигналу є достатньо новими та потребують подальшої розробки та верифікації.

### **3.3 Рідкі гідрометеори, як об'єкти нестабільної форми**

У випадку, коли рідка часточка Лагранжа збільшується впродовж трьох координатних осей під дією зовнішнього впливу, використовуються добре відомі рівняння Нав'є-Стокса. Ці рівняння не враховують експериментально відомий факт стискування часточки в напрямку дії зовнішньої сили [77]. Стискування компенсується витягуванням часточки в напрямках, що є ортогональними до напрямку прикладення зовнішньої сили. Розподіл тиску, що є нормальним до поверхні краплі, яка знаходиться в потоці повітря показано на рис. 3.21. Знак “+” відповідає зоні високого тиску, знак “-” відповідає зоні низького тиску порівняно з атмосферним і статичним тиском всередині краплі.

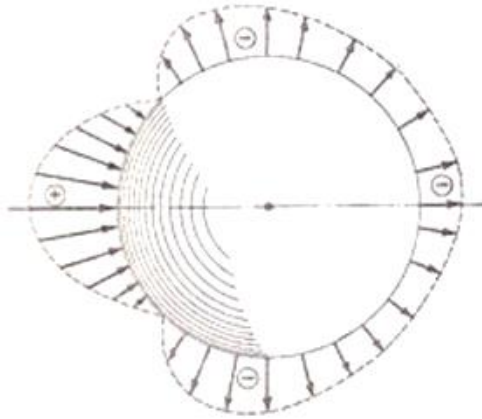


Рис. 3.2 Розподіл тиску, по поверхні краплі [77]

Аеродинамічні сили сприяють сплюсненню краплі та її витягуванню. Отже зручною та часто використововуваною моделлю краплі є сфероїд.

Різниця поверхневого тиску краплі веде до появи внутрішніх потоків рідини, які переміщуються з зони високого тиску до зони низького тиску та викликають появу вихрових потоків всередині краплі. Отже крапля в потоці повітря постійно вібрує і може розглядатися як об'єкт з нестійкою або нестабільною формою. Вібрації краплі виявляються у флуктуаціях осей краплі-сфероїда і відображають важливу інформацію про поведінку, структуру та характеристики об'єкту, що вібрує. Характер флуктуацій обумовлений як характеристиками самого об'єкту, так і його взаємодією з оточуючим середовищем. Деякими із факторів середовища можуть бути динамічні атмосферні явища – вітер, турбулентність тощо.

Деформація краплі за рахунок дії аеродинамічних сил може бути поділена на лінійну та кутову. Кутова деформація виявляється як зміна просторової орієнтації краплі та в її обертанні. Лінійна деформація веде до зміни лінійних розмірів краплі вздовж координатних осей. Таким чином, форма та параметри форми краплі не є фіксованими характеристиками і їх можна розглядати як випадкові характеристики. Вплив вітру та інших динамічних атмосферних явищ на випадковий процес вібрації краплі може виявлятися як зміна частоти, поляризації або амплітуди відбитої електромагнітної хвилі.

### 3.4 Зв'язок відбитого поляризованого сигналу з характеристиками рідких гідрометеорів, які знаходяться під дією вітру. Формування поляризаційного спектра.

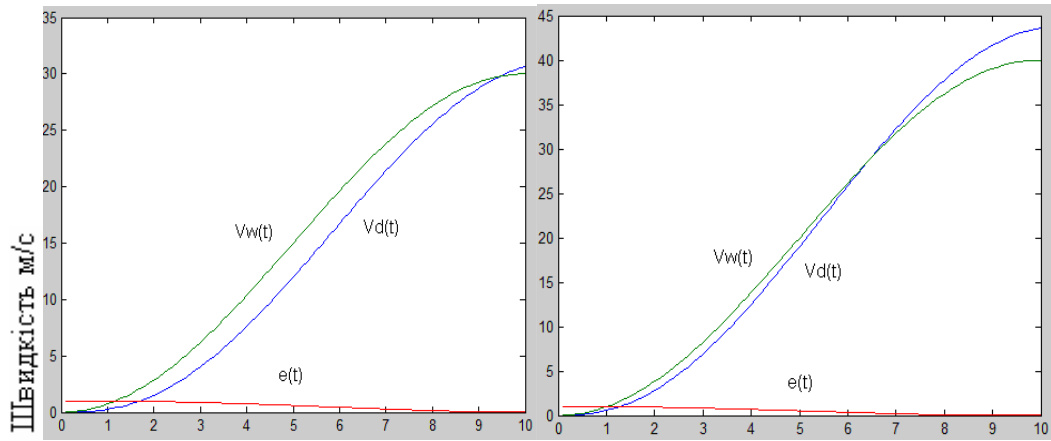
В реальному випадку радіолокаційний сигнал відбивається від ансамблю гідрометеорів різної форми, розміру та орієнтації. Реакція крапель в об'ємі, що відбиває, на вплив вітру не є моментальною. Краплі різного розміру реагують на вплив інерційно, а тому з різною швидкістю. Краплі більшого розміру реагують на вплив з більшою інерцією, а отже з більшим затриманням. На рис. 3.4 (а, б, в та г) наведено діаграми відповідно до викладок з [78], які показують, що зміна швидкості краплі наслідуює зміну швидкості вітру з деяким затриманням, яке залежить від маси краплі.

На рис. 3.4 показано змодельовані поведінки гідрометеорів діаметром 4 мм та 3 мм під час пориву вітру, швидкість якого змінюється по синусоїдальному закону від 0 до 20 м/с та від 0 до 30 м/с. Швидкість руху краплі розраховувалась відповідно до загального рівняння прискорення руху. За модель зовнішнього збурення був прийнятий синусоїдальний закон зміни вітру для якого характерна зміна градієнта швидкості.

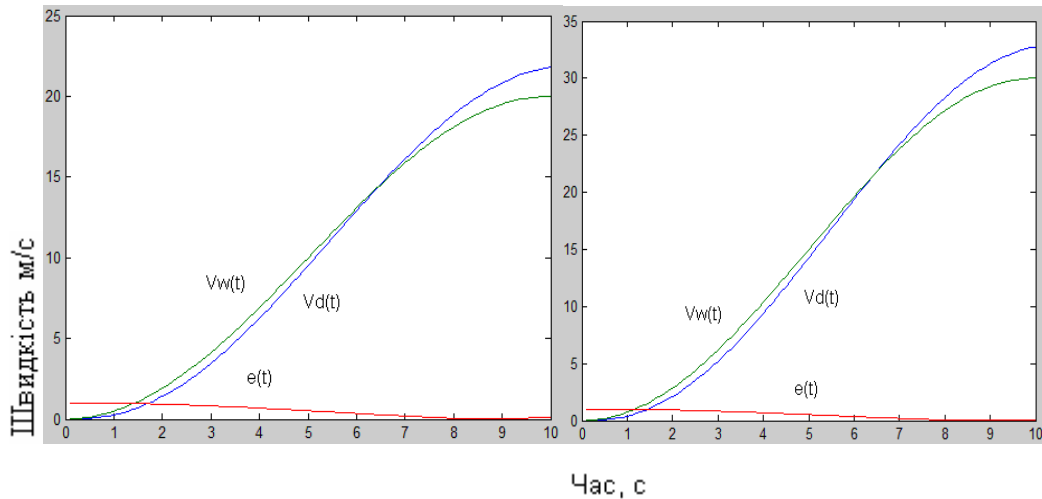
Швидкості дорівнюють одна другій в точці, де крапля не відчуває більше швидкості вітру, а її рух продовжується завдяки інерції. Також на рис. 3.4.

показана відносна похибка методу  $e(t) = \frac{V_W(t) - V_k(t)}{V_w(t)}$ , що характеризує

наближення швидкості гідрометеору до швидкості вітру в часі.



Час, с

а)  $D=4\text{мм}$ ,  $V_w = \text{від } 0 \text{ до } 20 \text{ м/с}$ б)  $D=3\text{мм}$ ,  $V_w = \text{від } 0 \text{ до } 20 \text{ м/с}$ 

Час, с

в)  $D=4\text{мм}$ ,  $V_w = \text{від } 0 \text{ до } 20 \text{ м/с}$ г)  $D=3\text{мм}$ ,  $V_w = \text{від } 0 \text{ до } 30 \text{ м/с}$ 

Рис. 3.4 Залежність швидкості краплі  $V_k$  від швидкості вітру  $V_w$  і та похибка  $e$  у часі

Час затримування можна визначити, як постійну часу краплі. В роботах [74, 75] зустрічаються постійні часу, що враховують інерційність крапель та використовуються в моделях поведінки крапель. Постійна часу краплі характеризує перехідний процес руху краплі під дією вітрових явищ. Постійна часу краплі залежить від розміру рідких часточок та параметрів середовища. Залежність постійної часу краплі  $\tau_k$  від діаметру крапель, яка розрахована відповідно до формули, що наведена в [78] показана на Рис. 3.5

$$\tau_k = \frac{m}{k} = \frac{\rho D_0^2}{18\mu}, \quad (3.22)$$

де  $m = \frac{\rho \pi D_0^3}{6}$  - маса краплі;

$D_0$  - еквівалентний діаметр краплі;

$\rho$  - щільність рідини краплі;

$\mu$  - в'язкість повітря.

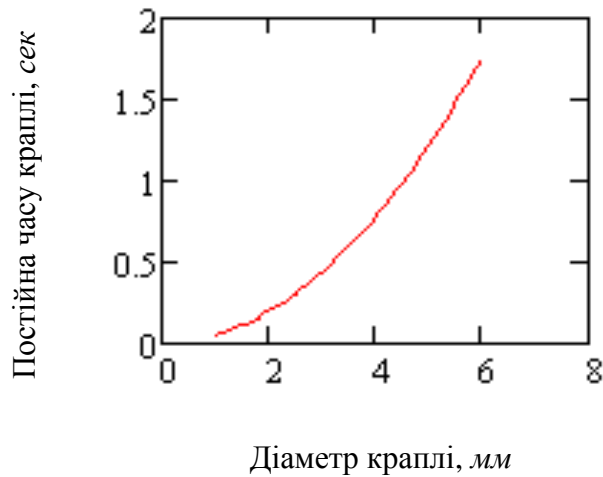


Рис. 3.5 Залежність постійної часу краплі  $\tau$  від її діаметру  $D$

З рис. 3.5 видно, що більші краплі потребують більше часу для того, щоб їх швидкість досягла швидкості вітру, що на них впливає. В той же час більші краплі сильніше деформуються під дією градієнта швидкості вітру та роблять більш вагомий внесок до інтенсивності енергії відбитої хвилі. Припустимо, що в турбулентній атмосфері наявні краплі різного розміру, орієнтації та форми. В такому випадку поляризація відбитого сигналу визначається ансамблем гідрометеорів різної форми, що рухаються з різними швидкостями. Перехідний процес в такому випадку характеризується набором перехідних характеристик. Отже на вході приймача радіолокатора отримаємо спектр коливань різного енергетичного рівня, який обумовлений різною зміною кутів поляризації,

відбитої від різних гідрометеорів електромагнітної хвилі. Таким чином ми можемо говорити про поляризаційний спектр як про енергетичний розподіл за поляризаційними складовими по аналогії з частотним спектром.

Максимальний енергетичний рівень відповідає випадку, коли поляризація відбитої хвилі співпадає з поляризацією зондувального променя. В інших випадках енергетичний рівень визначається, як проекція вектора напруженості електричного поля на головну вісь відповідної діаграми спрямованості. Чим більшою є деформація крапель та зміна поляризації відбитої від гідрометеорів електромагнітної хвилі, тим менший рівень енергії коливань в антені, що налаштована сприймати сигнали з основною поляризацією (поляризацією зондувальної хвилі) і більший рівень енергії на антені, що налаштована сприймати сигнали з поляризацією, що відрізняється від основної. Таким чином, оцінка прийнятої потужності поляризованого сигналу залежить від розподілу складових поляризаційного спектру відбитого від гідрометеорів сигналу.

### **3.5 Метод оцінювання енергії поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів**

Сучасні поляриметричні радіолокатори можуть приймати відбиті сигнали основної поляризації та ортогональної до основної поляризації, це обмежує інформативність поляриметричних параметрів, тому що не відображає динаміку процесів в об'єкті, які ведуть до зміни поляризації відбитого сигналу. Сигнал з ортогональною до основної поляризацією, який спроможні приймати сучасні поляриметричні радіолокатори є досить малою величиною, а тому, не завжди може використовуватись для розрахунку поляриметричних параметрів, які б давали інформацію про небезпечне явище з достатнім рівнем ймовірності.

Отже існує задача забезпечити можливість прийняття відбитих радіолокаційних сигналів з поляризацією, що відрізняється від основної, в тому числі ортогональною для підвищення можливості пристрою щодо одержання інформації про властивості цілей, які викликають зміну поляризації відбитого сигналу, а також спостерігати за зміною поляризаційних складових відбитого сигналу з часом.

Приймання сигналів антенами, що налаштовані сприймати сигнали з поляризацією, що відрізняється від поляризації зондувального сигналу свідчить про процеси, що призвели до деформації крапель і, як наслідок, зміни кута поляризації відбитої електромагнітної хвилі. Більшість природних динамічних явищ не викликають зміни кута поляризації відбитих від метеоутворення радіохвиль більше ніж на 15 градусів. Це також є причиною того факту, що в антені, яка налаштована приймати сигнали з ортогональною поляризацією відносно поляризації зондувальної хвилі рівень сигналу часто є меншим за рівень завад. Таким чином, для приймання сигналів із зміненим кутом поляризації з рівнем, що є необхідним для подальшої обробки та розрахунків параметрів, використовується проміжна антена або декілька проміжних антен.

*Метод оцінювання енергії поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів* полягає в наступному:

1. Радіолокатор з керованою поляризацією випромінює електромагнітне коливання фіксованої поляризації в напрямку небезпечної для польотів хмари (крапельно-рідкої).

2. Приймальна система, з декількома вхідними каналами, або приймальними антенами, що налаштовані приймати сигнал певної поляризації приймають енергію відбитої електромагнітної хвилі з певною зміною кута поляризації відповідно до поляризації зондувальної хвилі. Енергія, що приймається антеною з певною зміною кута поляризації розраховується за формулою 4.1.9, що міститься в наступному розділі даної дисертаційної роботи. Модель, що представлена у вигляді формули

4.1.10 демонструє внесок несферичності краплі в поле, о розсіюється краплей та приймається  $k$ -ою антеною .

3. Система реєстрації та обробки порівнює енергетичні рівні (миттєві потужності), прийняті антенами що налаштовані приймати сигнал певної поляризації між собою (формула 4.1.9 та 4.1.10) та сигналом поляризації зондувальної хвилі.

Поляриметричні параметри для подальшої обробки можна розрахувати за формулами, які за аналогією з загальноживаними Радіолокаційною відбиваністю на певній поляризації, Диференційною відбиваністю (формула 1.5) та лінійним деполаризаційним відношенням (формули 1. 6 та 1. 7) можна назвати проміжне  $Z_{ij}$ ,  $Z_{dr}$  та проміжне  $L_{dr}$ . Отже для аналізу зміни потужності одержаної під певним кутом поляризації, що відрізняється від основної та ортогональної до основної введемо параметри  $int Z_{ij}$ ,  $Int Z_{dr}$  та  $Int L_{dr}$ . Для умовного випадку основної поляризації горизонтальної, а приймальних антен налаштованих приймати хвилі з кутами поляризації що відрізняються від основної на  $i, j, l$  градусів деякі з них можна записати наступним чином:

$$Z_h = \frac{4\lambda^4}{\pi^4 |K|^2} |P_{hh}|^2 \quad (3.23)$$

для випадку приймання сигналу антеною, що налаштована приймати сигнал основної поляризації,

$$Int L_{dr_{hi}} = 10 \log \frac{P_{hi}}{P_{hh}} \quad (3.24)$$

для випадку приймання сигналу антеною, налаштованою приймати хвилі з кутами поляризації що відрізняються від основної на  $i$  градусів,

$$Int L_{dr_{hj}} = 10 \log \frac{P_{hj}}{P_{hh}} \quad (3.25)$$

для випадку приймання сигналу антеною, налаштованою приймати хвилі з кутами поляризації що відрізняються від основної на  $j$  градусів,

$$Int L_{dr_{hl}} = 10 \log \frac{P_{hl}}{P_{hh}} \quad (3.26)$$



для випадку приймання сигналу антеною, налаштованою приймати хвилі з кутами поляризації що відрізняються від основної на  $l$  градусів,

4. За розрахованими відношеннями фіксується інформація про:

- кут поляризації за яким спостерігається найбільший рівень прийнятого сигналу;
- кут поляризації та відповідній йому прийнятий енергетичний рівень.

5. Далі повторюються пункти 1-4 для спостереження часової зміни енергетичних складових.

6. За результатами часового спостереження фіксується швидкість зміни енергетичного стану для кожної з приймальних антен.

7. За одержаною інформацією приймається рішення щодо:

- неосередненого значення зміни кута поляризації відбитої від ансамблю рідких гідрометеорів електромагнітної хвилі, а отже про ступінь впливу на гідрометеори вітру (чим більшою є зміна кута поляризації, тим більшою є сила вітру);
- відносну кількість гідрометеорів певного розміру (за порівнянням енергетичного рівня на різних антенах, враховуючи розмір рідких гідрометеорів, та їх здатність до деформації);
- наявності чи відсутності турбулентних рухів повітря (якщо за результатами часового спостереження фіксується постійна зміна енергії на всіх приймальних антенах поляриметричного радіолокатора).

Комп'ютерне моделювання за запропонованим методом та аналіз результатів наведено в четвертому розділі даної дисертаційної роботи.

### **3.6 Поляриметрична радіолокаційна система для оцінювання енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів сигналу**

Метод оцінювання енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів сигналу з поляризацією, що відрізняється від основної, в тому числі ортогональною показано за допомогою пристрою, що наведено на рис.3.6

В системі 3.6 можливість прийняття відбитих радіолокаційних сигналів з поляризацією, що відрізняється від основної, в тому числі ортогональною вирішується тим, що до поляриметричного радіолокатора, який містить генератор зондувальних імпульсів, передавальну антену, що налаштована на випромінювання електромагнітного коливання з фіксованою поляризацією, приймач, давач положення антен, блок обробки прийнятих сигналів та визначення поляриметричних параметрів, блок відображення та реєстрації згідно з [79] включені антени, що налаштовані на приймання сигналів з основною поляризацією, та сигналів з поляризацією, що відрізняється від основної. Це дозволяє сепарувати прийняті на кожну з антен сигнали за поляризацією, та зробити розподіл поляризаційних складових у часі.

Кількість антен обирається з урахуванням роздільної здатності антени по поляризації.

Введені в пристрій антени, що налаштовані на приймання сигналів з основною поляризацією, та сигналів з поляризацією, що відрізняється від основної, дозволяють приймати відбиті сигнали не тільки основної та ортогональної до основної поляризації, а також сигнали з поляризацією, що відрізняється від основної, включно ортогональної до основної поляризації. В результаті збільшується можливість щодо прийняття корисної інформації про об'єкт, що відбиває.

Поляриметричний радіолокатор здатний оцінювати енергію поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів електромагнітної хвилі містить хронізатор  $I$ , підключений до генератора

зондувального сигналу 2 та блоку обробки сигналів та визначення поляриметричних параметрів 11, генератор зондувальних сигналів 2, вихід якого з'єднаний з входом передавальної антени 3, передавальну антену 3, давач положення антен 4, який підключений до передавальної антени 3, приймальних антен 5-7 та блоку обробки сигналів та визначення поляриметричних параметрів 11, антени 5, 6, 7, що налаштовані на приймання сигналів з різними поляризаціями, які підключені до приймачів 8, 9, 10 відповідно, приймачі 8, 9, 10, блок обробки прийнятих сигналів та визначення поляриметричних параметрів 11, вхід якого з'єднаний з хронізатором 1, з давачем положення антен 4 та приймачами 8 – 10 і блок відображення та реєстрації 12, вхід якого з'єднаний з виходом блоку обробки сигналів та визначення поляриметричних параметрів 11.

На рис.3.6 зображена структурна схема поляриметричного радіолокатора.

Поляриметричний радіолокатор працює таким чином.

На передавальну антену 3 з генератора зондувального сигналу 2, вхід якого з'єднаний з хронізатором 1, подається сигнал з фіксованою поляризацією, який випромінюється передавальною антеною в напрямку на об'єкт дослідження. Приймальні антени (ПА) 5 – 7 приймають відбиті сигнали від об'єму, що досліджується, та здійснюють селекцію сигналу за поляризацією. Кожна з антен налаштована на приймання сигналів окремої поляризації (кількість антен обирається з урахуванням роздільної здатності антен за поляризацією). Сигнали з антен 5, 6, 7, для яких здійснена селекція за поляризацією, поступають до приймачів 8, 9, 10 відповідно. Сигнали, з приймачів 8, 9, 10 поступають на блок обробки прийнятих сигналів та визначення поляриметричних параметрів 11. На цей самий блок поступають сигнали від хронізатора 1, та давача положення антен 4, який з'єднаний з передавальною антеною 2 та приймальними антенами 6 - 7, що дозволяє співвіднести відбиті сигнали з конкретними координатами елементарного об'єму, що відбиває, за дальністю та напрямком. Обробка прийнятих сигналів здійснюється за заданим алгоритмом. Інформація з блоку обробки сигналів та

визначення поляриметричних параметрів *11* подається до блоку відображення та реєстрації *12*.

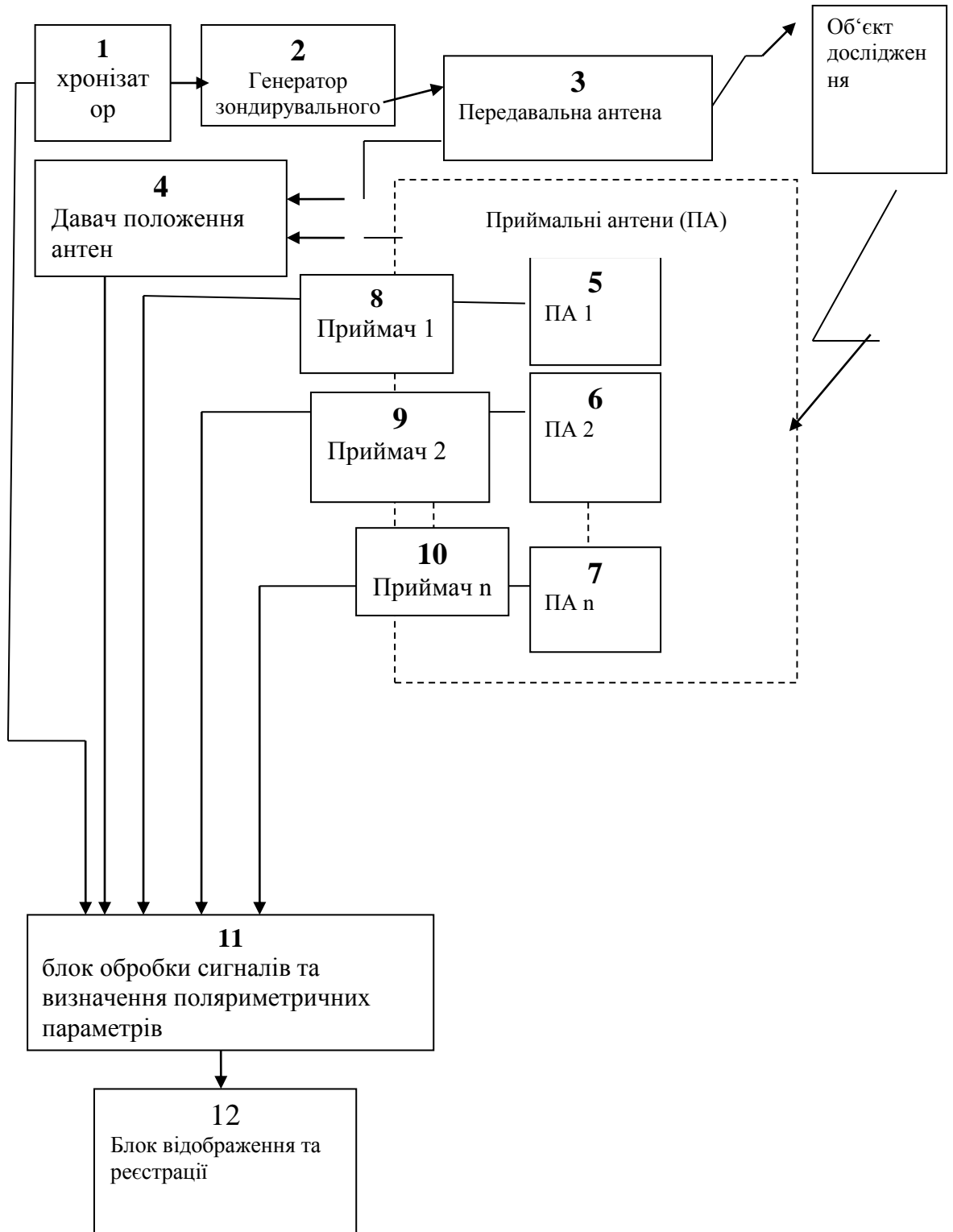


Рис. 3.6 Структурна схема запропонованого поляриметричного радіолокатора з багатопроменевим прийманням

Найкраще приймання поляризованих сигналів можна досягти у випадку, коли вектори поляризації антени та поляризації сигналу співпадають. У нашому випадку поляризація відбитого сигналу визначається ансамблем гідро метеорів, які можуть мати різну форму, орієнтацію та рухатися з різними швидкостями. Наслідком цього є поява спектру коливань однієї частоти та з різною поляризацією на вході антенного блоку. У даному випадку ми можемо говорити про *поляризаційний спектр* за аналогією з частотним спектром [79, 80, 81]. Такий поляризаційний спектр можна визначити, як деякий миттєвий розподіл енергії відбитого від метеорологічної цілі поляризованого сигналу за складовими однієї частоти, але з різними кутами поляризації.

Оцінювання потужності прийнятого поляризованого сигналу буде залежати від розподілу сигналів по поляризаційному спектру та від діаграми спрямованості антени, що враховує розподіл потужності прийнятого сигналу залежно від поляризаційних складових. Таку діаграму спрямованості називаємо діаграмою спрямованості за поляризацією [82-84]. У даному випадку мається на увазі сприйняття енергії сигналу відповідно до кута поляризації приймальної антени. На рис. 3.7 вісь  $y$  відповідає максимальній потужності відбитого сигналу з вертикальною поляризацією, вісь  $x$  - максимальній потужності відбитого сигналу з горизонтальною поляризацією.

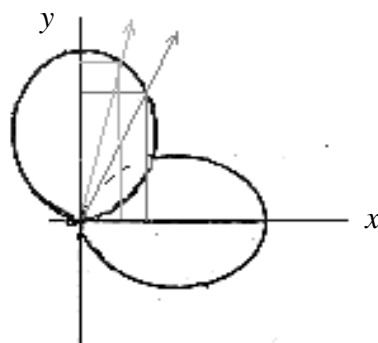


Рис. 3.7 Розподіл потужності прийнятого сигналу по діаграмах спрямованості антени залежно від поляризаційних складових

Ширина діаграми спрямованості антени за поляризацією буде визначатися кутами поляризації, на яких потужність відбитого від метеоутворення сигналу зменшується в два рази відносно поляризації приймальної антени. Діаграми спрямованості приймальних антен частково перекриваються. Як наслідок, енергії суміжних антен перерозподіляються і, таким чином, енергія сигналу, що не була прийнята однією із суміжних антен буде компенсована обмеженням сигналу в іншій.

Вирішення проблеми оцінювання сигналу за кутом поляризації можливо тільки в тій частині приймально-передавального тракту радіолокатора, де така різниця існує, а саме в електромагнітному полі на вході антенної системи. Для ефективного приймання відбитого сигналу характер поляризації антени має збігатися з характером поляризації відбитої електромагнітної хвилі. Це означає, що вібратори приймальної антени мають бути орієнтовані паралельно вектору  $E$  відбитої електромагнітної хвилі. Важливим фактором для оцінювання сигналів з різними кутами поляризації є ширина спрямованості антени, яка характеризується відносною чутливістю антени щодо сприймання сигналів відповідної поляризації в заданому напрямку зондування. Антена має сприймати не тільки відбиті сигнали з поляризацією, яка скоординована з поляризацією приймальної антени, а і миттєвий спектр сигналів однієї частоти, але з різними кутами поляризації - *поляризаційний спектр* [85, 86]. Отже, ширину діаграми спрямованості антени потрібно скорегувати, враховуючи можливість приймання сигналів з різними кутами поляризації. У випадку системи, що складається з  $n$  ( $n > 2$ ) приймальних антен, кожна з антен антенного блоку має бути скоординованою за поляризацію з коливаннями головного напрямку осі ширини діаграми спрямованості приймальної антени. Таким чином, потужність прийнятого сигналу з напрямку, який відрізняється від головного напрямку осі ширини діаграми спрямованості приймальної антени, не буде визначатися повним вектором сили поля, а тільки його деяким ефективним значенням. Це значення можна визначати як проекцію повного

вектора на головну вісь діаграми спрямованості антени скоординованою за поляризацією з відбитою електромагнітною хвилею.

### 3.7 Енергетична оцінка складових поляризаційного спектра: алгоритм оцінювання турбулентності за складовими поляризаційного спектра

Зміна інтенсивності електромагнітного поля впродовж перетину сканувального променя виражається у зміні струму антени і залежить від поляризації прийнятого сигналу. Наявність хаотичних рухів повітря (турбулентності) призводить до зміни поляризації радіолокаційних сигналів відбитих від різних розсіювачів електромагнітних хвиль. Поляризація таких відбитих сигналів не збігається з початковою поляризацією зондувального сигналу. Така зміна інтенсивності електромагнітного поля на вході антенного блоку приведе до зменшення струму антени. У роботі [87] зміна струму антени моделюється за допомогою вагових коефіцієнтів, які визначають діаграму спрямованості антени та залежать від зміни поляризації відбитих від гідрометеорів сигналів.

На рис. 3.8-3.13 показано змодельовані зміни струму в приймальних антенах антенного блока, що налаштовані приймати сигнали з різними поляризаціями щодо поляризації зондувального сигналу та спектральні складові поляризаційних спектрів, що відповідають діаграмам 3.8, 3.10, 3.12.

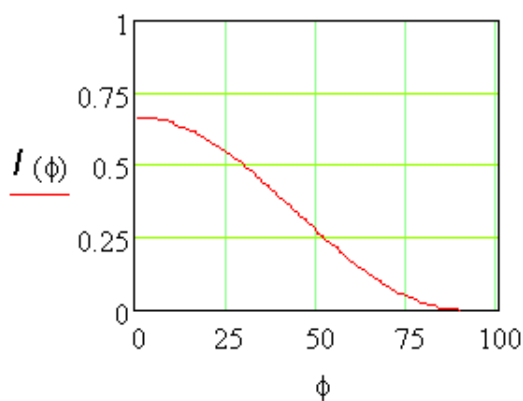


Рис. 3.8 Зміна струму в приймальній антені, що скоординована приймати відбиті сигнали горизонтальної поляризації

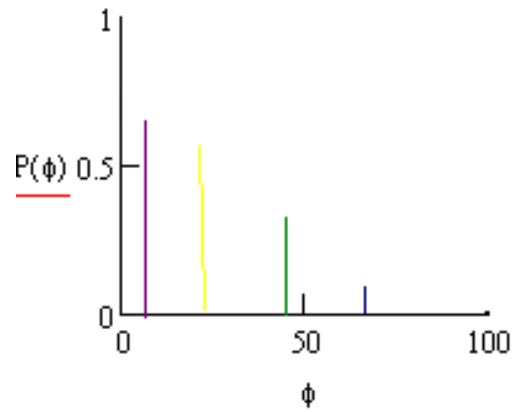


Рис. 3.9 Спектральні складові поляризаційного спектра для приймальної антени, що скоординована приймати відбиті сигнали горизонтальної поляризації

Однакова інтенсивність кольору відповідає складовим з однаковими кутами поляризації на діаграмах 3.9, 3.11, 3.13. Поляризація зондувального сигналу в даному випадку – вертикальна.

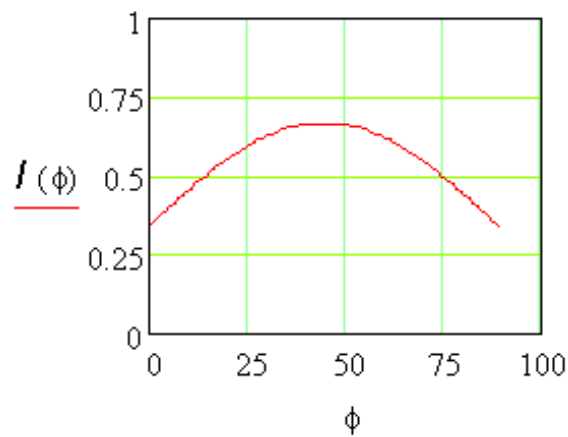


Рис. 3.10 Зміна струму в приймальній антені, що скоординована приймати відбиті сигнали з поляризацією  $45^\circ$



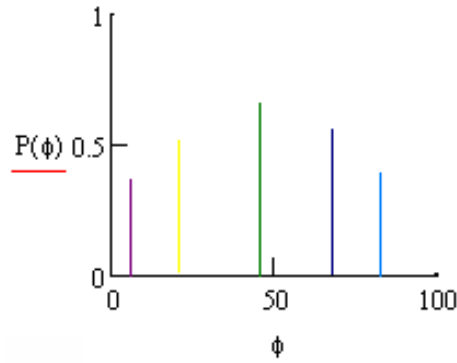


Рис. 3.11 Спектральні складові поляризаційного спектра для приймальної антени, що скоординована приймати відбиті сигнали з поляризацією  $45^\circ$

Враховуючи згаданий факт, що більшість природних динамічних явищ не викликають зміни кута поляризації відбитих від метеоутворення радіохвиль більше, ніж на  $15$  градусів, та що в антені, яка налаштована приймати сигнали з ортогональною поляризацією відносно поляризації зондувальної хвилі рівень сигналу часто є меншим за рівень завад, наведемо результати моделювання зміни потужності в тих самих трьох антенах, що налаштовані приймати сигнали з основною поляризацією (а), ортогональною (б) та під кутом  $45$  градусів до основної (в) з урахуванням рівня сигнал/завада з [84].

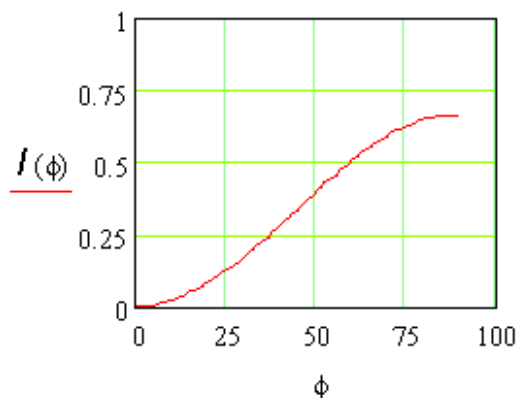


Рис. 3.12 Зміна струму в приймальній антені, що скоординована приймати відбиті сигнали вертикальної поляризації

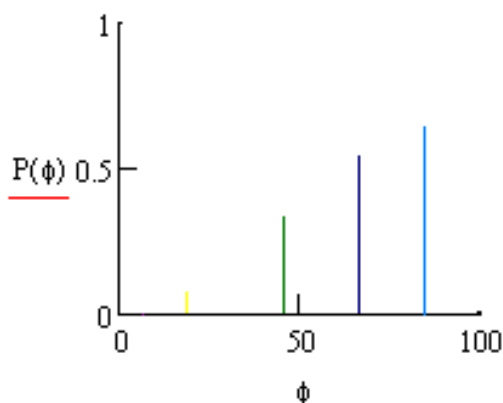
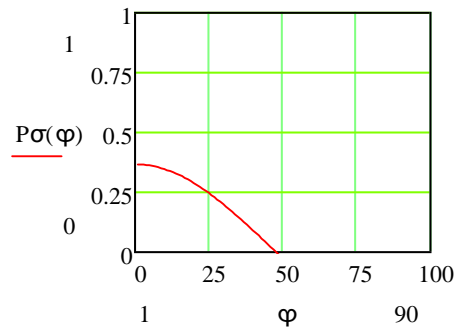


Рис. 3.13 Спектральні складові поляризаційного спектра для приймальної антени, що скоординована приймати відбиті сигнали вертикальної поляризації

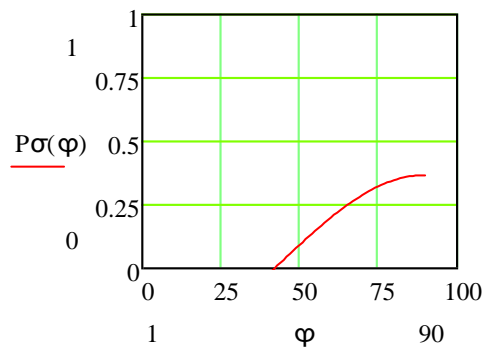
Поляризація зондувального сигналу в даному випадку також вертикальна. Потужність адитивної завади обрано на рівні 0.3 від загальної прийнятої потужності. Результати моделювання наведено на рис. 3.14 (а,б,в), де рівень нормованої потужності відкладено впродовж вісі  $y$ , кут зміни поляризації відкладено впродовж вісі  $x$ .

На рис. 3.14 (б) можна побачити, що у випадку приймання сигналів антеною, що налаштована приймати ортогонально поляризовані хвилі, рівень сигналу є меншим за рівень завад у випадку невеликих кутів зміни поляризації відбитої хвилі.

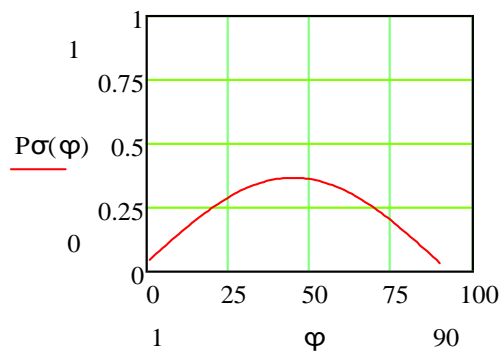
На рис. 3.14 (в) можна побачити, що в антені, яка налаштована приймати сигнал з поляризацією 45 градусів відносно поляризації зондувальної хвилі сигнал перевищує рівень завад майже по всьому діапазону змін кутів поляризації. Цей факт є важливим у випадку дослідження атмосферних явищ, які в більшості випадків не викликають значних відхилень кутів поляризації. З аналізу рис. 3.14 а,б,в можна сказати, що ефективне приймання відбитих від метеоутворень радіохвиль зі зміненою поляризацією можливо проміжною антеною, що налаштована приймати сигнали зі зміненим не більше, ніж на 45 градусів, кутом поляризації відносно основної поляризації.



а



б



в

Рис. 3.14 Зміна потужності прийнятого сигналу антеною, що налаштована приймати електромагнітні хвилі а) з вертикальною поляризацією, б) з горизонтальною поляризацією, в) з кутом поляризації 45 градусів від вертикальної

З аналізу рис 3.8, 3.10, 3.12, 3.14 (а,б,в) можна сказати, що зменшення потужності прийнятого сигналу в будь-якій окремій антені супроводжується збільшенням потужності в іншій антені. Рівень сигналу в антені з деякою проміжною поляризацією значно вище, ніж в антені з ортогональною поляризацією відповідно до поляризації зондувального сигналу. Отже,

відношення сигнал/шум для відбитого деполаризованого сигналу краще в антені з деякою проміжною поляризацією, ніж в антені, що налаштована приймати сигнали з ортогональною поляризацією відповідно до поляризації зондувального сигналу. Кращий рівень сигнал/шум дозволяє оцінювати та розраховувати поляризаційні параметри для визначення небезпечних явищ з вищим рівнем імовірності.

На базі *методу оцінювання енергії поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів* та з урахуванням особливостей поляриметричної радіолокаційної системи (рис. 3.6) можна оцінити інтенсивність атмосферної турбулентності за наступним алгоритмом :

1. Блоком приймальних антен (або однією багатоканальною антеною) приймаються сигнали з різною поляризацією (щонайменше 3) – сигнал з основною поляризацією (поляризацією, що співпадає з поляризацією зондувальної хвилі), сигнал з поляризацією, що змінилась на 45 градусів, та сигнал з поляризацією, що є ортогональною до основної поляризації. (важливо відмітити, що кути поляризації на які налаштовані приймальні антени впливають на можливість виділення компонент відбитого сигналу – вібраційної, або сталої, що відповідає відбиттю від крапель еквівалентного діаметру, що необхідно прийняти до уваги при виборі поляризації приймальних антен. Також при виборі кутів поляризації приймальних антен для оцінки напрямку вітру важливо а часто і доцільно використовувати такі, що менш відрізняються від поляризації зондувальної хвилі, наприклад, 5, 10 та 15 градусів. Це обумовлено найбільш ймовірним діапазоном змін кута поляризації відбитої електромагнітної хвилі від несферичних та деформованих рідких часточок).

2. Одночасно вимірюється струм в кожній з антен.

3. Одночасно оцінюється миттєва потужність прийнятого сигналу за пульсаціями струму в антенах, формула 3.23

4. Визначаються вагові коефіцієнти перерозподілу потужності в антенах та міра значимості потужності одержаної на кожну з приймальних антен:

$$M_{\text{зн}} = \sum_{j=1}^n w_{pj} w_{\tau j} \quad (3.27)$$

$w_{pj}$  - вага за рівнем потужності на кожній з приймальної антени;

$w_{\tau j}$  - вага за постійною краплі (формула 2.1.8) на кожній з приймальної антени;

$n$  – кількість приймальних антен.

Розрахунок вагових коефіцієнтів здійснюється за формулою:

$$w_x = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (3.28)$$

$x_{i,j}$  – відповідна ознака (потужність або постійна часу).

5. Сепаруються миттєві потужності ( $P_{ij}$ ) по спектральних складових поляризаційного спектра з урахуванням часу їх існування в антенах з різними поляризаціями. ( $ij$  – відповідають значенням кутів поляризації,  $i$ - основна поляризація,  $j$  – поляризація відповідно до кута поляризації приймальної антени). Відповідно до формули (3.22) час спостереження має бути не меншим за 1 сек, для того щоб зафіксувати можливу деформацію крапель з розмірами в діапазоні до 4,5 мм.

6. Далі повторюються пункти 1-5 для нових часових відліків.

7. Якщо  $P_{hi1}$  як і  $P_{hj1}$  та  $P_{hl1}$  значно відрізняються від значень  $P_{hi2}$ ,  $P_{hj2}$ ,  $P_{hl2}$  та  $P_{him}$  , і  $P_{hjm}$ ,  $P_{hlm}$  (1, 2 та 3 – часові відліки), то приймається рішення про наявність турбулентних рухів повітря. Чим більшою є різниця, тим інтенсивнішою є атмосферна турбулентність.

Результати моделювання за запропонованим алгоритмом та їх аналіз наведено в четвертому розділі даної дисертаційної роботи.

Послідовність операцій, необхідних для оцінювання потужності турбулентних складових поляризаційного спектра згідно з [78] можна подати

алгоритмом, який відповідає  $n$ -канальній системі та показана на рис. 3.15. У нумерації блоків перша цифра позначає номер каналу, а друга номер блока в даному каналі. Кожний канал відповідає певній поляризаційній складовій сигналу, що приймається.

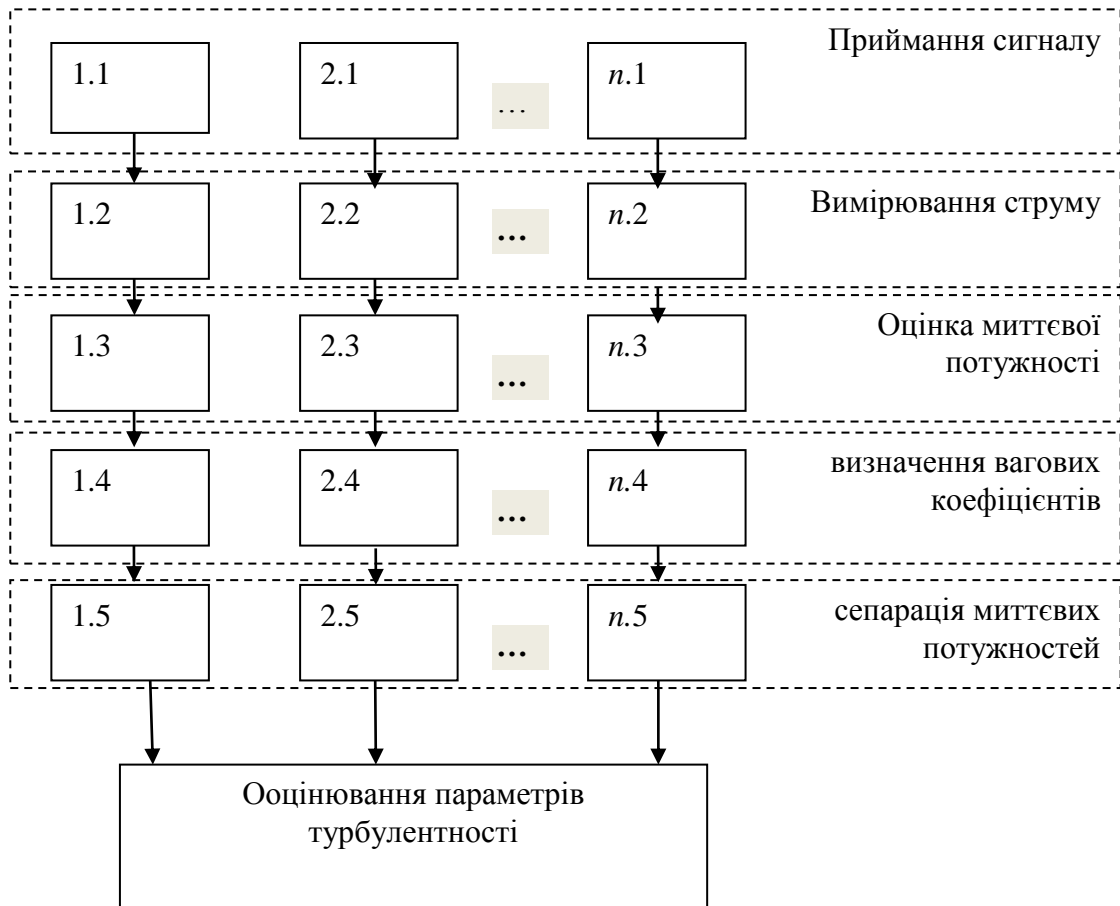


Рис. 3.15 Алгоритм оцінювання потужності турбулентних складових поляризаційного спектра в метеорологічних поляриметричних радіолокаторах

У цьому алгоритмі блок 1.1 – приймання сигналу основної поляризації (наприклад, Н); блок 1.2 – вимірювання струму в антені з основною поляризацією Н; блок 1.3 – оцінка миттєвої потужності прийнятого сигналу за пульсаціями струму в антені з основною поляризацією Н; блок 1.4 – визначення вагових коефіцієнтів перерозподілу потужності в антені з основною поляризацією Н; блок 1.5 – сепарація миттєвих потужностей по спектральних складових поляризаційного спектра з урахуванням часу їх існування в антені з основною поляризацією Н. Блоки 2.1 - 2.5 відображають процеси для антени,

що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $45^\circ$  (або будь-якою іншою, яка відрізняється від основної). Блоки  $n.1 - n.5$  демонструють процеси для антени, що налаштована приймати сигнал з ортогональною поляризацією  $V$ .

### 3.8 Метод одержання інформації про вітрові явища в атмосфері за допомогою радіолокаційної системи з антеною фіксованої поляризації

Для визначення деполаризації відбитих від гідрометеорів електромагнітних хвиль скористаємось просторово-часовим описом прийнятих сигналів. Як показано в [85] ступінь деполаризації відбитої радіохвилі - інформативний параметр - змінюється відповідно до напрямного косинуса.

Напрямний косинус описує сигнал в координатах сфери Пуанкаре (рис.3.16).

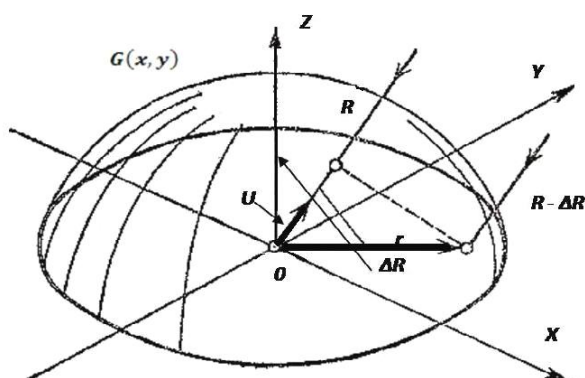


Рис. 3.16 Різниця ходу променів у випадку, коли хвиля падає на апертуру антени в у координатах

На рис.3.16:

$r$  – нормаль-вектор фронту падаючої хвилі в точці апертури;

$R_i$  – вектор поляризації, що співпадає з поляризацією антени,  $i$  – індекс поляризації;

$\Delta R$  – відхилення вектору  $R_i$  від основної поляризації;

$U$  - повний сигнал в площині основної поляризації.

Комплексна обвідна напруженості поля, прийнятого в точках  $x, y$  антени в час  $t$  визначається за формулою:

$$S_E(x, y, z) = \sqrt{1 - u_x^2 - u_y^2} G(x, y) S_E \left[ t - \frac{R_i(x, y, t)}{c} \right] \times \exp[-j2\pi f_0 R_i(x, y, t)/c] \quad (3.29)$$

де  $S_E[t - R_i(x, y, t)/c] \exp[-j2\pi f_0 R_i(x, y, t)/c]$  - хвиля, що падає на довільну точку  $x, y$  апертури антени в довільний момент  $t$ ;

$R_i(x, y, t)$  - компоненти проекції вектору на площину основної поляризації.

Ці компоненти характеризують напруженість електромагнітного поля в точці апертури антени.

В реальності, сигнал в приймальній антені  $S_E$  змінюється за законом напрямного косинусу. Значення  $\sqrt{1 - u_x^2 - u_y^2} G(x, y)$  описує флуктуації амплітуди за наявності зміни кута поляризації відбитої від гірметеорів електромагнітної хвилі. На Рис. 3.17 показано флуктуації току в приймальній антені за наявності деполаризації відбитої хвилі.

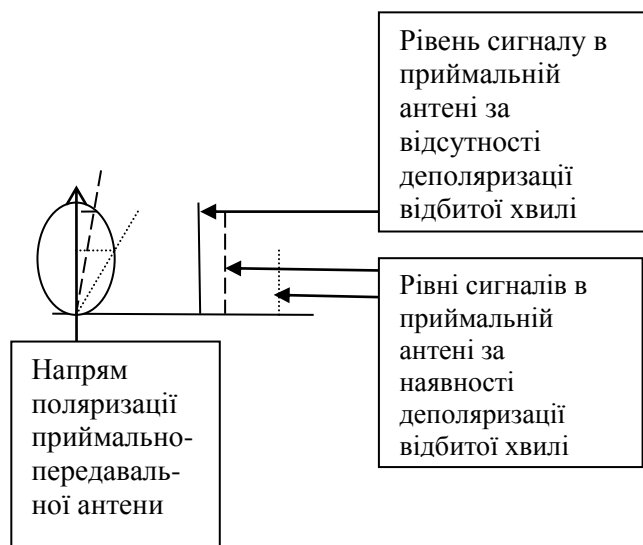


Рис. 3.17 Часові флуктуації струму в приймальній антені



Таким чином, можна сказати, що зміна кута деполяризації відбитої електромагнітної хвилі веде до появи флуктуацій струму в приймальній антені. Флуктуації з'являються внаслідок того, що максимальне значення струму в приймальній антені відповідає прийому відбитої хвилі з поляризацією, яка співпадає з поляризацією зондувального променя. У випадку деполяризації відбитої від метеорологічної цілі хвилі, струм в приймальній антені визначається його проекцією на головну вісь діаграми спрямованості.

Частотні характеристики флуктуацій амплітуди, що викликані динамічними процесами в атмосфері різняться від флуктуацій, що є наслідком інших процесів, які впливають на амплітуду сигналів. Цей факт обумовлений особливостями фізики атмосферних явищ. Для оцінки флуктуацій амплітуди струму можна використовувати добре розвинену теорію оптимального приймання радіолокаційних сигналів.

Метод одержання інформації про вітрові явища в атмосфері за допомогою радіолокаційної системи з антеною фіксованої поляризації полягає в наступному:

1. Передавальною антеною випромінюється зондувальний сигнал фіксованої поляризації для дистанційного зондування небезпечної для польотів хмари або опадів.
2. Антена перемикається на прийом та приймає відбите від цілі високочастотне коливання;
3. Виконується поляризаційна демодуляція прийнятого сигналу та одержується низькочастотна складова (обвідна) відбитого від цілі радіолокаційного сигналу.
4. В блоці поляризаційного детектування проводиться оцінка параметрів низькочастотної обвідної відбитого від цілі радіолокаційного сигналу, що викликана зміною поляризації відбитої електромагнітної хвилі.

5. В блоці реєстрації та обробки проводиться статистична оцінка дисперсії випадкового процесу зміни обвідної відбитої електромагнітної хвилі та будується розподіл інформаційного параметру.

6. На основі результатів оцінки (відповідно до розподілу, що одержаний за результатами моделювання в розділі 4 даної дисертаційної роботи рис. 4.2.10, 4.2.11) приймається рішення про наявність чи відсутність небезпечної для польотів турбулентності.

Результати моделювання та алгоритм визначення турбулентності на основі запропонованого методу представлено в розділі 4.2.4. даної дисертаційної роботи

### **3.9 Метод розрахунку швидкості вітру за критерієм Вебера для режиму критичної деформації краплі**

#### **3.9.1 Розрахунок швидкості деформації рідких гідрометеорів та критичної швидкості вітру**

Розглянемо лінійну деформацію рідкої часточки, яка представлена часточкою Лагранжа. На рис. 3.9.1. показано лінійну деформацію часточки Лагранжа, як деформацію осей паралелепіпеда.

З рис. 3.18  $dx$  це відстань між точками  $a$  та  $d$ . Швидкість руху точок  $a$  та  $d$  можна визначити за допомогою виразу:

$$\left( U - \frac{dU}{dx} dx \right) - U = \frac{dU}{dx} dx, \quad (3.30)$$

$U$  - швидкість часточки впродовж вісі  $x$ .

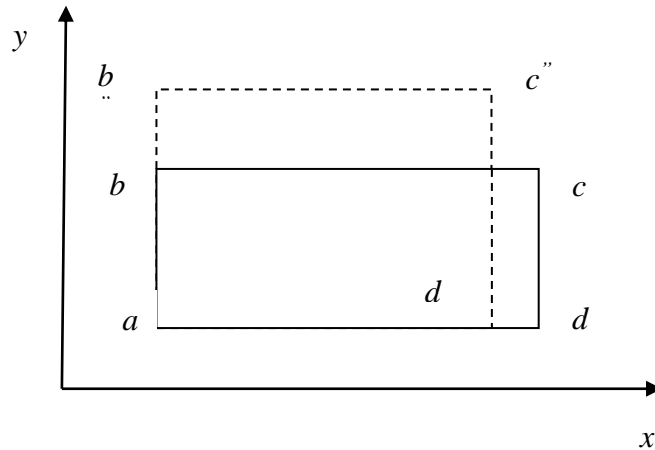


Рис. 3.18 Лінійна деформація граней паралелепіпеда, що репрезентує рідку часточку Лагранжа

Під дією зовнішніх сил часточка стискається і стає коротше за час  $dt$ . Зменшення часточки описується виразом:

$$dd'' = - \frac{dU}{dx} dx dt . \quad (3.31)$$

Відносне зменшення часточки впродовж вісі  $x$  дорівнює

$$\frac{dd''}{ad} = - \frac{dU}{dx} dt . \quad (3.32)$$

Швидкість утиснення краплі впродовж вісі  $x$  дорівнює:

$$\varepsilon_x = - \frac{dU}{dx} \quad \text{або} \quad -\varepsilon_x = \frac{dU}{dx} . \quad (3.33)$$

Швидкість відносного витягування часточки впродовж інших осей дорівнює:

$$\varepsilon_y = \frac{dU}{dy} \quad \text{і} \quad \varepsilon_z = \frac{dU}{dz} . \quad (3.34)$$

Знак “-“ відповідає зменшенню часточки-краплі у напрямку, що є протилежним до позитивного напрямку вісі  $x$ .

Зміна граней паралелепіпеда (Рис. 3.18) може привести до зміни об'єму краплі за рахунок лінійної деформації.

Повну швидкість трансформації рідкої краплі можна одержати, якщо підсумувати значення швидкостей зміни об'єму впродовж всіх осей [84]:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= -\frac{dU}{dx} dx dy dz + \frac{d\vartheta}{dy} dy dz dx + \frac{dW}{dz} dz dx dy = \\ &= (-\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) dx dy dz, \end{aligned} \quad (3.35)$$

$\frac{d\vartheta}{dy}$  – швидкість збільшення (витягування) краплі впродовж вісі  $y$ ;

$\frac{dW}{dz}$  – швидкість збільшення (витягування) краплі впродовж вісі  $z$ .

Поділимо вираз (3.35) на первісний об'єм краплі:

$V = dx dy dz$ , одержимо вираз для розрахунку швидкості відносної зміни об'єму краплі:

$$\frac{\frac{dV}{dt}}{V} = -\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z. \quad (3.36)$$

У випадку нетиснутої рідини ( $\frac{dV}{dt} = 0$  та  $V = const$ ),

Вираз для розрахунку швидкості відносної зміни об'єму краплі має вигляд:

$$-\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad \text{або} \quad \varepsilon_x = \varepsilon_y + \varepsilon_z. \quad (3.37)$$

Сили поверхневого натягу краплі протидіють процесу деформації краплі під дією швидкісного напору. Таким чином, результуюча деформація краплі

буде визначатися співвідношенням між тиском швидкісного напору  $P_v = \rho V^2/2$ , та молекулярними силами додаткового поверхневого натягування

$$P_p = 4\sigma/R,$$

де  $m$  – це маса краплі;

$V$  - швидкість потоку, що набігає;

$\sigma$  – поверхневе натягування плоскої поверхні води;

$R$  – радіус краплі-кулі.

Сили поверхневого натягування намагаються повернути форму краплі до кулеподібної. Таке співвідношення відображає результат взаємодії цих сил та називається числом Вебера [81]. Крапля зберігає форму подібну до еліпсу при значенні числа Вебера від 0 до 10. Це є, так званий, докритичний режим при якому крапля деформується, але зберігає свою цілісність. Цей режим можна також назвати режимом зворотної деформації. В такому режимі спостерігається вібрація краплі зі змінами значень півосей краплі-сфероїда в залежності від швидкісного напору. В режимі зворотної деформації коливання крапель різного розміру відбуваються відповідно до частоти, що визначається постійною краплі .

При значенні числа Вебера, що дорівнює 10, спостерігається розпад (роздвоєння) краплі. При значеннях більших за 10 має місце ділення краплі на більшу кількість маленьких частинок.

Скористаємося критерієм Вебера для визначення результуючої деформації краплі відповідно до [81]:

$$W_2 = (\rho V^2/2) / 4\sigma/R = 10, \quad (3.38)$$

де  $W_2$  – число Вебера, що відповідає моменту роздвоєння краплі;

$\rho V^2/2$  – тиск швидкісного напору;

$4\sigma/R$  - молекулярні сили додаткового поверхневого натягу.

З виразу (3.9.9) одержимо вираз для розрахунку швидкості вітру за якої відбувається роздвоєння краплі, яку будемо називати критичною швидкістю вітру [92]:

$$V_{cr} = \sqrt{(80 \sigma) / \rho D}. \quad (3.39)$$

Залежність критичної швидкості вітру від діаметру крапель, що розраховано за виразом (3.39) наведено на рис. 3.19. У виразі використані наступні значення параметрів: щільність повітря  $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$ , сила поверхневого тяжіння  $\sigma = 0,0725 \text{ Н/м}$ , діаметри краплі від 1 до 6 мм.

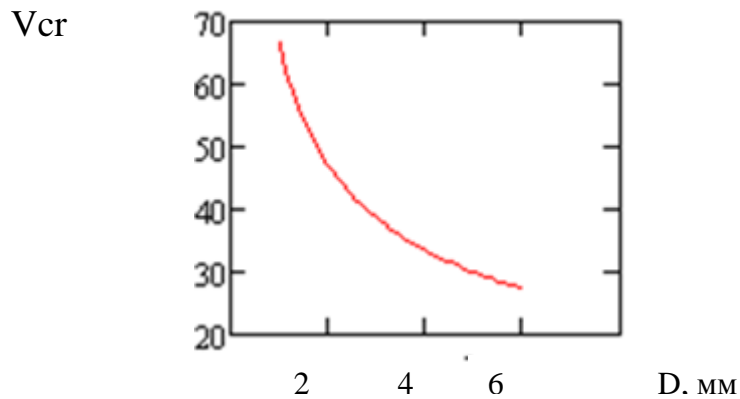


Рис. 3.19 Залежність критичної швидкості вітру від діаметру крапель

З рис. 3.19 видно, що чим меншою є крапля, тим сильніший вітер має діяти на неї для її роздвоєння. Більш того, видно, що можна встановити чітку залежність між значенням критичної швидкості вітру та краплею відповідного діаметру.

### **3.9.2 Зв'язок поляризаційних характеристик відбитого радіолокаційного сигналу з критичною швидкістю вітру**

Критичну швидкість вітру за допомогою поляризаційних характеристик радіолокаційного сигналу можна визначити за моментом роздвоєння крапель.

У випадку, коли на краплю діє потік повітря вона деформується. Як наслідок, змінюється поляризація відбитої електромагнітної хвилі і, відповідно до рівняння (3.37) відбувається перерозподіл потужності відбитого радіолокаційного сигналу між складовими поляризаційних спектрів антени, налаштованої приймати сигнал з основною поляризацією, та складових ортогональної антени. Тобто змінюється енергетичний рівень складових поляризаційних спектрів основної та ортогональної антен доплерівсько-поляриметричного радіолокатора.

В момент, коли швидкість потоку повітря, що діє на краплю, буде дорівнювати критичній швидкості, крапля розділиться на дві, що менші за розміром і в обох спектрах з'являться рівні складові відбитого радіолокаційного сигналу, відношення яких будуть дорівнювати одиниці. Володіючи інформацією про відповідність енергетичного рівня розміру краплі можна одержати інформацію про швидкість вітру, яка на цю краплю діє за допомогою залежності, що наведено на рис. 3.16.

В розділі 3.2 цієї роботи представлено підхід, який дозволяє одержати просторовий розподіл складових поляризаційного спектру, відбитого від метеорологічного об'єкту радіолокаційного сигналу. В розділі 4.3 цієї роботи наведено результати математичного моделювання поляризаційних спектрів відбитого радіолокаційного сигналу на вході приймальної антени для невеликої кількості розсіювачів і для різних значень амплітуди вібрації крапель.

### 3.9.3 Алгоритм розрахунку критичної швидкості вітру поляриметричним радіолокатором

Описаний підхід визначення швидкості вітру з критерієм Вебера для режиму критичної деформації краплі можна здійснити за допомогою алгоритму, що представлено на рис. 3.20.

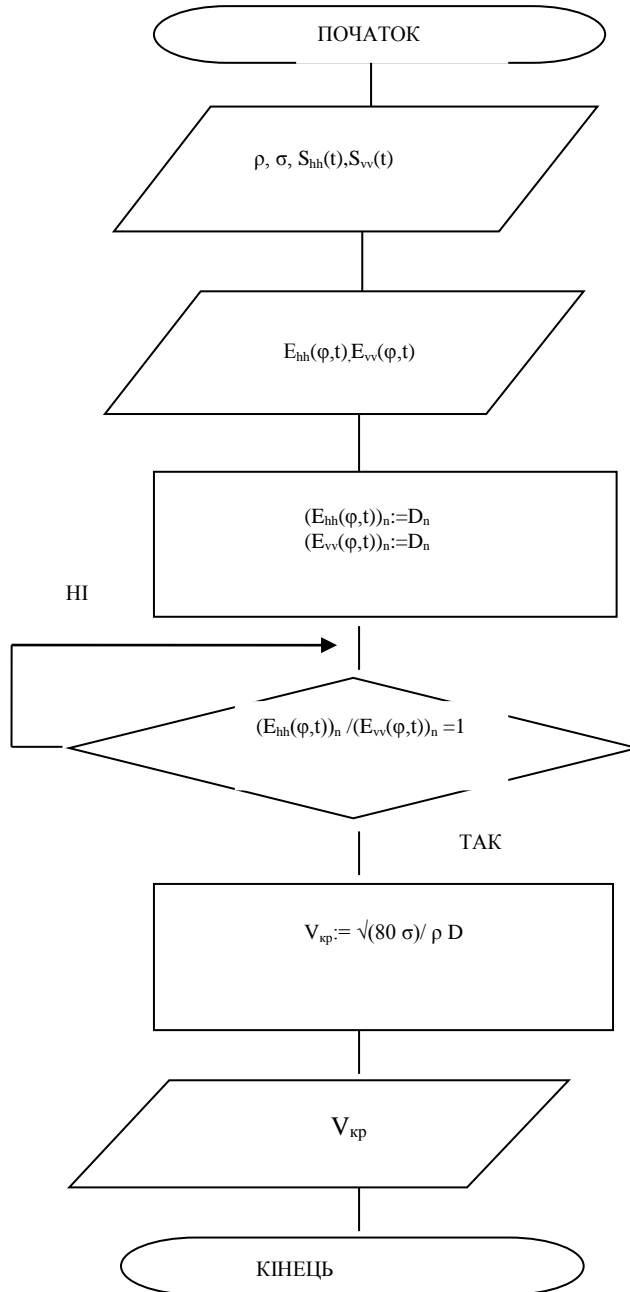


Рис. 3.20 Загальний алгоритм розрахунку критичної швидкості вітру поляриметричним радіолокатором



На рис. 3.20 використані наступні позначення:

$S_{hh}(t)$ ,  $S_{vv}(t)$  – це відбиті від метеорологічної цілі сигнали на входах ортогональних антен доплерівсько-поляриметричного радіолокатора;

$E_{hh}(\varphi, t)$ ,  $E_{vv}(\varphi, t)$  – поляризаційні спектри на входах ортогональних антен доплерівсько-поляриметричного радіолокатора;

$(E_{hh}(\varphi, t))_n$ ,  $(E_{vv}(\varphi, t))_n$  – складові поляризаційних спектрів, що відповідають краплям конкретного діаметру  $D_n$ .

### **3.9.4 Оцінка розподілу крапель за розмірами за допомогою поляризаційного спектра відбитого радіолокаційного сигналу**

Для оцінки швидкості вітру за критерієм Вебера та поляризаційним спектром відбитого радіолокаційного сигналу, необхідно встановити або мати залежність між характеристиками відбитого радіолокаційного сигналу та розмірами крапель в розсіючому об'ємі. Така задача є класичною для метеорологічної радіолокації. Приймаючи до уваги той факт, що запропонований підхід може бути реалізований на базі сучасних метеорологічних радіолокаторів, то для вирішення питання визначення розподілу крапель за розмірами можна скористатись класичними методами [93 - 96], або впровадити методи, що досліджуються [97 - 99]. Можна також застосувати концепцію поляризаційного спектру і для вирішення питання визначення розподілу крапель за розмірами.

Енергетичний рівень складових поляризаційного спектра має таку саму залежність від розміру крапель, як і енергетичний рівень сигналу відбитого від ансамблю гідрометеорів. Тобто, чим більший розмір крапель, тим більший рівень складових поляризаційного спектра. На відміну від звичайних методів оцінки енергії, інформація, що одержується за допомогою поляризаційного спектра не осереднюється. Це означає, що кожна з складових поляризаційного

спектра відповідає краплям одного розміру, які однаково реагують на зовнішні фактори відповідно до їх часових чи частотних характеристик.

Для того, щоб встановити чітку відповідність між рівнем складових поляризаційного спектра та розмірами крапель, необхідно обґрунтувати граничні значення розміру часточок, що роблять енергетичний внесок в поляризаційний спектр.

Найменший розмір рідкої часточки може бути визначений як розмір мінімальної краплі, що утворюється за рахунок тільки конденсаційного росту. Це можливо у випадку стійкої атмосфери і якщо максимальний розмір краплі, що була сформована за рахунок конденсаційного росту відповідно до [11], не перевищує одного мкм. Такі краплі зазвичай мають сферичну форму. Сферичні часточки рівномірно розсіюють енергію в усіх напрямках. Як наслідок, складові поляризаційних спектрів на всіх антенах поляриметричного радіолокатора матимуть однаковий рівень.

Розмір мінімальної краплі, що може бути сформована за рахунок конденсаційного росту, можна розрахувати за формулою, що наведена в [100]

$$r_{cr} = \frac{2\sigma m_{\mu}}{\rho RT} \cdot \frac{1}{\ln \frac{p}{p_{\infty}}}, \quad (3.40)$$

$r_{cr}$  - критичний радіус;

$\sigma$  - сила поверхневого натягу;

$m_{\mu}$  - молекулярна вага;

$\rho$  - щільність рідини;

$R = N_a k = 8.3 \cdot 10^7 \text{ erg / mole} \cdot \text{grad}$  - газова константа водяної пари;

$p$  - тиск водяної пари в стані термодинамічної рівноваги;

$p_{\infty}$  - тиск, що утворює водяна пара на пласку поверхню.

Формула (3.40) визначає радіус краплі, що знаходиться в стані термодинамічної рівноваги щодо пари, яка її оточує. Такий радіус називається критичним радіусом. В роботі [100] роз'яснюється, що краплі, які досягли критичного радіусу ( $r_{кр}=r_{cr}$ ) мають тенденцію до подальшого росту та формують, так зване, «ядро нової стадії». Краплі, з радіусом меншим за критичний ( $r_{кр}<r_{cr}$ ) не мають тенденції до подальшого росту і зникають одразу після свого формування. Подальше зростання краплі може проходити за рахунок різних факторів: таких, як конденсація, коагуляція, електризація тощо. Краплі, з розміром більше, ніж 0.5 мм при падінні сплющуються. [97, 98]. У випадку падіння рідких гідрометеорів в спокійній стійкій атмосфері, їх розмір пов'язаний з рівнем складових поляризаційних спектрів на різних антенах поляриметричного радіолокатора через залежність коефіцієнта еліптичності краплі від її еквівалентного діаметру [90, 92]. У випадку представлення краплі сплющеним сфероїдом [89], еліптичність краплі визначається як відношення її вертикальної вісі до горизонтальної. Тобто відношення рівня складової поляризаційного спектру відбитого сигналу, прийнятого антеною налаштованою приймати сигнали з основною поляризацією, до рівня складової поляризаційного спектру відбитого сигналу прийнятого антеною, налаштованою приймати сигнали з перехресною поляризацією, і є коефіцієнтом еліптичності краплі. В якості прикладу можна привести змодельовані складові поляризаційного спектру для однієї краплі на антенах, що налаштовані приймати сигнали з основною поляризацією, та поляризацією, що відрізняється від основної на 45 градусів (рис. 3.21). Змодельовані складові поляризаційних спектрів одержані за допомогою рівнянь, що наведені в [99, 101], та відповідають діаметру краплі 3 мм та амплітуді вібрації краплі 0.3.

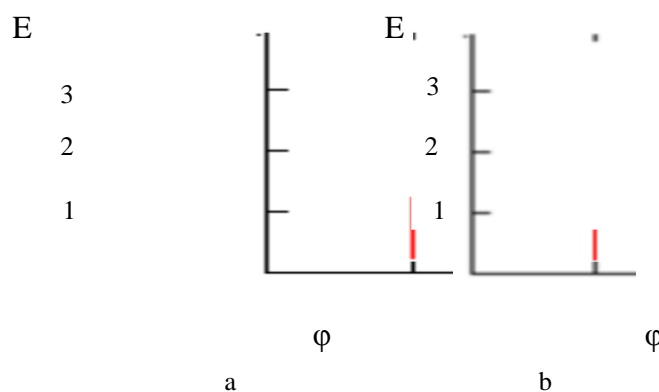


Рис. 3.21 Змодельовані складові поляризаційних спектрів для краплі з діаметром 3 мм;

Рис. 3.21 (а) відповідає складовій на антені, налаштованій приймати сигнали з основною поляризацією;

Рис. 3.21 (б) відповідає складовій на антені, налаштованій приймати сигнали з поляризацією, що відрізняється від основної на 45 градусів.

$E$  – енергія поля на приймальній антені в умовних одиницях;

$\varphi$  - кут поляризації в градусах.

Вітер та інші явища, що пов'язані з вітром, змінюють форму та орієнтацію рідких гідрометеорів. Таким чином, розмір краплі не може бути розрахований, як функція еліптичності. В такому випадку необхідно вносити корегуючі коефіцієнти та змінювати еліптичний кут еліпсу поляризації. Методики перетворення еліпсу поляризації представлено в [50].

У випадку оцінювання розміру крапель за допомогою наведеного підходу, що базується на критерії Вебера та роздвоєнні крапель, немає необхідності у використанні складних перетворень. Це можливо тому, що розмір краплі визначається за розмірами двох сферичних крапель, що сформувались одразу після моменту розриву початкової більшої краплі. В момент одразу після розриву краплі на кожній з антен поляриметричного радіолокатора з'являться дві однакові складові поляризаційного спектру (рис. 3.22). Ці дві складові з'являться замість однієї, що відповідає розсіюванню від деформованої або

сплющеної більшої краплі. Зазначимо також, що рівень поляризаційних складових для однієї краплі на різних антенах різнився відповідно до сплюсненості або деформації краплі та кута поляризації приймальної антени (рис. 3.22).

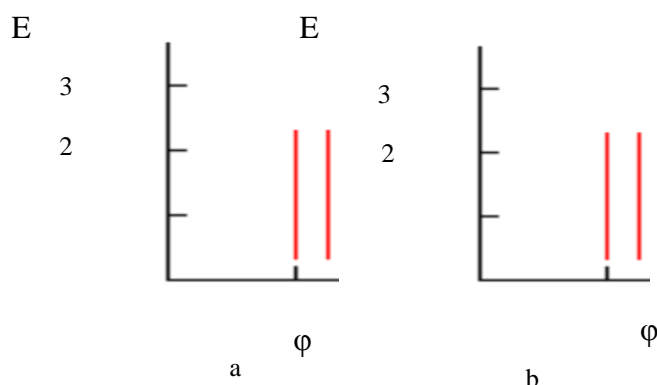


Рис. 3.22 Змодельовані складові поляризаційних спектрів одразу після моменту розриву для краплі з діаметром 3 мм

Розмір сферичної краплі можна визначити, як функцію рівня відбитої енергії. Розмір початкової краплі, що розірвалась, можна визначити як суму діаметрів новосформованих сферичних крапель.

### **3.10 Протиріччя в інтерпретації інформації: випадки, що призводять до роздвоєння крапель**

При визначенні швидкості вітру за критерієм Вебера та динамікою поляризаційного спектра електромагнітної хвилі, відбитої від ансамблю гідро метеорів, необхідно прийняти до уваги деякі протиріччя, що виникають при інтерпретації інформації. Як вже зазначалось в розділі 3.9 даної дисертаційної роботи, при роздвоєні краплі спостерігається поява однакового рівня складових на всіх приймальних антенах поляриметричного радіолокатора. Роздвоєння рідких гідрометеорів має місце у випадку, коли сили поверхневого натягу

знаходяться в рівновазі з аеродинамічними силами, що відповідає значенню числа Вебера 10. Атмосфера є доволі динамічним середовищем в якому можуть виникнути різні ситуації, які приведуть до виникнення рівноваги між силами поверхневого натягу та аеродинамічними силами. Таким чином, неможливо стверджувати однозначно, що поява однакового рівня складових на всіх приймальних антенах поляриметричного радіолокатора відповідає ситуації, коли роздвоєння рідких гідрометеорів є наслідком дії критичної сили вітру. В даному підрозділі дисертаційної роботи розглянуті можливі випадки, що призводять до роздвоєння крапель та представлено методи вирішення даного протиріччя.

### **3.10.1 Роздвоєння рідких гідрометеорів у випадку гравітаційного падіння**

Краплю, що падає в нерухомому повітрі, зручно представляти у вигляді сфероїда. Така крапля-сфероїд, що падає, знаходиться під дією сил гравітації та аеродинамічних сил опору повітря. Аеродинамічні сили опору повітря з'являються внаслідок дії сили гравітації та протидіють їй в протилежному напрямку. У випадку невеликих розмірів та невеликих чисел Рейнольдса крапля поводить себе подібно до твердої часточки та не деформується. У випадку, коли число Рейнольдса перевищує мінімальне критичне значення, масові сили починають переважати над силами поверхневого натягу і крапля починає сплющуватися. Сплющення краплі веде до збільшення її площини, що знаходиться під дією сил гравітації та аеродинамічних сил, які діють у протилежних напрямках. Процес сплющення супроводжується збільшенням аеродинамічної сили до моменту виникнення рівноваги між нею та силою гравітації. В такий момент рівноваги виникають умови невагомості і крапля знов приймає форму сфери. Нова сферична крапля виникає за інших умов рівноваги та відповідає меншому радіусу. На практиці це означає, що деформована крапля ділиться на дві краплі меншого розміру. Умови рівноваги

визначаються силами додаткового поверхневого натягу для крапель різного розміру (формула Лагранжа):

$$P_p = 2\sigma/R,$$

$\sigma$  – поверхнєве натягування плоскої поверхні води;

$R$  – радіус нової краплі-кулі.

Процес розпаду крапель на менші за розміром часточки може продовжуватись до моменту, коли крапля досягне мінімального розміру, що відповідає розміру зародкової краплі.

### **3.10.2 Роздвоєння рідких гідрометеорів у випадку дії висхідних або спадних потоків повітря**

У випадку дії на рідкі гідрометеори висхідного потоку його дія додається до дії аеродинамічної сили. Сумарна дія сил перевищує силу гравітації в цьому випадку. Коли сумарна дія аеродинамічної сили та сили висхідного повітря буде дорівнювати критичній силі вітру для крапель відповідного розміру, що визначається за формулою (3.39), крапля розпадеться на дві менші сферичні часточки.

У випадку спадного руху повітря розпад крапель відповідного розміру виникне, коли сумарна дія сили гравітації та сили спадного руху повітря перевищить аеродинамічну силу та буде дорівнювати критичній силі вітру для крапель відповідного розміру.

### **3.10.3 Роздвоєння рідких гідрометеорів у випадку дії вітру**

У випадку дії на краплю вітру необхідною умовою для її розриву є перевищення кінетичного тиску потоку, що набігає, над Лапласовим тиском у 10 разів (формула 3.38). Саме ця умова визначається критерієм Вебера. В

підрозділі 3.9 цієї роботи наведено вираз для розрахунку критичної сили вітру (формула 3.39). Розрахунки за формулою 3.39 представлено на рис. 3.22.

### **3.11 Вирішення протиріччя в інтерпретації інформації**

#### **3.11.1 Вирішення протиріччя для випадку гравітаційного падіння**

Розпад краплі на менші за розміром сферичні часточки, що виникає у випадку гравітаційного падіння, можна розрізнити від розпаду, що виникає за інших атмосферних процесів, якщо прийняти до уваги той факт, що умова рівноваги не залежить від маси крапель. Таким чином, за умови рівноваги між силою гравітації та аеродинамічною силою, ділення відбувається для крапель різного розміру одночасно на однаковій висоті. Відповідно до [102] відбувається ділення тих крапель, для яких число Рейнольдса перевищує 4,5. Отже, у випадку розпаду крапель при гравітаційному падінні на антенах, що приймають відбиті сигнали з різною поляризацією поляриметричного радіолокатора, буде спостерігатися одночасна поява складових однакового енергетичного рівня для крапель різного розміру.

Перед появою складових однакового енергетичного рівня буде спостерігатися характерний енергетичний перерозподіл складових поляризаційних спектрів. Цей перерозподіл буде відповідати зменшенню коефіцієнта форми краплі, як відношення вертикальної півосі краплі, що апроксимується сфероїдом до її горизонтальної півосі.

Коефіцієнт форми краплі можна визначити за відношенням складових поляризаційних спектрів, одержаних за допомогою антен, що налаштовані приймати сигнали з вертикальною поляризацією та сигнали з будь-якою іншою поляризацією, що відрізняється від вертикальної. В даному випадку поляризація зондувальної електромагнітної хвилі має бути вертикальною.



### **3.11.2 Вирішення протиріччя для випадку ділення крапель за умови впливу вертикальних рухів повітря та горизонтального вітру**

Для того, щоб уникнути протиріччя в інтерпретації інформації та відрізнити випадки розриву крапель при дії вертикальних рухів повітря від розриву крапель, що виникає, коли дує горизонтальний вітер критичної швидкості, необхідно застосувати доплерівсько-поляриметричну обробку сигналу до підходу, що представлено в розділі 3.9.

У випадку горизонтального сканування простору під час виконання польоту доплерівський радіолокатор вимірює горизонтальну складову вітру. В даному випадку, висхідні та спадні рухи повітря мають напрямок, що є нормальним до площини зондування. Доплерівська складова вектора вітру дорівнює нулю за наявності вертикальних рухів повітря. Вимірювання поляриметричним радіолокатором надасть значення швидкості вітру, що відповідає критичній швидкості вітру для крапель відповідного розміру.

Така сама ситуація виникає у випадку, коли напрямок горизонтального вітру спрямовано перпендикулярно до площини зондування антени доплерівського радіолокатора. Розрізнити ці дві ситуації можливо, якщо спостерігати перерозподіл складових поляризаційного спектра на антенах, що налаштовані приймати сигнали з різною поляризацією до моменту розриву крапель, в так званому докритичному режимі. В такому режимі крапля вібує, змінює свою форму, орієнтацію, але лишається нерозривною.

У випадку дії висхідних та спадних рухів повітря гідрометеори сплющуються під дією сил гравітації, аеродинамічних сил та сил вертикальних рухів повітря.

Коефіцієнт форми краплі в такому випадку поступово зменшується, що призведе до наступної зміни складових поляризаційних спектрів з часом:

- Енергетичний рівень, що приймає антена, яка налаштована приймати сигнал з вертикальною поляризацією, що співпадає з

поляризацією зондувальної електромагнітної хвилі, поступово зменшується (рис. 3.14 а).

- Енергетичний рівень, що приймає антена, яка налаштована приймати сигнал з поляризацією, що відрізняється від основної, збільшується до моменту розриву крапель (рис. 3.14 б,в).

Комбінація доплерівських та поляриметричних результатів вимірювання, коли доплерівська складова вектора вітру дорівнює нулю, а вимірювання поляриметричним радіолокатором дає значення швидкості вітру, що відповідає критичній швидкості вітру для крапель відповідного розміру та характерна зміна енергетичного рівня на антенах, що налаштовані приймати сигнали з різною поляризацією електромагнітної хвилі (рис. 3.14 а,б,в) є підставою стверджувати про дію на краплю саме вертикальних рухів повітря.

У випадку дії на гідрометеори горизонтального вітру коефіцієнт форми краплі буде поступово збільшуватись до моменту розриву. Такий характер зміни можна пояснити тим фактом, що вітер тисне на краплю в напрямку по нормалі до дії сили гравітації та аеродинамічної сили. Відповідно до [101] коефіцієнт форми краплі може змінюватися в межах до 1,5. Формули, за якими можна розрахувати коефіцієнт форми краплі за допомогою енергетичного рівня складових поляризаційного спектра, одержаного за допомогою антен, що налаштовані приймати сигнали з різною поляризацією електромагнітної хвилі наведено в четвертому розділі цієї дисертаційної роботи.

### Висновки до розділу 3

1. В задачах навігації та управління рухом для виявлення небезпечних для польотів ПС атмосферних явищ запропоновано розглядати рідкі гідрометеори як об'єкти з нестійкою формою, що постійно вібрують під дією зовнішніх факторів та процесів, а отже їх форма та параметри не є фіксованими характеристиками і їх можна розглядати як випадкові характеристики.
2. Аналіз фізики атмосферних процесів, їх впливу на відбивачі електромагнітної хвилі показав, що вплив вітру та інших динамічних атмосферних явищ на випадковий процес вібрації краплі може виявлятися не тільки як зміна частоти та амплітуди відбитої електромагнітної хвилі, а також і в зміні поляризації відбитої електромагнітної хвилі.
3. Вперше введено поняття поляризаційного спектра, який визначається як енергетичний розподіл за поляризаційними складовими. Проведено аналіз та фізичне обґрунтування процесу формування поляризаційного спектру
4. Розроблено метод оцінювання поляризаційного спектра відбитої від рідких гідрометеорів електромагнітної хвилі.
6. Запропоновано та наведено запатентовану автором радіолокаційну поляриметричну систему, яка реалізує спосіб оцінювання поляризаційного спектра відбитої від рідких гідрометеорів електромагнітної хвилі. Як показано в розділі 3.7. використання для метеорологічних цілей запропонованої системи дозволяє одержати значно вищий рівень сигналу зі зміненою поляризацією та забезпечує кращий рівень сигнал/шум, ніж це можливо за допомогою традиційних поляризаційних систем, що забезпечують приймання сигналів з основною та ортогональною поляризаціями. За допомогою таких систем можливо покращити аналіз мікроструктури хмар та опадів, а також визначати характеристики атмосферних явищ пов'язаних з вітром. Треба зазначити, що з урахуванням технічних можливостей сучасних приймальних (антенних) систем

блок приймальних антен можливо реалізувати за допомогою однієї багатоканальної антени, або антени з багатьма входами. Такий підхід дозволить розширити можливості метеорологічних радіолокаторів, а також значно збільшити інформативність вимірюваних параметрів і якість метеорологічної інформації. Зазначені додаткові вимоги до системи з декількома приймальними антенами щодо характеристик антени, таких як діаграма направленості за поляризацією та ширина діаграми направленості антени, яка характеризується відносною чутливістю антени щодо сприймання сигналів відповідної поляризації в заданому напрямку зондування.

7. Розроблено та представлено метод та алгоритм оцінювання поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів за допомогою системи з багатопроменевим прийманням. Метод демонструє можливість поляризаційних радіолокаційних методів щодо покращення вирішення таких питань, як оцінка інтенсивності опадів, вимірювання розподілу крапель за розміром, оцінка динамічних атмосферних явищ тощо.

8. Розроблено та представлено метод оцінювання енергії відбитого деполаризованого сигналу за допомогою однієї антени з фіксованою поляризацією. Показано можливість оцінки деполаризації відбитої електромагнітної хвилі за характером зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів, які знаходяться під впливом динамічних атмосферних процесів. Характер зміни обвідної залежить від частотних властивостей розсіювачів та інтенсивності впливу на них динамічних явищ.

9. За допомогою запропонованого підходу оцінюється зміна енергії в приймально-передавальній антені з визначеними поляризаційними властивостями. Зменшення енергії в розглянутому випадку є еквівалентом збільшення енергії перехресної складової в ортогональній приймальній антені поляриметричного радіолокатора. Для оцінювання зміни кута поляризації відбитої електромагнітної хвилі за допомогою запропонованого підходу не потребує використання двох ортогональних антен, оскільки в цьому разі більш

високий рівень сигнал/шум і оцінює сигнал в антені з основною поляризацією. Такий факт є важливим у випадку невеликих змін кутів поляризації, що характерно саме для випадку атмосферних явищ.

10. Вперше запропоновано, розроблено та представлено метод визначення швидкості вітру за моментом роздвоєння крапель, що базується на оцінці поляризаційного спектра відбитого від метеорологічної цілі радіолокаційного сигналу в комбінації з доплерівськими характеристиками. Дозволяє визначити та оцінити:

- Реальну швидкість вітру;
- Наявність висхідних та спадних рухів повітря;
- Повний вектор вітру у випадку, коли напрямок вітру є нормальним до площини зондувальної електромагнітної хвилі доплерівського радіолокатора;
- кут між радіальною складовою вітру та реальним напрямком вітру.

11. У випадку оцінювання розміру крапель за допомогою підходу, що базується на критерії Вебера та роздвоєнні крапель, немає необхідності у використанні складних перетворень. Це можливо тому, що розмір краплі визначається за розмірами двох сферичних крапель, що сформувались одразу після моменту розрива початкової більшої краплі. В момент одразу після розрива краплі на кожній з антен поляриметричного радіолокатора з'являться дві складні поляризаційного спектру однакового енергетичного рівня.

12. Запропоновані підходи можливо реалізувати на базі сучасних доплерівських когерентних систем, а також звичайних некогерентних метеорологічних радіолокаторів. Це дозволить значно розширити можливості доплерівських радіолокаторів стосовно можливості визначення характеристик вітрових атмосферних явищ.

**Список публікацій здобувача за матеріалами третього розділу**

1. Авер'янова Ю.А. Оцінювання ступеня деполяризації відбитих від гідрометеорів радіохвиль амплітудним методом / Ю.А. Авер'янова, А.О. Аверьянов, Ф.Й. Яновський // Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2012. - Т1. – с. 56-60.  
*Особистий внесок здобувача: одержання математичної моделі для оцінювання зміни поляризації відбитого від рідких гідрометеорів сигналу за допомогою однієї приймальної антени з фіксованою поляризацією. Розробка алгоритму.*
2. ПАТЕНТ на корисну модель u 2008 04248 Україна. МПК (2006) П01І 13\00. Поляриметричний радіолокатор / Авер'янова Юлія Анатоліївна, Аверьянов Анатолій Олексійович, Яновський Фелікс Йосипович.; Власник Національний Авіаційний Університет. - №34917; Заявл.04.04.2008 ; опубл. 26.08.2008, Бюл.№ 16.  
*Особистий внесок здобувача: розробка поляриметричного радіолокатора.*
3. Averyanova Yu. Polarization signal components estimate in weather radar / Yu. A. Averyanova, A. A. Averyanov, F.J. Yanovsky // 12th Intern. Conf. on Mathematical methods in electromagnetic theory, Odesa, 2008.: Proc. of Conference. – 07. 2008. - P. 360-362. (Scopus)  
*Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму оцінювання потужності турбулентних складових поляризаційного спектра в метеорологічних поляриметричних радіолокаторах, моделювання процесу зміни струму в приймальній антені, що скоординована приймати відбиті сигнали з різною поляризацією, аналіз результатів моделювання. Введення та обґрунтування концепції поляризаційного спектру, розробка підходу щодо одержання інформації про інтенсивність турбулентності в рідких опадах за допомогою параметрів поляризаційного спектру, розрахунок параметрів сканування простору для визначення статистичних характеристик відбитого поляризаційного сигналу.*

4. Averyanova Yu. The Estimate of Instantaneous Power of Polarization Spectrum Components in Polarmetric Weather Radar / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J Yanovsky // 2nd Intern. Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS-2008), 22-24 September, Kiev.: Conference proc. 09.2008. - P. 179-181. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: опис гідрометеорів, як об'єктів нестабільної форми, аналіз впливу об'єктів нестабільної форми на відбиття радіолокаційного сигналу, аналіз можливостей поляриметричних систем.*

5. Авер'янова Ю.А. Концепція застосування поляризаційно-чутливих антен для локації об'єктів нестабільної форми / Ю.А. Авер'янова, А.А. Аверьянов, Ф.И.Яновський // Вісник НАУ -К.: НАУ, 2011. - Том 1- С. 27-33.

*Особистий внесок здобувача: моделювання розподілу поляризаційних складових радіолокаційного сигналу при відбиванні від опадів.*

6. Авер'янова Ю.А. Оцінювання ступеня деполаризації відбитих від гідро метеорів радіохвиль амплітудним методом / Ю.А. Авер'янова, А.О. Аверьянов, Ф.И. Яновський // Вісник НАУ -К.: НАУ, 2010. - Том 1- С. 100-104.

*Особистий внесок здобувача: розрахунок швидкості деформації рідких гідрометеорів під дією атмосферних явищ, обґрунтування зв'язку швидкості деформації рідких гідрометеорів з відбитим радіолокаційним сигналом.*

7. Averyanova Yu. Correction of Radar Signal on Elevation Angle when Reflecting from Turbulent Zone [Електронний ресурс]: Proc. of Signal Processing Symposium SPS-2007. / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J.Yanovsky/ - 05. 2007, Warsaw, Poland - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: оцінювання сигналу корекції за кутом місця променя поляриметричного метеорадіолокатора, розрахунок залежності коефіцієнта корекції за кутом місця.*

8. Averyanova Yu. Correction of Radar Signal on Elevation Angle when Reflecting from Turbulent Zone/ Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J.Yanovsky. // Proceedings SPIE. – 2007. Issue 12. P.191-196. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: оцінювання сигналу корекції за кутом місця променя поляриметричного метеорадіолокатора, розрахунок залежності коефіцієнта корекції за кутом місця.*

9. Averyanova Yu. Reflected Signal Depolarization Estimate with Single Transceiving Airborne Antenna [Електронний ресурс]: Proc. of Signal Processing Symposium SPS-2009. /Yu. Averyanova, F. Yanovsky, / - 05. 2009, Warsaw, Poland - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus).

*Особистий внесок здобувача: аналіз нового підходу для оцінки інтенсивності турбулентності, який дозволяє оцінити деполаризацію відбитої електромагнітної хвилі за характером зміни НЧ обвідної радіосигналу, відбитого від гідрометеорів, що знаходяться під впливом динамічних атмосферних процесів, опис фізики процесу модуляції зондувальної електромагнітної хвилі частотним спектром турбулентності, моделювання процесу зміни обвідної відбитого від ансамблю гідрометеорів радіолокаційного сигналу за наявності турбулентності різної інтенсивності, аналіз результатів моделювання.*

10. Averyanova Yu.A. Polarization selective antennas for reflected wave depolarization determination / Yu.A. Averyanova, F.J.Yanovsky, A.A. Averyanov// Antenna Theory and Techniques (ICATT 2009), 06-09 October, 2009, Lviv, Ukraine, Conference proceedings. – X.2009. - PP. 256-258. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: аналіз можливостей сучасних поляризаційних систем, аналіз методів виявлення динамічних явищ за допомогою поляризаційно-чутливих антенних систем.*

11. Averyanova Yu.A. Influence of Turbulence onto Depolarization of Signal Reflected from Hydrometeors/ Yu.A. Averyanova, F.J. Yanovsky, A.A.



Averyanov // International Radar Symposium (IRS 2010), 14-18 June, 2010, Vilnius, Lithuania, Conference proceedings. – 07.2010. -P.501-504. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: розробка методики оцінки ступеня зміни поляризації відбитої від опадів електромагнітної хвилі, що викликана турбулентністю з використанням радіолокаційної системи з одною антеною фіксованої поляризації.*

12.Averyanova Yu. Connection of Reflected Radar Signal with Liquid-Hydrometeor Deformation Rate/ Yu. Averyanova, F. Yanovsky, A. Averyanov// The 3<sup>d</sup> Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS 2011), Kiev, Ukraine, August 25-27.: Conference proc. – 2011. - P. 217-219. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: комп'ютерне моделювання залежності коефіцієнта корекції від кута нахилу антени, аналіз результатів моделювання.*

13.Averyanova Yu. The approach to estimating critical wind speed in liquid precipitation using radar polarimetry / Yu. Averyanova A. Averyanov, F. Yanovsky // 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kiev 2012, August 28-30, Ukraine.: Conference Proc. - 09.2012. - pp.517-520. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: аналіз умов в атмосфері для розриву крапель, обґрунтування зв'язку поляризаційного спектру відбитого радіолокаційного сигналу з моментом розриву крапель.*

14. Averyanova Yu. Ambiguity of Droplet Fission and its Resolution Using Doppler-Polarimetric Signal Processing in Meteorological Radar [Електронний ресурс]: Proc. of Signal Processing Symposium SPS-2013. /Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky, / - 06. 20013, Warsaw, Poland - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: аналіз різних атмосферних ситуацій, що призводять до розриву рідких гідрометеорів. Опис та аналіз можливих протиріч в інтерпретації інформації при аналізі відбитого радіолокаційного сигналу.*

15. Averyanova Yu. Estimating Drop Size via the Polarization Spectrum Components for Wind Speed Calculation/ Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky // International Radar Symposium (IRS 2013), June 19-21, Dresden, Germany. : Conference proc. – 2013. - P. 805-809. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: розробка підходу щодо оцінювання швидкості вітру за критерієм Вебера, розрахунок критичної швидкості вітру, як функції діаметру крапель.*

16. Averyanova Yu. An approach to improve interpretation of polarimetric radar measurements for meteorological applications / Yu. Averyanova A. Averyanov, F. Yanovsky // International Radar Symposium (IRS 2012), June 16-18, Gdansk, Poland: Conference proc. – 2014. - P. 230-233. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування можливості оцінювання та оцінювання розподілу крапель за розмірами за допомогою поляризаційного спектру відбитого радіолокаційного сигналу.*

17. Averyanova Yu. Polarimetric Approach to Improve Estimation of Drop Size Distribution and Wind Related Phenomena / Yu. Averyanova, F. Yanovsky // 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, August 26-28, Dnepropetrovsk, Ukraine. : Conference proc.- 2014. – P.243-246. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування переваг використання поляризаційного спектру для вирішення низки метеорологічних задач.*

18. Averyanova Yu. Some features of a Radar Measuring Polarization Spectrum/ Yu. Averyanova, F. Yanovsky// The 4<sup>th</sup> Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing, September 23-25, Kiev, Ukraine.: Conference proc. - 2014. - P.31-34. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: аналіз сил та атмосферних процесів, що призводять до деформації та вібрації рідких гідрометеорів; виведення виразу, який дозволяє визначити розподіл енергії відбитого від гідрометеорів радіолокаційного сигналу між ортогональними антенами доплерівсько-*

*поляриметричного радіолокатора; обґрунтування граничних значень змін півосей краплі-сфероїда за рахунок впливу атмосферних динамічних процесів.*

19. Averyanova Yu. Dynamics of Drop Polarization Basis under Atmospheric Factors Influence [Електронний ресурс]: Proceedings of Signal Processing Symposium SPS-2015 / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F. Yanovsky / 10-12. 2015, Warsaw, Poland - 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Назва з контейнера. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування зв'язку поляризаційного базису відбивача електромагнітної хвилі з характеристиками відбитої електромагнітної хвилі за допомогою поляриметричної радіолокаційної системи.*

20. Averyanova Yu. An approach to hydrometeors discrimination with similar polarization properties within the resolution volume/ Yu. Averyanova. F. Yanovsky// International Radar Symposium (IRS 2016), May 10-12, Krakow, Poland.: Conference proc. – 2016. - P.1-4. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: фізичне обґрунтування та розробка методу визначення швидкості вітру за моментом розділення крапель з однаковими поляризаційними властивостями в об'ємі, що відбиває.*

21. Averyanova Yu. Polarimetric Method to Discriminate the Drops on Sizes within the Resolution Volume /Yu. Averyanova, F. Yanovsky// International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Lviv, Ukraine.: Conference proc. – 2016. - P. 176-179 . (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: математичне обґрунтування та розробка принципу визначення кількості гідрометеорів з однаковим розміром та формою в об'ємі, о відбиває.*

22. Averyanova Yu. Principle of drops discrimination on sizes and shapes within the resolution volume with radar polarimetry/ Yu. Averyanova, O. Averianova// The 3rd Radar Methods and Remote Sensing Symposium (RMSW 2016), 27-28 September, Kyiv, Ukraine.: Conference proc. - 2016. - P.44-47. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: розробка поляриметричного методу визначення відносної кількості крапель певного розміру.*

23. Аверьянова Ю.А. Можливості використання поляриметричних радіолокаційних параметрів для визначення характеристик вітру / Ю.А. Аверьянова А.О. Аверьянов, Ф.И. Яновский // Вісник НАУ. - К.: НАУ, 2005. - Том 4- с. 34-39.

*Особистий внесок здобувача: перевірка фізичної моделі зв'язку поляриметричних параметрів радіолокаційного сигналу з характеристиками вітру за допомогою комп'ютерного моделювання. Аналіз результатів моделювання.*

24. Аверьянова Ю.А. Оцінка інтенсивності атмосферної турбулентності за допомогою поляриметричного радіолокатора / Аверьянова Ю.А., Аверьянов А.О., Яновський Ф.Й. // Вісник НАУ. - 2006. - № 2.- с. 38-40.

*Особистий внесок здобувача: аналіз поляриметричних параметрів щодо можливості вміщувати інформацію про вітрові явища, розробка методу розрахунку тангенціальної складової швидкості вітру за допомогою поляриметрії.*

25. Averyanova Yu. The possibility to use polarimetric radar for atmospheric turbulence intensity estimate / Averyanova Yu. // Proc. of the National Aviation University. - 2006. № 3 (29). - P. 46-48.

26. Аверьянова Ю. Корекція радіолокаційного променя за кутом місця поляриметричного метеорологічного радіолокатора/ Ю.А. Аверьянова А.О. Аверьянов // Вісник НАУ. - 2008. -Том 4- с. 33-36.

*Особистий внесок здобувача: порівняння розрахунків за аналітичним виразом залежності коефіцієнта корекції радіолокаційного сигналу за кутом місця з відомими експериментальними даними. Розробка структурної схеми автоматичної корекції та видалення гравітаційної складової під час оцінювання інтенсивності турбулентності.*

27. Аверьянова Ю.А. Алгоритм оцінювання турбулентності поляриметричними метеорологічними радіолокаторами/ Ю.А. Аверьянова, А.О. Аверьянов, Ф.И. Яновский // Вісник НАУ -К.:НАУ, 2009.- Том 2- С. 69-73.

*Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму оцінювання турбулентності поляриметричним метеорологічним радіолокатором.*

28. Авер'янова Ю.А. Алгоритм оцінювання швидкості вітру поляриметричним радіолокатором / Ю.А.Авер'янова // Вісник - К.: НАУ, 2013. - Том 2- С. 44-49.

29. Averyanova Yu. Analysis of the possibility to determine wind parameters ahead the aircraft by using polarimetric airborne radar/ Yu. Averyanova, A.Averyanov, F.Yanovsky, //International Workshop on Microwaves, Radar and Remote Sensing, Kiev, 2005.: Proc. of Conference. – 09.2005. - pp.81-86.

*Особистий внесок здобувача: аналіз можливостей радіолокаційної поляриметрії щодо виявлення небезпечних для авіації атмосферних явищ. проведено дослідження впливу вітру на параметри руху та форму гідрометеорів, розроблена фізична модель зв'язку поляриметричних параметрів радіолокаційного сигналу з характеристиками вітру (з урахуванням аеродинамічних сил, теореми Геймгольца та рівнянь Стокса).*

30. Аверьянова Ю.А. Можливості використання радіолокаційної поляриметрії для виявлення небезпечних для авіації атмосферних явищ/ Ю.А. Аверьянова, А.О. Аверьянов //IX Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2009», 21-23 вересня, Київ, Україна, Матеріали конференції.- 09.2009.

31. Averyanova Yu.A. Polarization Selective Antennas For Radar Application/ Yu.A. Averyanova, F.J. Yanovsky // The Forth World Congress “Safety in Aviation – Space Technologies” (Radar Methods and Systems Symposium (RMSW 2010)), Kiev, Ukraine, September 11-23, 2010.: Conference proc. - Vol. 2. – 2010. - P. 22.89-22.92.

*Особистий внесок здобувача: аналіз можливостей сучасних поляризаційно чутливих антен.*

## РОЗДІЛ 4

### МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ

#### **4.1 Моделювання розподілу енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу**

Даний розділ дисертаційної роботи присвячений перевірці нових поляриметричних методів оперативного одержання інформації про небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту, що було запропоновано в третьому розділі даної роботи шляхом математичного та комп'ютерного моделювання. Проведено моделювання за методом, що запропоновано в розділі 3.5 за яким оцінюється енергія відбитого деполаризованого сигналу за допомогою радіолокаційною системи з  $n$  антенами, що налаштовані приймати сигнал з поляризацією, що відрізняється від поляризації зондувального сигналу.

Вплив рідких гідрометеорів на відбивальні властивості електромагнітної хвилі та формули, за якими проводились розрахунки, наведено розділі 4.1 даної роботи. Також проведено моделювання за поляриметричним методом виявлення та оцінки небезпечної турбулентності за маршрутом польоту ПС, що запропоновано та описано в розділі 3. 6.

#### **4.1.1 Вплив об'єктів нестабільної форми на відбитий радіолокаційний сигнал**

У випадку відбиття зондувального сигналу від ансамблю гідрометеорів, необхідно прийняти до уваги відбивальні властивості крапель хмар, які здебільшого знаходяться у зваженому стані, та крапель в опадах, що падають. Як вже зазначалось, крапля, що падає, має сплюснену форму, що пояснюється дією аеродинамічних сил. Чим крапля більша за розміром, тим більш сплюсненою вона є.

Більш того, крапля, що знаходиться в потоці повітря, постійно вібрує під дією різних сил та процесів, а отже її форма не є стабільною [96] як і

параметри її розміру. Амплітуда вібрації залежить як від зовнішніх факторів, так і від розміру самої краплі. Відповідно до статистичних даних [95], чим більша крапля, тим більшою є амплітуда вібрації, і, як наслідок, тим більшою є дисперсія коливань розмірів сплющеного сфероїду. Таким чином, краплю, що знаходиться в повітрі, можна розглядати, як об'єкт нестабільної форми, або сфероїд з осями, розмір яких є випадковими величинами. Одною з причин нестабільності можна назвати динамічні явища, такі як атмосферна турбулентність. Таким чином, параметри турбулентності впливають на процес зміни осей краплі-сфероїду, що, в свою чергу, може виявитися у частотних, поляризаційних та амплітудних змінах відбитого радіолокаційного сигналу.

Для оцінки розподілу відбитої енергії за складовими поляризаційного спектру, необхідно враховувати різницю в рівні спектральних складових та динаміку спектра, тобто зміну рівня спектральних складових з часом.

В роботі [99] одержано вираз для розрахунку зворотного розсіяння краплею, що вібрує. Найбільший вплив несферичності та вібрації крапель виявляється в поляризаційних характеристиках електромагнітної хвилі. Вирази для розрахунку со-поляризаційних та крос-поляризаційних компонентів поля на вході приймальних антен наступні:

$$E_{parallel} = E^S [1 + A(\delta)q\Delta\gamma_0 + A(\delta)q\Delta\gamma_d \cos(\Omega t + \varphi)] \quad (4.1)$$

$$E_{orthogonal} = E^S [B(\delta)q\Delta\gamma_0 + B(\delta)q\Delta\gamma_d \cos(\Omega t + \varphi)] \quad (4.2)$$

$$E^S = \frac{1}{2} D^3 \left[ \frac{(\varepsilon-1)}{(\varepsilon+2)} \right] E_0 \cos[\omega_0 t + 2kr(t)] - \text{поле, що розсіюється краплею}$$

еквівалентного об'єму,

$D$ ,  $\omega_0$  - кругова частота зондувальної хвилі,

$D$  – діаметр сферичної краплі еквівалентного об'єму,

$\varepsilon$  - відносна проникливість води,

$E_0$  - амплітуда лінійно поляризованої зондувальної хвилі,

$k = 2\pi\lambda$  - хвильове число,

$r(t)$  - проекція радіус-вектора розсіювача на напрям зондування,

$\Omega = 2\pi F$ ;  $F$  - частота вібрації краплі,

$\Delta\gamma_d$  - амплітуда вібрації краплі,

$\varphi$  - початкова фаза вібрації краплі,

$B(\delta) = \frac{3}{2} \sin 2\delta$  ,  $\delta$  - кут між площиною поляризації  $E_0$  та вертикаллю,

$q = 0,4 \frac{(\varepsilon-1)}{(\varepsilon+2)}$ ,  $\gamma_0$  - середня форма краплі.

Середня форма краплі визначається як відношення вертикальної півосі краплі, що апроксимується сфероїдом до її горизонтальної півосі. Значення середньої форми для реальних крапель відповідно до [99] знаходиться у межах [0,4...1,5]. Амплітуда вібрації краплі  $\Delta\gamma_d$  є тим більшою, чим більше розмір краплі і дорівнює 0,2...0,3.

На рис. 4.1. (а, б, с) показано залежності енергії прийнятої антеною, що налаштована приймати сигнали з поляризацією, що співпадає з поляризацією зондувальної хвилі від розмірів краплі. Залежності розраховані за формулою 4.1 та для різних значень амплітуд вібрації крапель.

З аналізу залежностей рис.4.1 (а, б, с) можна сказати, що сигнал, прийнятий антеною, що налаштована приймати сигнали поляризація яких співпадає з поляризацією зондувальної електромагнітної хвилі зменшується із збільшенням амплітуди вібрації крапель. Рівень сигналу є більшим для крапель більшого розміру. Така поведінка залежностей цілком співпадає з фізикою атмосферних процесів і взаємодією відбивачів радіолокаційних сигналів з електромагнітною хвилею. Тобто чим більшими є краплі, тим більший рівень відбитого сигналу. Вібрація крапель призводить до зміни форми та орієнтації рідких гідрометеорів, що, в свою чергу, призводить до зміни поляризації



відбитої електромагнітної хвилі. Отже зменшення прийнятої антеною енергії можна пояснити збільшенням відхилення вектору поляризації, що співпадає з поляризацією антени від основної поляризації.

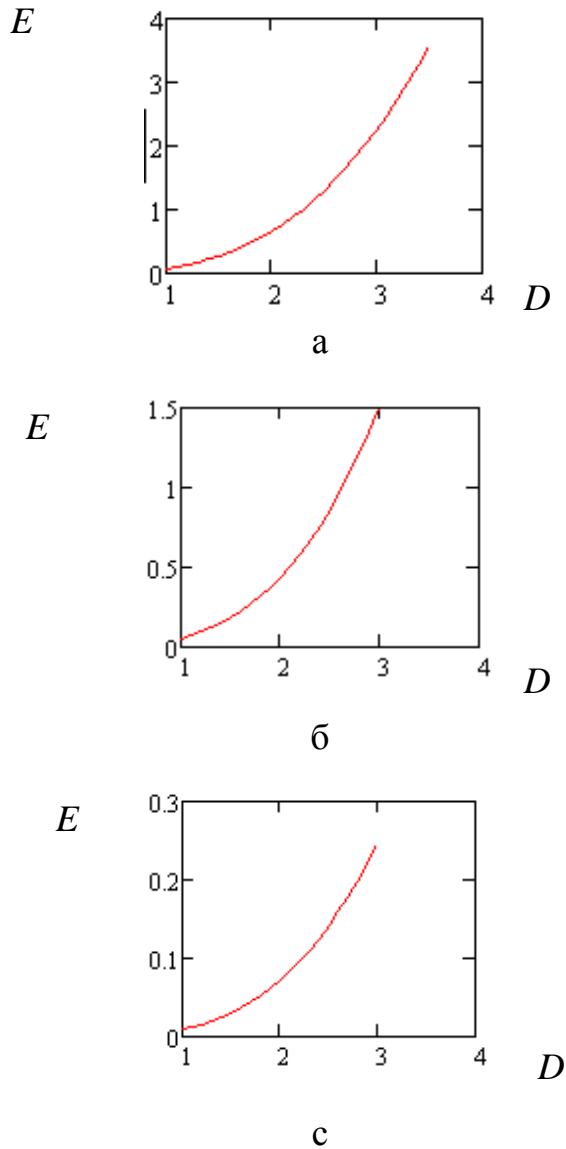


Рис. 4.1 Залежність енергії прийнятої антеною, що налаштована приймати сигнали з поляризацією, що співпадає з поляризацією зондувальної хвилі від розмірів краплі. а - Невелика амплітуда вібрації краплі, б - середня амплітуда вібрації краплі, с - значна амплітуда вібрації краплі.

#### 4.1.2 Моделювання енергетичного розподілу складових поляризаційного спектра сигналу, відбитого від гідрометеорів

В реальному випадку зондування хмар та опадів сигнал відбивається від ансамблю гідрометеорів. В цьому ансамблі наявні краплі різних форм та орієнтацій, а отже на вході приймальної антени можна одержати спектр, який відображає внесок кожного з відбивачів радіолокаційної хвилі. Skorистаємось виразами 4.1 та 4.2 для розрахунку розподілу енергетичного рівня за поляризаційними складовими відбитої від гідрометеорів електромагнітної хвилі. Розрахунки проведемо для випадку розсіювання від невеликої кількості крапель з еквівалентними діаметрами, що дорівнюють 1, 1.5, 2, 2.5, 3 та 3.5 мм.

На рис. 4.2 показано змодельовані спектри відбитого радіолокаційного сигналу на вході приймальної антени для невеликої кількості розсіювачів і для значення амплітуди вібрації крапель  $\Delta\gamma_d = 0.2$ . По вертикалі відкладено енергетичний рівень складових поляризаційного спектра відбитого від гідрометеорів сигналу на вході приймальної антени. По горизонталі відкладено розмір крапель (рис. 4.2.а) або кількість розсіювачів (рис. 4.2 б). На рис. 4.2 а показано змодельовані складові поляризаційного спектру відповідно до конкретного розміру розсіювачів. На Рис. 4.2б показано випадковий розподіл складових поляризаційного спектру сигналу відбитого від невеликої кількості розсіювачів. Розмір крапель розсіювачів на Рис. 4.2б співпадає з розміром крапель на Рис. 4. 2а.

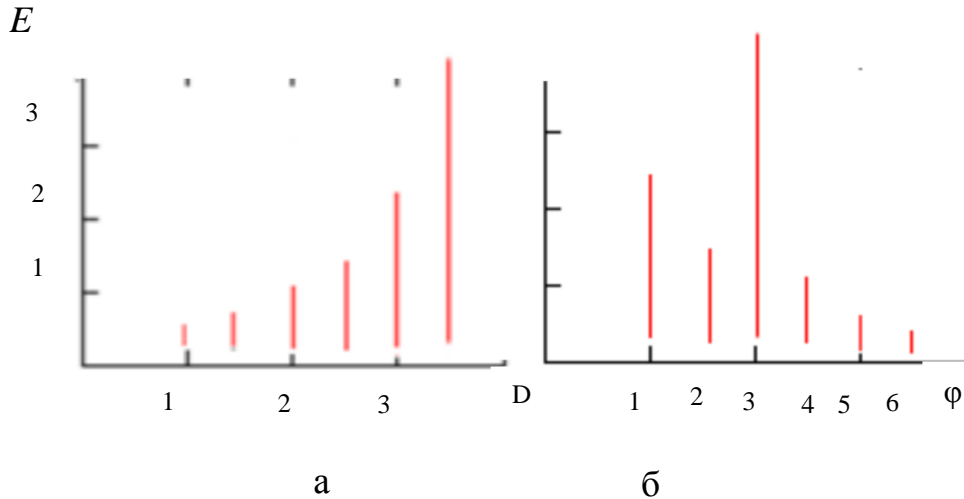


Рис. 4.2 Змодельовані спектри для невеликої кількості розсіювачів і для значення амплітуди вібрації крапель  $\Delta\gamma_d = 0.2$  (розміри крапель: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5).

З аналізу рис. 4.2 можна сказати, що чим більшою є крапля, тим більшим є енергія на приймальній антені. Щоб дізнатися про вплив вібрації краплі на зміну енергетичного рівня складових поляризаційного спектру змодельуємо аналогічну ситуацію для більшого значення вібрації рідких гідрометеорів.

На рис. 4.3 показано змодельовані аналогічні спектри відбитого радіолокаційного сигналу на вході приймальної антени з основною поляризацією для невеликої кількості розсіювачів, але для більшого значення амплітуди вібрації крапель  $\Delta\gamma_d = 0.3$

З аналізу рис. 4.2 і рис. 4.3 можна побачити, що при збільшенні амплітуди вібрації крапель енергетичний рівень складових спектру на вході приймальної антени з основною поляризацією зменшується, як і рівень самого сигналу. Найбільше змінюється рівень складових спектра, що відповідають великим розмірам крапель, які в більшій мірі можуть вібрувати та змінювати свою форму і орієнтацію під дією зовнішніх факторів і, таким чином, зміна поляризації, відбитої від великих крапель, є більш істотною. Відповідно до цього очікується збільшення енергетичного рівня складових поляризаційного спектру в антенах, що налаштовані приймати сигнал з поляризацією, що відрізняється від поляризації зондувальної хвилі.

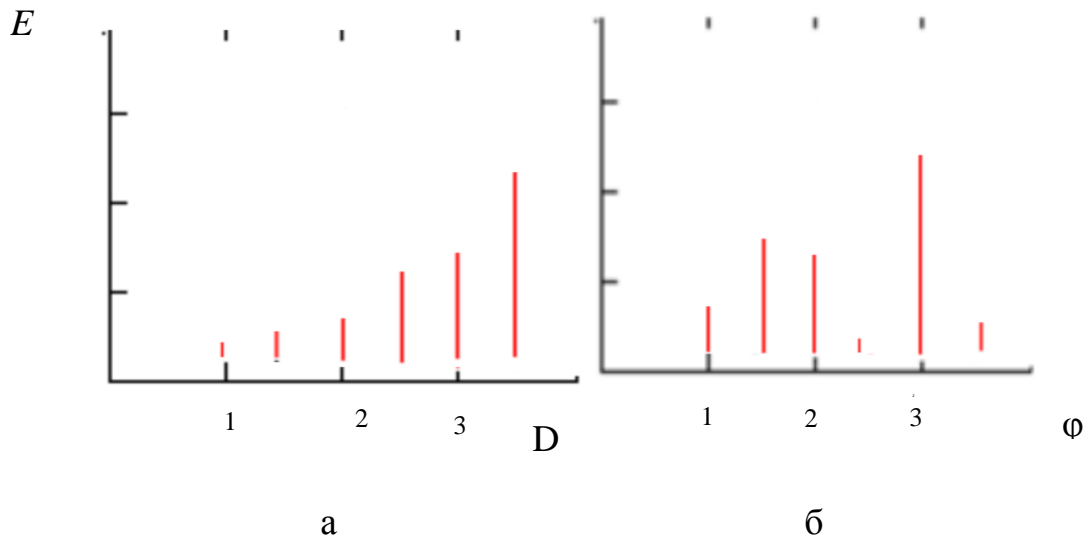


Рис. 4.3 Змодельовані спектри для невеликої кількості розсіювачів і для значення амплітуди вібрації крапель  $\Delta\gamma_d = 0.3$  (розміри крапель: 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5)

Різниця впливу розмірів краплі на відбиту електромагнітну хвилю відчувається не тільки в можливій більшій вібрації великих крапель, а також в швидкості реакції краплі на вплив на неї зовнішніх факторів, що обумовлено більшою інерційністю великих крапель порівняно з малими. В роботі [103] проведено моделювання поведінки гідрометеорів різного розміру під впливом градієнту вітру як перехідного процесу, результати моделювання наведені в розділі 3.1. Таким чином, реальний спектр на вході приймальної антени не буде складатися з фіксованих енергетичних компонентів. В ньому будуть наявні «спалахи» з різним часом існування відповідно до розміру крапель, що їх обумовлюють. Отже, оцінювання вітрових явищ, зокрема турбулентності, потребує не тільки оцінки просторового розподілу енергетичних складових поляризаційного спектру відбитого радіолокаційного сигналу, але і їх часової поведінки.

Для моделювання за запропонованим в розділі 3.5. методом модифікуємо вирази 4.1 та 4.2 для випадку, коли сигнал випромінюється однією передавальною антеною з фіксованим кутом поляризації  $\delta_i$  та прийманням

відбитого сигналу декількома приймальними антенами, що налаштовані сприймати сигнали з різними кутами поляризації  $\{\delta_{r_k}\}$ . Для спрощення розрахунків кут азимуту та місця прийому такими, що дорівнюють нулю. Якщо проводити опис в Декартовій системі координат, як це показано в розділі 3.1., то в нашому випадку напрямок осі  $y$  співпадає з напрямком зондування, напрямок осі  $z$  спрямовано до зеніту, а напрямок осі  $x$  є перпендикулярним до обох осей  $y$  та  $z$ . Вирази для  $x$  та  $z$  складових розсіяного краплями поля можна записати наступним чином:

$$E_x = E_x^{sph} \left[ 1 + 0.4 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \rho(t) \right] \quad (4.3)$$

$$E_z = E_z^{sph} \left[ 1 - 0.8 \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \rho(t) \right] \quad (4.4)$$

тут

$$E_x^{sph} = E^{sph} \sin \delta_i, \quad (4.5)$$

$$E_z^{sph} = E^{sph} \cos \delta_i, \quad (4.6)$$

$$E^{sph} = E_0 \frac{D^3}{8} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cos[\omega_0 t + 2k_0 r(t)], \quad (4.7)$$

$$\rho(t) = \rho_0 + \Delta\rho \cos[\Omega t + \varphi], \quad (4.8)$$

$D$  - еквівалентний діаметр краплі;

$\varepsilon$  - відносна діелектрична проникливість води;

$\omega_0$  - кругова частота зондувальної хвилі ;

$k_0$  - хвильове число;

$r(t)$  - проекція радіус-вектора краплі на напрямок зондування;

$\rho$  - коефіцієнт еліптичності краплі;

$\rho_0$  - середній коефіцієнт форми краплі;

$\Delta\rho$  - величина дисперсії коефіцієнта форми краплі;

$\Omega$  та  $\varphi$  - кругова частота та початкова фаза вібрації краплі відповідно.

Поле, що приймається  $k$ -ою антеною можна записати за допомогою виразу:

$$E_k = E_x \sin \delta_{r_k} + E_z \cos \delta_{r_k} \quad (4.9)$$

З урахуванням виразів 4.1.3 та 4.1.4 одержимо наступний вираз для розрахунку поля, що приймається  $k$ -ою антеною:

$$\begin{aligned} E_k &= E^{sph} \left[ \cos(\delta_{r_k} - \delta_i) - \frac{\rho(t)}{2} \{ \cos(\delta_{r_k} - \delta_i) + 3 \cos(\delta_{r_k} + \delta_i) \} \right] = \\ &= E^{sph} [A_0(\delta_i, \delta_{r_k}) - \rho(t) A_1(\delta_i, \delta_{r_k})] \end{aligned} \quad (4.10)$$

Вираз 4.10. демонструє внесок несферичності краплі в поле, о розсіюється краплею та приймається  $k$ -ою антеною.  $A_0(\delta_i, \delta_{r_k})$  та  $A_1(\delta_i, \delta_{r_k})$  в даному випадку є поляризаційними коефіцієнтами, що залежать від кута поляризації  $k$ -ої антени. Деформація та вібрація краплі призводять до появи деякої деполаризаційної компоненти, амплітуд якої є пропорційною до  $A_1(\delta_i, \delta_{r_k})$ .

На рис. 4.1.4. (а, б) показано змодельовані залежності поляризаційних коефіцієнтів  $A_0(\delta_i, \delta_{r_k})$  та  $A_1(\delta_i, \delta_{r_k})$  від кутів поляризації зондувальної та приймальних антен.

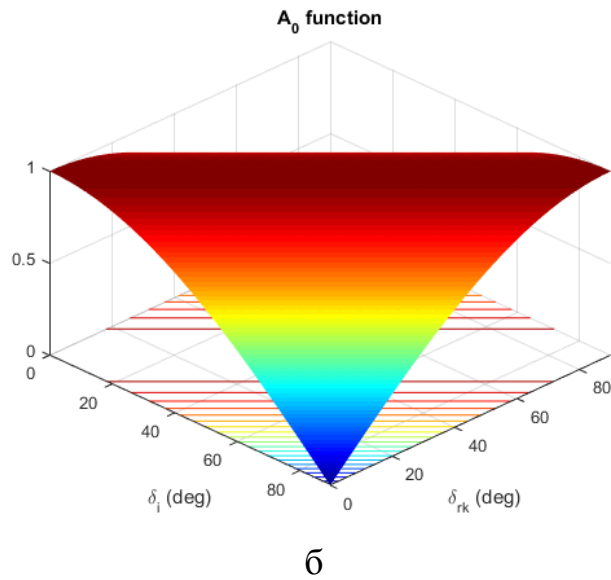
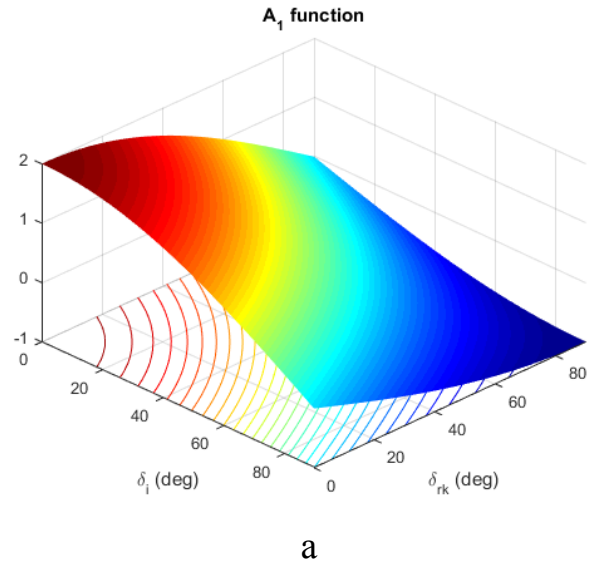


Рис. 4.4 Залежність поляризаційних коефіцієнта  $A_1(\delta_i, \delta_{rk})$  від кутів поляризації зондувальної та приймальних антен: а – коефіцієнт  $A_1(\delta_i, \delta_{rk})$ , б – коефіцієнт  $A_0(\delta_i, \delta_{rk})$

З аналізу виразу 4.9 та рис.4.4 (а, б) можна сказати, що існує така комбінація передавальної та приймальної антен при якій є можливість повністю виключити вплив несферичності та вібрації краплі в складову прийнятого сигналу, а отже одержати такий самий сигнал, як від краплі еквівалентного діаметру (сферичної краплі такого самого об'єму, як і несферична крапля). Цей

факт є дуже важливим для випадку удосконалення методів одержання інформації про розподіл крапель за розмірами, а також реалізації нового методу одержання інформації про швидкість вітру за критерієм Вебера, що представлений в розділі 3.9. Як видно з результатів розрахунків за формулою 4.9 такий кут дорівнює приблизно  $54,7^\circ$ . Також важливо відмітити, що результати відповідають результатам для випадку з [101].

Для демонстрації факту можливості виділення компоненти зворотного розсіювання, що викликана тільки вібрацією краплі, а також для демонстрації перерозподілу енергії поляризаційного складових відбитого від гідрометеорів радіолокаційного сигналу у випадку дії вітру та/або турбулентності на відбивачі електромагнітної хвилі проведемо комп'ютерне моделювання процесу.

На рис. 4.5а показано блок-схему комп'ютерної моделі відбиття від гідрометеорів, що вібрають, тобто знаходяться під дією турбулентності та, за певних умов, вітру. Комп'ютерна модель рис. 4.5а розроблена за допомогою програмного середовища Simulink та вміщує модель флуктуацій форми крапель, передавальну антену, 4 приймальні антени (антена з основною поляризацією  $54,7$  градусів, антена з поляризацією, що є ортогональною до основної, та 2 антени з проміжними поляризаціями).

Розрахунок енергії, що приймається антеною з поляризацією ортогональною до основної, тобто  $54,7$  градусів плюс  $90$  градусів проводили за формулою:

$$E_k \Big|_{\delta_k = \frac{\pi}{2} + \delta_i} = E^{sph} [\rho(t) \{3 \sin(\delta_i) \cos(\delta_i)\}] = E^{sph} \rho(t) A_{vib}(\delta_i). \quad (4.11)$$

Вираз 4.11 описує внесок вібраційної складової у повний відбитий сигнал, з коефіцієнтом  $A_0(\delta_i, \delta_k)$ , який у даному випадку дорівнює нулю.

На рис. 4.5б показана комп'ютерна модель флуктуацій форми крапель. Модель враховує розмір крапель, частоту вібрації, еліптичність крапель, швидкість вібрації.



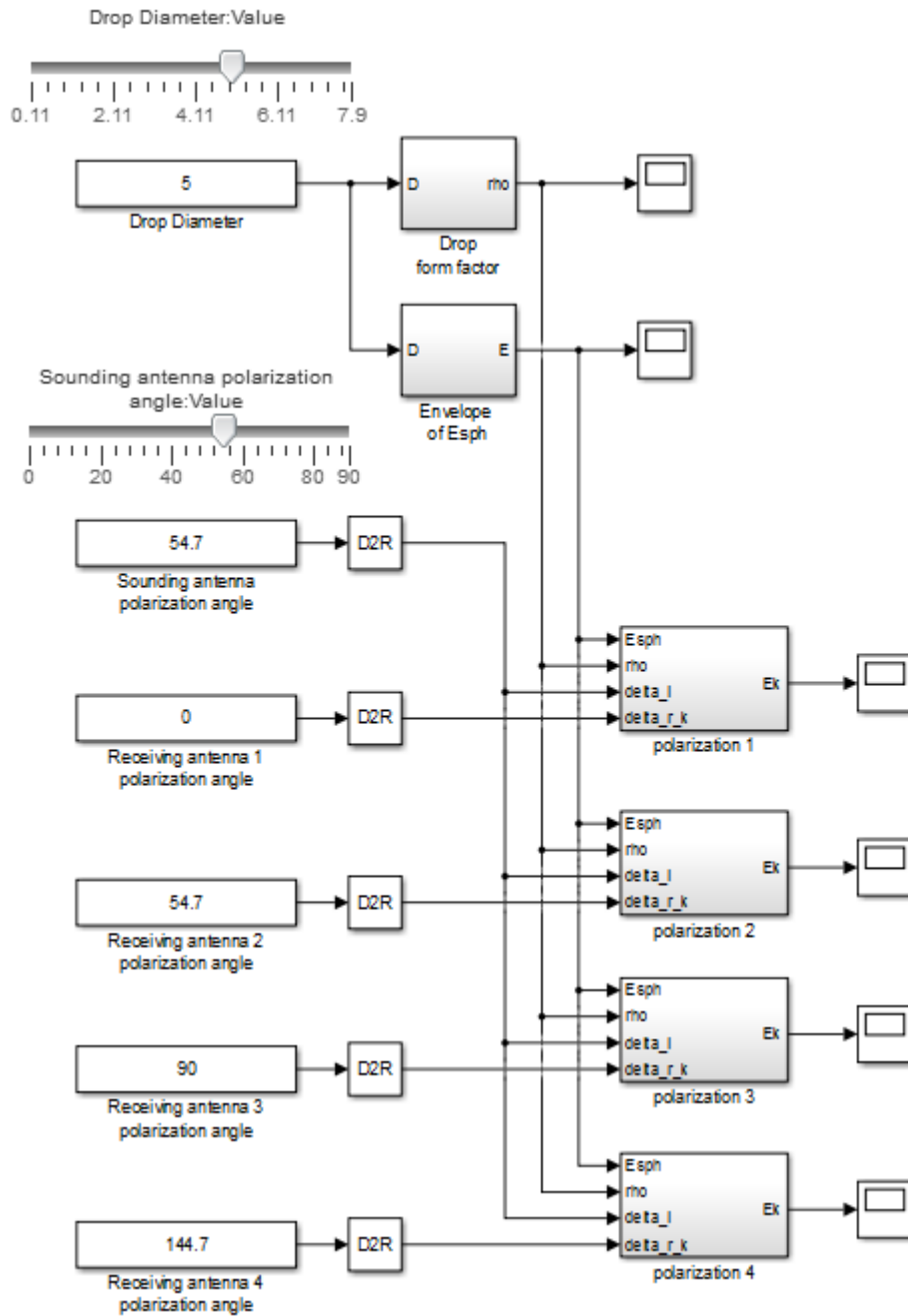


Рис. 4.5 Блок-схема комп'ютерної моделі процесу відбиття від гідрометеорів, що вібрують

Результати моделювання, за розробленою комп'ютерною моделлю для крапель з розміром 5 мм показано на рис. 4. 6 – 4.10.

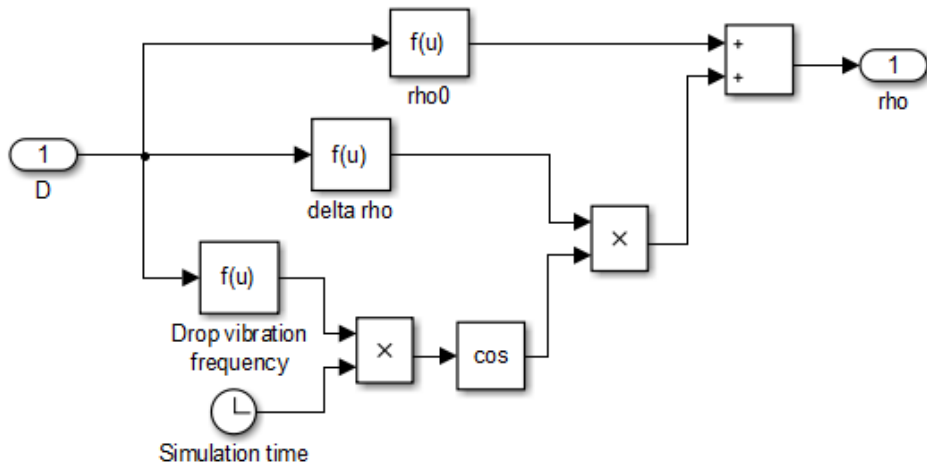


Рис. 4.5 Блок схема комп'ютерної моделі флуктуацій форми крапель

На рис.4.6 показано приклад зміни коефіцієнта форми краплі для діаметру краплі 5 мм. Крапля з таким розміром є порівняно великою, що зустрічається в опадах, найчастіше за умов нестійкої атмосфери.

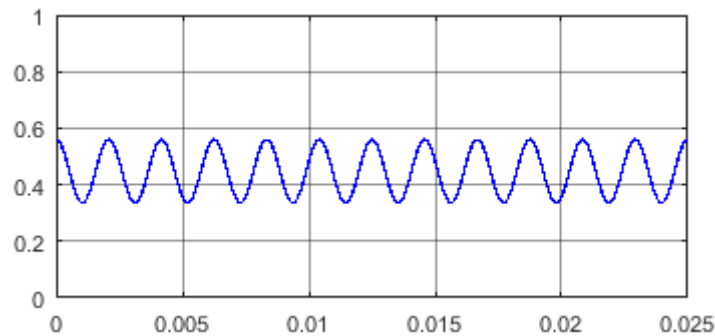


Рис. 4.6 Зміна коефіцієнта форми краплі

На рис. 4.7. та рис. 4.8 показано змодельований за розробленою моделлю відбиття, що приймається антеною з основною поляризацією (в даному випадку поляризація зондувальної 54,7 градусів) (рис.4.8), та сигнал, що випромінюється передавальною антеною (рис.4.7).

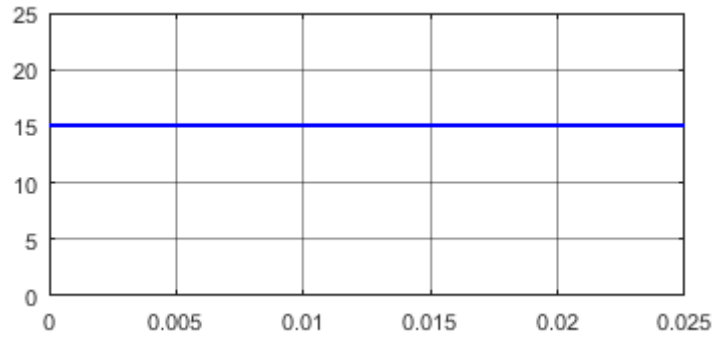


Рис. 4.7 Обвідна сигналу, що випромінюється передавальною антеною

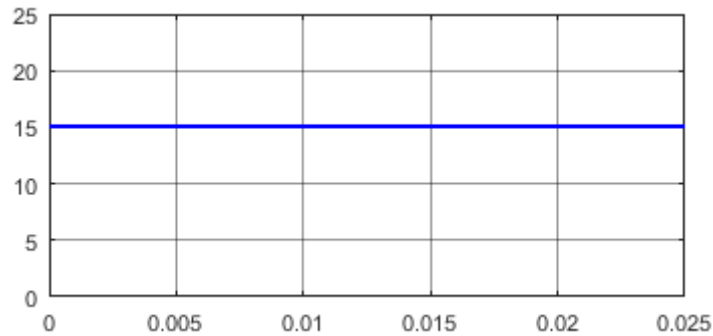


Рис. 4.8 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $54,7^\circ$

Енергія сигналу, що реєструється приймальною антеною з основною поляризацією  $54,7^\circ$  (рис.4.1.9), є енергією, що еквівалентна відбиванню від гідрометеорів еквівалентного діаметру, тобто дає можливість одержати інформацію про розмір рідких гідрометеорів, що відбивають.

На рис. 4.9 показано результати моделювання для антени, що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $90^\circ$ .

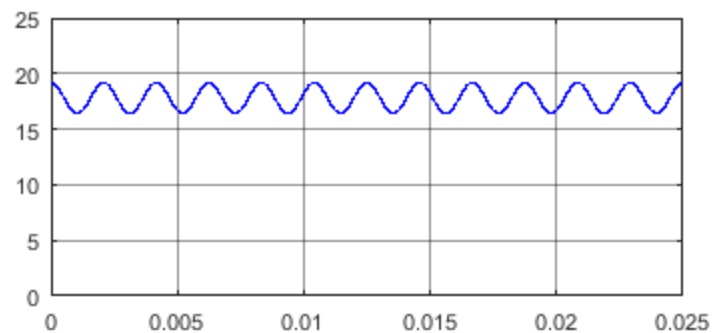


Рис.4. 9 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $90^\circ$

На рис. 4.9 показано відбитий сигнал, що вміщує в своєму складі як звичайний рівень сигналу, так і вібраційну компоненту.

На рис. 4.10 показано результати моделювання для приймальної антени, що приймає сигнал з ортогональною поляризацією до поляризації до передавальної електромагнітної хвилі (поляризація  $144.7^{\circ}$ ).

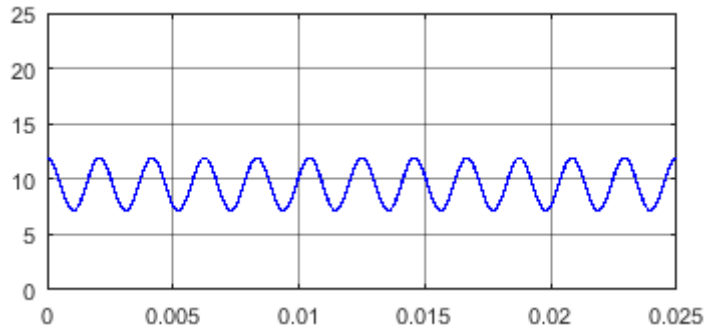


Рис. 4.10 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $144.7^{\circ}$ .

На рис. 4.10 показано тільки вібраційну складову відбитої електромагнітної хвилі, що дає можливість реєстрації та аналізу характеру вібрації форми крапель для подальших висновків про динамічні процеси в атмосфері.

Результати моделювання за розробленою моделлю (рис. 4.5) для невеликих крапель з діаметром 1 мм, що переважно зустрічаються в хмарах стійкої атмосфери показано на рис. 4.11 - 4.13.

На рис. 4.11 показано відбиття від крапель, що приймається антеною з основною поляризацією (поляризація збігається з поляризацією зондувальної хвилі).

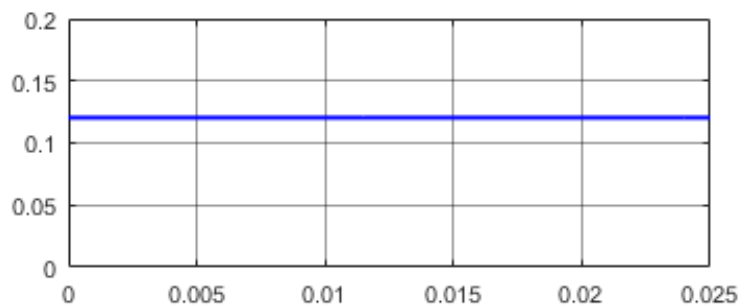


Рис. 4.11 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $54.7^{\circ}$

На рис. 4.12 показано відбиття від гідрометеорів, що приймається антеною, яка налаштована приймати сигнал з поляризацією  $99,7^\circ$ , тобто відрізняється від основної поляризації на кут  $45^\circ$ .

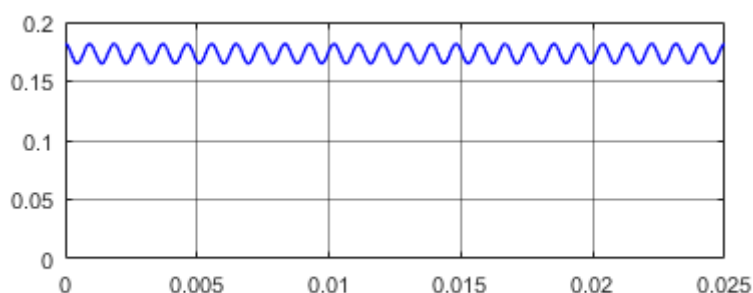


Рис. 4.12 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $99,7^\circ$

На рис. 4.13 показано результати моделювання для приймальної антени, що приймає сигнал з ортогональною поляризацією до поляризації до передавальної електромагнітної хвилі (поляризація  $144,7^\circ$ ).

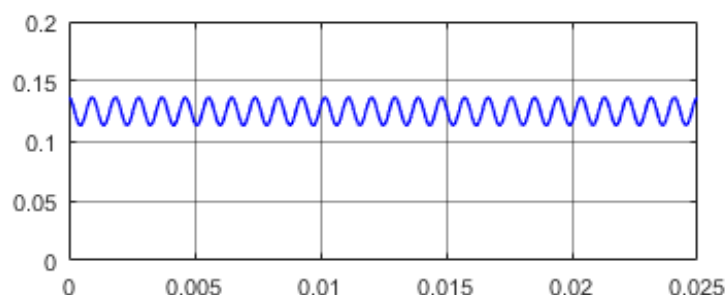


Рис. 4.14 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $144,7^\circ$ .

На рис. 4.14 показано вібраційну складову відбитої електромагнітної хвилі. Якщо порівняти результати моделювання для невеликої краплі (рис. 4.14) з результатами для великої краплі (рис. 4.10) можна сказати, що результати добре відповідають фізичним процесам в атмосфері, а саме, при збільшенні розмірів краплі збільшується рівень прийнятого сигналу. Цей факт виконується для всіх приймальних антен. Глибина вібраційної складової збільшується із збільшенням розмірів краплі, що відповідає природному факту більшої вібрації крапель з більшим розміром.

З аналізу результатів моделювання можна сказати, що шляхом підбору кута поляризації приймальної антени є можливість реєстрації та аналізу характеру вібрації форми крапель для подальших висновків про динамічні процеси в атмосфері.

Отже для реєстрації вібраційної складової при відбитті від рідких гідрометеорів достатньо мати 2 приймальні ортогонально поляризовані антени з кутами поляризаціями  $54,7^\circ$  та  $144,7^\circ$ .

У випадку оцінювання напряму дії градієнта вітру на рідкі гідрометеори необхідно мати інформацію про розподіл поляризаційних складових не тільки на ортогональних поляризаціях, а і на проміжних для фіксації можливого максимуму, що має відповідати факту співпадіння поляризаційного базису приймальної антени з поляризаційним базисом відбивачів електромагнітного сигналу. На рис. 4.15 – 4.21 показано результати моделювання енергетичного розподілу за різними поляризаційними складовими. Моделювання проводилось для набору антен з кутами поляризації  $54,7^\circ, 69,7^\circ, 84,7^\circ, 99,7^\circ, 114,7^\circ, 129,7^\circ, 144,7^\circ$  (інтервал між кутами поляризації становить  $15^\circ$ ). В даному випадку наведені розрахунки для крапель за розміром 4 мм.

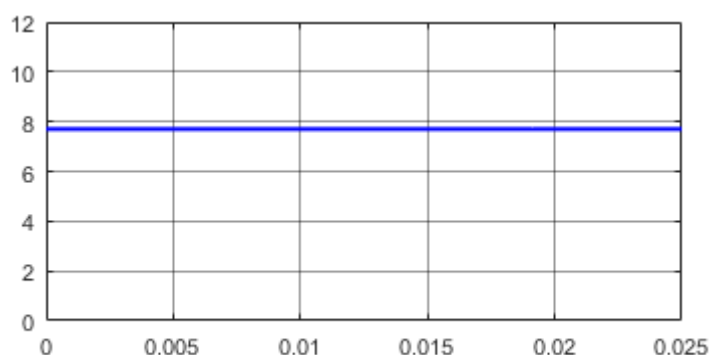


Рис. 4.15 Обвідна відбитого сигналу на антені, о налаштована приймати сигнал з поляризацією  $54,7^\circ$

Відбиття, що змодельоване та показано на рис.1.15 відповідає відбиттю від крапель з еквівалентним діаметром 4 мм, та не вміщує інформацію про вібраційну компоненту.

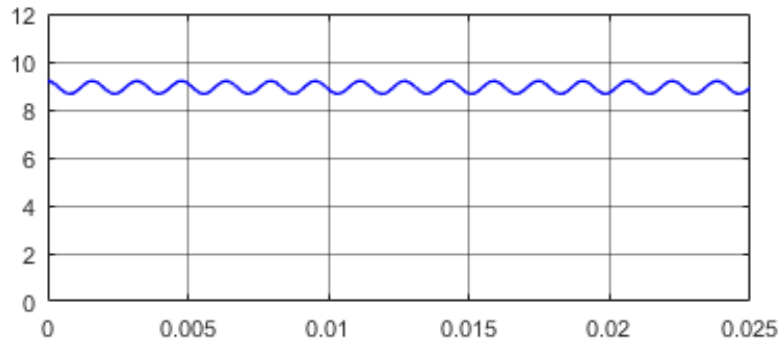


Рис. 4.16 Обвідна відбитого сигналу на антені, о налаштована приймати сигнал з поляризацією  $69.7^\circ$

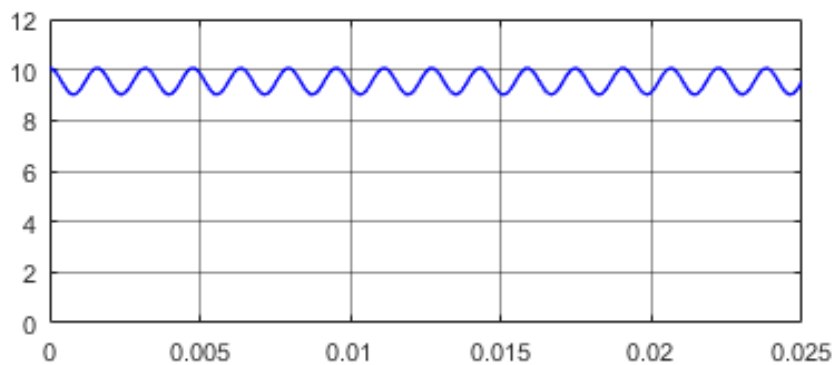


Рис. 4. 17 Обвідна відбитого сигналу на антені, що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $84.7^\circ$

З аналізу рис.4.16 та 4.17 можна сказати, що при збільшенні кута поляризації спостерігається збільшення рівня відбитого сигналу, а також внесок вібраційної компоненти.

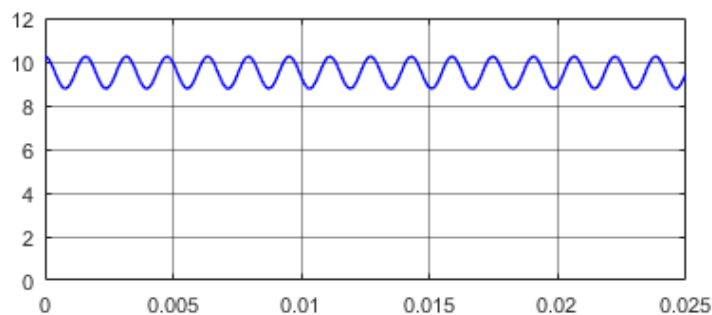


Рис. 4.18 Обвідна відбитого сигналу на антені, о налаштована приймати сигнал з поляризацією  $99.7^\circ$

На рис.4.18 ще можна побачити невелике збільшення рівня сигналу та вібраційної компоненти при зміні кута поляризації на 45 градусів від поляризації зондувальної хвилі.

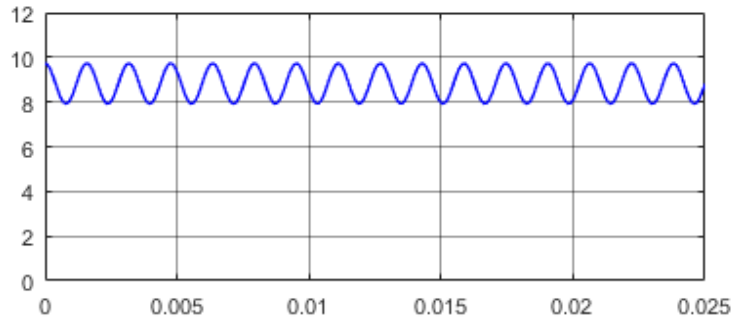


Рис. 4.19 Обвідна відбитого сигналу на антені, о налаштована приймати сигнал з поляризацією  $114.7^{\circ}$

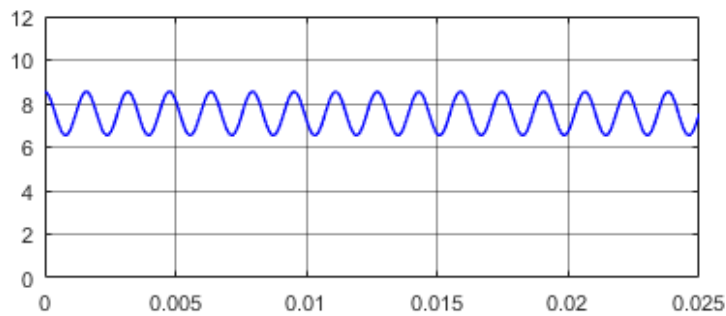


Рис. 4.20 Обвідна відбитого сигналу на антені, о налаштована приймати сигнал з поляризацією  $129.7^{\circ}$

З аналізу рис.4.18 та 4.20 можна сказати, що при подальшому збільшенні кута поляризації спостерігається вже зменшення рівня відбитого сигналу, а збіг поляризаційного базису приймальної антени та відбивачів електромагнітної хвилі знаходиться поряд з кутом, що відрізняється від поляризації зондувальної хвилі на 45 градусів.



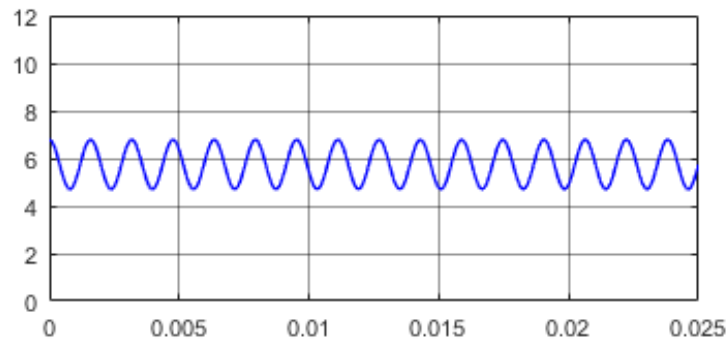


Рис. 4.21 Обвідна відбитого сигналу на антені, о налаштована приймати сигнал з поляризацією  $144.7^{\circ}$

Результати моделювання, що показано на рис. 4.21 показують подальше зменшення та демонструють внесок вібраційної складової у повний відбитий від рідких гідрометеорів радіолокаційний сигнал.

За аналізу результатів моделювання можна сказати, що розроблений в третьому розділі цієї роботи метод оцінювання вітру за допомогою поляризаційного спектру підтверджується методами комп'ютерного та математичного моделювання.

Для ілюстрації запропонованого підходу та більш детального аналізу приведемо результати моделювання для крапель меншого розміру  $D=2$  (Рис. 4.22 – 4.28).

На рис. 4.22 показано відбиття від крапель з еквівалентним діаметром 2 мм, що приймається антеною з основною поляризацією.

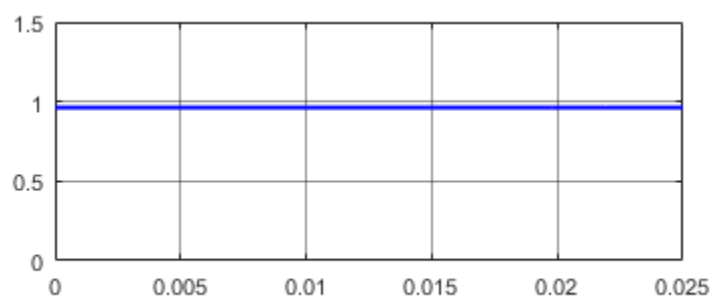


Рис. 4.22 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $54.7^{\circ}$

При порівнянні результатів рис. 4.22 та 4.14 можна побачити значно нижчий рівень сигналу, що приймається без внеску вібраційної компоненти. Це відповідає факту меншому відбиттю енергії від крапель меншого діаметра.

На рис. 4.21 показано результати моделювання для приймання антеною з поляризацією  $69.7^\circ$ .

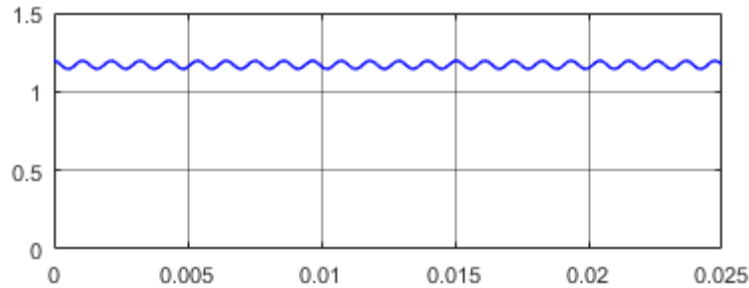


Рис. 4.23 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $69.7^\circ$

На рис. 4.23, як і на рис.4.15 можна побачити збільшення рівня відбитого сигналу, але на відміну від рис. 4.15 на рис 4.23 величина вібраційної компоненти, як і відхилення від енергетичного рівня прийнятого антеною з основною поляризацією є значно меншим, що відповідає факту меншої деформації крапель меншого розміру під дією динамічних атмосферних явищ.

На рис. 4.24. показано результати моделювання для антени, що налаштована примати сигнал з поляризацією  $84.7^\circ$ ,  $99.7^\circ$  та з поляризацією  $114.7^\circ$  (рис. 4.24, 4.25, 4.26).

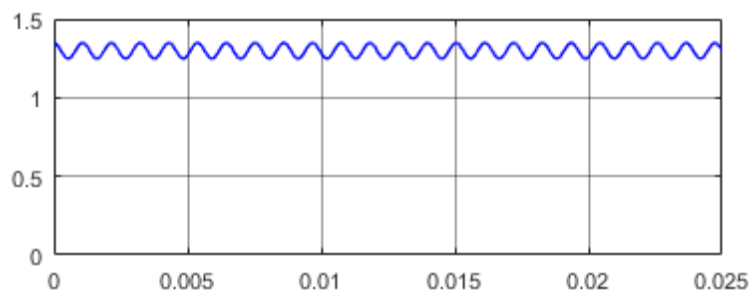


Рис. 4.24 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $84.7^\circ$

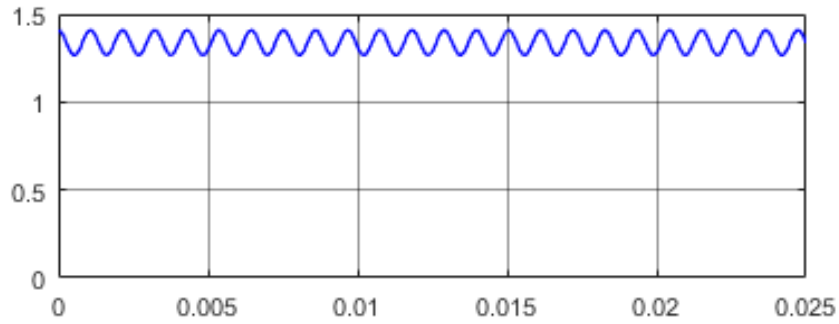


Рис. 4.25 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $99.7^{\circ}$

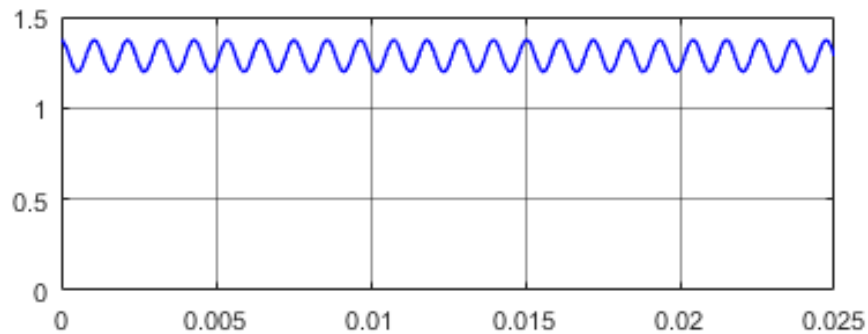


Рис. 4. 26 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $114,7^{\circ}$

На рис. 4.24, 4.25 та 4.26 як і на рис. 4.17, 4.18 та 4.19 знов спостерігаємо збільшення енергетичного рівня на вході приймальних антен в порівнянні з попередніми антенами. Цікаво, що для обох випадків (крапель  $D=4$  та  $D=2$ ) на антенах  $84,7^{\circ}$ ,  $99.7^{\circ}$  та  $114,7^{\circ}$  енергетичні рівні мають майже однаковий рівень, але спостерігається збільшення вібраційної компоненти відносно середнього рівня. Антена з поляризацією  $99.7^{\circ}$  відповідає зміні поляризаційного кута на  $45^{\circ}$  відносно поляризації зондувальної хвилі.

На рис. 4.27 та рис. 4.28 показано результати моделювання для антена, що налаштована примати сигнал з поляризацією  $129.7^{\circ}$  та  $144.7^{\circ}$ .

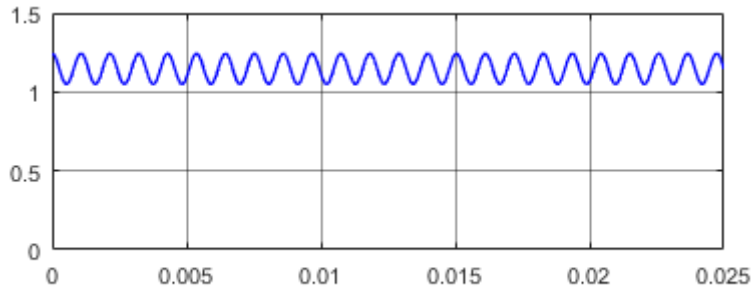


Рис. 4. 27 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $129.7^{\circ}$

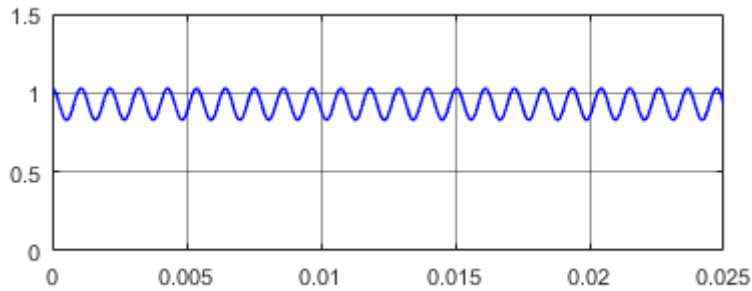


Рис. 4. 28 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $144.7^{\circ}$

З рис. 4.27 та 4.28 можна побачити, що рівень сигналу на антенах, які приймають сигнали з кутом поляризації, який відрізняється від основною більше ніж на  $45^{\circ}$  зменшується, а на антені налаштованій приймати сигнали з поляризацією  $144.7^{\circ}$  спостерігається тільки вібраційна складова.

В реальному випадку радіолокаційний сигнал відбивається від ансамблю гідрометеорів які, в більшості випадків мають різні розміри та по різному реагують на зовнішній вплив. Для врахування цих факторів запишемо вираз 4.11 для випадку розсіювання від ансамблю гідрометеорів.

$$E_k = \sum_{n=1}^N E_n^{sph} \left[ A_0(\delta_i, \delta_{r_k}) - A_1(\delta_i, \delta_{r_k}) \{ \rho_{0n} + \Delta \rho_n \cos[\Omega_n t + \varphi_n] \} \right] \quad (4.12)$$

Індекс  $n$  відповідає  $n$ -ій краплі,

$$A_0(\delta_i, \delta_{r_k}) = \cos(\delta_{r_k} - \delta_i); \quad A_1(\delta_i, \delta_{r_k}) = 1/2 \{ \cos(\delta_{r_k} - \delta_i) + 3 \cos(\delta_{r_k} + \delta_i) \};$$

$$E^{sph} = E_0 \frac{D^3}{8} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cos[\omega_0 t + 2k_o r(t)];$$

інші позначення відповідають позначенням до формули 4.7.

Результати моделювання за виразом 4.12. показано на рис. 4.29-4.31. Результати моделювання показано для випадку приймання антенами з поляризацією, що збігається з поляризацією зондувальної хвилі ( у нашому випадку  $54.7^\circ$ ), з поляризацією  $99.7^\circ$  для демонстрації відбиття з найбільшим рівнем сигналу, а також з поляризацією  $144.7^\circ$  для демонстрації внеску вібраційної складової. Відбиття від ансамблю гідрометеорів на антенах з поляризаціями  $69.7$ ,  $84.7$ ,  $114.7$ ,  $129.7$  наведено в додатку 2 даної дисертаційної роботи.

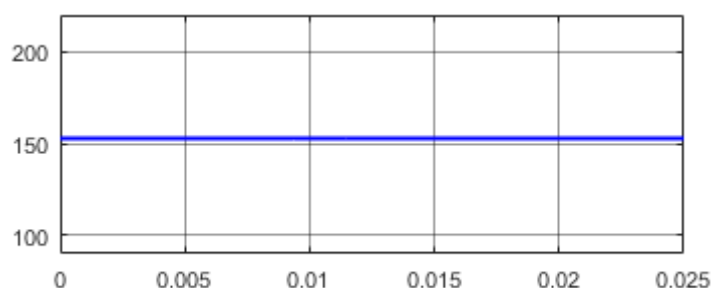


Рис. 4.29 Обвідна відбитого сигналу на антені, що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $54.7^\circ$

З аналізу рис. 4.8, 4.14, 4.22 , де показано обвідну відбитого сигналу на антені, що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $54.7^\circ$  для крапель з різними розмірами та рис.4.29 видно, що характер обвідної збігається. Змінюється лише рівень прийнятого сигналу, що є характерним для відбиття від крапель різного розміру, а також від ансамблю крапель – більше крапель, більший рівень прийнятого сигналу, крупніші краплі - більший рівень прийнятого сигналу.

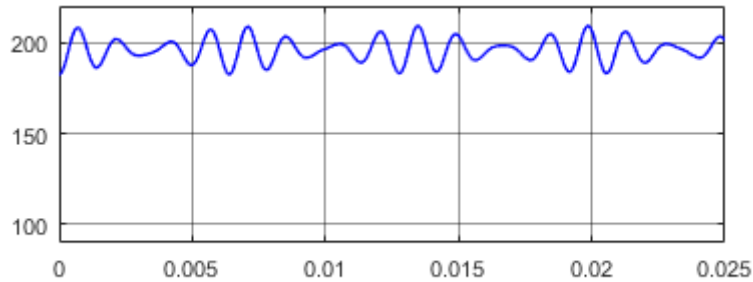


Рис. 4.30 Обвідна відбитого сигналу на антені , що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $99.7^\circ$

З аналізу та порівняння рис.4.30, 4.12, 4.18, 4.25 де показано обвідну відбитого сигналу на антені , що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $99.7^\circ$  для випадку відбиття від ансамблю гідрометеорів та гідрометеорів з розмірами 1мм, 4мм та 2 мм відповідно можна сказати про збіг загальних тенденцій поведінки обвідної. Цікаво, що для випадку відбиття від ансамблю гідрометеорів, максимум середнього рівня сигналу відповідає тому, що прийнятий антеною з поляризацією  $99.7^\circ$ . У випадку відбиття від крапель невеликого розміру коливання поблизу максимального енергетичного рівня спостерігається також і на сусідніх антенах з поляризаціями  $84.7^\circ$  та  $114.7^\circ$ . Такий факт можна пояснити тим, що у випадку крапель невеликого розміру відсутнє значне коливання рівня відбитого сигналу відповідно до зміни кута поляризації приймальної антени. У випадку маленьких крапель, форма яких є майже сферичною очікується відсутність помітної зміни рівня відбитого сигналу відповідно до зміни кута поляризації приймальної антени.

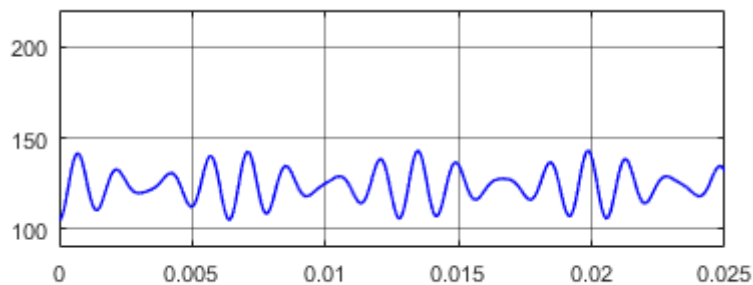


Рис. 4.31 Обвідна відбитого сигналу на антені , що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $144.7^\circ$

З порівняння та аналізу рис.4.31 та рис.4.10, 4.13, 4.21, 4.30 що демонструють обвідні відбитого сигналу на антені, що налаштована приймати сигнал з поляризацією  $144.7^\circ$  можна сказати, що у випадку відбиття від ансамблю гідрометеорів (Рис.4.31) також спостерігається фіксація тільки вібраційної складової відбитого від ансамблю гідрометеорів сигналу. Більше результатів моделювання наведено в додатку В цієї дисертаційної роботи.

Отже результати моделювання підтвердили можливість використовувати запропоновані методи (розділ 3 даної дисертаційної роботи) для одержання оперативної інформації про вітер та атмосферну турбулентність.

#### **4.1.3 Моделювання часового розподілу складових поляризаційного спектра сигналу, відбитого від гідрометеорів**

Різниця впливу розмірів краплі на відбиту електромагнітну хвилю відчувається не тільки в можливій більшій вібрації великих крапель, а також в швидкості реакції краплі на вплив на неї зовнішніх факторів, що обумовлено більшою інерційністю великих крапель порівняно з малими. В роботі [103] проведено моделювання поведінки гідрометеорів різного розміру під впливом градієнту вітру як перехідного процесу, результати моделювання наведені в розділі 3.1. Таким чином, реальний спектр на вході приймальної антени не буде складатися з фіксованих енергетичних компонентів. В ньому будуть наявні «спалахи» з різним часом існування відповідно до розміру крапель, що їх обумовлюють. Отже, оцінювання вітрових явищ, зокрема турбулентності, потребує не тільки оцінки просторового розподілу енергетичних складових поляризаційного спектру відбитого радіолокаційного сигналу, але і їх часової поведінки. Це означає, що складові поляризаційного спектру від крапель різного розміру будуть формуватися з запізненням. Спочатку з'являться складові, що відповідають меншим краплям, далі, з відповідним запізненням, і складові, що відповідають краплям більшого розміру. Цей факт дає можливість

чітко відокремити складові від крапель різного розміру, незважаючи на енергетичний рівень самої складової. В процесі моделювання для урахування часової затримки або запізнення в появі складових поляризаційного спектра від крапель різного розміру скористаємося постійною краплі з [103].

На рис. 4.32 (а,б) показано розраховані складові поляризаційного спектра для крапель з діаметрами  $D1=1$ ,  $D2=2$ ,  $D3=3$ ,  $D4=4$  та  $D5=5$  мм, що падають в спокійній атмосфері та з урахуванням часової затримки. Моделювання проводилось з урахуванням залежності коефіцієнта еліптичності крапель від діаметру [92]. На рис. 4.32 (а,б) впродовж вертикальної вісі відкладено енергію на вході приймальної антени як функції розміру крапель та коефіцієнта еліптичності крапель  $E(\gamma)$  в умовних одиницях. Постійна краплі  $\tau$  як функція діаметру крапель відкладена впродовж горизонтальної вісі.

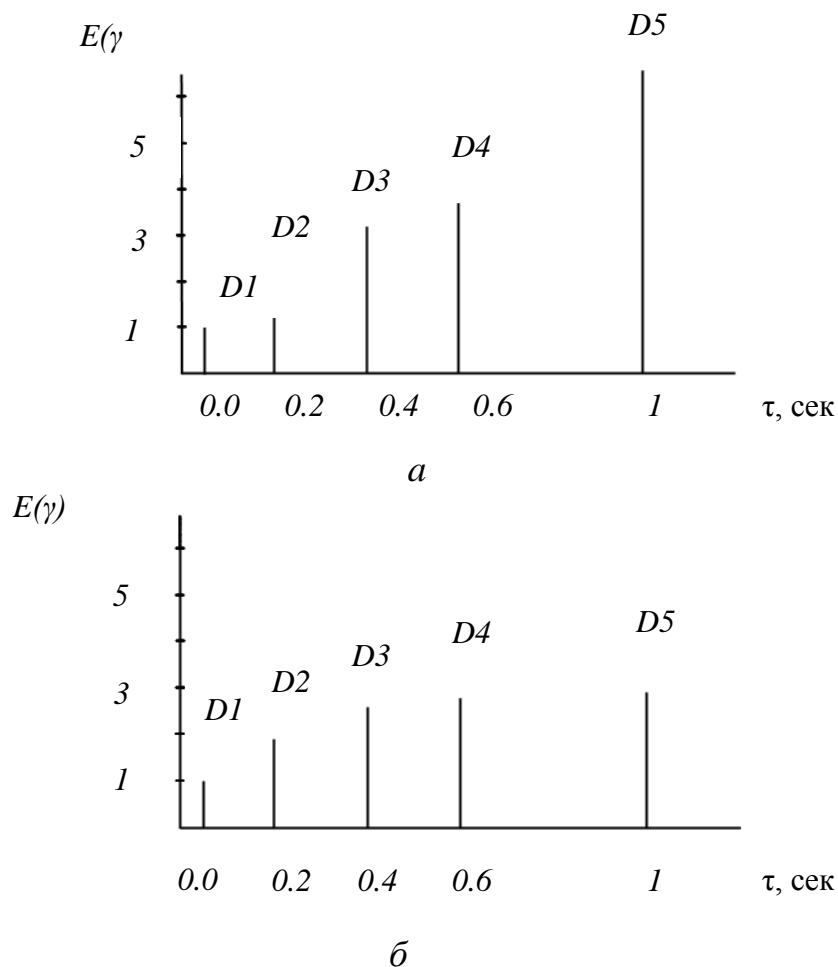


Рис. 4.32 Змодельовані складові поляризаційного спектра (випадок стійкої атмосфери)



На рис. 4.32а показано розподіл поляризаційних складових на вході приймальної антени, що налаштована сприймати сигнали з поляризацією, яка співпадає з поляризацією зондувальної електромагнітної хвилі. На рис. 4.27б показано розподіл поляризаційних складових на вході приймальної антени, що налаштована сприймати сигнали з поляризацією, яка є ортогональною до поляризації зондувальної електромагнітної хвилі.

На рис. 4.33 показано змодельовані складові поляризаційного спектра для крапель з діаметрами  $D1=1$ ,  $D2=2$ ,  $D3=3$ ,  $D4=4$  та  $D5=5$  мм у випадку дії на гідрометеори градієнту вітру. Результати моделювання наведено для випадку приймання сигналу антеною, що налаштована сприймати сигнали з поляризацією, яка співпадає з поляризацією зондувальної електромагнітної хвилі. Впродовж вертикальної вісі відкладено енергію на вході приймальної антени як функцію зміни кута поляризації, розміру крапель та коефіцієнту еліптичності крапель  $E(\gamma)$  в умовних одиницях. Постійна краплі  $\tau$  як функція діаметру крапель відкладена впродовж горизонтальної вісі. Моделювання проводилось за експериментально одержаними виразами (4.1) та (4.2). Розрахунки проводились для значення амплітуди вібрації краплі  $\Delta\gamma_d=2$

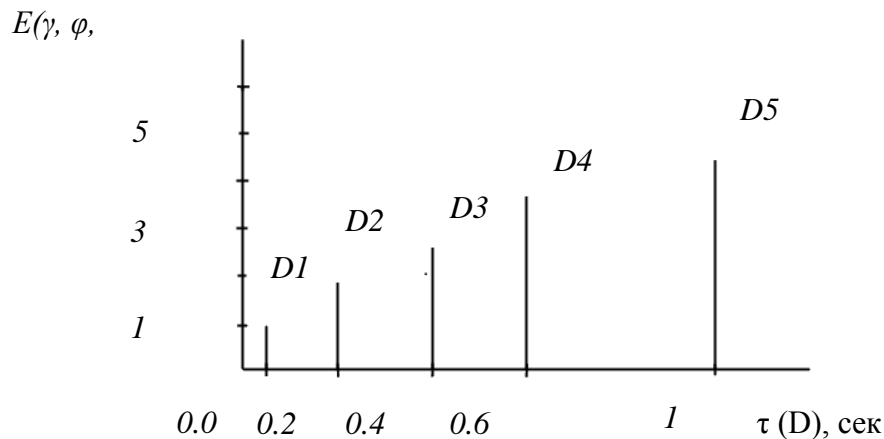


Рис. 4.33 Просторово-часовий розподіл складових поляризаційного спектра (гідрометеори знаходяться під дією градієнту вітру)

Часовий розподіл складових поляризаційного спектра дозволяє відокремити зворотне розсіювання від крапель різного розміру. На Рис. 4.33 можна побачити, що складові, які відповідають краплям  $D_1=1$ ,  $D_2=2$ ,  $D_3=3$ ,  $D_4=4$  та  $D_5=5$  мм з'являються з деяким запізненням  $\tau(D)$ , що залежить від розміру крапель. Складові від крапель більшого розміру з'являються через більший проміжок часу ніж складові, що відповідають краплям меншого розміру. Це пояснюється інерційністю крапель – більші за розміром краплі реагують на вплив вітру з більшою інерційністю, тобто з більшою затримкою, ніж менші за розміром краплі. Такий природний процес формування поляризаційного спектра дозволяє запобігти невизначеності при інтерпретації радіолокаційної інформації, що може виникнути у випадку значного перевищення в метеоутворенні кількості маленьких за розміром крапель над кількістю, наприклад, крапель більшого розміру. Отже, енергетичний рівень складової, що відповідає краплям меншого розміру, може виявитись більшим, ніж енергетичний рівень складової від крапель, що більші за розміром. Тому що в реальному випадку рівень енергії на вході приймальної антени є функцією кількості крапель одного розміру в об'ємі, що відбиває. Часова затримка появи складових від різних за розміром крапель дозволяє однозначно пов'язати складові поляризаційного спектра з краплями конкретного розміру.

На рис. 4.32 та рис. 4.33 можна побачити, що на вході приймальної антени (рис. 4.33) енергетичний рівень складових є нижчим, ніж на рис. 4.33. Така різниця пояснюється зміною кута поляризації, та більшим відхиленням поляризації відбитої електромагнітної хвилі від поляризації зондувальної електромагнітної хвилі. Зміна поляризації у даному випадку викликана деформацією краплі під дією вітру. З аналізу рис. 4.32 та рис. 4.33 можна побачити, що зміна енергетичного рівня виявляється сильнішою для складових від крапель більшого розміру. Це відповідає відомому факту, що більші за розміром краплі більше деформуються під дією градієнту вітру. Таким чином, енергетичний рівень складових поляризаційного спектра вміщує

диференційовану інформацію про кількість крапель конкретного розміру та ступень деформації різних крапель, що викликана впливом вітру або вітрових явищ. Порівняння ступеня деформації крапель різного розміру дозволяє зробити висновки про інтенсивність процесів в атмосфері, такі як вітрові явища, що є причиною цієї деформації.

#### **4.2. Моделювання процесу відбиття енергії деполяризованого сигналу за допомогою однієї антени та її оцінювання**

В розділі 3.3. наведено та описано принцип, за яким оцінюється енергія відбитого деполяризованого сигналу за допомогою радіолокаційної системи з однією антеною з фіксованою поляризацією для одержання інформації про інтенсивність атмосферної турбулентності. Результати моделювання відповідно до підходу, що описує процес оцінки ступеня зміни кута поляризації відбитих від ансамблю гідрометеорів електромагнітних хвиль та їх обговорення, наведено в розділі 4.2. даної роботи.

##### **4.2.1 Моделювання процесу формування поляризаційної модуляції**

Моделювання запропонованого в розділі 3.3 даної дисертаційної роботи підходу до оцінки динамічних явищ в атмосфері, за допомогою однієї антени з фіксованими поляризаційними властивостями на попередньому етапі, можна продемонструвати за допомогою наступної діаграми (Рис.4.34).

В якості зондувального сигналу  $S_1$  приймаємо високочастотний сигнал.  $S_2$  – відбитий від гідрометеорів високочастотний сигнал з низькочастотною (НЧ) модуляцією. Турбулентність моделюється, як квазігармонійний сигнал з частотами, що відповідають частотам турбулентності [86]. Турбулентність впливає на ансамбль гідрометеорів, який подано набором еквівалентних фільтрів нижніх частот (ФНЧ) з різними характеристиками, що відповідають сталим краплі [87].

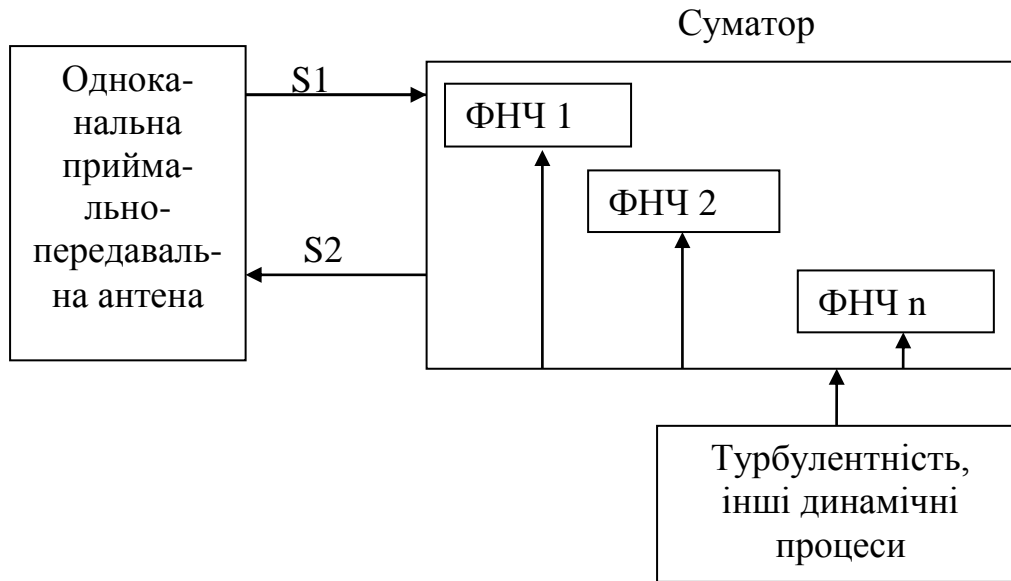


Рис. 4.34 Процес модуляції зондувальної електромагнітної хвилі частотним спектром турбулентності

Стала краплі  $\tau$  залежить від діаметра рідких гідрометеорів та характеризує перехідний процес руху [88]. Просторова орієнтація гідрометеорів змінюється під дією динамічних атмосферних явищ. Як наслідок, змінюється поляризація сигналу, що відбивається від ансамблю гідрометеорів. Відбитий від гідрометеорів сигнал  $S_2$  таким чином подається промодульованим сигналом з виходу зазначених фільтрів, наслідком чого є зміна кута поляризації відбитої хвилі, а отже, відбитий сигнал містить інформацію про інтенсивність турбулентності. Такий процес зміни обвідної відбитого високочастотного радіолокаційного сигналу  $S_e$  ми описували математично як реакцією ФНЧ  $g(t)$  на початковий вплив турбулентності  $U_T$ :

$$S_e = g(t)U_T;$$

$$g(t)_+ = \frac{1}{\tau_k} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right); \quad (4.13)$$

$$g(t)_- = -\frac{1}{\tau_k} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right); \quad (4.14)$$

$$\tau_k = \frac{m}{k} = \frac{\rho D_0^2}{18\mu} \text{ – стала краплі;}$$

$$m = \frac{\rho \pi D_0^3}{18\mu} \text{ – маса краплі;}$$

$D_0$  – медіанний діаметр краплі;

$\rho$  – щільність повітря;

$\mu$  – в'язкість повітря,

$k = 1, 2, \dots, n$ .

Формула (4.13) описує реакцію крапель у випадку прискорення їх руху, формула (4.14) описує реакцію крапель у випадку сповільнення їх руху.

Схема процесу оцінки ступеня зміни кута поляризації відбитих від ансамблю гідрометеорів електромагнітних хвиль показано на рис. 4.35.

Отже, на вході приймально-передавальної антени маємо відбитий високочастотний сигнал з низькочастотною модуляцією. Такий відбитий від гідрометеорів сигнал, по суті, є сигналом з поляризаційною модуляцією, або поляризаційно-модульованим сигналом. Саме зміни амплітуди низькочастотної складової містять інформацію про турбулентність та інші динамічні явища, що обумовлено частотними характеристиками відбивачів радіосигналів під дією вітрових явищ. Надалі, за допомогою перетворення Гілберта, одержуємо обвідну відбитого радіосигналу  $S_e$ . В наступному блоці проводимо аналіз характеру змін обвідної, одержуємо, у разі потреби, частотний її спектр, проводимо її статистичне оцінювання і порівнюємо з характеристиками інтенсивності турбулентності. Всі етапи моделювання виконувалися за допомогою середовища MathCad. В моделі зміна інтенсивності турбулентності задається різними значеннями амплітуд квазігармонічного сигналу відповідно до значень прирощення перевантаження ПК. Бовтанка ПК, яка оцінюється відповідно до ІСАО в значеннях прирощення перевантаження, є наслідком дії турбулентності [11].

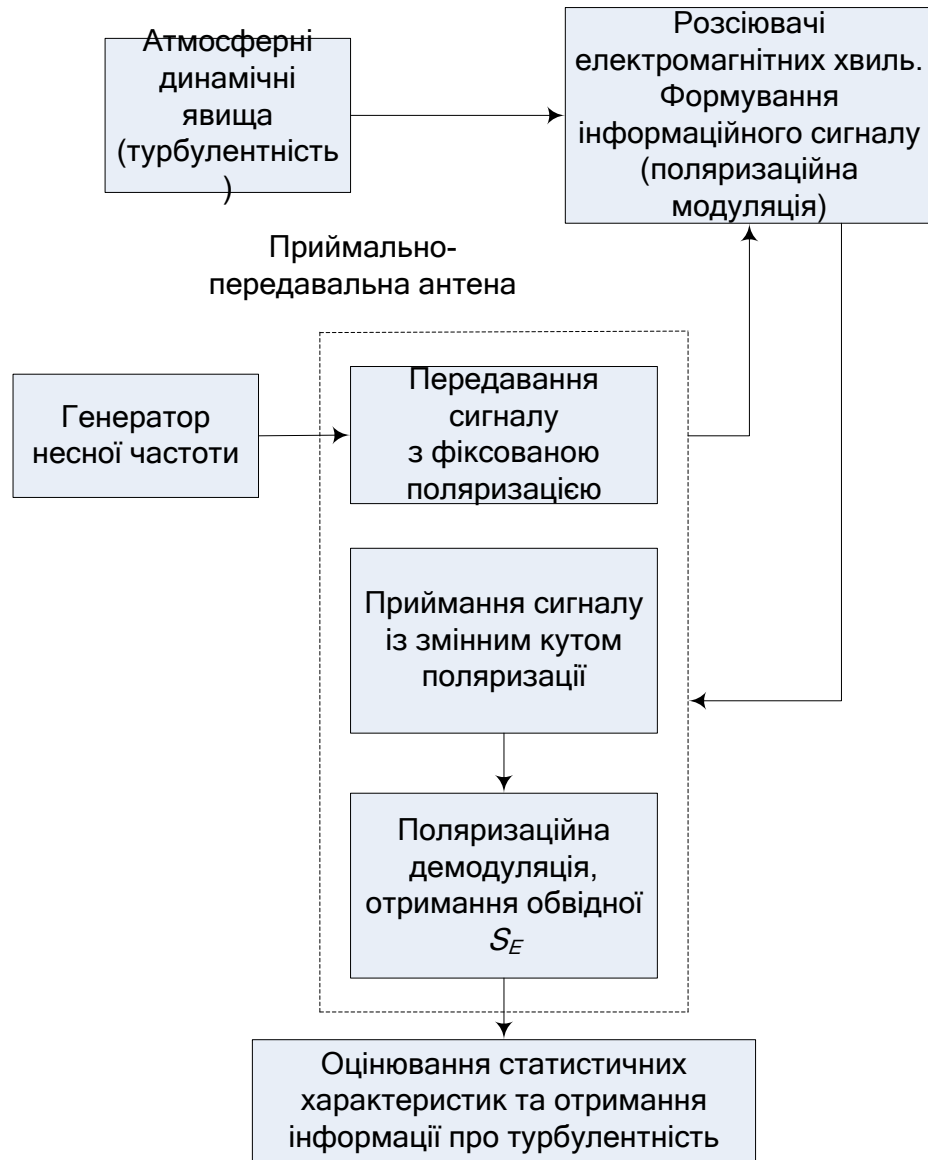


Рис. 4.35 Схема процесів формування поляризаційної модуляції та оцінювання зміни кута поляризації відбитих сигналів

У таблиці 4.1. наведено класифікацію турбулентності відповідно до значень прирощення перевантаження  $\Delta n$ , що виражається в одиницях прискорення вільного руху  $g$ .

**Класифікація турбулентності відповідно до значень прирощення  
перевантаження  $\Delta n$**

Помірна турбулентність	$\Delta n = \pm 0,5g \dots \pm 1g$	Протягом польоту
	$\Delta n = \pm 0,3g \dots \pm 0,4g$	Протягом зльоту або посадки
Сильна турбулентність	$\Delta n$ більша за $\pm 1g$	Протягом польоту
	$\Delta n$ більша за $\pm 0,4g$	Протягом зльоту або посадки

На рисунках 4.36- 4.40 показано змодельований відповідно до схеми 4.36 відбитий від гідрометеорів ВЧ сигнал з поляризаційною модуляцією (а) та обвідну відбитого радіосигналу, одержану за допомогою перетворення Гілберта (б). На рисунках рівень сигналу або обвідної  $S_E$  відкладено впродовж осі у. Час відкладено впродовж вісі x .

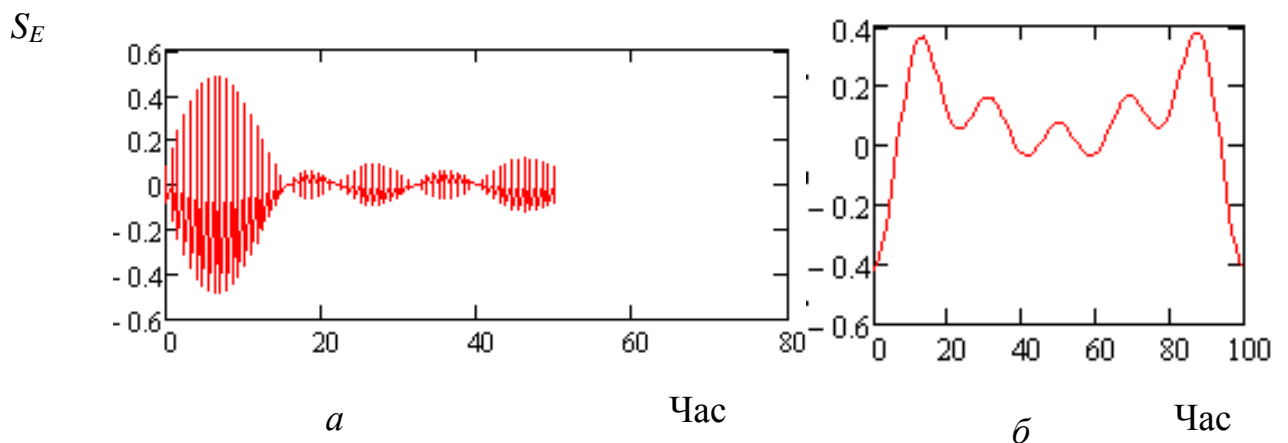


Рис. 4.36 Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (а), обвідна відбитого сигналу (б) у випадку спокійної атмосфери  $\Delta n = 0,1 g$

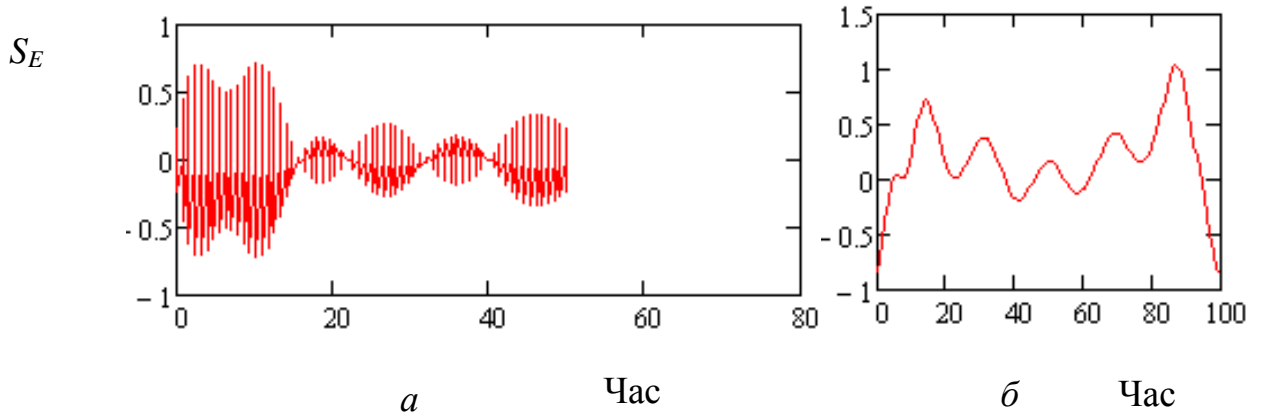


Рис. 4.37 Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (а), обвідна відбитого сигналу (б) у випадку слабкої турбулентності  $\Delta n = 0,3g$

З порівняння рис. 4.36 – 4.37 можна сказати, що згідно з цією моделлю навіть незначна зміна в інтенсивності атмосферної турбулентності в метеоутворенні призводить до помітного зростання енергетичного рівня обвідної та збільшенню глибини поляризаційної модуляції.

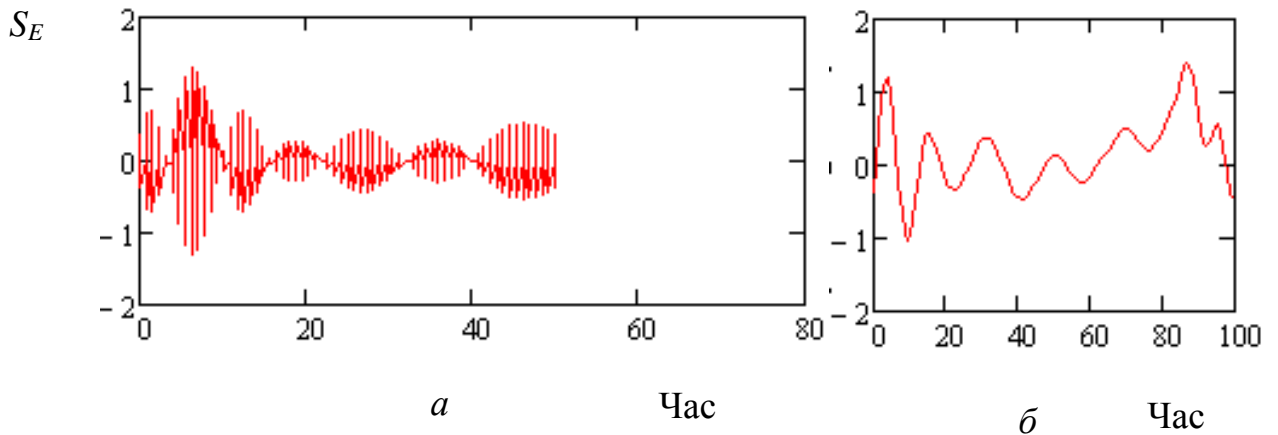


Рис. 4.38 Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (а), обвідна відбитого сигналу (б) у випадку помірної (сильної) турбулентності  $\Delta n = 0,6g$

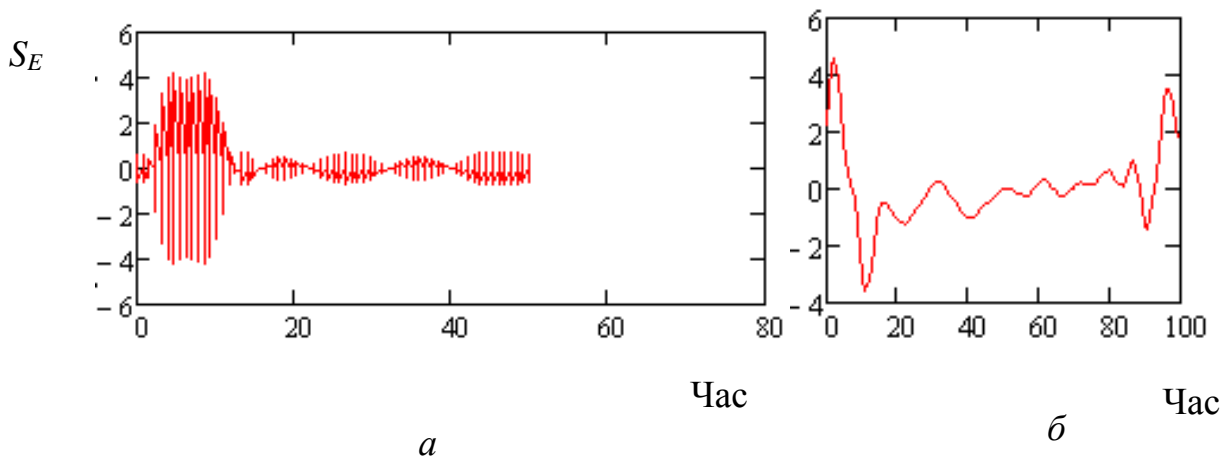




Рис. 4.39 Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (а), обвідна відбитого сигналу (б) у випадку сильної турбулентності  $\Delta n = 0,9 g$

З рис. 4.38 – 4.39 можна сказати, що подальше збільшення інтенсивності атмосферної турбулентності в метеоутворенні призводить до більш значного (на порядок, якщо порівняти Рис. 4.38 та 4.39 зростання рівня обвідної, та значного збільшення глибини поляризаційної модуляції.

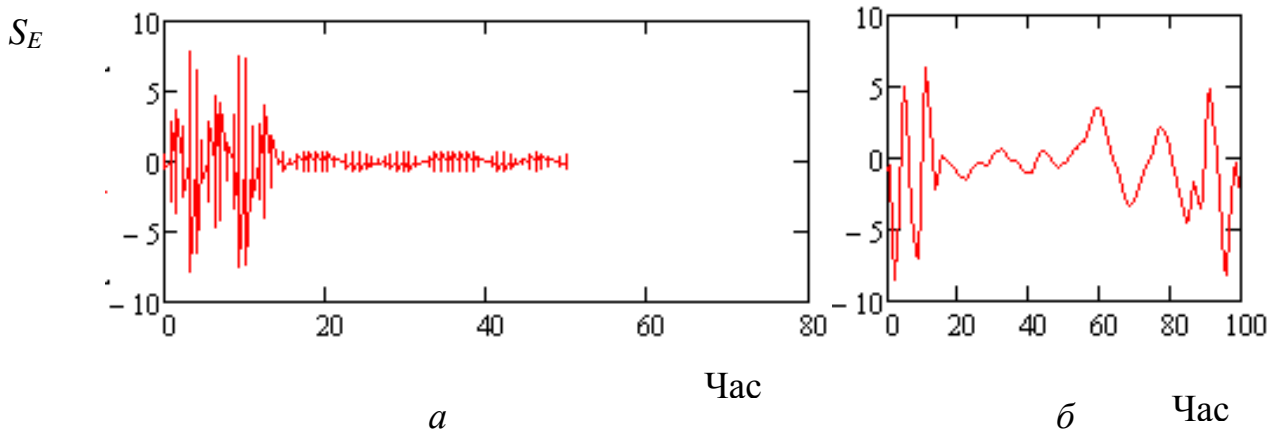


Рис. 4.40 Відбитий від гідрометеорів сигнал з поляризаційною модуляцією (а), обвідна відбитого сигналу (б) у випадку дуже сильної турбулентності  $\Delta n = 2g$ .

З подальшим збільшенням інтенсивності атмосферної турбулентності характер змін обвідної зберігається (рис.4.40). За наявності сильних вітрових поштовхів (порівняння рис. 4.39 та рис. 4.40) спостерігається не тільки збільшення рівня НЧ складової, а також з'являється додаткове її викривлення. Цікаво, що зі збільшенням кількості сильних вітрових поштовхів збільшується глибина модуляції саме таких викривлень, як це видно з рис. 4.39 та рис 4.40. Цікаво окремо проаналізувати рис. 4.37, на якому показано змодельований характер зміни НЧ складової за наявності дуже сильної турбулентності з великою кількістю вітрових поштовхів. Велика кількість коротких викидів НЧ складової модульованого сигналу є результатом суперпозиції перехідних процесів з різними постійними краплі  $\tau$ , що є наслідком наявності в метеоутворенні крапель різного розміру.

Математично процес за схемою 4.35 можна представити за допомогою формули для розрахунку сигналу на виході фазового детектора:

$$S_{Ek} = \sum_{n=1}^N |E_n^{sph}| [A_0(\delta_i, \delta_{r_k}) - A_1(\delta_i, \delta_{r_k}) \rho_{0n}] \cos(\omega_n t + \psi_n) + \frac{1}{2} A_1(\delta_i, \delta_{r_k}) \sum_{n=1}^N |E_n^{sph}| \Delta \rho_n \{ \cos[(\omega_n + \Omega_n)t + \psi_n + \varphi_n] + \cos[(\omega_n - \Omega_n)t + \psi_n - \varphi_n] \} \quad (4.15.)$$

де  $\kappa$  відповідає поляризації приймально-передавальної антени;

$E_n^{sph}$  відповідає частоті Доплерівського зсуву  $\omega_n$ ;

$\psi_n$  - початкові фази вібрації крапель;

Інші позначення формули 4.15 відповідають позначенням формул 4.10, 4.11 та 4.12. Формулу можна використовувати за різної поляризації приймально-передавальної антени для сепарації «поляризаційної модуляції» НЧ обвідної від змін обвідної сигналу, що викликані іншими атмосферними факторами.

На рис. 4.41 – 4.48 наведено приклад результатів моделювання за запропонованим енергетичним методом оцінювання турбулентності за зміною НЧ складової відбитого радіолокаційного сигналу на фоні вібрацій, що викликані іншими факторами.

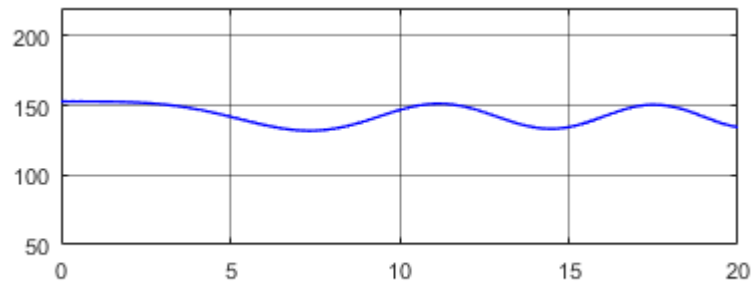


Рис. 4.41 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $54.7^\circ$

На рис. 4.41 зображено відбитий радіолокаційний сигнал від гідрометеорів поляризаційною модуляцією. Вібрації, що викликані іншими факторами видалено за рахунок вибору кута поляризації приймальної антени. Поляризаційна модуляція, що викликана наявністю турбулентності в атмосфері призводить до характерної зміни НЧ складової.

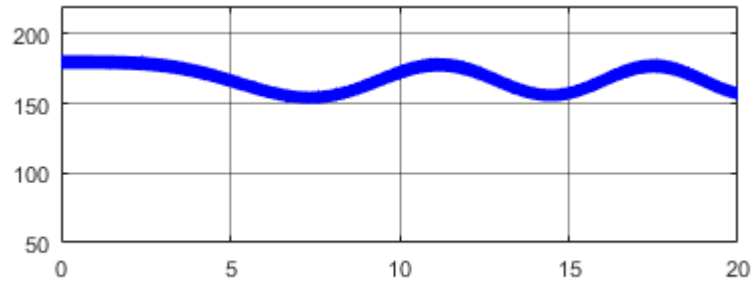


Рис. 4.42 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $69.7^{\circ}$

На рис.4.42 можна побачити, що тренд зміни НЧ складової, що викликав наявністю турбулентності зберігається на фоні появи вібраційного високочастотного внеску, що виявляється у «розширенні» відбитого сигналу.

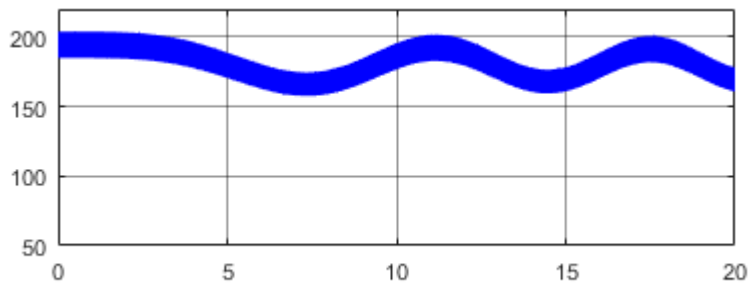


Рис.4.43 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $84.7^{\circ}$

На рис. 4.43 можна побачити збільшення внеску вібрації крапель на фоні стійкої зміни НЧ складової відбитого радіолокаційного сигналу за рахунок поляризаційної модуляції, що викликана атмосферною турбулентністю.

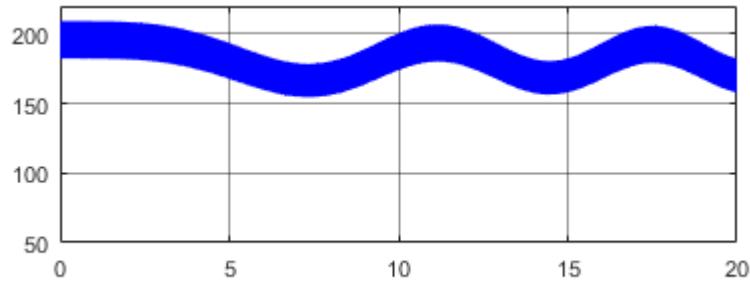


Рис.4.44 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $99.7^{\circ}$

На рис.4.44 спостерігається збереження загального тренду.

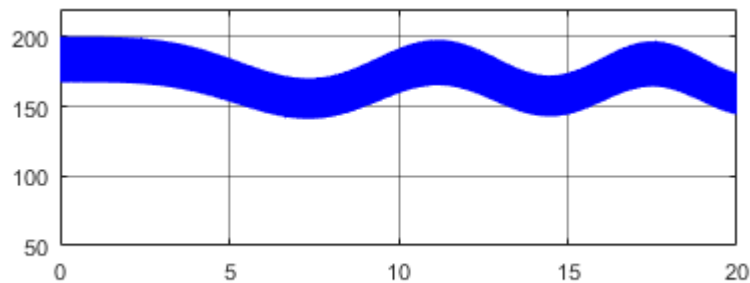


Рис.4.45 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $114.7^{\circ}$

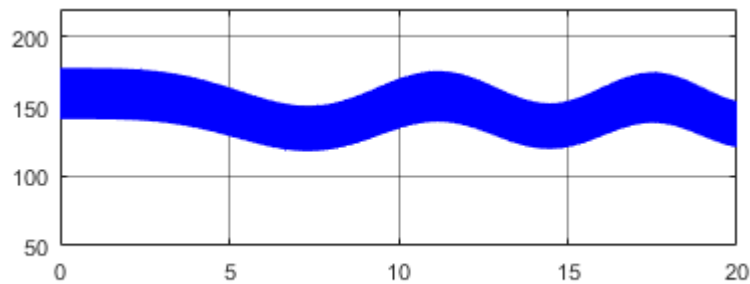


Рис.4.46 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $129.7^{\circ}$

На рис.4.44-4.46 спостерігається збереження загального тренду збільшення внеску вібрацій крапель в загальний відбитий радіолокаційний

сигнал та збереження характеру зміни НЧ складової, що викликана наявністю турбулентності.

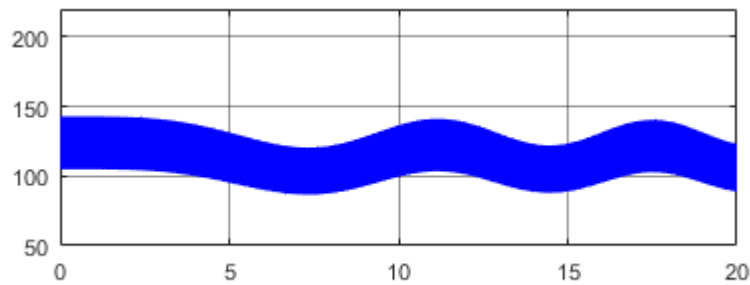


Рис.4.47 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $144.7^{\circ}$

На рис.4.47 можна побачити сигнал, що вміщує інформацію тільки про вібрацію крапель та стійку поляризаційну модуляцію за рахунок турбулентності. З результатів моделювання можна зробити висновки про те, що є можливим сепарувати енергетичні зміни відбитого від ансамблю гідрометрів сигналу, що викликані турбулентністю від тих, що викликані іншими факторами. Це є можливим, якщо врахувати частотні характеристики турбулентності.

В додатку А (рис. А32-А38) наведені результати моделювання за запропонованою моделі, що за допомогою програмного середовища Simulink для крапель меншого розміру.

#### **4.2.2 Оцінка характеристик випадкового процесу впливу турбулентності на ансамбль гідрометеорів**

Отже, процес та характер зміни НЧ обвідної відбитого від гідрометеорів ВЧ сигналу можна розглядати як інформаційний параметр, що вміщує інформацію про силу чи інтенсивність впливу випадкового процесу турбулентності на ансамбль гідрометеорів.

Проведемо оцінку характеристик випадкового процесу – математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення від інтенсивності турбулентності.

Залежність математичного сподівання випадкового процесу від інтенсивності турбулентності показано на рис. 4.48, залежність дисперсії та середньоквадратичного відхилення від інтенсивності турбулентності – на рис. 4.49. Інтенсивність турбулентності в одиницях прискорення вільного руху відкладено впродовж осі  $x$ . Значення математичного сподівання, дисперсії та середньоквадратичного відхилення в десятих частках відкладено впродовж осі  $y$ .

З рис. 4.48 видно, що математичне сподівання флюктує біля деякого середнього значення, а амплітуда флюктуацій зменшується з підвищенням турбулентності. Такий характер зміни математичного сподівання відповідає нестационарному випадковому процесу. Явище турбулентності на інтервалі спостереження можна розглядати як нестационарний випадковий процес.

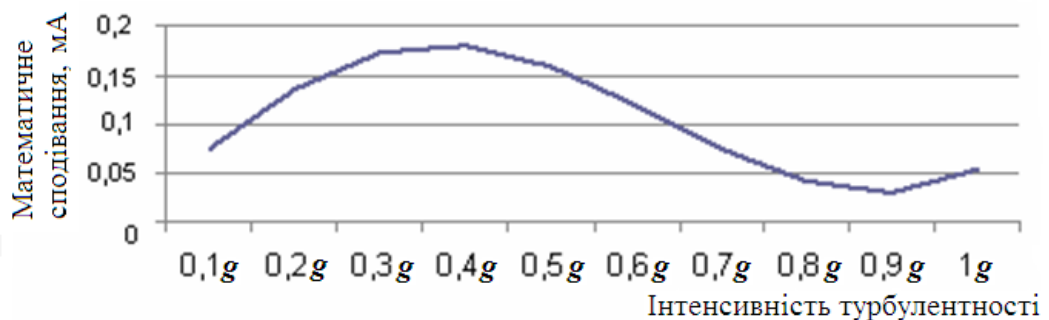


Рис. 4.48 Залежність математичного сподівання випадкового процесу зміни обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу від інтенсивності турбулентності

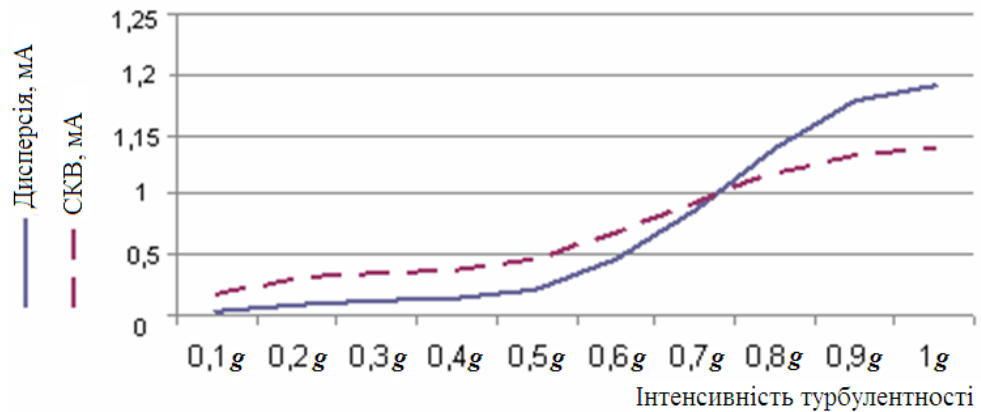


Рис. 4.49 Залежність дисперсії та середньоквадратичного відхилення обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу від інтенсивності турбулентності

Згладженість кривої (рис. 4.49) залежить від інтервалу спостереження. В розглядуваному випадку характер реакції крапель на вплив турбулентності є тим фактором, що визначає характер залежності математичного сподівання випадкового процесу зміни НЧ обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу від інтенсивності турбулентності. З рис. 4.49 видно, що дисперсія та середньоквадратичне відхилення плавно збільшуються з підвищенням інтенсивності турбулентності, що також відповідає нестационарному випадковому процесу.

#### 4.2.3 Статистична оцінка можливостей поляриметричного метода

Результати моделювання, що наведені в главах 4.2.1 та 4.2.2 цього розділу, використано для оцінки потенційної можливості визначення зон небезпечної турбулентності за допомогою підходу, що представлений в розділі 3.3.

Для статистичної оцінки оберемо інформаційний параметр, за яким буде проведена оцінка потенційної можливості використання запропонованого методу для визначення зон небезпечної турбулентності. В нашому випадку інформаційним параметром є статистичні дані про дисперсію випадкового

процесу зміни низькочастотної складової відбитої від ансамблю гідрометеорів електромагнітної хвилі [104, 105]. Після одержання за допомогою системи MathCad статистичних даних про інформаційний параметр для 4 випадків – слабкої, помірної, сильної та дуже сильної турбулентності, побудуємо розподіл цього параметру.

На рис. 4.50 показано розподіл інформаційного параметру за наявності слабкої, помірної, сильної та дуже сильної турбулентності. Інтенсивність турбулентності обрано відповідно до ступеня перевантаження ПС ( $\Delta n$ ) в процесі польоту. Значення перевантаження ПС ( $\Delta n$ ) наведено в таблиці 4.1 з [11].

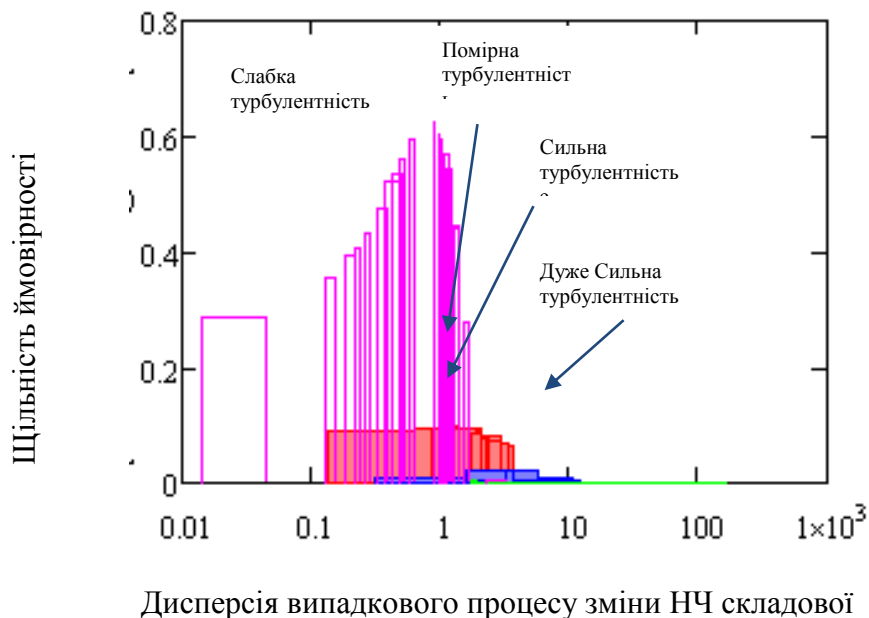


Рис. 4.50 Результати моделювання розподілу інформативного параметру для випадків слабкої, помірної, сильної та дуже сильної турбулентності в логарифмічному масштабі

З рис.4.50 можна побачити, що щільність ймовірності сконцентрована чітко поблизу одиниці для випадку слабкої турбулентності. Щільність ймовірності простирається на значному інтервалі для випадку дуже сильної турбулентності. Щільності ймовірностей для згаданих двох випадків перетинаються тільки на незначному інтервалі. З огляду на те, що для більшості



сучасних повітряних суден, що виконують політ на ешелоні, є важливим і достатнім визначити саме зони сильної та дуже сильної турбулентності, факт незначного перетинання щільностей ймовірності для слабкої та сильної турбулентності, є доволі обіцяним з точки зору можливості використання поляриметрії для виявлення зон небезпечної турбулентності.

Для наочності на рис. 4.51 наведено результати моделювання розподілу інформаційного параметру за наявності слабкої (червоний колір) та дуже сильної турбулентності (синій колір). Слабка турбулентність відповідає значенню прирощення перевантаження ПС  $\Delta n = 0,2g$ . Дуже сильна турбулентність відповідає значенню прирощення перевантаження ПС  $\Delta n = 2g$ . Результати наведені в логарифмічному масштабі.

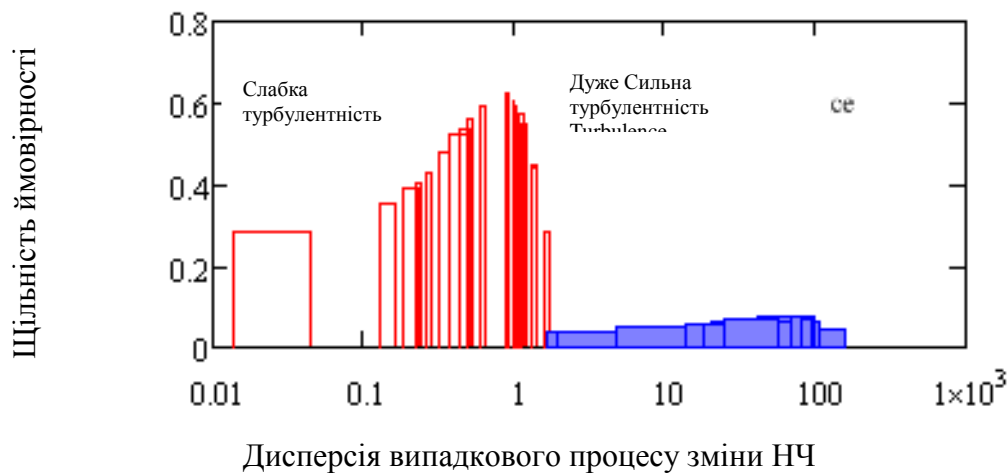


Рис. 4.51 Результати моделювання розподілу інформативного параметру для випадків слабкої та дуже сильної турбулентності

Для виявлення зон небезпечної турбулентності проведемо розділення явища атмосферної турбулентності за ознакою її інтенсивності. Для цього розрахуємо ймовірність прийняття вірного рішення при визначенні зон турбулентності різної інтенсивності та ймовірність помилкової тривоги. Ймовірність прийняття вірного рішення та ймовірності помилкової тривоги для випадків турбулентності різної інтенсивності розрахуємо як функцію деякого порогового значення. В подальшому, для розрахунку сумарної похибки при

виявленні зон турбулентності різної інтенсивності оберемо рівень порогового значення таким чином, щоб забезпечити мінімальну похибку при визначенні зони турбулентності потрібної інтенсивності.

Для виявлення зон небезпечної турбулентності проведемо розділення явища атмосферної турбулентності за ознакою її інтенсивності. Для цього розрахуємо ймовірність прийняття вірного рішення при визначенні зон турбулентності різної інтенсивності та ймовірність помилкової тривоги. Ймовірність прийняття вірного рішення та ймовірності помилкової тривоги для випадків турбулентності різної інтенсивності розрахуємо як функцію деякого порогового значення. В подальшому, для розрахунку сумарної похибки при виявленні зон турбулентності різної інтенсивності оберемо рівень порогового значення таким чином, щоб забезпечити мінімальну похибку при визначенні зони турбулентності потрібної інтенсивності.

На рис. 4.52 наведено приклади змодельованої ймовірності виявлення зон сильної турбулентності у випадку наявності сильної та слабкої турбулентності як функцію порогового значення.

На рисунку впродовж вісі  $y$  відкладено значення ймовірності, впродовж вісі  $x$  відкладено значення порогового рівня.

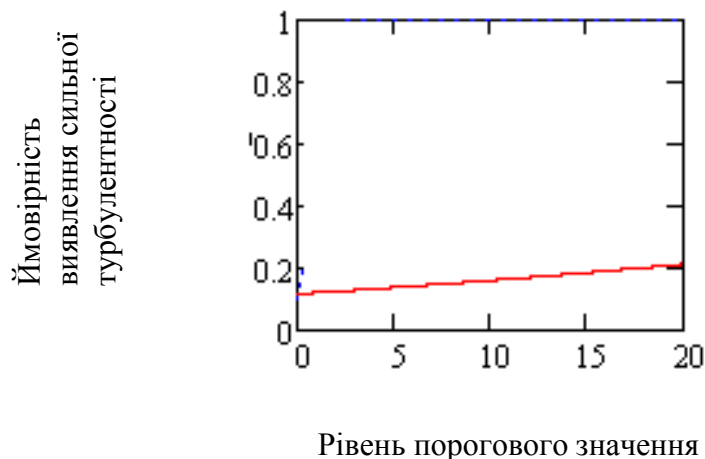


Рис. 4.52 Ймовірність виявлення зон сильної турбулентності у випадку наявності сильної та слабкої турбулентності

З рис. 4.52 можна побачити, що зі збільшенням значення порогу збільшується ймовірність виявлення зон сильної турбулентності. Розрахунок ймовірності помилкової тривоги, як функції порогового значення, показано на рис. 4.53.

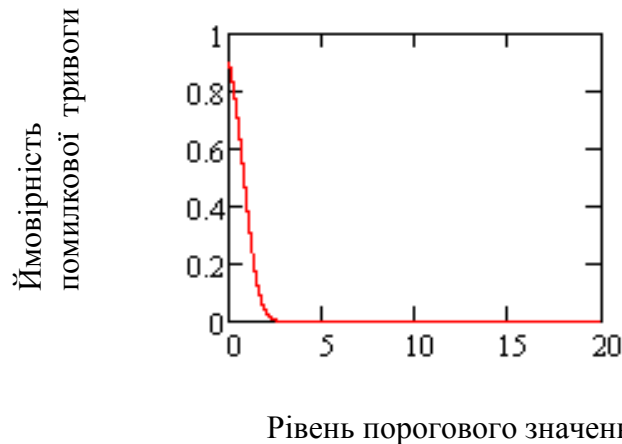


Рис. 4.53 Ймовірність помилкової тривоги при виявленні зон сильної турбулентності у випадку наявності сильної та слабкої турбулентності

З рис. 4.53 можна побачити, що ймовірність помилкової тривоги зменшується із збільшенням порогового значення. На рівні порогового значення, що дорівнює 6.1, ймовірність помилкової тривоги дорівнює нулю.

Ймовірність помилкової тривоги має зворотний характер зміни відповідно до значення ймовірності вірного виявлення зон сильної турбулентності. Такий характер змін ймовірностей дозволяє розрахувати сумарну похибку таким чином, щоб забезпечити її мінімальне значення за умови вибору відповідного порогового рівня. Для остаточного розрахунку сумарної похибки залишається також врахувати можливість невиявлення зон небезпечної турбулентності. Ймовірність невиявлення зон небезпечної турбулентності як значення порогового рівня показано на рис.4.54.

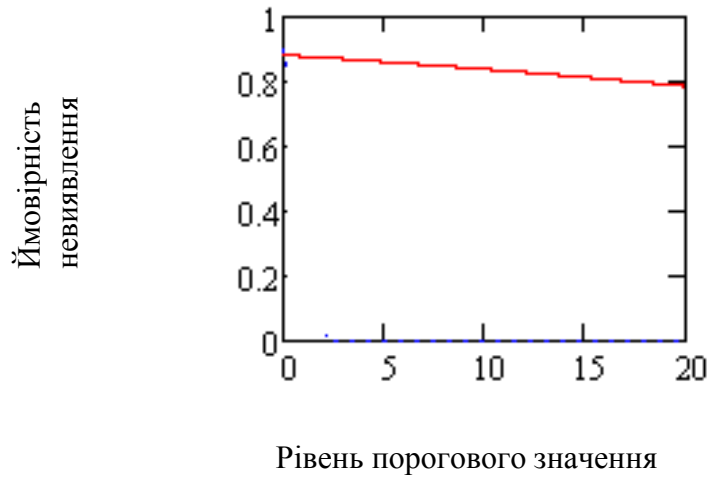


Рис. 4.54 Змодельована ймовірність невиявлення зон небезпечної турбулентності як значення порогового рівня для випадків сильної та слабкої турбулентності

Відповідно до змодельованої залежності, ймовірності невиявлення зон небезпечної турбулентності, що наведені на рис. 4.54, можна сказати, що факт невиявлення зон небезпечної турбулентності залишається доволі високим. Сумарна похибка виявлення зон сильної турбулентності у випадку наявності сильної та слабкої турбулентності показано на рис. 4.55.

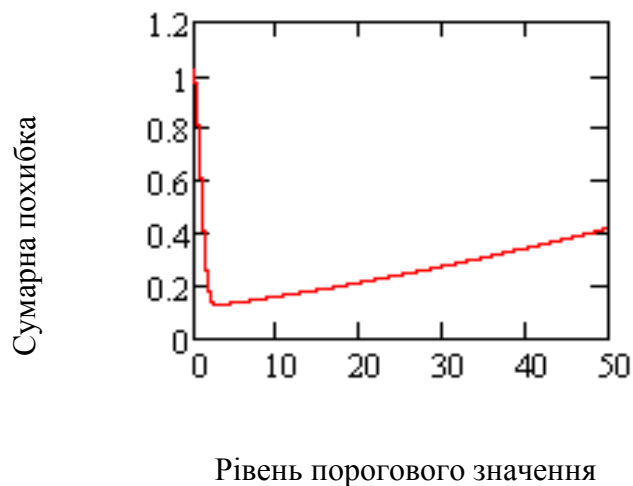


Рис. 4.55 - Змодельована сумарна похибка виявлення небезпечної турбулентності у випадку наявності сильної та слабкої турбулентності

Як видно з рис. 4.55 мінімальне значення сумарної похибки знаходиться поблизу порогового значення, що дорівнює 2 та має значення порядку 0.1. Саме це значення ми можемо розглядати як оцінку потенційної ймовірності виявлення небезпечної турбулентності поляриметричним радіолокатором.

Для градації турбулентності за ознакою її інтенсивності, проведемо розрахунки ймовірності сумарної похибки як функції порогового значення для випадків помірної, сильної та дуже сильної турбулентності. На рис. 4.56 – 4.58 наведено приклади розрахунків сумарної похибки для випадків визначення зон помірної, сильної, та дуже сильної турбулентності. Розрахунки для сильної турбулентності у даному випадку проводились для випадку наявності помірної та сильної турбулентності.

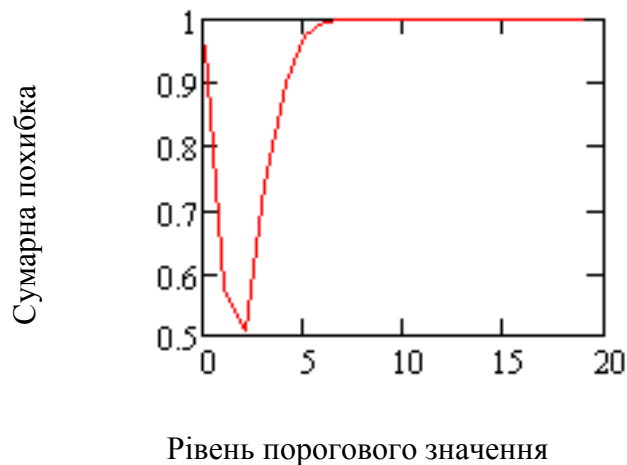


Рис. 4.56 - Ймовірність сумарної похибки як функції порогового значення для випадку визначення помірної турбулентності

Розрахунки для рис. 4.56 проводились для випадку визначення зон помірної турбулентності за наявності зон слабкої та помірної турбулентності.

Розрахунки для рис. 4.57 проводились для випадку визначення зон сильної турбулентності за наявності зон помірної та сильної турбулентності.

Розрахунки для рис. 4.58 проводились для випадку визначення зон дуже сильної турбулентності за наявності зон сильної та дуже сильної турбулентності.

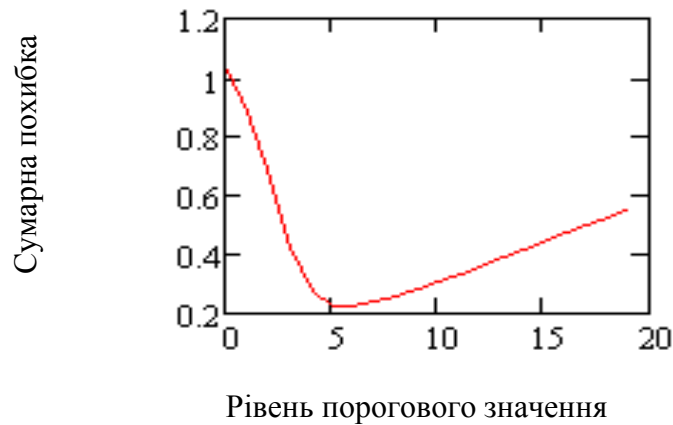


Рис. 4.57 Ймовірність сумарної похибки як функції порогового значення для випадку визначення сильної турбулентності

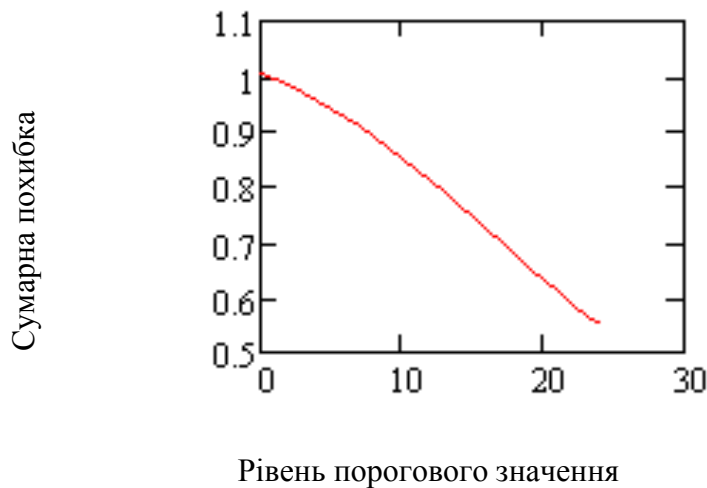


Рис. 4.58 Ймовірність сумарної похибки як функції порогового значення для випадку визначення дуже сильної турбулентності

З рис. 4.56 можна побачити, що мінімальне значення сумарної похибки відповідає значенню порога, що дорівнює 2 у випадку визначення помірної турбулентності. У випадку визначення сильної турбулентності (рис. 4.57) мінімальне значення сумарної похибки відповідає значенню порога, що приблизно дорівнює 6 та має порядок 0,1. Мінімальне значення сумарної похибки постійно зменшується з підвищенням рівня порога у випадку визначення дуже сильної турбулентності (Рис. 4.58). Для того, щоб розпізнати

випадки сильної, що відповідає значенню прирощення перевантаження більше  $1g$  та дуже сильної турбулентності, що відповідає значенню прирощення перевантаження більше  $2g$  значення рівня порогу доцільно обрати поблизу 20. В даному випадку необхідно зазначити, що відповідно до таблиці 4.1, будь яка турбулентність, значення прирощення перевантаження для якої складає більше, ніж  $1g$ , розглядається як небезпечна для виконання польотів. Врахуємо цей факт для вибору значення порогу для того, щоб відокремити зони небезпечної турбулентності, та оберемо його на рівні поблизу значення 6.

Класифікація турбулентності за ознакою її інтенсивності відповідно до шкали ІСАО (таблиця 4.1) та на базі поляризаційних характеристик відбитої від ансамблю гідрометеорів електромагнітної хвилі наведено на Рис.4.59.

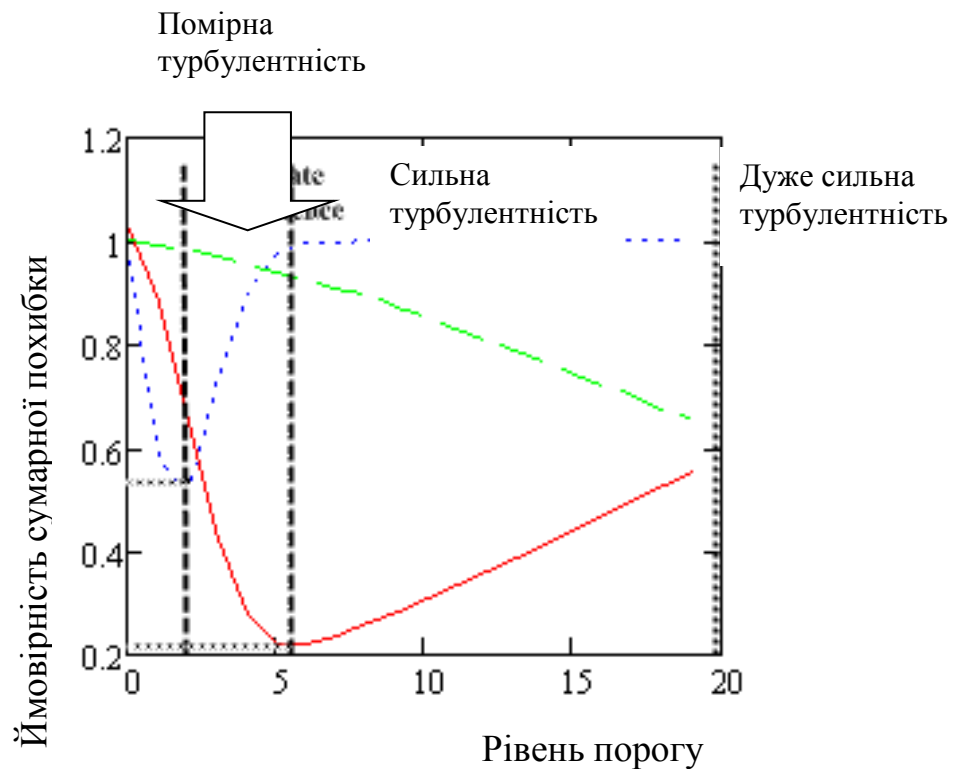


Рис. 4.59 Класифікація турбулентності за ознакою її інтенсивності

На рис. 4.59 впродовж вісі  $y$  відкладено рівень ймовірності сумарної похибки при визначенні турбулентності різної інтенсивності. Впродовж вісі  $x$  відкладено значення дисперсії випадкового процесу зміни низькочастотної складової відбитої від ансамблю гідрометеорів електромагнітної хвилі, що є

наслідком зміни кута поляризації відбитої електромагнітної хвилі. Саме цей параметр ми обрали у якості інформаційного параметру.

На рис. 4.59 суцільна лінія відповідає ймовірності сумарної похибки як функції значення порогу для випадку визначення сильної турбулентності. Лінія крапками відповідає ймовірності сумарної похибки як функції значення порогу для випадку визначення помірної турбулентності. Штрихова лінія відповідає ймовірності сумарної похибки як функції значення порогу для випадку визначення дуже сильної турбулентності.

На рис. 4.59 вертикальні штрихові лінії розділюють зони значень інформативного параметру, що відповідають різній інтенсивності турбулентності. Розділення проводилось за умов мінімального значення ймовірності сумарної похибки. На рис. 4.59 можна побачити, що розділення зони, що відповідає сильній турбулентності від тієї, що відповідає помірній можна зробити з більш високим рівнем ймовірності, ніж розділення між зонами помірної та слабкої турбулентності. Загальна ймовірність визначення сильної турбулентності має порядок 0.1, що відповідає результатам, які були одержані за допомогою інших методів, наприклад методу визначення і класифікації турбулентності за допомогою ширини доплерівського спектру.

#### **4.2.4 Статистичний алгоритм виявлення зон небезпечної для польотів турбулентності**

З використанням даних розділу 3.3 розроблено статистичний алгоритм виявлення зон небезпечної для польотів атмосферної турбулентності.

Синтез статистичного алгоритму виявлення зон небезпечної для польотів атмосферної турбулентності ставиться як задача виявлення зон небезпечної турбулентності на основі інформативного параметру розподілу дисперсії обвідної відбитого від хмар або опадів радіолокаційного сигналу.



За такого підходу гіпотеза про наявність слабкої та помірної турбулентності відповідно до шкали ІКАО розглядається як альтернатива випадку наявності сильної або дуже сильної турбулентності.

В загальному випадку метод реалізує різні гіпотези виявлення турбулентних зон з різною інтенсивністю:

Гіпотеза 1 розглядається як альтернатива наявності помірної турбулентності випадку наявності слабкої турбулентності.

Гіпотеза 2 розглядається як альтернатива наявності сильної турбулентності випадку наявності помірної турбулентності.

Гіпотеза 3 розглядається як альтернатива наявності дуже сильної турбулентності випадку наявності сильної турбулентності.

У випадку найпростішої реалізації алгоритму слабка та помірна турбулентність вважаються такими, що не є небезпечними для польотів на відміну від сильної та дуже сильної турбулентності, що вважаються небезпечними для польотів повітряних суден. В такому випадку логарифм відношення правдоподібності в якості дискримінантної функції

$$F(x) = \ln \frac{p(x/\omega_{\text{слабка}})}{p(x/\omega_{\text{помірна}})}, \quad (4.16)$$

де  $p(x/\omega_i)$  - розподіл інформативного параметру  $x$  для випадку небезпечної турбулентності

Дискримінантна функція розраховується з використанням даних комп'ютерного моделювання для знаходження оцінок розподілу параметрів.

Використовуючи обмежений набір розподілів інформативного параметру можна дістати недвозначного визначення випадків «незначної» турбулентності або «небезпечної» турбулентності. Таким чином, статистичний алгоритм виявлення можна привести до розрахунку значення дискримінантної функції  $F(x)$  та значення порогового рівня  $F_0$ :

$$\begin{cases} F \geq F_0 \Rightarrow \text{імовірність виявлення} \\ F < F_0 \Rightarrow \text{імовірність хибної тривоги} \end{cases} \quad (4.17)$$

Значення порогу  $F_0$  обирається відповідно до критерію якості. В якості критерію можна обрати задовільне відношення ймовірності виявлення до ймовірності хибної тривоги.

## Висновки до розділу 4

1. В даному розділі проведено комп'ютерне моделювання за новими поляриметричними методами, що представлені та описані в третьому розділі даної дисертаційної роботи. Зокрема, проведено математичне моделювання перерозподілу енергії поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів для демонстрації можливостей поляриметричного методу щодо чутливості до динамічних атмосферних явищ; також проведено комп'ютерне моделювання за поляризаційним методом одержання інформації про турбулентність в атмосфері за допомогою радіолокаційної системи з однією антеною фіксованої поляризації.

2. Одержано математичні вирази для розрахунку енергії, що приймаються антенами, які налаштовані приймати сигнали з різними кутами поляризації (відмінними від основної та ортогональною до неї поляризаціями).

3. Аналіз результатів комп'ютерного та математичного моделювання енергетичного розподілу енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу показав, що даний розподіл можна використовувати для аналізу інтенсивності турбулентності та градієнту вітру, як факторів, що викликає вібрацію та деформацію крапель. Це відбувається завдяки тому, що при збільшенні амплітуди вібрації крапель енергетичний рівень складових спектра на вході приймальної антени з основною поляризацією зменшується, як і рівень самого сигналу. Відповідно енергетичний рівень складових спектра на вході приймальної антени з поляризацією, що є відмінною від основної поляризації, збільшується. Найбільша зміна енергетичного рівня відповідає краплям більшого розміру.

4. За результатами математичного та комп'ютерного моделювання можна сказати, що для одержання інформації про

еквівалентний розмір рідких гідрометеорів доцільно проводити зондування з кутом поляризації  $54,7^{\circ}$ . Для оцінювання внеску тільки вібраційної складової доцільно використовувати антену, що налаштована на кут поляризації  $144,7^{\circ}$ , тобто є ортогональною до зондувальної хвилі, що має кут поляризації  $54,7^{\circ}$ .

5. Аналіз результатів моделювання часового розподілу енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу показав, що таку інформацію можна використовувати для визначення кількості крапель конкретного розміру та ступеня деформації різних крапель, що викликана впливом вітру або вітрових явищ.

6. Спільне використання просторового та часового розподілу енергії поляризаційних складових відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу можна використовувати для одержання інформації про розподіл крапель за розмірами, визначення швидкості вітру та інтенсивності атмосферної турбулентності.

7. Аналіз результатів моделювання за методом одержання інформації про турбулентність в атмосфері за допомогою радіолокаційної системи з однією антеною фіксованої поляризації показав, що згідно з моделлю процесу формування поляризаційної модуляції відбитого від ансамблю гідрометеорів радіолокаційного сигналу, зміна інтенсивності атмосферної турбулентності в метеоутворенні призводить до зростання рівня НЧ обвідної ВЧ відбитого радіолокаційного сигналу та збільшенню глибини поляризаційної модуляції.

8. Процес та характер зміни НЧ обвідної відбитого від гідрометеорів сигналу можна використовувати як інформаційний параметр, що містить інформацію про силу впливу випадкового процесу турбулентності на ансамбль гідрометеорів, а отже дає можливість оцінити інтенсивність атмосферної турбулентності.

9. Статистична оцінка можливостей поляриметричного методу визначення інтенсивності турбулентності за характером зміни НЧ складової відбитого від гідрометеорів сигналу показала, що в якості інформаційного параметру можна використовувати дисперсію випадкового процесу зміни низькочастотної складової відбитої від ансамблю гідрометеорів електромагнітної хвилі, як такий, що відображає фізичний процес атмосферної турбулентності. Даний новий підхід демонструє можливість енергетичного оцінювання інтенсивності атмосферної турбулентності за допомогою системи з однією антеною фіксованої поляризації.

10. Результат розрахунків ймовірності прийняття вірного рішення при визначенні зон турбулентності різної інтенсивності та ймовірності помилкової тривоги, а також розрахунок сумарної похибки показав, що ймовірність сумарної похибки має порядок 0.1, а це відповідає результатам, які були одержані за допомогою інших методів, наприклад методу визначення і класифікації турбулентності за допомогою ширини доплерівського спектру відбитої від гідрометеорів електромагнітної хвилі.

11. В цілому результати моделювання показали можливість та доцільність використання поляризаційних методів не тільки для аналізу мікроструктури хмар та опадів, що є відомими на наш час, а також для визначення характеристик атмосферних явищ пов'язаних з вітром, зокрема виявлені зон небезпечної турбулентності та визначення абсолютного значення швидкості вітру, що в комбінації з доплерівськими методами дозволить оперативно визначати повний вітер та удосконалити системи виявлення атмосферної турбулентності.

**Список публікацій здобувача за матеріалами четвертого розділу**

1. Yanovsky F. Classification Algorithms for Weather Radar/ F. Yanovsky Ya.Ostrovsky, V.Marchuk, Yu. Averyanova// 12th International Conference on Mathematical methods in electromagnetic theory, Odesa 2008.: Proc. of the Conference - 07. 2008. - P. 366-368. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: обґрунтування параметрів, що використовуються в класифікаторі, аналіз результатів моделювання.*

2.Averyanova Yu. Reflected signal depolarization estimate with single transceiving antenna/ Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J.Yanovsky// Proc. SPIE. – 2009. Vol. 7502, 75021X (Aug. 5, 2009). (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму моделювання процесів формування поляризаційної модуляції та оцінювання зміни кута поляризації відбитих сигналів, моделювання процесів, аналіз зв'язку статистичних характеристик випадкового процесу зміни НЧ обвідної відбитого від ансамблю гідрометеорів сигналу з інтенсивністю турбулентності.*

3.Averyanova Yu. A. Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization / Averyanova Yu. A. // 34th European microwave Conference EuRAD 2004, 11-15 October 2004, Amsterdam. The Netherlands.: Conference proc. 10., 2004. - P. 20-32.

4.Averyanova Yu. Statistical Estimation of Polarimetric Method Potential for Dangerous Turbulence Detection in Rain/Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J.Yanovsky //13th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kiev 2010, Ukraine.: Conference proc. – 2010. - P.1-4 (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму класифікації турбулентності за ознакою її інтенсивності на основі оцінки статистичних поляриметричних параметрів при відбитті від опадів та дощу.*

5. Averyanova Yu. Echo-Signal from Hydrometeors. Spatial and Temporal Estimation of Polarization Spectrum Components/ Yu. Averyanova // International

Radar Symposium (IRS 2011), 7-9 September, Leipzig, Germany.: Conference proc. – 2011. - P. 263-266. (Scopus)

6. Averyanova Yu. Turbulence intensity classification based on estimating statistical polarimetric parameters of radar reflections from rain / Yu. Averyanova, F. Yanovsky, A. Averyanov // Telecommunications and Radio Engineering. – 2012. - 71(4). – P.379-385. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: моделювання розподілу інформаційного параметру для випадків різної інтенсивності турбулентності, розробка класифікатора інтенсивності атмосферної турбулентності.*

7. Averyanova Yu. Statistical Algorithm for Turbulence Detection using Polarization Features of Radar Reflections from Rain/ Yu. Averyanova // International Radar Symposium (IRS 2015), June 24-26, 2015, Dresden, Germany.: Conference proc. - P.593-596. (Scopus)

8. Yanovsky F.J. Copula Analysis of Full Polarimetric Weather Radar Complex Signals / F.J. Yanovsky, A.N. Rudiakova, R.B. Sinitsyn, Yu.A. Averyanova // EuRad, 3-7 October, London, UK.: Conference proc. 2016. – P.197-200. (Scopus)

*Особистий внесок здобувача: аналіз результатів моделювання.*

9. Комп'ютерне моделювання аеродинаміки рідких гідрометеорів / Ю.А. Аверьянова, А.А. Аверьянов // Журнал «Технологические системы». – 2006.- № 3– С. 43-45.

*Особистий внесок здобувача: моделювання поведінки крапель різних розмірів під дією вітру різної швидкості. Аналіз результатів моделювання.*

10. Авер'янова Ю.А. Оцінювання ступеня деполяризації відбитих від гідрометеорів радіохвиль амплітудним методом / Ю.А. Авер'янова А.А. Аверьянов, Ф.И. Яновський // Вісник НАУ -К.: НАУ, 2010. - Том 1- С. 100-104.

*Особистий внесок здобувача: розрахунок швидкості деформації рідких гідрометеорів під дією атмосферних явищ, обґрунтування зв'язку швидкості деформації рідких гідрометеорів з відбитим радіолокаційним сигналом.*

11. Авер'янова Ю.А. Статистична оцінка впливу турбулентності на зміну кута поляризації відбитих від гідрометеорів радіохвиль/ Ю.А. Авер'янова, А.А.

Аверьянов, Ф.И. Яновські // Електроніка та системи управління – К: «НАУ-друк», 2010. - Том №2(24). - С.5-11

*Особистий внесок здобувача: аналіз результатів моделювання поведінки крапель різних розмірів під дією вітру різної швидкості. Оцінювання ступеня деполаризації відбитих від сукупності гідро метеорів радіохвиль.*

12. Авер'янова Ю.А. Концепція застосування поляризаційно-чутливих антен для локації об'єктів нестабільної форми / Ю.А. Авер'янова, А.А. Аверьянов, Ф.И.Яновський // Вісник НАУ -К.: НАУ, 2011. - Том 1- С. 27-33.

*Особистий внесок здобувача: моделювання розподілу поляризаційних складових радіолокаційного сигналу при відбиванні від опадів.*

13. Авер'янова Ю.А. Оцінка інтенсивності турбулентності в до критичному режимі оборотної деформації рідких гідрометеорів / Ю.А. Авер'янова, А.О. Аверьянов, Ф.Й. Яновський // Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2012. - Т1. – с. 56-60.

*Особистий внесок здобувача: одержання математичної моделі для оцінювання зміни поляризації відбитого від рідких гідрометеорів сигналу за допомогою однієї приймальної антени з фіксованою поляризацією. Розробка алгоритму.*

14. Авер'янова Ю.А. Просторова оцінка розподілу енергії за складовими поляризаційного спектра відбитого від метеоутворення радіолокаційного сигналу/ Ю.А. Авер'янова// Електроніка та системи управління. – К., 2012. - №1(31). - С. 109-112.

15. Ю.А. Аверьянова, А.А. Аверьянов, Комп'ютерне моделювання аеродинаміки рідких гідро метеорів// Доповідь на науково-практичній конференції «Проблеми підтримки та контролю державного експорту продукції наукоємного виробництва». 5-ий Міжнародний авіа космічний салон «АВІАСВІТ ХХІ». Гостоміль, 11-12 червня 2006р.

*Особистий внесок здобувача: Комп'ютерне моделювання аеродинаміки рідких гідро метеорів. Аналіз результатів моделювання.*



16. Averyanova Yu. Simulation of depolarized signal energy redistribution when reflection from weather target/Yu.A. Averyanova, Ya.I. Puzanov// Міжнародна науково-технічна конференція "ПОЛІТ", НАУ 2009 рік

*Особистий внесок здобувача: моделювання розподілу енергії відбитого радіолокаційного сигналу на приймальних антенах, що налаштован приймати сигнал з різними кутами поляризації. Аналіз результатів моделювання.*

17. Averyanova Yu. Turbulence Intensity Classification Based on Estimating Statistical Polarimetric Parameters/ Yuliya Averyanova, Felix Yanovsky, Anatoly Averyanov // International Conference on Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP-2010), Kiev, Ukraine, October 13-14.: Conference proc. – 2010. - P.95-98.

*Особистий внесок здобувача: статистичне оцінювання можливості поляриметричного методу виявлення турбулентності та визначення її інтенсивності; розрахунки ймовірностей хибної тривоги, виявлення турбулентності, а також сумарної похибки.*

## РОЗДІЛ 5

### УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИКОРИСТАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

П'ятий розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу процесу інформаційного забезпечення екіпажів ПС, аналізу ризиків, які можуть виникнути на різних етапах роботи з інформацією, її одержання та розповсюдження в процесі прийняття та реалізації рішення, а також аналізу сучасного стану та можливостей систем одержання та розповсюдження метеорологічної інформації для його удосконалення та зменшення ризиків в процесі прийняття рішень за рахунок введення нової концепції удосконалення процесу глобального спостереження, обміну та розповсюдження метеорологічної інформації, що передбачає використання сучасних та нових запропонованих систем одержання, розповсюдження та обміну метеорологічною інформацією. На основі проведеного аналізу запропоновано низку корегувальних заходів, які необхідні для підтримання встановленого рівня ефективності забезпечення польотів в процесі удосконалення метеорологічного забезпечення аеронавігації.

#### **5.1 Психофізичні особливості сприйняття інформації пілотом в процесі прийняття рішень**

Пілотування ПС, робота фахівців, що задіяні в обслуговуванні та наданні послуг членам екіпажів ПС відносяться до IV категорії напруженої праці [106]. Відповідно до характеристики важких факторів праці членів польотних екіпажів ПС ЦА, до четвертої групи відносяться працівники, енерговитрати яких за добу дорівнюють 3 700 – 4 300 ккал відповідно. Також треба прийняти до уваги, що польоти ПС характеризуються високими нервово-емоційним навантаженням в умовах підвищеного ризику, що також значно впливає на енергетичні витрати та професійну працездатність [3].

Причини багатьох авіаційних подій часто пов'язані з неадекватним сприйняттям ситуації та втратою людиною чи командою орієнтації. Відповідно до [106, 3] домінуючим фактором, що призводять до авіаційних подій (АП) є людський фактор. Більш ніж 80 % АП пов'язані з діяльністю льотного складу, технічного складу, персоналу ОНР. Отже при розгляданні питань, що пов'язані з підвищенням ефективності та безпеки польотів необхідно приділяти увагу помилкам сприйняття, які часто пов'язані з особливостями праці та оточуючого середовища, ілюзіями при заході на посадку чи приземленні, помилкового сприйняття інформації, що передається на борт ПС диспетчером УНР, особливо в критичних умовах.

До факторів, що впливають на психофізичні особливості сприйняття інформації, ускладнюють роботу екіпажів ПС, впливають на їх професійне здоров'я, працездатність та безпеку польотів, можна віднести:

- високі рівні авіаційних шумів;
- тривалість сконцентрованого спостереження, що може складати більше 50% від загального робочого часу;
- можлива тривалість робочого дня більше ніж 12 годин та робота в нічні години;
- підвищені рівні загальної вібрації;
- коливання атмосферного тиску при зльоті, посадці, наборі висоти та зниженні;
- знижений парціальний тиск кисню в кабіні (гіпоксія);
- температурний дискомфорт в кабінах;
- незадовільний хімічний та фізичний склад повітря, яким дихають;
- підвищене радіаційне (фонове) випромінювання;
- підвищені електромагнітні поля;
- бовтанки в повітрі та знакозмінні перевантаження ;
- надвисокі випромінювання від наземного та бортового обладнання;
- керування в умовах обмеженого простору, великої маси ПС та його інерційності;

- біометрично несприятливі умови праці;
- *об'єм інформації, що сприймається та передається з щільністю більше ніж 300 повідомлень за годину;*
- робота в умовах дефіциту часу, відповідальності за безпеку інших осіб, небезпеці виникнення особливих ситуацій;
- робота, що пов'язана з напруженістю функцій зору та слуху;
- *непродуктивні втрати часу, що пов'язані з організаційними, метеорологічними, технічними, та іншими причинами [106].*

Робота екіпажів ПС проходить на певній висоті, за умов, які відрізняються від звичних для людини. Організм звичайної здорової людини здатен повноцінно функціонувати до висоти 2 450 метрів (8000 футів) [107]. На такій висоті в кабіні забезпечення рівня кисню в крові людини в стані спокою становить близько 93 %, що не викликає гіпоксії у здорової людини. Відмічається, що симптоми, які викликані кисневим голодуванням можуть з'являтися вже на висоті 1000 метрів. На практиці на такій висоті частіше не виникає значного зниження працездатності, але з підвищенням абсолютної висоти над цим рівнем вже починають з'являтися перші *ознаки гіпоксії*, до яких в тому числі відносяться втома, слабкість, погіршення керуючих дій, погіршення якості переробки оперативної інформації, запаморочення тощо.

При польотах на значних висотах виникають також проблеми, що пов'язані з концентрацією озону, високим рівнем радіації та порушенням біологічних ритмів і сну, що є наслідком швидких міжконтинентальних перельотів [106]. В [108, 109] наведено об'єктивні прояви порушення біологічних ритмів, до яких віднесено:

- уповільнення реакції,
- підвищення інтервалів часу, що необхідний для прийняття рішень,
- провали пам'яті відносно нещодавніх подій,
- помилки в розрахунках,
- бажання примирення з більш низьким стандартом праці.

Рівень відносної вологості в кабіні після 2,5-3 годин польоту знижується і може досягати 5-10 відсотків. Більш того, встановлено [108], що має місце перевищення дозвальної концентрації шкідливих хімічних речовин різного класу небезпеки, наприклад, озону в п'ять разів, акролеїну в 3 рази, аерозолю мастильних масел в 6 разів. Отже, хімічний склад повітря в робочих зонах кабін може перевищувати рівень дозвальної концентрації в багато разів і, як наслідок, мати канцерогенний та мутагенний вплив на людину.

Радіаційне випромінювання, що відноситься до одного з найшкідливіших та найнебезпечніших для здоров'я людини фактора, значно збільшується на висотах від 9000 до 12 000 метрів. Відповідно до результатів досліджень радіаційного фону кабін рейсових ПС, проведених спеціалістами ГОСНИИ ГА та американськими радіобіологами в 1988-1993 роках, показали перевищення звичайного радіаційного фону на висотах та дози опромінення екіпажів ПС:

- на висоті 9000 м – у 31 раз;
- на висоті 11000 м - у 35 разів;
- на висоті 12000 м - у 41 раз.

Більш того на висотах 1000-12000 метрів сонячні спалахи підвищують дози опромінення за декілька годин від 0,7 до 200 мбер/год, іноді до 2000 мбер/год. Додатково до цього, екіпаж ПС знаходиться під постійним впливом НВЧ випромінювання від наземних радіолокаційних систем служб управління повітряним рухом та бортових блоків радіонавігаційних та радіолокаційних систем ПС. Все це призводить до значного ослаблення імунної системи організму, розвитку низки професійних захворювань, а на етапах польоту до погіршення самопочуття членів ПС та зниження уваги.

Шкідливо впливають на організм членів ПС авіаційні шуми, від яких не існує надійних засобів захисту. Крім деяких професійних захворювань, вплив авіаційного шуму викликає головний біль, підвищення тиску та інші негативні прояви, що впливають на працездатність та сприйняття інформації в польоті.

Підвищені рівні *загальної вібрації* викликають зниження зору, точності рухів керування, якості переробки оперативної інформації, знижують увагу,

погіршують просторове орієнтування, ускладнюють вимову, сприяють розвитку перевтоми і тим самим впливають на сприйняття інформації та на роботу членів екіпажів ПС.

Напруженість фізіологічних систем організму є тим вищою, чим складнішою є авіаційна техніка, особливо за умов дефіциту часу та стресових ситуацій, що є одними з основних характеристик сучасних умов польоту. На стресовий стан членів екіпажів ПС вказують наступні фактори:

1. В момент відриву та особливо торкання землі при посадці в благополучних польотах частота серцевих скорочень підвищується до 150-160 за 1 хвилину;
2. у випадках, коли має місце відмова авіаційної техніки, рівень частоти серцевих скорочень сягає 180-200 за хвилину;
3. у більшості членів екіпажів ПС артеріальний тиск в процесі польоту підвищується на 30-45 відсотків від початкового рівня;
4. має місце гіперсекреція гормонів та порушення їх добового ритму.

Все це призводить до стану нервово-емоційної напруги, втомі і, як наслідок, втрати професійної працездатності та можливості адекватного сприйняття інформації в процесі прийняття рішень при пілотуванні ПС.

У випадку виконання польотів в нічні години, фізіологічні функції організму сповільнені, що також є фактором ризику, який сприяє виникненню помилок під час пілотування ПС. Відповідно до аналізу [106] кількість відхилень від завданих параметрів в нічних польотах в 4 рази перевищує показники для польотів, що виконувались в денний час. Це пов'язують з тим фактом, що ступінь функціональних резервів та працездатності пілотів прямо пропорційна тривалості польоту та досягає 40 % при перетині більш ніж трьох часових поясів. Зниження рівня функціональних резервів, в свою чергу, тісно пов'язане зі зниженням показників ефективності льотної діяльності та безпеки польотів (відповідно до [106] до 50 відсотків).

Такий особливий характер праці визначається високою ймовірністю появи в польоті особливого стану психічної дезінтеграції аналізаторних систем, інстинктів, обману почуттів.

Всі перелічені фактори в комбінації або окремо можуть впливати на адекватність сприйняття ситуації людиною, її орієнтацію в просторовому та інформаційному середовищі. Це, в свою чергу, знижує можливості психічної компенсації та призводить до підвищення кількості помилкових дій в процесі прийняття рішень і, як наслідок, може привести до АП.

## **5.2 Оцінка пріоритетності метеорологічної інформації для пілота в процесі прийняття рішень**

Відповідно до положень ІСАО [1] авіаційним користувачам – експлуатантам, членам екіпажів ПС, органам ОПР, адміністрації аеропортів та іншим структурам, що пов'язані з обслуговуванням, плануванням, виконанням польотів надається наступна метеорологічна інформація:

- дані метеорологічних спостережень (фактична інформація) та дані прогнозів погоди;
- надання інформації метеорологічних попереджень у форматах SIGMET , AIRMET;
- попередження про небезпечні явища на аеродромі та попередження про зсув вітру;
- авіаційно-кліматична інформація.

Забезпечення користувачів метеорологічною інформацією для самостійної підготовки здійснюють авіаційні метеорологічні органи (АМО), або брифінг офіси. Метеорологічне забезпечення екіпажів ПС в польоті виконується відповідними органами ОПР, що організовують та забезпечують трансляцію ATIS, VOLMET та інших типів.

Польотна, авіаційно-кліматична, інша консультативна інформація, як вже зазначалось, подається у вигляді кодованих зведень, карт (прогностичних, радіолокаційних, супутникових тощо), таблиць, відкритим текстом, за допомогою радіоповідомлень, та на моніторах бортового метеорологічного обладнання.

При плануванні та виконанні польоту постає питання, як з усього об'єму наданої інформації

- виділити інформацію, яка стане необхідною під час виконання польоту,
- яка інформація допоможе виконати політ з найкращими показниками якості (економічності, регулярності, безпеки),
- яка інформація не є корисною для виконання конкретного польоту ПС.

Для вирішення цих питань необхідно оцінити пріоритетність інформації для пілотів в процесі прийняття рішень.

Пріоритетність можна визначити, як порівняльну характеристику елементів в деякому наборі відносно один до іншого за визначеним критерієм, що дозволяє виділити ті елементи набору, що є більш вагомими відносно обраного критерію.

Критерій – ознака, за якою порівнюються, оцінюються та класифікуються будь-які об'єкти.

Елементами набору, в нашому випадку, є метеорологічна інформація конкретно типу та вигляду. За критерії можна обрати такі ознаки метеорологічної інформації, як її *важливість та оперативність* в процесі прийняття рішення для забезпечення безпеки польоту чи виконання маневру.

Необхідно звернути увагу, що на різних етапах – планування чи виконання польоту, пріоритетності можуть набути різні елементи набору.



Наприклад, на етапі планування польотів та складання розкладу, або підготовки льотного складу до польотів в певні регіони пріоритетною може бути авіаційно-кліматична інформація. Наявність попереджень про небезпечні явища на аеродромі та про зсув вітру набувають пріоритетності під час виконання зльоту або посадки. Фактична та прогностична інформація має оцінюватись в першу чергу під час прийняття рішення на зліт. В процесі виконання польоту оперативна інформація про небезпечні явища за маршрутом польоту, SIGMET, AIRMET, дані бортових систем виявлення небезпечних явищ, є найважливішою.

Для визначення пріоритетності існує багато методів. Відомими є впорядкований список, матриця пріоритетних дій, експертна оцінка, вагове ранжування та інші [110].

### **5.2.1 Оцінка пріоритетності метеорологічної інформації під час виконання польоту методом вагового ранжування**

При вирішенні багатьох практичних задач часто виявляється, що фактори, які визначають кінцеві результати не піддаються безпосередньому вимірюванню [110]. Розміщення таких факторів в порядку відповідно до будь-якої їх властивості називають ранжуванням.

Ранжування доцільно застосовувати у наступних випадках:

1. Коли є необхідність впорядкувати будь-які явища, об'єкти за часом або в просторі. Ситуація, коли є зацікавленість в просторовому або часовому розміщенні (положенні) цих явищ чи об'єктів.
2. Коли є необхідність впорядкувати об'єкти відповідно до будь-якої їх властивості, а не проводити його точне вимірювання.

3. Коли принципово можливо виміряти будь яку властивість, але в даному випадку це викликає труднощі практичного або теоретичного характеру.

В нашому випадку оцінки пріоритетності метеорологічної інформації під час виконання польоту цікаво впорядкувати набір елементів відповідно до важливості інформації для прийняття рішення в польоті за різних умов, а отже виконується другий пункт. Також є зацікавленість в просторовому або часовому розміщенні (положенні) елементів метеорологічної інформації, що відповідає виконанню першого пункту.

Точність та надійність процедури ранжування залежить від кількості об'єктів. Загалом, чим меншою є кількість об'єктів, що ранжуються, тим більш надійно можна встановити ранг об'єкту [110]. В будь якому випадку кількість об'єктів, що ранжується не має перевищувати  $n=20$ . Найбільш надійною є процедура ранжування при  $n < 10$ .

В нашому випадку кількість об'єктів, що ранжується не перевищує 10, а отже виконується основна з точки зору точності та надійності вимога, що дозволяє скористатись методом простого вагового ранжування за одним критерієм для оцінки пріоритетності метеорологічної інформації під час виконання польоту. Сутність методу полягає в попарному порівнянні елементів набору для її ранжування за обраним критерієм. Для цього складемо повний список метеорологічної інформації, до якої має доступ екіпаж повітряного судна під час виконання польоту.

1. Прогноз вітру та температури на висотах.
2. Прогноз особливих явищ погоди (SIGWX).
3. Інформація METAR , SPECI (включно прогноз типу TREND)
4. Прогнози TAF або змінені прогнози TAF для аеропортів вильоту, посадки чи запасних.

5. Інформація SIGMET та відповідні спеціальні донесення з борту ПС за всім маршрутом польоту.

6. Дані бортових радіолокаційних систем спостереження та систем виявлення небезпечних явищ.

Розмістимо метеорологічну інформацію в таблиці 5.1. відповідно до порядкового номеру в списку, що наведений, та проведемо ранжування відповідно до важливості інформації для прийняття рішення в польоті за умови виникнення неочікуваного метеорологічного явища.

З аналізу ранжування відповідно до Таблиці 5.1 можна сказати, що під час виконання польоту на ешелоні, фактична або прогностична інформація про стан атмосфери на аеродромі (METAR , SPECI, TAF) для аеропортів вильоту, посадки чи запасних майже не використовується для прийняття рішення в польоті за умови виникнення неочікуваного метеорологічного явища. Її ранг складає одиницю в порівнянні елементів 3 та 4 між собою. Відомо, що відповідно з методом ранжування, для елементів з однаковою вагою можна обрати ранг 0 чи 1. Ранг 1 обрано не випадково. В даному випадку мається на увазі, що інформація все ж має прийматися до уваги, якщо обирається оптимальна траєкторія польоту за умови запобігання потрапляння у зону з небезпечним явищем. Наприклад, якщо не має значення, з якого боку оминати зону небезпечного явища, приймаючи до уваги повітряний стан та метеорологічне оточення, не можна обирати траєкторію польоту, що веде до аеропорту з складними метеорологічними умовами, щоб виконати умови економічності та безпеки польотів.

### Ранжування метеорологічної інформації

Елементи	1	2	3	4	5	6	Ранг	Пріоритет
1	X	0	1	1	0	0	2	4
2	1	X	1	1	0	0	3	3
3	0	0	X	1	0	0	1	5
4	0	0	1	X	0	0	1	5
5	1	1	1	1	X	0	4	2
6	1	1	1	1	1	X	5	1

Прогностична інформація про вітер та температуру має відповідний ранг 2 та 3, що є меншим від рангу п'ятого елемента 4. Це обумовлюється тим фактом, що прогностична інформація на відміну від оперативної інформації про особливі явища має часові та просторові обмеження і не завжди відповідає реальному стану атмосфери.

Найбільший ранг для прийняття рішення в польоті за умови виникнення неочікуваного метеорологічного явища одержав елемент 6 - оперативна інформація бортових систем ПС. Особливо це стосується випадків виявлення атмосферних явищ, що характеризуються раптовістю виникнення і неможливістю точного визначення місця та зони дії явища сучасними звичайними засобами одержання та розповсюдження метеорологічної інформації. В такій ситуації літак сам перетворюється на мобільний датчик, що одержує та передає інформацію не тільки про стандартні характеристики атмосфери, а і про складні метеорологічні явища, їх інтенсивність та місцезнаходження.

Отже, за результатами оцінки пріоритетності метеорологічної інформації методом ранжування можна зробити наступні висновки для вирішення поставлених питань стосовно пріоритетності використання наданої інформації:

1. Метеорологічна інформація, що є необхідною під час виконання польоту в умовах виникнення складної метеорологічної ситуації це

- оперативна інформація бортових систем ПС, або тих ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища;

- інформація про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET);

- відповідні спеціальні донесення з борту ПС за всім маршрутом польоту.

2. Метеорологічна інформація, що допоможе виконати політ з найкращими показниками якості, таких, як економічність, регулярність та безпека. Для відповіді на це питання потрібно прийняти до уваги етап польоту. Якщо розглядати політ на ешелоні це

- оперативна інформація бортових систем ПС, або тих ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища;

- інформація про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET);

- відповідні спеціальні донесення з борту ПС за всім маршрутом польоту.

3. Метеорологічна інформація, що не є корисною для виконання конкретного польоту. На різних етапах польоту непотрібною може виявитися різна інформація, що немає відношення до конкретного місцезнаходження ПС, але такого не можна сказати про оперативну інформацію бортових систем ПС.

Метод ранжування в «чистому» вигляді використовується доволі рідко. Найчастіше його комбінують з іншими методами для забезпечення більш чіткого розрізнення факторів. В наступному підрозділі проведемо оцінку пріоритетності інформації методом експертних оцінок.

### **5.2.2 Оцінка пріоритетності метеорологічної інформації методом експертних оцінок**

Визначення пріоритетності метеорологічної інформації для успішного виконання польотів можна віднести до задачі оцінювання факторів, що не піддаються прямому вимірюванню та формалізації [110]. Таким чином, доцільно також провести оцінку пріоритетності метеорологічної інформації методом експертного оцінювання. Метод базується на використанні професійного досвіду та інтуїції компетентних фахівців та допомагає одержати кількісні або порядкові оцінки для дослідження багатокритеріальних задач.

Один з найбільш поширених та відносно простих методів експертного оцінювання це метод індивідуальної експертної оцінки з подальшим осередненням [110]. В даному випадку, чим більшою є група експертів, тим успішніше можна виділити риси суб'єктивної невизначеності індивідуальних оцінок.

Основними етапами проведення експертизи є:

1. Формування цілей експертизи та розробка процедури опитування.
2. Формування групи спеціалістів аналітиків (організаторів експертизи).
3. Формування групи експертів.
4. Опитування експертів.
5. Аналіз та обробка інформації (експертних оцінок).
6. Синтез об'єктивної (статистичної) інформації та інформації, що одержана за допомогою експертизи для надання їй зручної для прийняття рішення форми.

Перший та другий пункти зазначених етапів відповідають цілям та умовам даної дисертаційної роботи, отже продовжимо оцінювання з третього пункту зазначених етапів.

### *3. Формування групи експертів.*

В нашому випадку група експертів складає 22 людини, що мають досвід роботи пілотом ПС. Враховуючи той факт, що визначення оптимальної чисельності групи експертів є достатньо складним завданням скористаємося досвідом деяких вчених у цьому питанні [111, 112, 113, 114, 115], а також залежністю між кількістю експертів в групі та середньою груповою помилкою. Крива з [116], що характеризує таку залежність представлена на рис. 5. 1.

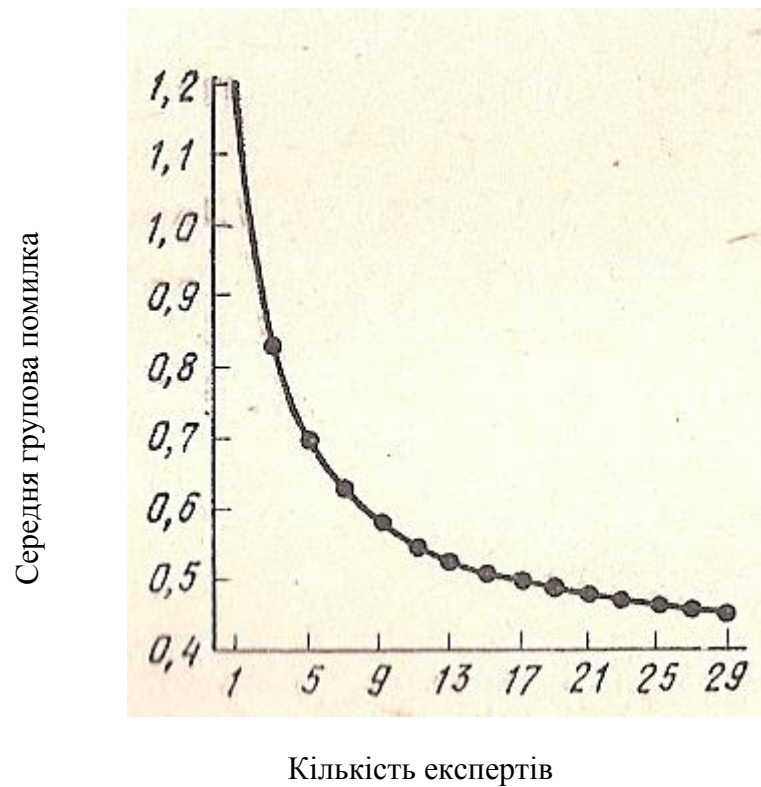


Рис. 5.1 Залежність групової помилки від чисельності групи експертів

Як можна побачити з графіку залежності, зазначена кількість експертів дозволяє одержати середню похибку на рівні, що є меншим за 0,5. Подальше збільшення кількості експертів не буде суттєво впливати на зменшення рівня середньої групової похибки. Також важливо відмітити, що при великій кількості експертів стає складніше виявити їх узгоджену думку. Таке може статися за рахунок зменшення внеску тих думок та поглядів, що є відмінними від більшості думок та поглядів, але не завжди є хибними.

Чотири людини з групи експертів мають основний досвід роботи польотів на малих висотах (польоти за правилами візуальних польотів), чотири людини мають досвід роботи пілотів транспортної авіації (досвід польотів на значні відстані в різних кліматичних зонах), чотири людини з групи – початківці без значного досвіду, але з ґрунтовною теоретичною підготовкою, інші фахівці з групи експертів – пілоти комерційних літаків з різним рівнем досвіду польотів. Отже задовольняються інші вимоги щодо групи експертів – досвід та



суверенність спеціалістів. В даному випадку термін «суверенність» потрібно розуміти в тому сенсі, що був сформульований К. Ерроу в п'яти умовах коректного групового вибору.

#### *4. Опитування експертів.*

Опитування експертів проводилось в різний час в різних групах, тобто їх відповіді мають незалежний характер. Експертам було запропоновано обрати позиції з двох списків з можливістю додати свої пропозиції за необхідністю.

В перший список включено небезпечні метеорологічні явища. Експертам було запропоновано обрати ті з них, які вони вважають найнебезпечнішими, та наявність яких за маршрутом польоту є небажаною. В другий список включено повний перелік метеорологічної інформації, до якої має доступ екіпаж сучасного повітряного судна під час виконання польоту. З нього експертам було запропоновано обрати ту інформацію, якою вони користуються, або хотіли б мати у випадку наявності небезпечних метеорологічних явищ за маршрутом польоту. Також до уваги було прийнято інформацію з особистого досвіду пілотів та їх запитання стосовно сучасних можливостей інформаційного забезпечення екіпажів ПС. Тобто питання, що представлені в анкеті мають риси питань так званого «відкритого типу», що дозволяє скористатися перевагами такого анкетування – можливості виявити нові аспекти проблеми. Головне в питаннях, це все ж таки перелік альтернатив, або так звані питання «закритого типу», що дозволяє запобігти вільної інтерпретації питання з боку експертів та кінцевої несумісності відповідей.

#### *5. Обробка експертних оцінок.*

За результатами опитування стосовно небезпечних для польотів метеорологічних явищ складемо список явищ, які, на погляд експертів, є найнебезпечнішими під час виконання ними польоту, та виникнення яких дещо

лякає пілотів. На початку списку надано явища, що згадувались найбільшу кількість разів.

- Раптові явища, що пов'язані з вітром (зсув вітру, сильні спадні рухи повітря, мікробух тощо)
- Гроза
- Хмари вулканічного попелу.

Цікаво зазначити, що першу позицію згадували всі експерти без винятку, навіть ті з них, що не мали досвіду потрапляння в зони дії явищ, що пов'язані з вітром. Експерти, які мали такий досвід, цікавились та детально розпитували про природу виникнення явища та можливості щодо попередження потрапляння в такі зони.

Грозові явища також фігурували у більшості відповідей експертів. Цікаво зазначити, що ті з пілотів, що мали значний досвід польотів за правилами візуальних польотів, не мали досвіду потрапляння в середину купчасто-дощової хмари. Отже, небезпеку пов'язували знов таки з вітровими явищами, що супроводжують формування та життя грозових хмар, а саме, турбулентність, зсув вітру, фронт поривчастості (лінія шквалів), мікробух тощо. Пілоти, що мали досвід польотів на значні відстані, вказували на небезпеку, що пов'язана з фронтальною хмарністю та неможливістю здійснити політ відповідно до встановлених норм, а саме, відстань між грозовими осередками на екрані РЛС була значно менше 50 км. Така ситуація може спостерігатися впродовж всієї лінії фронту, тобто на сотні та тисячі кілометрів. Вказували навіть, що така ситуація доволі поширена у зимовий період у Середземноморському регіоні.

Хмари вулканічного попелу, та небезпека, що пов'язана з потраплянням у хмару, вказували пілоти транспортної авіації або ті, що мали досвід польотів на значні відстані. Особливу небезпеку пов'язували з неможливістю виявлення хмари вночі за допомогою бортових радіолокаційних систем та відсутністю

оперативної інформації про переміщення та поширення хмари вулканічного попелу. Цікаво відмітити, що переміщення та поширення хмари вулканічного попелу залежить від процесів в атмосфері, її стійкості та реального поля вітру, та не завжди відповідає розрахованій прогностичній інформації.

Оброблення отриманих даних проводилось за наступною методикою:

1. Складено матрицю групових переваг та визначено думку групи експертів за кожним фактором (5.1):

$$R_{gri} = \frac{\sum_{j=1}^m R_{ij}}{m}, \quad (5.1)$$

де  $R_{ij}$  – ранг  $j$ -го експерта за  $i$ -м фактором ( $i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}$ );

$m$  – кількість експертів.

2. Для визначення узгодженості думки групи експертів:

– обчислено дисперсію для кожного фактору  $D_i$  (5.2):

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^m (R_{gri} - R_{ij})^2}{m-1}; \quad (5.2)$$

– обчислено середньоквадратичне відхилення  $\sigma_i$  (5.3):

$$\sigma_i = \sqrt{D_i}; \quad (5.3)$$

– обчислено коефіцієнт варіації  $v_i$  (5.4):

$$v_i = \frac{\sigma_i}{R_{gri}} \cdot 100\%. \quad (5.4)$$

Значення варіації  $v_i \leq 33\%$  підтвердило узгодженість думки експертів за всіма факторами.

3. Порівняно середню думку групи експертів  $R_{gr}$  та кожного експерта в групі  $R_i$  за допомогою коефіцієнта рангової кореляції Спірмена  $r_s$  (5.5):

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (5.5)$$

де  $x_i$  – ранги групи експертів;

$y_i$  – ранги  $i$ -го експерта.

4. Перевірено статистичну значущість коефіцієнту Спірмена за допомогою  $t$ -статистики за довірчої ймовірності  $P = 0,95$ , рівнем значущості  $\alpha = 5\%$  і числом ступенів свободи  $v = n - 2$  за таблицями Ст'юдента.

Значення критичної точки обчислено за формулою (5.6):

$$T_{cr} = t_{cr} \sqrt{\frac{1 - r_s^2}{n - 2}}. \quad (5.6)$$

Визначено, що  $r_s > T_{cr}$ , тому ранговий зв'язок є значущим, що підтверджує узгодженість думок експертів.

5. Визначено узгодженість думок експертів за допомогою коефіцієнту конкордації Кендала  $W$  (5.7):

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} m^2 (n^3 - n) - m T_j}, \quad (5.7)$$

де  $S = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m x_{ij} - a_{ij} \right\}^2$  – сума квадратів різниць (відхилень);

$x_{ij}$  – сума рангів в  $i$ -му стовбці;

$a_{ij} = \frac{1}{2} m(n + 1)$  – середнє значення для сумарних рангів  $j$ -го ряду;

$T_j = \frac{1}{12} \sum_{T_j} (t_j^3 - t_j)$  – кількість повторень кожного рангу  $j$ -м експертом;

$t_j$  – число однакових рангів в  $j$ -му ряду.

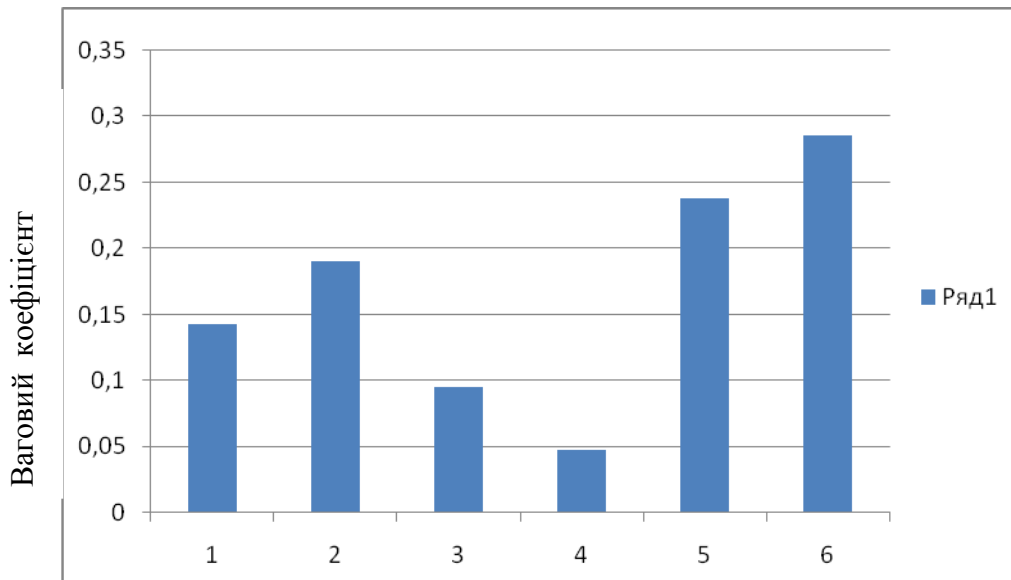
5. Визначено вагові коефіцієнти впливу факторів  $w_i$  за допомогою методу ранжування (5.8):

$$w_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i}, \quad (5.8)$$

$$\text{де } C_i = 1 - \frac{R'_{gri} - 1}{n} \text{ – проміжна оцінка;}$$

$R'_{gri}$  – ранг групи за  $i$ -м джерелом.

Розрахунки виконано за допомогою табличного процесора MS Excel. Вагові коефіцієнти впливу параметрів фактору значимості відповідної інформації в процесі прийняття рішення в процесі польоту ПС представлено на рис. 5.2 (табл. 5.1).



Елементи (метеорологічна інформація відповідно до таблиці 5.1.)

Рис. 5.2 Вагові коефіцієнти впливу параметрів фактору

## 6. Синтез інформації

За результатами опитування стосовно інформації, яку експерти визначили як корисну або бажану у випадку наявності небезпечних метеорологічних явищ за маршрутом польоту, можна скласти наступний список де перша позиція відповідає найнеобхіднішій з погляду експертів та оцінювання визначено, що найбільший вплив на прийняття рішення пілота в процесі польоту мають

- оперативна інформація бортових систем ПС;
- інформація про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET).

Стосовно відповідних спеціальних донесень з борту ПС за маршрутом польоту, експерти виявляли скептицизм з точки зору відповідальності пілотів інших ПС щодо обов'язкового та вчасного інформування про наявність небезпечного метеорологічного явища.

Деякі з експертів також зазначали, що пілоти, які працюють на одну авіакомпанію (у випадку нерегулярних транспортних рейсів), практикують систему повідомлень між собою про реальне метеорологічне становище за схожим маршрутом польоту. Наприклад, пілот першого рейсу повідомляє про економічну недоцільність виконувати політ за наявності небезпечного явища та необхідності значно корегувати маршрут та використовувати значно більше пального. У такому випадку рейс можуть відкласти, або перенести. Тобто пілоти використовували інформацію від тих ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища.

Отже за результатами оцінки пріоритетності метеорологічної інформації методом експертного оцінювання можна зробити наступні висновки для вирішення поставлених питань стосовно пріоритетності використання наданої інформації:

6. Метеорологічна інформація, що є необхідною під час виконання польоту в умовах виникнення складної метеорологічної ситуації це

- оперативна інформація бортових систем ПС;
- інформація про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET);
- оперативна інформація бортових систем від ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища.

Потрібно зазначити, що останній пункт експерти визначали як бажаний, тому що не мали досвіду роботи з автоматичною системою передачі та розповсюдження даних від ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища з можливістю додаткового сигналізування про наявність небезпеки.

2. Метеорологічна інформація, що допоможе виконати політ з найкращими показниками якості, таких, як економічність, регулярність та безпека, у випадку польоту на ешелоні це

- оперативна інформація бортових систем ПС, або тих ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища;
- інформація про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET);
- прогноз особливих явищ погоди (SIGWX).

### 5.3. Удосконалення систем розподілу метеорологічної інформації

Процес оцінки ризиків для безпеки польотів, який розроблено ІКАО представлено в Керівництві з управління безпекою польотів [117]. В документі відмічається [117, 118], альтернативні підходи, які базуються на затвердженій системі управління безпекою польотів тієї чи іншої організації можуть використовуватися в рівній мірі. В такому випадку мінімальні умови щодо системи управління безпекою польотів для оцінки ризиків щонайменше складаються з наступних кроків:

- а) ідентифікація факторів небезпеки для безпеки польотів;
- б) забезпечення прийняття корегувальних заходів, що необхідні для підтримання встановленого рівня ефективності забезпечення польотів;
- в) передбачення постійного контролю рівня ефективності забезпечення безпеки польотів та регулярної оцінки цього контролю;
- г) постійне підвищення загальної ефективності системи управління ризиками.

Для кожної загрози має бути дана оцінка можливих негативних наслідків та результатів. Відповідно до [117] результати за даними такої оцінки мають бути внесені до таблиці показників оцінки ризику для безпеки польотів. Для кожного виду небезпеки необхідно зазначити якісну або кількісну оцінку ймовірності негативних наслідків. В процесі оцінки необхідно приймати до уваги наступні фактори:

- будь-які неточності в наявній інформації;
- будь-який інцидент або інформація про подію, яка має відношення до конкретної загрози та пов'язана з безпекою польотів;
- експертна думка відповідних зацікавлених сторін;
- експлуатаційні умови в яких відбуваються польоти.

Результати цієї стадії оцінки також мають бути зафіксовані в таблиці показників оцінки ризиків для безпеки польотів [117].

Потрібно прийняти до уваги, що заходи для зниження ризиків можуть створювати нові ризики. Отже ефективна система управління безпекою



польотів повинна передбачати процедури постійного моніторингу небезпеки та ризиків, а кваліфікований персонал приймати заходи щодо зниження ризику або припиняти виконання польотів. Приймаючи до уваги появу нових ризиків, а також можливу зміну обставин, що впливають на початкову оцінку принципово важливим є регулярне проведення повторних оцінок ризиків для безпеки польотів, які можуть потребувати внаслідок прийняття цих чи інших заходів для зниження ризику.

### **5.3.1. Аналіз ризиків при одержанні та розповсюдженні інформації в процесі прийняття та реалізації рішення**

Для підвищення ефективності роботи систем одержання та розподілу метеорологічної інформації проаналізуємо ризики, які можуть виникнути на різних циклах (етапах) роботи з інформацією, її одержання та розповсюдження. Для цього необхідно дослідити процес формування та переміщення інформації крізь фізичні та автоматичні елементи системи одержання та розподілу метеорологічної інформації, а також ті ризики, що можуть виникнути на кожному з етапів роботи з інформацією.

Ще раз зазначимо, що система одержання та розподілу метеорологічної інформації включає в себе як автоматичні елементи, наприклад, різні датчики, алгоритми обробки даних, лінії зв'язку, так і людський чинник, наприклад людина-оператор, авіаційний диспетчер або пілот ПС. Всі ці елементи відповідно до схеми запропонованої в [117] розміщені в різних просторових сегментах – наземному, повітряному та космічному. Кожний з елементів може стати джерелом виникнення похибки або помилки на будь-якому з етапів інформаційної циркуляції. Інакше кажучи, робота та вихідні дані всіх складових впливають на кінцеву системну ціль – прийняття рішення в процесі виконання конкретного етапу польоту.

Представимо процес формування та переміщення інформації у вигляді діаграми, що дозволяє дослідити переміщення інформації крізь фізичні та автоматичні елементи системи та причино-наслідковий зв'язок послідовностей

рішень та дій. Діаграма складається з шарів, або сегментів подій, в послідовності переміщення інформації від джерела до людини-оператора, яка має приймати рішення на базі цієї інформації, наприклад пілот ПС, та представлена на рис. 5.3.



Рис. 5.3 Процес формування та переміщення інформації та можливі ризики

Діаграма складається з чотирьох шарів або сегментів, що відповідають визначеній позиції інформаційного переміщення. Для кожного з шарів у правому стовпчику представлено приклади дій, що пов'язані з формуванням та переміщенням інформації, тобто кожний з сегментів є джерелом інформації для наступного (нижчого сегменту). В лівому стовпчику наведено приклади

можливих ризиків, що можуть виникнути на відповідному етапі формування та циркуляції інформації. Тобто проведена ідентифікація факторів небезпеки для забезпечення безпеки виконання польотів відповідно до першого пункту умов щодо системи управління безпекою польотів для оцінки ризиків.

Для першого рівня *Одержання інформації* в правому стовпчику розміщуються елементи, що дозволяють одержати інформацію, яка необхідна для виконання польоту. Таку інформацію можна розподілити по трьох групах відповідно до джерела надходження.

Перша група – джерела інформації космічного сегменту та навігаційної інформації. Інформація з космічного простору може передаватися від супутника до ПС, а також до центру наземного диспетчерського контролю та наземної метеорологічної служби. У формуванні сучасного інформаційного потоку задіяні навігаційні супутники, та супутники зв'язку. Оброблену інформацію з метеорологічних супутників екіпаж ПС одержує переважно через авіаційні диспетчерські служби по лінії зв'язку «земля-повітря», «диспетчер-пілот». Для розповсюдження метеорологічної інформації серед користувачів наземного сегменту використовуються супутникові системи радіотрансляції фіксованої служби (AFS) для розповсюдження глобального повідомлення ОРМЕТ, прогнозів ВЦЗП, інформації центрів стеження за хмарами вулканічного попелу (VAACs) та інформації центрів стеження за тропічними циклонами (TCACs).

Друга група – джерела інформації наземного сегменту та польотна інформація. До джерел інформації наземного сегменту відносяться системи наземних метеорологічних станцій, система аерологічних датчиків та система наземних метеорологічних радіолокаторів. Інформація з наземного сегменту розповсюджується від метеорологічного органа до пов'язаного з ним органа ОПР за допомогою високочастотної радіомовної трансляції VOLMET, а далі пілоту по лінії зв'язку «земля-повітря», «диспетчер-пілот», а також за допомогою радіомовної трансляції D-VOLMET або VOLMET.

До третьої групи можна віднести джерела оперативної інформації повітряного простору: датчики та системи, що розташовані на борту ПС та дозволяють одержати оперативну інформацію про небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту, або система комерційних літаків, що залучені до системи АМДАР. Треба зазначити, що на наш час метеорологічна інформація, яка безпосередньо одержується літаком, що не приймає участі в системі АМДАР, губиться. Також така інформація не завжди є в наявності у диспетчера та інших учасників ПР, що може призвести до ризиків Інформаційного непорозуміння між декількома учасниками повітряного руху або різного бачення розв'язання ситуації пілотом та диспетчером на третьому рівні прийняття рішень. Отже, в сучасному забезпечені повітряного руху метеорологічна інформація від третьої групи, або повітряного сегменту, відіграє доволі обмежену роль.

В другому стовпчику діаграми наведено можливі ризики або фактори небезпеки, що відповідають різним етапам інформаційного потоку. Ризиками, що характерні для першого рівня *одержання інформації* є помилки пристроїв, інформація, що загубилась, порушення в роботі систем зв'язку тощо, що, в свою чергу, сприяє на процес оцінювання ситуації пілотом чи авіаційним диспетчером. Процес оцінювання ситуації з точки зору потенційних ризиків для безпечного та економічного виконання польоту відповідає другому рівню *оцінювання ризиків*. На другому рівні процесу формування та переміщення інформація проходить обробку з ціллю виявити та оцінити потенційні фактори небезпеки, та, за необхідності, запропонувати різні вирішення потенційно небезпечної чи конфліктної ситуації. Обмеження в інформаційній обізнаності, невірна інтерпретація, нерозуміння інформації чи людський чинник, що є ризиками на даному етапі інформаційної циркуляції, можуть призвести до прийняття невірної рішення пілотом щодо вирішення потенційно небезпечної чи конфліктної ситуації.

Таким чином ризики, що виникають на другому рівні, впливають на процес *третього рівня – прийняття рішення*. Ризики, що можуть виникнути на

третьому рівні пов'язані з тим, що, як правило, в організацію та реалізацію повітряного руху залучено багато учасників – пілоти різних ПС, авіадиспетчери тощо. Обмеження в інформаційній обізнаності, невірна інтерпретація, нерозуміння інформації чи людський чинник, що є ризиками на другому етапі інформаційної циркуляції, можуть призвести до інформаційного непорозуміння між декількома учасниками повітряного руху, а також до різного бачення шляху вирішення потенційно небезпечної чи конфліктної ситуації пілотами різних ПС, або пілота та авіаційного диспетчера. Більш того, у випадку централізованого управління, авіаційний диспетчер має вирішувати ситуацію для всіх ПС в зоні відповідальності, на відміну від пілота ПС, який вирішує ситуацію тільки для одного ПС, що також сприяє різному баченню шляхів вирішення потенційно небезпечної чи конфліктної ситуації.

Інформація про прийняття рішення, що формується на третьому рівні, є основою для *четвертого рівня – реалізації обраного плану*, на якому пілот ПС має приступити до виконання обраного плану. На цьому рівні можливе виникнення наступних, незалежних від попередніх, ризиків, наприклад неможливість виконання за рахунок технічних проблем.

Треба зазначити, що ризики, які виникли на попередніх рівнях, впливають на прийняття рішення та можливість виконання обраного плану розв'язання потенційно небезпечної чи конфліктної ситуації. Більш того, ризики, що характерні для кожного з окремих рівнів можуть додаватися один до одного та збільшувати ймовірність помилкового прийняття рішення та успішної реалізації розв'язання потенційно небезпечної чи конфліктної ситуації.

Важливим також є той факт, що основна частина АП виникає в так званих неочікуваних умовах експлуатації ПС [3]. В неочікуваних умовах експлуатації оператор не має чітких інструкцій з вирішування позаштатної ситуації, а на його вибір впливають фактори зовнішнього середовища.

Задача прийняття рішення оператором АНС полягає в моделюванні оптимальної дії  $\bar{Y}$  оператора :

$$\bar{Y} = \{ \{ A \}, \Phi(G_{c1}), \Phi(G_{c2}) \} \rightarrow \{ A^* \}, \quad (5.9)$$

де  $\bar{Y}$  - вектор дії оператора;  $\{ A \}$  - множина альтернативних рішень (стратегій, дій);  $\Phi(G_{c1})$  – правило, принцип дії в очікуваних умовах експлуатації ПК;  $\Phi(G_{c2})$  – правило, принцип дії в неочікуваних умовах експлуатації ПК;  $G_{c1}$  – очікувані умови експлуатації ПК;  $G_{c2}$  – неочікувані умови експлуатації ПК;  $\{ A^* \}$  - множина обраних альтернатив.

Вплив факторів зовнішнього середовища на людину-оператора F, які що були систематизовані і формалізовані в попередньому підрозділу. Їх вплив на оператора можна дослідити за допомогою моделей ПР. Тому проблему моделювання і удосконалення діяльності людини-оператора в аеронавігаційній системі як соціотехнічній системі представлено у вигляді кортежу:

$$\{ \{ F \}, \{ \lambda \}, \{ x \}, \{ S \}, \Phi(G_{c1}), \Phi(G_{c2}) \} = \\ \langle C, T, A, P, Q, U, F, \gamma, \rho | M_{пр}, M_c | Y_{пр}, Y_c, Y_{G,Go} \rangle = \{ A^* \}, \quad (5.10)$$

*Вихідні дані:*  $F = \{ F_1 \}$  - множина факторів, що впливають на прийняття рішення;  $\Omega = \{ \lambda \}$  – рівень невизначеності задачі прийняття рішення, умови прийняття рішення;  $X = \{ x \}$  – модель оператора;  $S = \{ s \}$  - умови виконання польоту ПС (нормальна ситуація, ускладнення умов польоту, складна ситуація, аварійна ситуація, катастрофічна ситуація);  $\Phi(G_{c1})$  – правило, принцип дії в очікуваних умовах експлуатації ПК;  $\Phi(G_{c2})$  – правило, принцип дії в неочікуваних умовах експлуатації ПК;

*Розрахункові дані:*  $C = \{ c_i \}$  – множина цілей (мінімізація ризику, мінімум збитків, час на прийняття рішення, раціональна модель поведінки людини-оператора, тощо);  $A = \{ a_i \}$  – множина альтернативних рішень (стратегій, дій);  $T = \{ t_i \}$  – множина тривалостей дій на виконання процедур для визначення часу

на ПР;  $P=\{p_j\}$  – множина ймовірностей: виникнення наслідку ПР; станів ситуацій, розвитку польотної ситуації у бік парировання і навпаки, тощо;  $Q=\{q_j\}$  – множина наслідків вибору альтернативи завершення польоту;  $U= \{u_j\}$  – вектор характеристик наслідків  $q \in Q$ , результатів вибору альтернативи завершення польоту;  $\gamma = \{ \gamma_r \}$  - моделі поведінки оператора;  $\rho = \{ \rho_r \}$  – система переваг індивіда в конкретній ситуації вибору;  $M_{np}$  – модель прийняття рішення людиною оператором;  $M_c$  – модель розвитку польотної ситуації;  $Y_{np}$  – вектор прийняття рішення;  $Y_c$  – вектор ситуації;  $Y_{G,G_0}$  – вектор прогнозування розвитку ситуації;  $\{A^*\}$  - множина оптимальних альтернатив.

Вирішення проблеми удосконалення процесу інформаційного забезпечення для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень полягає в моделюванні поведінки людини-оператора в очікуваних і неочікуваних умовах експлуатації ПС, оптимізації прийняття рішень у разі виникнення позаштатної ситуації, оперативного прогнозування розвитку польотної ситуації, мінімізації ризику прийняття рішення, що в цілому веде до підвищення безпеки польотів. Таким чином, моделювання удосконалення процесу інформаційного забезпечення для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень оператора АНС  $\bar{Y}$  у разі виникнення позаштатної ситуації залежить від складових процесу прийняття рішення: сприйняття інформації оператором  $\bar{G}_i^I$ ; ідентифікації ситуації  $\bar{G}_i^{II}$  (етапу польоту ПС, умов польоту (очікувані  $G_{c1}$ , неочікувані  $G_{c1}$  умови експлуатації ПС)), впливу  $F$  факторів зовнішнього середовища при прийнятті рішення  $\bar{G}_i^{III}$  і дії  $\bar{G}_i^{IV}$ :

$$\bar{Y} = Y(\bar{G}_i^I, \bar{G}_i^{II}, \bar{G}_i^{III}, \bar{G}_i^{IV}) = \left| \bar{Y}_c(\bar{G}) - \bar{Y}_{np}(\bar{G}, \bar{G}_0) \right| \rightarrow opt \quad (5.11)$$

$$\inf F_{np} = f_{\min}^N, \sup F_{np} = f_{\max}^N,$$

де  $\bar{Y}_{np} = F(\bar{G}, \bar{G}_0)$  – вектор дії людини-оператора з урахуванням індивідуальних якостей  $\bar{G}_0$  та етапів прийняття рішення  $\bar{G}$  (Рис.4.3.1):

сприйняття інформації  $\bar{G}_i^I$  (рівень 1 на рис. 5.3) , ідентифікації ситуації  $\bar{G}_i^{II}$  (рівень 1 на рис. 5.3), прийняття рішень  $\bar{G}_i^{III}$  (рівень 3 на рис. 5.3) і дії (рівень 4 на рис. 5.3)  $\bar{G}_i^{IV}$  ;

$\bar{Y}_c(G)$  - вектор розвитку ситуації;

$$\bar{Y}_G = F(\bar{G}_i^I, \bar{G}_i^{II}, \bar{G}_i^{III}, \bar{G}_i^{IV});$$

$\bar{G}_0 = \{F_p, F_{np}\}$  - множина факторів, що впливають на прийняття рішення;

$f_{\min}^N$  ,  $f_{\max}^N$  мінімальне (максимальне) значення факторів.

### **5.3.2. Удосконалення процесу інформаційного забезпечення для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень.**

Другим пунктом умов роботи системи управління безпекою польотів для оцінки ризиків є забезпечення прийняття корегувальних заходів, які необхідні для підтримання встановленого рівня ефективності забезпечення польотів.

Для покращення процесу інформаційного забезпечення для зменшення ризиків в процесі прийняття рішення тобто для прийняття корегувальних заходів врахуємо можливості сучасних систем одержання, розповсюдження та обміну метеорологічною інформацією таким чином, щоб зменшити ймовірність можливих ризиків, що можуть виникнути на кожному з етапів формування та циркуляції інформації відповідно до діаграми на рис.5.3.

Для цього модифікуємо діаграму рис.5.3. наступним чином і збільшимо простір складових процесу прийняття рішення відповідно до формули (5.11): В правий стовпчик діаграми додамо додаткові автоматичні та фізичні елементи або дії, що пов'язані з формуванням та переміщенням інформації, а в лівому стовпчику відобразимо їх можливості, що спрямовані на зменшення ймовірності чи усунення можливих ризиків. Такий варіант діаграми процесу формування та переміщення інформації з урахуванням можливості сучасних



систем одержання, розповсюдження та обміну метеорологічною інформацією та додаткові можливості щодо зменшення ризиків показано на рис. 5.4.

З урахуванням сучасних можливостей бортових систем спостереження, супутникових технологій та ліній зв'язку, на першому етапі формування інформаційного потоку мають бути задіяні ПС у якості автоматичних мобільних датчиків про метеорологічне становище, а також супутники спостереження додатково до навігаційних супутників та супутників зв'язку. Ключовим моментом в даному випадку є вимога оснащення ПС сучасними автоматичними системами одержання інформації про небезпечні метеорологічні явища додатково до можливостей проводити автоматичний моніторинг та передачу інформації про стандартні атмосферні характеристики. Система виявлення та повідомлення про небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту має як сигналізувати екіпажу ПС про наявність небезпеки, так і автоматично передавати інформацію в метеорологічні центри та іншим користувачам для корегування та подальшого аналізу метеорологічного стану.

Одночасна передача інформації з мобільних датчиків ПС, супутників спостереження та інших джерел до центру наземного диспетчерського контролю, наземної метеорологічної служби та ПС дозволить зменшити ймовірність помилки за рахунок роботи ліній зв'язку, або ймовірність того, що інформація загубилась. Для цього доцільно використовувати системи ADS-B для розповсюдження метеорологічних даних між ПС та іншими структурами, що задіяні в управлінні ПР. Це дозволить запобігти обмеженню в інформаційній обізнаності, загубленню інформації та можливості виявлення джерел помилкової інформації.

На другому етапі інформаційної циркуляції, етапі оцінки ситуації (оцінки ризиків) доцільно введення таких додаткових елементів, як автоматичне повідомлення бортових систем спостереження та автоматична передача інформації про небезпечні метеорологічні явища з борту ПС. Таке введення, особливо у випадку централізованого управління, дозволить ввести режим

додаткового повідомлення пілота про небезпечний стан, навіть якщо інформація одержана і з борту цього самого ПС.



Рис. 5.4 Діаграма процесу формування та переміщення інформації з урахуванням можливості сучасних систем одержання, розповсюдження та обміну метеорологічною інформацією та додаткові можливості щодо зменшення ризиків

Це дозволить впевнитись учасникам ПР в обізнаності ситуації щоб запобігти інформаційному непорозумінню між декількома учасниками повітряного руху, або різному баченню розв'язання ситуації пілотом ПС та диспетчером (пілотами різних ПС).

На третьому етапі інформаційної циркуляції, етапі прийняття рішень, оперативна інформація з сучасних бортових систем спостереження та виявлення небезпечних для польотів ПС явищ, а також автоматичний обмін інформацією про небезпечні метеорологічні явища між датчиками ПС сприятиме усуненню інформаційного непорозуміння між декількома учасниками повітряного руху та зменшенню ймовірності різного бачення ситуації командами ПС при розв'язанні ситуації, а також зменшенню ймовірності різного бачення ситуації пілота та диспетчера у випадку централізованого управління ПР.

Отже, за рахунок введення концепції використання ПС, як автоматичного сенсора та датчика метеорологічної інформації, а також за рахунок автоматичної передачі та поширення оперативної метеорологічної інформації (включаючи супутникові системи зв'язку), що постійно оновлюється, та можливістю цільового доступу до інформації, яка на думку учасників повітряного руху є найважливішою на конкретному етапі польоту ПС, можна зменшити ризики, що відповідають першому, другому та третьому рівням інформаційної циркуляції. Таким чином людина-оператор або автоматизована система на четвертому етапі процесу формування та переміщення інформації, а саме етапі реалізації обраного плану може сконцентруватись на джерелах інформації та ризиках, що відповідають саме четвертому рівню за їх відсутності на процесі реалізації обраного плану.

## Висновки до розділу 5

1. За результатами оцінки пріоритетності метеорологічної інформації методом ранжування для вирішення поставлених питань стосовно пріоритетності використання наданої інформації з'ясовано:

1.1. відповідно до критерію «необхідності» під час виконання польоту в умовах виникнення складної метеорологічної ситуації, обрано

- оперативну інформацію бортових систем ПС, або тих ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища;

- інформацію про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET);

- відповідні спеціальні донесення з борту ПС за всім маршрутом польоту.

1.2. Щоб з'ясувати перелік метеорологічної інформації відповідно до критерію «економічність, регулярність та безпека» потрібно прийняти до уваги етап польоту.

Якщо розглядати політ на ешелоні це

- оперативна інформація бортових систем ПС, або тих ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища;

- інформація про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET);

- відповідні спеціальні донесення з борту ПС за всім маршрутом польоту.

1.3. Стосовно метеорологічної інформації, що не є корисною для виконання конкретного польоту, та може мати відволікаючу дію на екіпаж ПС показано, що на різних етапах польоту непотрібною може виявитися різна інформація, що немає відношення до конкретного місцезнаходження ПС, але такого не можна сказати про оперативну інформацію бортових систем ПС.

2. За результатами оцінки пріоритетності метеорологічної інформації методом експертного оцінювання з'ясовано, що Метеорологічна інформація, що є необхідною під час виконання польоту в умовах виникнення складної метеорологічної ситуації це

- оперативна інформація бортових систем ПС;
- інформація про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET);
- оперативна інформація бортових систем від ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища.

2.1. Метеорологічна інформація, що допоможе виконати політ з найкращими показниками якості, таких, як економічність, регулярність та безпека, у випадку польоту на ешелоні це

- оперативна інформація бортових систем ПС, або тих ПС, що виконують політ в зоні того ж самого метеорологічного явища;
- інформація про фактичні або очікувані небезпечні явища погоди від відповідних метеорологічних служб (наприклад інформація в форматі SIGMET);
- прогноз особливих явищ погоди (SIGWX).

3. За результатами аналізу ризиків, які можуть виникнути на різних етапах роботи з інформацією, її одержання та розповсюдження. в процесі прийняття та реалізації рішення, а також аналізу сучасного стану та можливостей систем одержання та розповсюдження метеорологічної інформації запропоновано удосконалення процесу інформаційного забезпечення для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень за рахунок можливості сучасних систем одержання, розповсюдження та обміну метеорологічною інформацією, а саме:

- за рахунок використання ПС, як автоматичного сенсора та датчика метеорологічної інформації, а також за рахунок автоматичної передачі та поширення оперативної метеорологічної інформації (включаючи супутникові системи зв'язку), що постійно оновлюється, та можливістю цільового доступу до інформації, яка на думку учасників повітряного руху є найважливішою на конкретному етапі польоту ПС, можна зменшити ризики на етапах одержання інформації, оцінки ризиків та прийняття рішень;

- на рівні реалізації обраного плану людина-оператор або автоматизована система може сконцентруватись на джерелах інформації та ризиках, що відповідають саме четвертому рівню за їх відсутності на процесі реалізації обраного плану.

### **Список публікацій здобувача за матеріалами п'ятого розділу**

1. Аверьянова Ю.А. Динамічна складова глобальної інтерактивної мережі одержання та обміну метеорологічними даними / Ю.А Аверьянова., Ф.Й Яновський // Вісник НАУ - К.: НАУ, 2011. - Том 4- с. 36-41.

*Особистий внесок здобувача: аналіз перспективних напрямків розвитку технічних засобів для одержання оперативної інформації про метеорологічні умови за маршрутом польоту Розробка структурної схеми глобальної мережі*

*одержання та поширення метеорологічної інформації з використанням повітряних суден, як динамічних інтерактивних елементів мережі.*

2. Averyanova Yu. In-flight weather data obtaining and exchange for operative flight path correction / Yu. Averyanova // Наукоємні Технології – К.: НАУ, 2014. - Том 21, №1. – С.86-100.

## РОЗДІЛ 6

### МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ МЕТЕОРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АЕРОНАВІГАЦІЇ

В шостому розділі дисертаційної роботи розроблено та досліджено структуру запропонованої глобальної мережі одержання та розповсюдження інформації з використанням ПС як динамічних елементів системи з використанням поляриметричних засобів ДЗ. В розділі також розроблено та надано рекомендації щодо побудови модернізованої системи метеорологічного забезпечення аеронавігації.

#### **6.1 Структурна схема модернізованого метеорологічного забезпечення аеронавігації**

Вимоги сучасної авіації, програм ICAO та EUROCONTROL такі, як SESAR, NexGen, Free Flight, 4DWxCube ставлять за мету забезпечити розповсюдження інформації (включно метеорологічної) з урахуванням наступних принципів: глобальність, доступність (включаючи доступність за запитом), системність, захищеність, персоніфікованість та сумісність систем.

Відповідно до таких умов в роботі розроблено та представлено архітектуру та структурну схему комплексної глобальної інтерактивної мережі одержання, розподілу, обміну та використання метеорологічної інформації.

На рис. 6.1 та рис. 6.2 показано архітектуру та структурну схему комплексної глобальної інтерактивної мережі для одержання, розподілу, обміну та використання метеорологічної інформації відповідно. Особливість запропонованої мережі відповідно до структурної схеми (рис. 6.1 та рис. 6.2) є те, що повітряні кораблі запропоновано використовувати у якості мобільних датчиків для одержання метеорологічної інформації та носіїв метеорологічного обладнання. Увага приділяється можливості та необхідності розміщення сучасних автоматичних систем одержання та обробки інформації про небезпечні метеорологічні явища на борту ПС для безпосереднього



інформування екіпажів ПС про наявність метеорологічної небезпеки за маршрутом польоту та автоматичної передачі цієї інформації іншим користувачам.

Мережа, що представлена на рис. 6.1 навідріз від таких, що наведені в роботах [119, 120, 48, 121, 49] доповнена зв'язками, які дозволяють в критичний момент польоту акцентувати увагу на найбільш небезпечних ситуаціях в оточуючому середовищі. Тобто сигналізувати екіпажу ПС про наявність небезпеки за маршрутом польоту. Такі зв'язки на рис. 6.1а показані як стрілки автоматичного обміну між ПС та стріла з темною заливкою між ПС та блоком, що репрезентує авіадиспетчерський контроль (Повітря-Повітря та Повітря-Земля). Зв'язки, що показані стрілками зі світлою заливкою репрезентують автоматичний обмін даними компонентів стаціонарної складової з динамічною (Повітря-Земля, Повітря-Космос-Повітря та Повітря-Космос-Земля).

Архітектура інтерактивної глобальної мережі отримання, обміну та поширення метеоданих умовно поділяє систему на три основних простора: наземний, повітряний та космічний (Рис. 6.1). Необхідно зазначити, що завжди існує зв'язок та автоматичний обмін інформацією між цими просторами.

Стаціонарна складова присутня у наземному та космічному просторах, динамічна складова присутня у повітряному та космічному просторах. Умовно можна сказати, що наземна складова – це стаціонарна, а повітряна – динамічна складова комплексної глобальної інтерактивної системи одержання, розподілу, обміну та використання метеорологічної інформації. Складові космічного простору, відповідно до користувача послуг, можуть розглядатися як стаціонарні чи динамічні елементи.

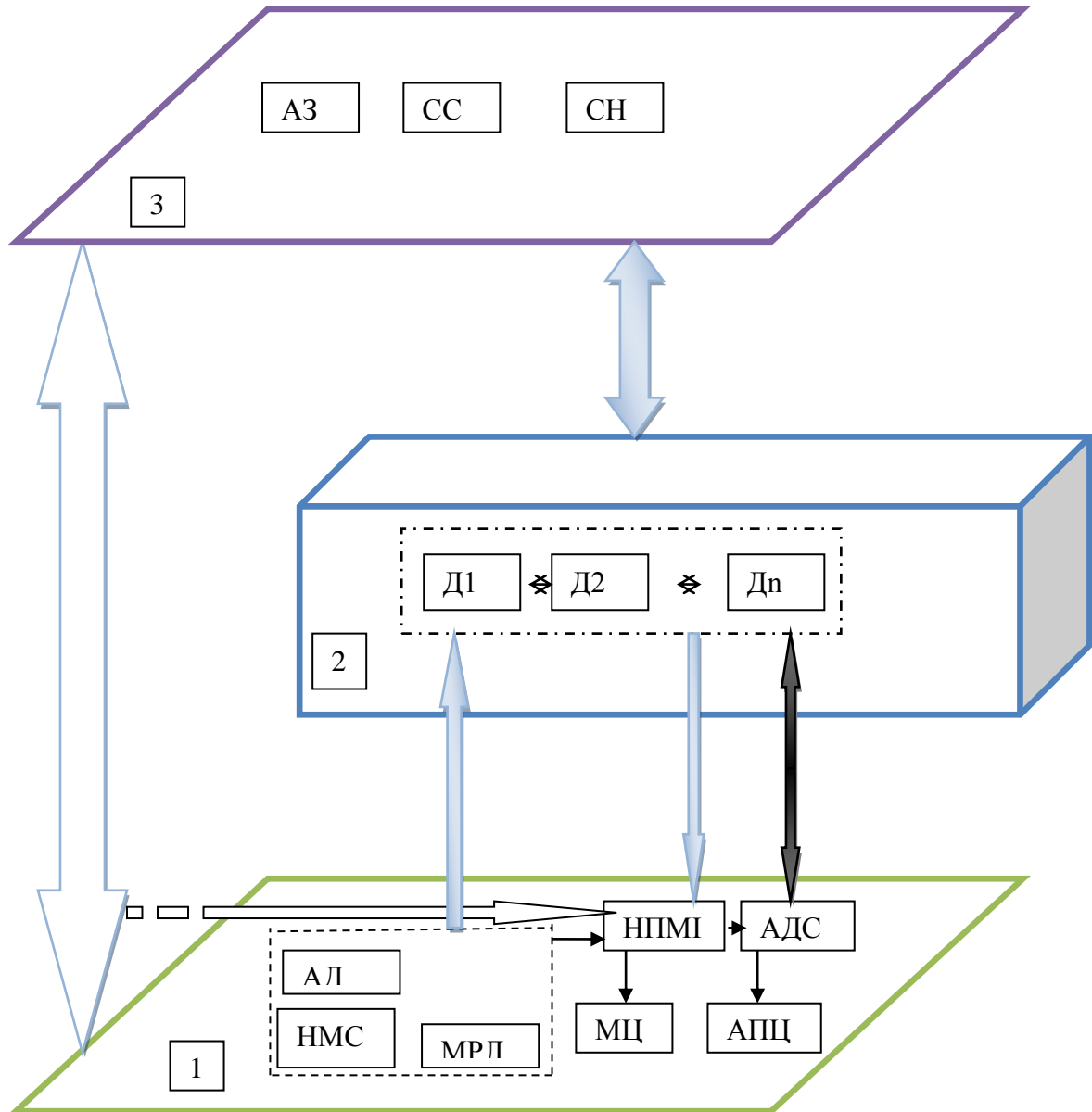


Рис. 6.1 Архітектура інтерактивної глобальної мережі отримання, обміну та поширення метеоданих

Наземний простір відповідно до рис. 6.1 містить наступні блоки:

НМС - система наземних метеорологічних станцій,

АД – система аерологічних датчиків,

МРЛ – система наземних метеорадіолокаторів.

Ці блоки обведені пунктирною лінією як компоненти стаціонарної складової, або складової першого типу [40,41].

Інші блоки наземного простору це

НПМІ – наземні приймачі метеорологічної інформації,  
 МС – авіаційні метеорологічні служби,  
 АДС - авіаційні диспетчерські служби,  
 ІМЦ – інформаційні метеорологічні центри та банки погоди,  
 АПЦ – аналітично-прогностичні центри.

В космічному просторі розміщуються блоки:

СЗ- супутники зв'язку,  
 СН – супутники навігаційні,  
 СС – супутники спостереження.

Блоки космічного простору поділено відповідно до класифікації за їх загальним функціональним призначенням.

Складові повітряного простору це динамічні датчики Д1-Дп, в якості яких можна використовувати ПС з відповідним обладнанням. Система датчиків Д1-Дп обведена штрих пунктирною лінією, як динамічна інтерактивна система одержання та розповсюдження інформації, або система другого типу [40,41 ].

Структурна схема інтерактивної глобальної мережі отримання, обміну та поширення метеоданих показано на рис. 6.1б. Мережа що зображена на рис. 6.2 містить підсистему одержання інформації фіксованого розташування 1, що включає в себе мережі наземних метеорологічних станцій (МНМС) 1.1, аерологічних датчиків (АД)1.2, наземних метеорологічних радіолокаторів (МР)1.3, метеорологічних супутників (МС)1.4, яка з'єднана з наземними приймачами метеорологічної інформації (НПМІ) 4 та супутниками зв'язку (СЗ)3, які незалежно з'єднані з наземними приймачами метеорологічної інформації 4 та динамічну інтерактивну підсистему одержання та розповсюдження інформації 2, що включає в себе з'єднаних між собою за допомогою системи автоматичного передавання інформації 8 та супутниковим зв'язком 3 користувачів метеорологічної інформації – повітряні транспортні засоби (ПТЗ) з відповідним обладнанням в якості давачів оперативної метеорологічної інформації 2.1-2n відповідно, що з'єднані з супутниками зв'язку 3 та наземними приймачами метеорологічної інформації 4, інформація

з виходу яких передається до інформаційних метеорологічних центрів (ІМЦ)5 та банків погоди (БП), до яких підключені аналітично-прогностичні центри (АПЦ)6, з виходу яких інформація надходить до користувачів (КІ) 9, в тому числі ПТЗ2.1-2n і авіаційних метеорологічних та диспетчерських служб (АМ та ДС)7, що також безпосередньо з'єднані з ПТЗ 2.1-2n відповідними системами авіаційного зв'язку.

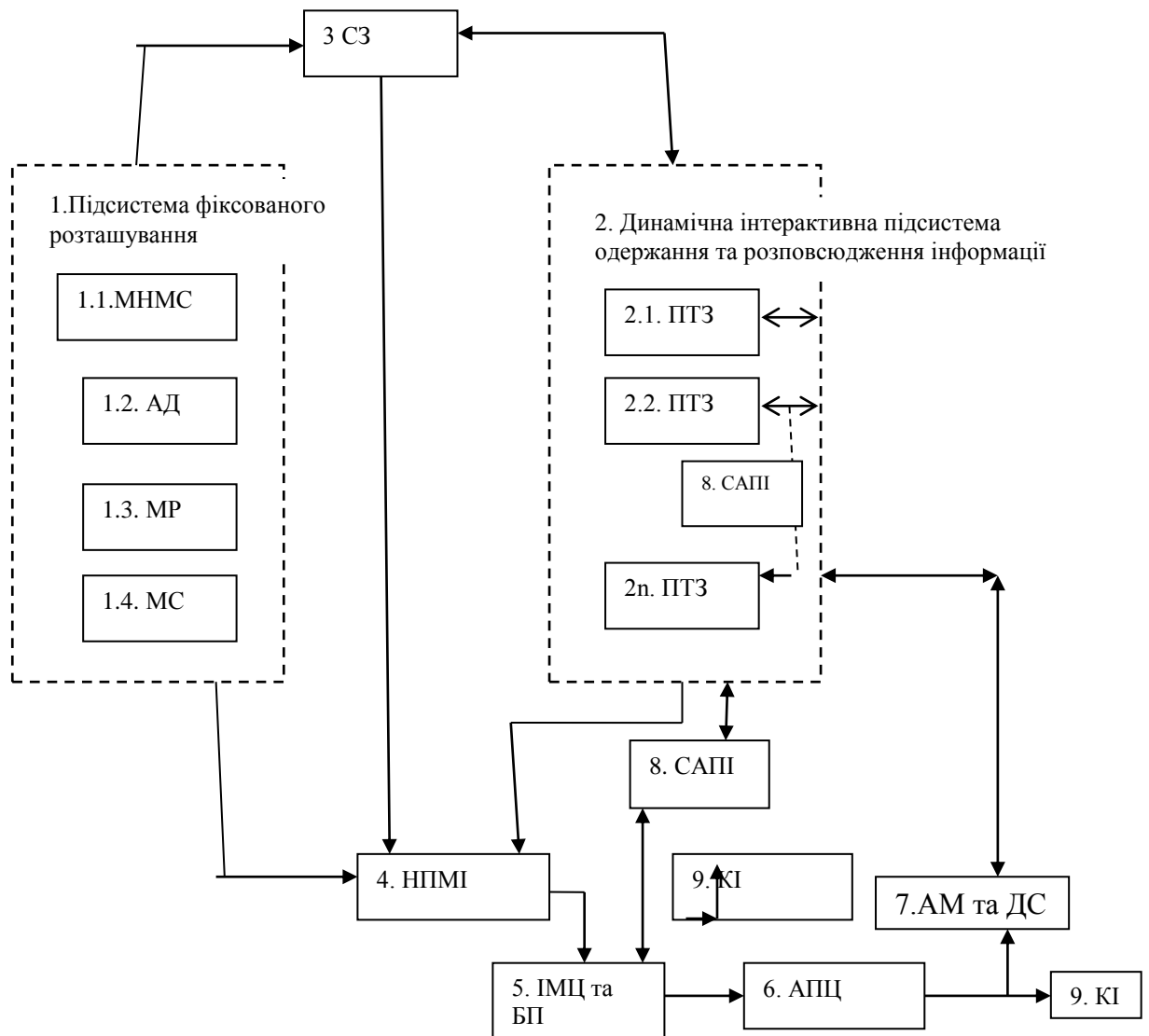


Рис. 6.2 Структурна схема комплексної глобальної інтерактивної системи одержання, розподілу, обміну

Система, що показана на рис.6.1б працює таким чином. Інформація з мережі наземних метеорологічних станцій 1.1, аерологічних датчиків 1.2, наземних метеорологічних радіолокаторів 1.3, метеорологічних супутників

1.4 безпосередньо через наземні приймачі метеорологічної інформації 4 надходить до інформаційних метеорологічних центрів 5 та банків погоди та через супутники зв'язку 3 до систем приймання та обробки інформації та повітряних транспортних засобів. Інформація з динамічної підсистеми 2, що складається з ПТЗ – давачі інформації з відповідним обладнанням 2.1-2n поширюється автоматично між учасниками повітряного руху 2.1-2n, які одночасно є і користувачами цієї оперативної інформації за допомогою систем супутникового зв'язку та системи автоматичного передавання інформації 8, а також надходить до наземних приймачів метеорологічної інформації 4, що передають інформацію до інформаційних метеорологічних центрів 5 та банків погоди, а в подальшому до аналітично-прогностичних центрів 6, які забезпечують готовим інформаційним продуктом користувачів, в тому числі ПТЗ 2.1-2n і авіаційні метеорологічні та диспетчерські служби 7, що також безпосередньо з'єднані з ПТЗ 2.1-2n відповідними системами авіаційного зв'язку.

Складна мережа, що наведена на рис. 6.2 має важливі особливості одержувати об'єднану інформацію з різних джерел та автоматизовано спостерігати за атмосферою та атмосферними явищами з різних просторових позицій – зверху (супутники спостереження), зсередини (ПС, та за необхідністю різні зонди) та знизу (система наземних метеорологічних засобів). Такий підхід надасть можливість сформувати комплект інформації про оперативну метеорологічну інформацію в різних точках маршруту польоту ПС для використання її командами ПС та надання іншим відповідним користувачам. Даний комплект інформації є метеорологічною складовою єдиного інформаційного простору, функціональну схему якого можна подати за допомогою схеми, що показана на рис. 6.3.

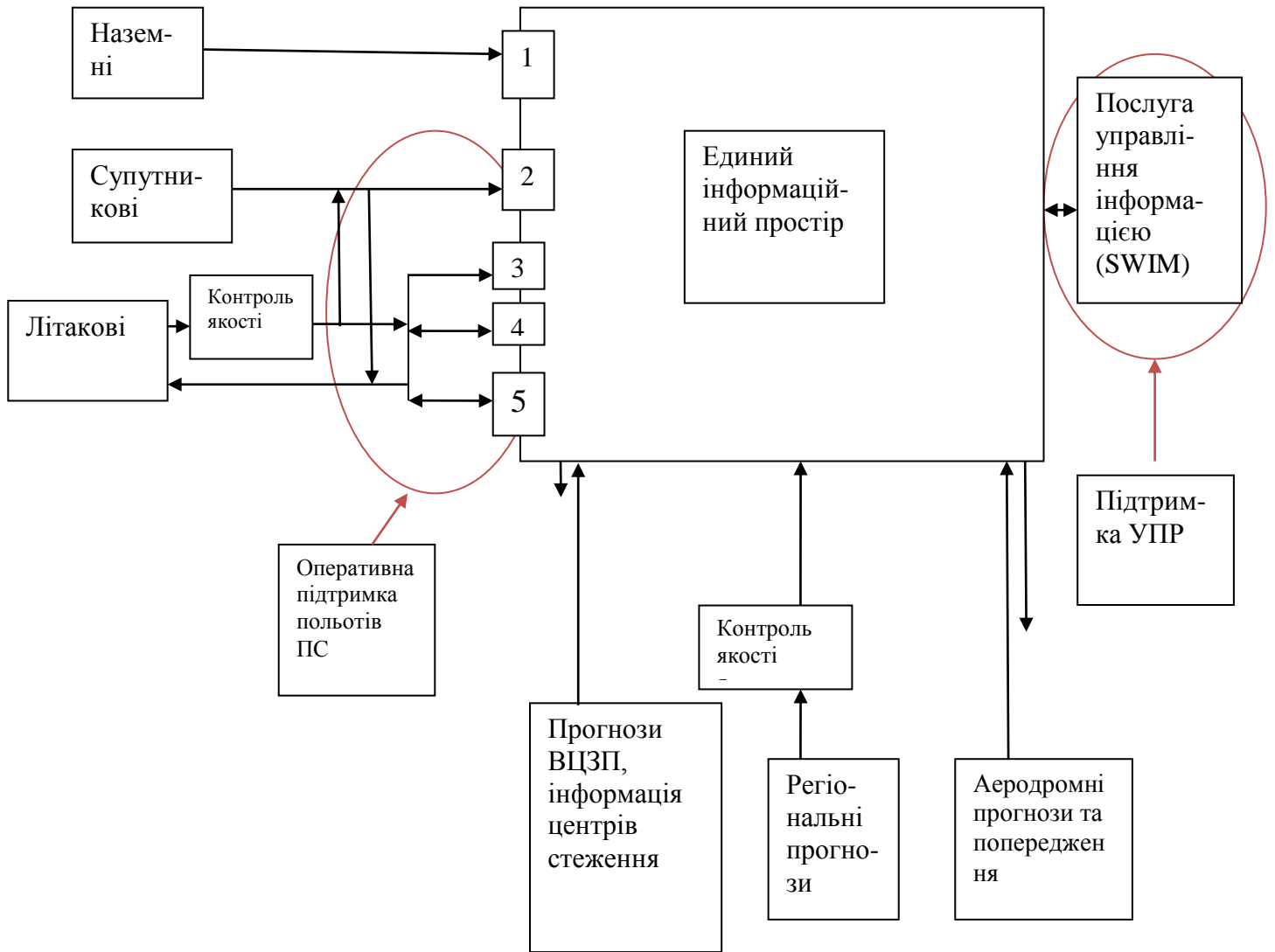


Рис. 6.3 - Функціональна схема метеорологічної компоненти єдиного інформаційного простору

1. Пряма лінія зв'язку
2. Лінія супутникового зв'язку
3. AMDAR
4. ADSB
5. Земля-повітря

Компонента працює наступним чином: інформація надходить до єдиного інформаційного простору від компонентів глобальної розподіленої системи одержання метеорологічних даних (наземні, літакові та космічні) через відповідні системи зв'язку (1-5) для наступного її об'єднання, поширення або

адресного надання користувачам за допомогою «послуги управління інформацією». Проаналізовані та оброблені дані метеорологічних спостережень у вигляді прогнозів та попереджень також надходять до єдиного інформаційного простору за допомогою прямих каналів зв'язку, інформацію з якого, в свою чергу, безпосередньо одержують всесвітні центри зональних прогнозів, органи метеорологічного стеження, а також відповідні аеродромні органи для надання короткострокових попереджень. Користувачі метеорологічної інформації повітряного простору одержують оперативну інформацію за допомогою існуючих каналів зв'язку (наприклад супутникового, або ADSB). Інформація літакових спостережень та регіональних центрів прогнозів надходить до єдиного інформаційного простору після процедури контролю якості (наприклад перевірка відповідності обладнання).

Отже наведена компонента має можливість для забезпечення відповідних користувачів оперативною інформацією за маршрутом польоту, а також є основою для метеорологічного забезпечення систем та органів управління повітряного руху.

Глобальну мережу для одержання та поширення метеорологічної інформації за допомогою послуги управління інформацією (наприклад, SWIM) в системі УПР можна представити наступним чином (рис.6.4):

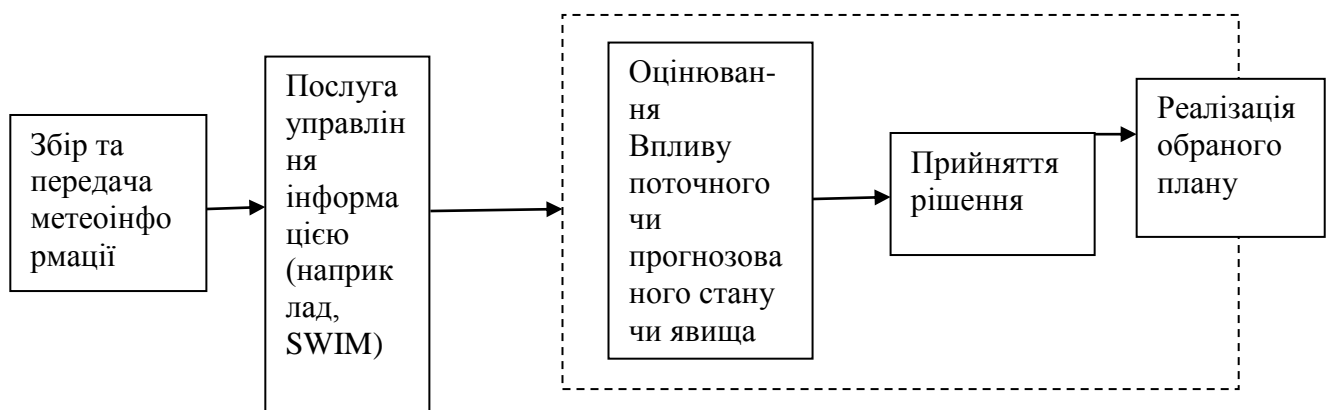


Рис. 6.4 Глобальна мережа для одержання та поширення метеорологічної інформації в системі УПР та процесі прийняття і реалізації рішення

Об'єднана метеорологічна інформація за допомогою послуги «управління інформацією» (наприклад SWIM) надається відповідним службам управління повітряного руху для подальшої її оцінювання з точки зору можливого впливу на процес руху ПС, або небезпеці процесу повітряного руху. Надалі приймається рішення щодо подальших дій. Процес відбувається відповідно до покращеної системи процесу інформаційного забезпечення для зменшення ризиків в процесі прийняття рішення та його реалізації згідно рис. 6.3.

Важливо зазначити, що з інформації, яка одержується за допомогою мережі рис. 6.1, з використанням різних джерел, можна скласти більш повну та достовірну картину метеорологічного стану атмосфери та наявності небезпечних метеорологічних явищ, що неможливо за допомогою тільки одного типу давачів.

Додатковий внесок в підвищення рівня безпеки польотів виникає завдяки зменшенню навантаження на авіаційного диспетчера за рахунок цільового передавання оперативної інформації безпосередньо пілотам ПС з урахуванням конкретного місцезнаходження ПС, а також з урахуванням можливостей сучасних систем обробляти, інтерпретувати та надавати в зручному для сприйняття вигляді метеорологічну інформацію.

## **6.2 Цільовий вибір та використання оперативної метеорологічної інформації**

Одним з принципів, на яких базується побудова глобальної мережі для одержання, розподілу, обміну та використання інформації, відповідно до вимоги програм ICAO та EUROCONTROL, є необхідність забезпечення доступності до потрібної інформації в будь-який час та в будь-якому місці.

Розроблена в даній роботі комплексна глобальна інтерактивна мережа для одержання, розподілу, обміну та використання метеорологічної інформації дозволяє обирати та використовувати оперативну метеорологічну інформацію за потребою від того джерела, який на конкретний момент представляє найбільший інтерес з точки зору інформативності та необхідності.



Наприклад, команда ПС може зробити цільовий відбір інформації від ПС-давача, що виконує політ в тому самому сегменті, або виконував його не набагато раніше за схожим маршрутом польоту.

Структурна схема інтерактивної глобальної мережі отримання, обміну та поширення метеоданих, що показана на рис. 6.1 реалізує цей принцип наступним чином. На рис. 6.1 показано, що блок АДС паралельно одержує таку саму інформацію, як і ПС, що знаходяться в польоті. Блок АДС з'єднано з системою датчики - ПС зворотною стрілою з темною заливкою. Інформація від датчика ПС автоматично передається як екіпажу ПС, так і авіаційно-диспетчерській службі. Отже, пілот, як і авіаційний диспетчер, одночасно володіє не тільки прогностичною інформацією, яка має часові та просторові обмеження, а й оперативною інформацією чітко за маршрутом польоту конкретного ПС. Це дає можливість диспетчеру при виникненні складної ситуації, додатково до автоматичних бортових систем попередження, продублювати пілоту цільову інформацію про виникнення чи існування небезпечного явища в атмосфері за маршрутом його польоту.

Отже така функція системи дозволяє надати потрібну інформацію потрібному користувачу в потрібний момент часу, що є одною з вимог щодо майбутніх систем розповсюдження інформації та авіаційних концепцій нового покоління [123].

Система комплексної глобальної інтерактивної системи одержання, розподілу, обміну та використання метеорологічної інформації додатково до автоматичного надання оперативної інформації має сигналізувати пілоту звернути увагу на ті зони, де значення параметрів перевищують критичні для даного ПС і його режиму роботи. Такий режим роботи системи є найбільш актуальним при виконанні польотів за концепцією Free Flight.

### **6.3 Порівняльний аналіз глобальної системи метеорологічного забезпечення авіонавігації з існуючою**

Відповідно до сучасного процесу забезпечення одержання, розподілу, обміну та використання метеорологічної інформації, екіпажі ПС, що знаходяться в польоті, одержують інформацію від органу ОПП по лінії зв'язку «земля-повітря», «диспетчер-пілот», а також за допомогою радіомовної трансляції D-VOLMET або VOLMET. Органи ОПП, в свою чергу, одержують метеорологічну інформацію від пов'язаного з ним метеорологічного органу. Треба зазначити, що в такому випадку, по-перше, інформація набуває часових та просторових обмежень, по-друге, реальна метеорологічна ситуація може різнитися від такої, як її оцінює авіаційний диспетчер або пілот ПС. Тобто виникає інформаційне непорозуміння між декількома учасниками повітряного руху, що, в свою чергу, може призвести до різного бачення розв'язання ситуації пілотом та диспетчером, або декількома пілотами різних ПС, що знаходяться в одній зоні польоту. Додатково до цього, цілком можливе виникнення помилок пристроїв, порушення в роботі систем зв'язку, що веде до втрати інформації.

Удосконалення процесу метеорологічного обслуговування, що забезпечує метеорологічною інформацією користувачів відповідно до концепцій та програм ICAO та EUROCONTROL та розроблена та представлена в підрозділі 6.1 даного розділу, має місце одночасна автоматична передача, поширення та обмін оперативною інформацією з динамічних ПС-давачів, інших джерел метеорологічної інформації стаціонарного, повітряного та космічного сегментів між собою та до центру наземного диспетчерського контролю і наземної метеорологічної служби.

Отже, пілот, як і авіаційний диспетчер, одночасно володіє не тільки прогностичною інформацією, яка має часові та просторові обмеження, а й оперативною інформацією чітко за маршрутом польоту конкретного ПС. Це дає можливість диспетчеру при виникненні складної ситуації додатково до автоматичних бортових систем попередження продублювати пілоту цільову

інформацію про виникнення чи існування небезпечного явища в атмосфері за маршрутом його польоту. Додаткове звернення уваги на складні та небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту допоможе запобігти нерозумінню чи втраті інформації, або її ігноруванню, що може бути наслідком втомленості, неувважності або розконцентрованості пілота.

Одночасна передача та обмін метеорологічною інформацією між усіма учасниками повітряного руху також допоможе виявити порушення в роботі систем зв'язку та джерела помилкової інформації, а отже, зменшити ризики загублення інформації або втрати каналу зв'язку.

Структурна схема комплексного глобального інтерактивного процесу одержання, розподілу, обміну та використання метеорологічної інформації (рис. 6.3) додатково до автоматичного надання оперативної інформації має сигналізувати пілоту звернути увагу на ті зони, де значення параметрів перевищують критичні для даного ПС і його режиму роботи. Такий режим роботи метеорологічного забезпечення є найбільш актуальним при виконанні польотів за концепцією Free Flight.

Однакова ситуативна обізнаність команд ПС, що виконують політ в одній зоні, та авіаційного диспетчера сприятиме усуненню інформаційного непорозуміння між декількома учасниками повітряного руху та зменшенню ймовірності різного бачення ситуації командами ПС при розв'язанні ситуації пілотом та диспетчером, або пілотами різних ПС, та ефективної реалізації обраного плану.

### ***Аналіз ефективності удосконаленої системи метеорологічного забезпечення авіонавігації***

В авіаційній галузі метеорологічна інформація має значний внесок в прийняття рішення та виробничий процес, що наглядно продемонстровано в п'ятому розділі даної роботи. Використання систем оперативного виявлення небезпечних явищ за маршрутом польоту та поширення інформації між зацікавленими учасниками повітряного руху призводить до прийняття більш обґрунтованих рішень порівнюючи з ситуаціями, в яких рішення приймаються

на основі тільки прогностичних даних, або даних з часовим обмеженням. Таке використання може сприяти росту економічних зисків за рахунок зниження витрат на виробництво та/або підвищення якості чи кількості вихідної продукції.

Для аналізу ефективності запропонованого удосконаленого метеорологічного обслуговування аеронавігації скористаємося моделлю для аналізу економічних вигод [136], що була розроблена з точки зору попередження витрат для внутрішніх рейсів Швейцарії в аеропорту Цюриха та адаптуємо її для запропонованого удосконалення метеорологічного забезпечення.

Модель прийняття рішення для аналізу ефективності запропонованого удосконалення метеорологічного забезпечення з використанням нових поляриметричних методів виявлення небезпечних явищ та використання повітряного судна у якості мобільної платформи для розміщення новітніх засобів з можливістю оперативного обміну між зацікавленими учасниками повітряного руху розроблена з точки зору скорочення витрат авіаліній на паливо та відхилення від траєкторій польоту. Основу моделі складає той факт, що рішення авіакомпанії про перевезення додаткового палива на конкретному рейсі базується на інформації з авіаційних прогнозів. Це означає, що якщо за маршрутом польоту очікуються особливі або небезпечні погодні явища, то може статися потреба використовувати додаткові аеродроми, а отже додатковий запас палива замовляється на випадок збільшення часу польоту у зв'язку з небезпечними метеорологічними умовами. Відхилення від плану польоту призводить до додаткових витрат до яких входить: компенсація пасажирам, трансфер, збір за посадку, паливо, витрати, що пов'язані з репутацією тощо. Отже замовлення додаткового палива працює в якості страхування ризику витрат, що пов'язані з відхиленнями, які можна попередити. Вартість даного страхування дорівнює вартості палива, що використовується для перевезення. Отже авіакомпанії мають обрати або

страховий внесок (витрати на додаткове паливо), або ризик збитків (вартість відхилення від маршруту).

Питання чи може ПС виконувати політ за маршрутом без значних відхилень залежить від фактичних умов погоди за маршрутом польоту та від рішення про наявність додаткового палива на борту ПС [137].

Для вирішення поставленого завдання розглянемо два різних типи погодних умов за маршрутом польоту – сприятливі та несприятливі (небезпечні). Модель прийняття рішень припускає, що в умовах сприятливої погоди політ можливий завжди. При несприятливих умовах політ можливий з ймовірністю  $P$ , якщо додаткове паливо є на борту і з ймовірністю  $P_1$ , якщо паливо відсутнє. Отже відхилення від плану польоту до іншого аеропорту має ймовірність  $1-P$ , якщо паливо на борту присутнє та з ймовірністю  $1-P_1$ , якщо паливо відсутнє. Рис. 6.5 ілюструє даний процес прийняття рішення. За такою моделлю розглядалися 2 випадки – з удосконаленою системою метеорологічного забезпечення та звичайною.

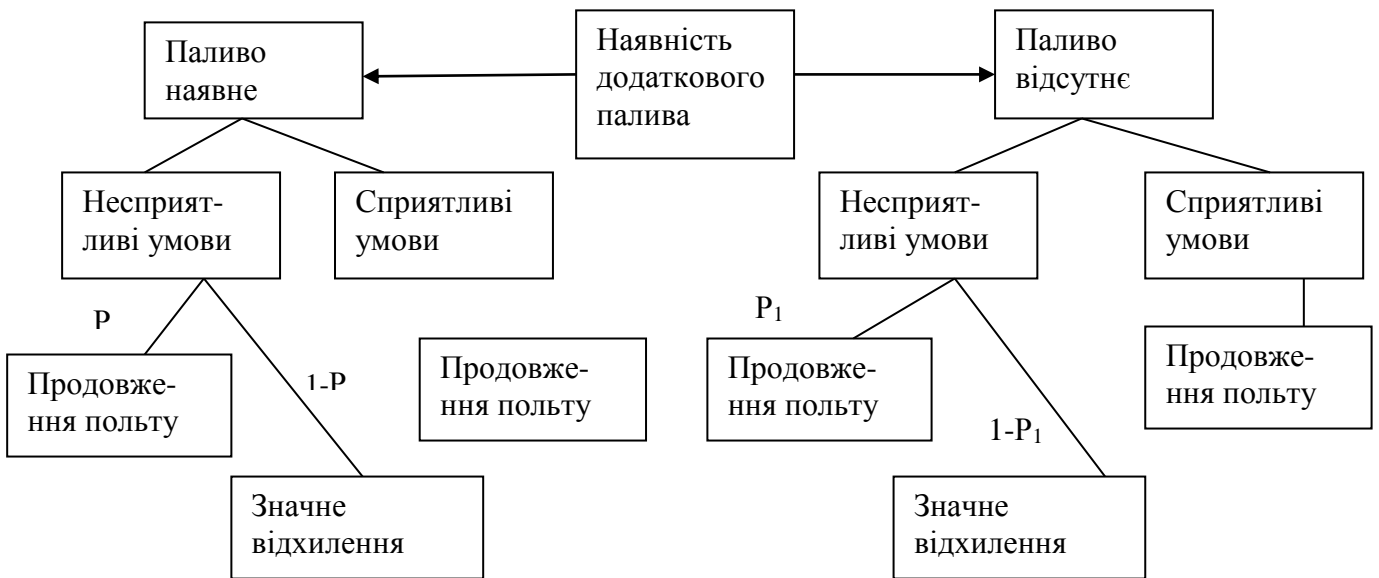


Рис. 6.5 Процес прийняття рішення

Для аналізу економічного зиску від удосконалення процесу метеорологічного забезпечення порівнюємо витрати за кожним з сценаріїв, що очікуються. Витрати авіаційних компаній складаються з витрат на відхилення

від плану польоту (В), у випадку, якщо ПС не може задіяти додатковий аеропорт та з витрат на страхування (І), у випадку наявності додаткового палива на борту. Для визначення витрат, що очікуються з використанням удосконаленої системи введемо змінну витрат для кожної з комбінацій реальних умов за маршрутом польоту та прогнозованих умов та явищ. Дані наведені в Таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

**Витрати, що пов'язані з різними комбінаціями погодних явищ  
інформація про які одержана за допомогою удосконаленого забезпечення  
та сучасного (стандартного)**

		Оперативна інформація про явища за маршрутом польоту	
		Сприятливі	Несприятливі
Стандартна інформація для планування польоту	Сприятливі	<b>C1</b>	<b>H</b>
	Несприятливі	<b>C2</b>	<b>0</b>

В даному випадку C2 є затратами авіакомпанії у випадку наявності інформації про несприятливі метеорологічні умови за маршрутом польоту, але в дійсності, з використанням сучасних систем виявлення можливість виконувати політ без значного відхилення від маршруту польоту зростає. Значення C2 дорівнює вартості страхування І, тому, що авіакомпанія прийняла рішення про необхідність забезпечення додатковим паливом, але не несе витрат на відхилення від маршруту польоту. Витрати C1 та H розраховані на основі вартості страхування та витрат на відхилення від маршруту польоту В та ймовірностей  $P$  та  $P_I$  наступним чином:

$$C1 = C2 + [(1 - p) \cdot B] \quad (6.1)$$

У випадку, коли за даними бортових систем оперативного виявлення небезпечних явищ є несприятлива для польоту ситуація і це збігається з інформацією, що одержується за стандартними процедурами, витрати авіакомпанії С1 дорівнюють сумі витрат на перевезення додаткового палива С2 та ймовірність відхилення від траєкторії польоту при перевезенні додаткового палива  $(1-P)$ , що помножена на вартість відхилення від плану польоту  $(B)$ .

Витрати авіакомпанії Н у випадку, коли за даними бортових систем оперативного виявлення небезпечних явищ є несприятливими для польоту, а інформація, що одержується за стандартними процедурами є сприятливою і на борту не є додаткового палива, витрати дорівнюють ймовірності відхилення від траєкторії польоту  $(1-P_1)$  помноженої на вартість відхилення від траєкторії польоту  $(B)$ :

$$H = [(1 - P_1) \cdot B] \quad (6.2)$$

Для розрахунку витрат авіакомпаній при використанні удосконаленого метеорологічного забезпечення необхідно визначити як часто ситуація, коли інформація, що одержана за допомогою удосконаленого процесу збігалась з тією, що одержана за стандартних процедур. Для цього необхідно визначити відсоток часу, що відповідає несприятливій погоді, та відсоток часу, що відповідає сприятливій погоді. Такі дані можна записати та представити за допомогою таблиці 6. 2:

Таблиця 6.2

### Оцінка збігу ситуацій

		Оперативна інформація про явища за маршрутом польоту		Відсутність новітніх систем
		Сприятливі	Несприятливі	
Стандартна інформація	Сприятливі	Ч11	Ч21	Ч01
	Несприятливі	Ч12	Ч22	Ч02

Витрати, що очікуються, та пов'язані з удосконаленням метеорологічного забезпечення ( $UCT$ ) можна розрахувати перехресним перемноженням таблиць 6.1 та 6.2 наступним чином:

$$UCT = \mathcal{C}11C1 + \mathcal{C}12C2 + \mathcal{C}21H \quad (6.3)$$

В більшості випадків авіалінії транспортують достатню кількість палива для можливості долетіти до одного з альтернативних аеропортів у випадку виникнення небезпечних умов за маршрутом польоту, або в аеропорту приземлення. Звичайно є умова мати палива в достатньої кількості для можливості долетіти до двох альтернативних аеропортів. Такі витрати ( $A$ ) вже враховані при розрахунку витрат без використання удосконаленого метеорологічного забезпечення ( $UCNT$ ) наступним чином:

$$UCNT = \mathcal{C}01C1 + \mathcal{C}02C2 + A \quad (6.4)$$

На основі одержаних виразів можна розрахувати економічну ефективність (цінність) ( $EE$ ) удосконаленої системи метеорологічного забезпечення за наступною формулою:

$$EE = UCNT - UCT \quad (6.5)$$

Для розрахунку економічної ефективності за формулою 6.5 необхідно врахувати економічні та метеорологічні фактори. В якості метеорологічних даних було використано статистичну інформацію з [138]. В якості економічної інформації ціни на паливо та маршрути польотів.

В результаті аналізу було одержано значення економічної ефективності, що змінюються в діапазоні від 81 до 1600 дол. США за політ. Такі варіації обумовлені різними значеннями тривалості польотів.

В розрахунках не врахована вартість розроблення та виробництва новітніх систем оперативного одержання інформації про небезпечні явища, а також можливе зниження вартості одержання інформації за рахунок



використання регулярних ПС у якості мобільної платформи для розміщення новітніх систем одержання інформації. В розділі 1 даної дисертаційної роботи було відмічено, що вартість інформації одержаної за допомогою комерційних літаків відповідно до [6] складає тільки 1% від вартості інформації, що одержується за допомогою куле-пілотних спостережень. Також треба зазначити, що економічна ефективність також може змінюватися відповідно до ціни на паливо та вартості аеропортових зборів.

#### **6.4 Розширення функціональних можливостей метеорологічного обслуговування**

На відміну від існуючих систем одержання та розповсюдження інформації в системі, що запропонована в даній роботі, ПС відіграє ключову роль, як засіб для одержання широкого спектру метеорологічної інформації з різних шарів та зон тропосфери за маршрутом польоту ПС.

Використання такого підходу є економічно доцільним, тому що не потребує додаткових коштів на запуск окремих засобів зондування, а використовує широко розгалужену мережу комерційних літаків, яка, в свою чергу забезпечує краще покриття, ніж мережа куле-пілотного зондування атмосфери. Отже ПС зручно використовувати у якості мобільної платформи для розміщення різноманітного складного сучасного обладнання для одержання, обробки та відображення метеорологічної інформації за маршрутом польоту.

Використання сучасного обладнання з реалізацією новітніх методів, алгоритмів та засобів одержання інформації дозволить значно розширити функціональні можливості систем щодо одержання інформації про складні та небезпечні метеорологічні явища.

1. Використання поляриметричних методів та засобів дозволить реалізувати функції виявлення зон небезпечного обледеніння [124], зон градової активності [54].

2. Приймаючи до уваги той факт, що тверді часточки, що є складовими хмар вулканічного попелу мають нерегулярну структуру, а отже здатні змінювати поляризацію зондувальної хвилі можна зробити висновок, що використання поляризаційних методів та систем також є доцільним у виявленні зон хмар вулканічного попелу.

3. Використання когерентних поляриметричних радіолокаторів надасть функціональну можливість вимірювання комбінованих Допплерівсько-поляриметричних характеристик. Такі комбіновані характеристики вимірюються за різних поляризацій випроміненої та прийнятої електромагнітних хвиль та є також функціями доплерівської швидкості. Для прикладу на рис. 6.6 показано залежність параметрів спектральної диференціальної відбиваності  $Z_{dr}(v)$  та спектрального лінійного деполаризаційного відношення  $L_{dr}(v)$  від доплерівської швидкості [125]. Використання спектральних поляриметричних параметрів, що є чутливими до динамічних атмосферних процесів дозволять одержувати інформацію про динамічні атмосферні явища, що підтверджується експериментальними дослідженнями [125-130].

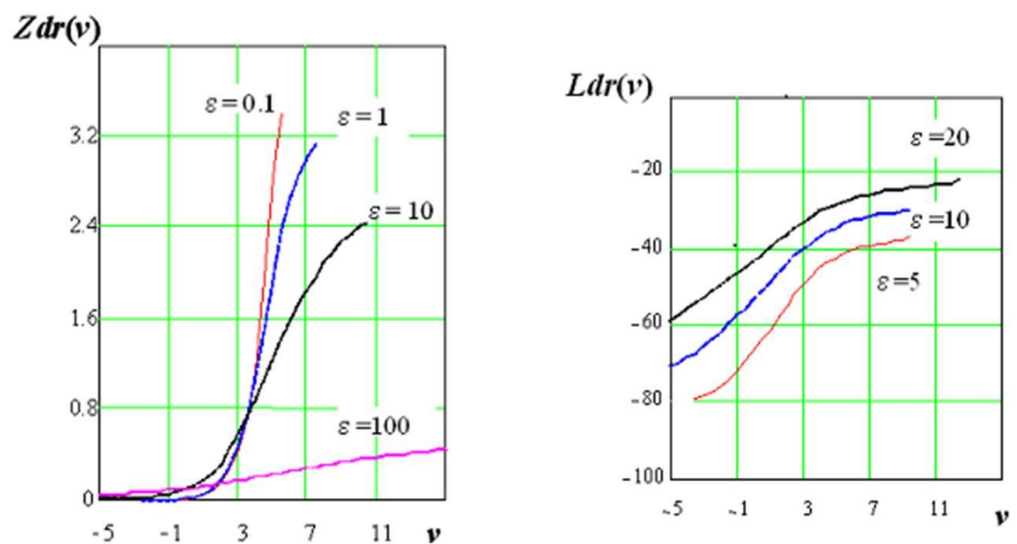


Рис. 6.6 Спектральна диференціальна відбиваність (ліворуч) та спектральне лінійне деполаризаційне відношення (праворуч) як функції доплерівської швидкості для різних значень інтенсивності турбулентності (швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності ШДКЕТ  $\epsilon$  змінюється від 0.1 до 100  $\text{cm}^2\text{s}^{-3}$ )

4. Використання поляриметричних методів, що презентовані в другому та третьому розділах даної дисертаційної роботи дозволять підвищити функціональність сучасних систем за рахунок можливості вимірювання швидкості вітру та оцінки інтенсивності таких динамічних явищ, як турбулентність.

Використання поляриметричних методів додатково до оцінки доплерівської швидкості надасть можливість підвищити функціональність сучасних систем за рахунок можливості одержання інформації про:

- Реальну швидкість вітру;
- Наявність висхідних та спадних рухів повітря;
- Повний вектор вітру у випадку, коли напрямок вітру є нормальним до площини зондувальної електромагнітної хвилі доплерівського радіолокатора;
  - кут між радіальною складовою вітру та реальним напрямком вітру;
  - розподіл крапель за розмірами.

5. Комбіноване використання засобів дистанційного одержання інформації, що працюють в різних частотних діапазонах, наприклад радіо та звукові системи (радари, содари, лідари) дозволить збільшити інформативність систем щодо параметрів та характеристик атмосферних явищ та процесів, а отже і ймовірність виявлення зон небезпечних для польотів ПС. В роботах [131-134] розглянуті принципи, методи та можливості систем, що мають комбіновані радіолокаційні та звукові канали для одержання метеорологічної інформації.

Розширенні функціональні можливості бортових систем одержання метеорологічної інформації в структурі запропонованого глобального обміну інформацією дозволить удосконалити глобальну систему одержання та обміну метеоінформацію за рахунок наступних додаткових функцій та можливостей:

- 1) Прямий автоматичний контроль розвитку метеорологічного явища за маршрутом польоту в необхідному часовому інтервалі з подальшим оновленням прогнозу можливого виникнення небезпечних зон;
- 2) Прямий оперативний контроль параметрів метеорологічного формування, таких як водність хмарності, структура хмарності, температурний розподіл,

наявність збурень та інші параметри для можливості оперативного корегування прогностичної інформації та надання реального зображення зон небезпечних явищ високої інтенсивності;

- 3) Одночасне зондування атмосферного явища з різних боків для відтворення 3D зображення небезпечного явища в реальному часі з зазначенням найбільш небезпечних зон для забезпечення ПС, що мають здійснювати політ у відповідній зоні польоту.

### **6.5 Рекомендації щодо модернізації метеорологічного забезпечення аеронавігації**

Рівень розвитку сучасної авіації обумовлює необхідність розробки всіх основних складових інформаційного забезпечення учасників повітряного руху, однією з яких є метеорологічна інформація. Процес розв'язання питань щодо побудови системи метеорологічного забезпечення аеронавігації потребує наукового обґрунтування, критичного осмислення та технічного застосування певних концепцій, форм і методів одержання, передачі та розповсюдження метеорологічної інформації. В процесі дослідження та розробки важливим постає питання методологічних засад побудови системи метеорологічного забезпечення аеронавігації, оскільки він залежить від застосованих методів, методик та засобів пізнавальної діяльності.

Для нашої мети методологію доцільно розглядати в практичному сенсі, тобто таку, що орієнтована на вирішення практичних проблем та цілеспрямоване перетворення і покращення системи метеорологічного забезпечення аеронавігації. В практичному контексті, методологію можна розглядати як алгоритм чи набір заходів і засобів для досягнення практичної цілі. Якість метода зазвичай перевіряється практикою, вирішенням науково-практичних задач, що реалізуються в комплексі реальних дій та обставин.

Процес розробки методологічних засад зазвичай включає наступні етапи:

1. Огляд системи методів та засобів, які використовуються в сучасній системі одержання та розповсюдження метеорологічної інформації;
2. Вибір або розробка нових методів та засобів для вирішення поставленої проблеми;
3. Систематизування методів та засобів, що використовуються, або доцільно використовувати;
4. Надання рекомендацій для використання кожного із запропонованих методів та засобів.

Перший етап розробки методологічних засад представлено в першому розділі цієї роботи, де було детально розглянуто та проаналізовано сучасні методи одержання метеорологічної інформації та її поширення між учасниками повітряного руху та іншими користувачами. Також було проаналізовано принципову можливість використання ПС у якості мобільного датчика для одержання оперативної інформації про стан атмосфери за маршрутом польоту, що дозволить значно зменшити витрати на одержання інформації з різних шарів тропосфери, а також значно збільшити кількість оперативної інформації.

В другому розділі даної роботи представлено нові методи дистанційного одержання метеорологічної інформації, які доцільно використовувати в процесі реалізації та функціонування глобальної системи одержання та розповсюдження метеорологічної інформації. Запропоновані поляриметричні методи, а також система для їх реалізації, що можуть бути використані додатково до існуючих класичних та доплерівських, для підвищення їх можливостей та інформативності в процесі одержання та розповсюдження оперативної інформації про можливі небезпечні явища за маршрутом польоту, додатково до інформації про параметри атмосфери.

Отже, для побудови модернізованої системи метеорологічного забезпечення аеронавігації доцільно використовувати наступні підходи, засоби та методи:

- ПС має використовуватися як мобільний датчик для одержання інформації з різних шарів тропосфери за маршрутом польоту;
- ПС має бути обладнано сучасними системами для одержання та обробки оперативної інформації за маршрутом польоту про складні метеорологічні умови, включно перспективні комбіновані доплерівсько-поляриметричні радіолокаційні системи;
- Доцільно використовувати поляриметричні методи додатково до існуючих як такі, що дозволяють проаналізувати та врахувати поляризаційні (додаткові) характеристики відбитої від метеорологічного утворення електромагнітної хвилі та одержати більш детальну інформацію про процеси та характер атмосферних явищ;
- Використання запропонованих поляриметричних методів та систем додатково до існуючих дозволять одержати неосереднені дані, що дуже важливо у випадку виявлення високодинамічних явищ, таких як атмосферна турбулентність, зсув вітру та інших, що пов'язані з вітром;
- Інформація з ПС автоматично має передаватися іншим ПС, авіадиспетчеру, користувачам метеорологічної інформації;
- Екіпаж ПС в свою чергу має доступ до інформації, що одержана бортовими системами інших ПС, а також іншими системами метеорологічного стеження;
- Одночасне володіння оперативною метеорологічною інформацією всіма учасниками повітряного руху в одній зоні польотів та авіаційного диспетчера;
- Сигналізування екіпажу ПС бортовими автоматичними системами про наявність небезпечного метеорологічного явища за маршрутом польоту;
- Автоматична обробка бортовими системами попередження оперативної метеорологічної інформації з декількох ПС, що знаходяться в одній зоні польоту та інформації з інших джерел для автоматичного

перерахунку маршруту польоту з урахуванням його безпеки та економічності;

- Можливість додаткового контакту з авіаційним диспетчером для звернення уваги на складні та небезпечні метеорологічні явища за маршрутом польоту;

- Для автоматичного безкоштовного розповсюдження інформації про складні метеорологічні умови за маршрутом польоту, які пілот може бачити на моніторі в кабіні, а також про своє місцезнаходження відповідно до інших літаків, та іншої польотної інформації включно з тимчасовими польотними обмеженнями доцільно використовувати інфраструктуру ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast);

- Передача ADS-B інформації авіаційним диспетчерам для забезпечення їх оперативною інформацією про складні метеорологічні умови за маршрутом польоту ПС (тобто для забезпечення одночасного володіння оперативною метеорологічною інформацією пілотів та авіаційного диспетчера), а також для визначення в реальному часі місцезнаходження ПС, яке, як зазначається в [135], може бути визначено більш точно, ніж за допомогою сучасних радіолокаційних систем.

## Висновки до розділу 6

1. Розроблена та запропонована в даній роботі комплексна глобальна інтерактивна система одержання, розподілу та обміну та метеорологічної інформації відповідає принципам глобальності, доступності (включаючи доступність за запитом), системності, захищеності, персоніфікованості та сумісності систем за рахунок наступних факторів, що є вимогою сучасної авіації, а також програм та концепцій ICAO та EUROCONTROL такі, як SESAR, NexGen, Free Flight, SWIM.
2. Запропонована глобальна інтерактивна система одержання, розподілу та обміну метеорологічної інформації дозволить удосконалити процес метеорологічного забезпечення за рахунок значного збільшення об'єму та деталізації метеорологічних даних, а також можливості цільового використання оперативної інформації, необхідної для виконання конкретного польоту, або для роботи конкретного аеродрому (Схема (Рис.5.1.1) доповнена зв'язками, які дозволяють в критичний момент польоту акцентувати увагу на найбільш небезпечних метеорологічних явищах за маршрутом польоту). Це досягається за рахунок використання повітряних кораблів у якості мобільної платформи для розміщення датчиків та новітньої апаратури для автоматичного одержання метеорологічної інформації з можливістю безпосереднього інформування екіпажів ПС про наявність метеорологічної небезпеки саме за маршрутом польоту та автоматичної передачі цієї інформації іншим користувачам.
3. Запропонована глобальна інтерактивна система одержання, розподілу та обміну метеорологічної інформації за рахунок використання супутникових каналів автоматичного поширення інформації між складовими мережі наземного розташування та повітряними транспортними засобами (ПТЗ), а також а також ПТЗ і наземними приймачами метеорологічної інформації та використання систем автоматичного поширення інформації дозволяють забезпечити оперативний обмін інформацією про можливі небезпечні явища за



маршрутом польоту, а в деяких випадках забезпечити додатковий канал передачі метеорологічної інформації.

4. Удосконалення технології одержання, поширення та використання метеорологічної інформації, що запропоновано та відображено за допомогою структурної схеми глобальної інтерактивної системи одержання, розподілу, обміну та використання метеорологічної інформації сприяє підвищенню ефективності метеорологічного забезпечення авіації, та підвищенню рівня безпеки авіації за рахунок:

- збільшення інформаційного потоку,
- зменшення витрат на одержання метеорологічних даних,
- цілеспрямованому вибору оперативної інформації, що є значимою для учасників повітряного руху конкретної зони польоту,
- забезпечення однакової ситуативної обізнаності між екіпажем ПС та авіаційною наземною службою управління повітряним рухом,
- зниження ймовірності інформаційного непорозуміння між учасниками повітряного руху,
- запобігання втрати даних,
- деталізованості інформації про конкретне метеорологічне явище (просторовий розподіл, інтенсивність) за умови наявності інтенсивного повітряного руху,
- забезпеченні резервного каналу передавання інформації.

5. Додатковий внесок в підвищення рівня безпеки польотів виникає завдяки зменшенню навантаження на авіаційного диспетчера за рахунок цільового передавання оперативної інформації безпосередньо пілотам ПС з урахуванням конкретного місцезнаходження ПС, а також з урахуванням можливостей сучасних систем обробляти, інтерпретувати та надавати метеорологічну інформацію в зручному для сприйняття вигляді.

6. Обробка даних, що одержуються за допомогою запропонованої динамічної мережі забезпечує якісно новий рівень метеорологічної інформації необхідної для метеорологічного обслуговування аеронавігації.

### Список публікацій здобувача за матеріалами шостого розділу

1. Аверьянова Ю.А. Динамічна інтерактивна система отримання та поширення метеорологічної інформації/ Ю.А. Аверьянова, Ф.Й. Яновський// Електроніка та системи управління. – К.: 2011. - №2(28). - С. 95-99.

*Особистий внесок здобувача: аналіз можливостей сучасної авіації щодо створення глобальної мережі одержання та обміну даними з можливістю їх вибіркового та цільового використання, розробка узагальненої можливої структурної схеми глобальної мережі одержання та обміну метеорологічними даними з використанням динамічної інтерактивної системи одержання та розповсюдження інформації.*

2. Аверьянова Ю.А. Динамічна складова глобальної інтерактивної мережі одержання та обміну метеорологічними даними / Ю.А Аверьянова., Ф.Й Яновський // Вісник НАУ - К.: НАУ, 2011. - Том 4- с. 36-41.

*Особистий внесок здобувача: аналіз перспективних напрямків розвитку технічних засобів для одержання оперативної інформації про метеорологічні умови за маршрутом польоту Розробка структурної схеми глобальної мережі одержання та поширення метеорологічної інформації з використанням повітряних суден, як динамічних інтерактивних елементів мережі.*

3. Авер'янова Ю.А. Інтерактивна глобальна мережа отримання, обміну та поширення метеорологічних даних / Авер'янова Ю.А. // - Вісник НАУ - К.: НАУ, 2012. - Том 4- С. 26-30.

4. ПАТЕНТ на корисну модель №106864 Україна.МПК (2016.01). Система одержання та поширення метеорологічних даних / Авер'янова Юлія Анатоліївна, Яновський Фелікс Йосипович.; Власник Національний Авіаційний Університет.- № и 2015 11020; заявл.11.11.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9

*Особистий внесок здобувача: розробка узагальненої структурної схеми глобальної мережі одержання та обміну метеорологічними даними з використанням динамічної інтерактивної складової для одержання та розповсюдження інформації.*

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну науково-технічну проблему створення методології метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням засобів оперативного виявлення та розповсюдження інформації. Проблема вирішена в рамках розробленої концепції удосконалення метеорологічного забезпечення міжнародної аеронавігації з використанням мережі мобільних платформ для розміщення систем одержання оперативної метеорологічної інформації з різних шарів атмосфери на базі літаків, що виконують регулярні та нерегулярні рейси, розробки нових поляриметричних радіолокаційних підходів та методів дистанційного одержання інформації про небезпечні метеорологічні явища, а також розробки структури комплексної глобальної інтерактивної мережі одержання та поширення метеорологічної інформації, що відповідає принципам глобальності, доступності (включаючи доступність за запитом), системності, захищеності, персоніфікованості та сумісності систем. Ефект від використання нових методів і підходів посилюється шляхом урахування поляризаційних характеристик відбитої електромагнітної хвилі для одержання більш детальної та надійної інформації про метеорологічні явища та процеси. При цьому отримані такі наукові та практичні результати:

4. Розроблено концепцію удосконаленого метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням поляриметричних засобів дистанційного зондування. Теоретично обґрунтовано можливість використання поляриметричних засобів для одержання інформації про динамічні атмосферні явища, що є небезпечними для навігації повітряних суден.

5. Розроблено поляриметричний метод та алгоритм дистанційного оцінювання поляризаційних складових сигналу відбитого від сукупності гідрометеорів за допомогою системи з багатопроменевим прийманням. Досліджено можливості поляриметричного методу щодо оцінки інтенсивності опадів, вимірювання розподілу крапель за розміром, оцінки динамічних атмосферних (турбулентності, вітру) явищ тощо. Отримано патент [79].

6. Уперше проведено аналіз та фізичне обґрунтування процесу формування просторово-часового розподілу відбитого сигналу Допплерівсько-поляриметричного (Д-П) метеолокатора. Введено поняття поляризаційного спектра, який визначено як енергетичний розподіл за поляризаційними складовими. Розроблено метод оцінювання поляризаційного спектра відбитої від рідких гідрометеорів електромагнітної хвилі. Запропоновано новий поляриметричний радіолокатор з багатопроменевим прийманням, який реалізує спосіб оцінювання поляризаційного спектра відбитої електромагнітної. Отримано патент.

7. Одержано математичні вирази для розрахунку енергії, що приймається антенами, які налаштовані на сигнали з різними кутами поляризації для математичного обґрунтування зв'язку зміни поляризації при відбитті електромагнітної хвилі від метеоутворень з динамічними характеристиками атмосфери в хмарах та опадах. Результати проведеного математичного та комп'ютерного моделювання запропонованого методу дистанційної оцінки динамічних явищ (турбулентності та вітру) за допомогою поляризаційного спектра підтвердили можливість виключення внеску вібраційної складової в відбитий сигнал, або навпаки, можливість оцінити тільки внесок вібраційної компоненти за рахунок підбору кута поляризації приймальної антени радіолокатора. Результати моделювання продемонстрували зв'язок поляризаційних характеристик електромагнітної хвилі з турбулентністю, вітром та розмірами крапель та довели працездатність запропонованого методу дистанційної оцінки швидкості вітру за допомогою поляризаційних характеристик відбитого радіолокаційного сигналу.

8. Розроблено та представлено поляриметричний енергетичний метод дистанційного виявлення зон небезпечної для польотів ПС атмосферної турбулентності за допомогою радіолокаційної системи з однією антеною з фіксованою поляризацією. Показано можливість оцінки деполіризації відбитої електромагнітної хвилі за характером зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів, які знаходяться під впливом динамічних

атмосферних процесів, та сепарації зміни НЧ обвідної, що викликана атмосферою турбулентністю, від інших факторів, які впливають на процес зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів. Проведене моделювання і отримана статистична оцінка інформативного параметру – дисперсії зміни НЧ обвідної радіосигналу відбитого від гідрометеорів, запропоновано та досліджено статистичний алгоритм виявлення та класифікації турбулентності за ознакою її інтенсивності. Оцінка сумарної похибки за даним методом показала, що її ймовірність має порядок 0.1, а це відповідає результатам, які були одержані іншими методами, зокрема, стандартним методом виявлення і класифікації турбулентності за шириною доплерівського спектру відбитої від гідрометеорів електромагнітної хвилі.

9. Вперше запропоновано та розроблено дистанційний поляриметричний метод визначення швидкості вітру за моментом роздвоєння крапель, що базується на оцінюванні поляризаційного спектра відбитого від метеорологічної цілі радіолокаційного сигналу. Проаналізовано випадки роздвоєння крапель за різних процесів в атмосфері та запропоновані шляхи вирішення протиріччя інтерпретації радіолокаційної інформації при визначення модуля швидкості вітру.

10. В цілому результати моделювання показали можливість та доцільність використання поляризаційних методів не тільки для аналізу мікроструктури хмар та опадів, що є відомим на наш час, а також і для визначення характеристик атмосферних явищ пов'язаних з вітром, зокрема виявлення зон небезпечної турбулентності та визначення абсолютного значення швидкості вітру, що в комбінації з доплерівськими методами дозволить оперативно визначати повний вітер та удосконалити системи виявлення атмосферної турбулентності.

11. Запропоновано удосконалення інформаційного забезпечення для зменшення ризиків в процесі прийняття рішень за рахунок впровадження сучасних систем одержання, розповсюдження та обміну метеорологічною інформацією, зокрема, використання ПС, як автоматичного сенсора та датчика

метеорологічної інформації, а також за рахунок автоматичної передачі та поширення оперативної метеорологічної інформації (включаючи супутникові системи зв'язку), що постійно оновлюється.

12. Розроблено та запатентовано комплексну глобальну інтерактивну мережу одержання, розподілу і обміну метеорологічної інформації та рекомендації щодо модернізації метеорологічного забезпечення аеронавігації (патент [140]). Мережа відповідає принципам глобальності, доступності (включаючи доступність за запитом), системності, захищеності, персоніфікованості та сумісності систем, що є вимогою сучасної авіації, а також програм та концепцій ICAO і EUROCONTROL, зокрема SESAR, NexGen, Free Flight, SWIM. Обробка даних, що одержуються за допомогою запропонованої динамічної мережі забезпечує якісно новий рівень метеорологічної інформації необхідної для метеорологічного обслуговування аеронавігації. реалізує спосіб оцінювання поляризаційного спектра відбитої електромагнітної.

13. Запропоновані в даній дисертаційній роботі методи та підходи використані при виконанні комплексної фундаментальної держбюджетної НДР «Розроблення першого вітчизняного наземного когерентного метеорологічного радіолокатора» (ХНУРЕ, ХНУ імені Каразіна, НАУ) та у навчальному процесі НАУ, що підтверджено актами впровадження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Международные стандарты и рекомендуемая практика Приложение 3 к Конвенции о международной гражданской авиации “Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации” 18 изд. 2013 г.- ИКАО, Монреаль – 180 стр.
2. Правила метеорологічного забезпечення авіації. – Київ: Наказ Державної служби України з нагляду за забезпеченням безпеки авіації, Міністерства охорони навколишнього природного середовища від 14 листопада 2005, №851/409/661.
3. Бабак В.П. Безпека авіації/ Бабак В.П., Харченко В.П., Яновський Ф.Й.; Монографія – Київ: Техніка, 2004. – 584с.
4. World Wide CNS/ATM Systems Implementer// ICAO, RIO Conference 1998.
5. Weather Decision Guide. [Електроний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.hf.faa.gov/WeatherDecisionGuide/default.aspx>
6. World Meteorological Organization Aircraft Meteorological Data Relay Panel. Aircraft Meteorological Data Relay: The international AMDAR Program. - Geneva, Switzerland: AMDAR Panel Flyer, WMO, 2007.
7. Руководство по автоматическим системам метеорологического наблюдения на аэродромах: Doc 9837, Издание первое. - ICAO, 2006. - 999 University Street, Montreal, Quebec, Canada H3C 5H7 – 116 с.
8. Aviation Weather Systems. [Електроний ресурс]. - Режим доступу до журн.: [http://www.allweatherinc.com/aviation/awos\\_dom.html](http://www.allweatherinc.com/aviation/awos_dom.html)
9. All-Weather Precipitation Gauge. [Електроний ресурс]. - Режим доступу до журн.: [http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/uscrn/documentation/site/sensors/precipitation/Descriptions/Precip\\_GeonorT-200B.pdf](http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/uscrn/documentation/site/sensors/precipitation/Descriptions/Precip_GeonorT-200B.pdf)
10. ASOS Product Improvement Implementation Plan (addendum II) for Dew Point Sensor upgrade. - U.S. Department of Commerce, National Oceanic and



Atmospheric Administration, August 16, 2002. [Электроний ресурс]. – Режим доступа до журн.:

<http://www.nws.noaa.gov/ops2/Surface/documents/DewPoint0816.pdf>

11. Баранов А. М. Авиационная метеорология / Баранов А. М., Лещенко Г. П., Белоусова Л. Ю. - М.: Транспорт, 1993. – 287 с.
12. Зайцева Н.А., Аэрология ./ Зайцева Н.А. - Ленинград: Гидрометеоиздат,- 1990. - 325 с.
13. Центральной аэрологической обсерватории 70 лет, [Электроний ресурс]. – Режим доступа до журн.: [http://www.cao-rhms.ru/cao\\_mini.pdf](http://www.cao-rhms.ru/cao_mini.pdf)
14. Federal Meteorological Handbook № 3, Rawinsonde and Pibal observation, 2013, [Электроний ресурс]. – Режим доступа до журн.: <http://www.ofcm.gov/fmh3/text/default.htm>.
15. Automated Weather Observing System (AWOS). [Электроний ресурс]. – Режим доступа до журн.: [http://www.allweatherinc.com/aviation/awos\\_dom.html](http://www.allweatherinc.com/aviation/awos_dom.html)
16. Atlas D. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence / Atlas D. , Srivastava R.C., Sefhon R.S.; Reviews of Geographical and Space Phisics, Vol 11 #1,1973.
17. Шупяцкий А.В., Радиолокационное рассеяние несферическими частицами. / Шупяцкий А.В. - Труды ЦАО, 1959, Вып. 30. - сс. 39-52.
18. Zrnice D. Weather Radar – Recent Developments and Trends/ D. Zrnice //Proc. of Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium 2008 (MRRS 2008). - 22-24 September 2008. – pp. 174-181.
19. Zrnice D. Multipurpose Phased Array Radar – Civilian Application/ D. Zrnice, D. Forsyth //Proc. of Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium 2005 (MRRS 2005). - 19-21 September 2005. – pp. 63- 70.
20. Яновський Ф. Й. Метеонавігаційні радіолокаційні системи повітряних суден: [Навчальний посібник] / Яновський Ф.Й. - К.: НАУ, 2003. -324 с.
21. Баранов И.М. Использование статистических характеристик эхо-сигналов бортовых радиолокаторов в целях обнаружения зон, опасных для полетов /

- Баранов И.М., Довганчин Б.А., Яновский Ф.И; труды ОЛАГА, вып. 59. - Л. - 1974. –стр. 40-47.
22. Russchenberg H.W.J. Ground-based remote sensing of precipitation using a multi-polarized FM-CW Doppler radar / Russchenberg H.W.J. - Delft University Press, 1992. - 206 p.
23. Lhermitte R.M. Meteorological doppler radar / Lhermitte R.M. – Science.- 1982: N 4109, 1973. - p.258-262.
24. Теоретические основы радиолокации: [Учебник - [2-е изд.] - под ред. Дулевича]. – Москва: «Советское радио»,1978г. – 607с.
25. Doviak R.J. Doppler radar and weather observations. / Doviak R.J., D.S. Zrnic. - Academic Press, inc., 1993. – p. 562
26. «МЕТЕОР-МетеоЯчейка» [Электроний ресурс]. - Режим доступа до журн.: [http://www.namc.com.ua/?page\\_id=103](http://www.namc.com.ua/?page_id=103)
27. The Next Generation Weather Radar (NEXRAD) system [Электроний ресурс]. - Режим доступа до журн.: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/radar-data/nexrad>
28. Standard for airborne weather radar Arinc-708A [Электроний ресурс]. - Режим доступа до журн.: <http://www.aviation-ia.com/aees/>
29. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли. Глава 2. Радиоакустическое зондирование пограничного слоя атмосферы: [Под ред. Кашеева Б.Л., Прошкина Е.Г., Лагутина М.Ф.].- Харьков: ХНУРЭ, 2007. - с. 49-100.
30. Оценка параметров турбулентности атмосферы по характеристикам огибающей сигнала радиоакустических систем / В.М. Карташов, В.А Петров, Е.Г. Прошкин, Г.И.Сидоров //Радиотехника. - Харьков. - 2000.- №115.- С.39-43.
31. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко - Л.: Гидрометеиздат, 1973. - 244 с.
32. Захаров В.М. Метеорологическая лазерная локация. / В.М. Захаров, О.К. Костко. - М.: Гидрометеиздат, 1977. - 222 с.
33. Оптическое зондирование атмосферы / [Тошенов Б.Т., Торопова Т.П., Ляджин В.А. и др.] - Алма-ата: Наука, 2006. - 108 с.

34. «Питання про погоду» [Електронний ресурс] / П. Д. Остапенко –Режим доступу:  
[http://www.myspytnik.com/index/meteorologicheskie\\_sputniki\\_ispolzovanie\\_celi\\_na\\_vigacija/0-77](http://www.myspytnik.com/index/meteorologicheskie_sputniki_ispolzovanie_celi_na_vigacija/0-77)
35. Агалаков В. С. Метеорологические ИСЗ / В. Агалаков, А. Сире. - М.: «Знание», 1977. – 64 с.
36. Sitellite Data. [Електроний ресурс]. - Режим доступу:  
<https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/satellite-data>
37. Eyal Ben Dor. Hyperspectral Remote Sensing, Airborne Measurements for Environmental Research [Електроний ресурс] / Tim Malthus, Antonio Plaza, and Daniel Schlapfer. - Режим доступу:  
<http://www.geo.uzh.ch/microsite/rsl-documents/research/publications/book-chapters/2012.EUFAR.Hyperspectral-741993216/2012.EUFAR.Hyperspectral.pdf>
38. Hrastovec M. Obtaining Meteorological Data from Aircraft with Mode-S Radars / M Hrastovec, F. Solina // “Systems” IEEE Aerospace and Electronic magazine. - December 2013. volume 28, number 12, Part I of II. – p.12-25.
39. ICAO and WMO Meteorology (MET) Divisional Meeting, 2014, Commission on Aeronautical session, Montreal, 7 to 18 July 2014, MET/14-IP/CAeM-15/I5/6/14). [Електроний ресурс] - Режим доступу:  
<http://www.icao.int/Meetings/METDIV14/Pages/default.aspx>
40. Яновский Ф.И. Анализ возможностей повышения информативности наблюдений за атмосферным электричеством / Ф.И. Яновский, Б.Е. Фишман // "4 Всесоюзный симпозиум по атмосферному электричеству": Тезисы докладов. - Нальчик, 1990. - С. 23-24.
41. Яновский Ф.И. Концепция единой сети наблюдений атмосферного электричества и опасных метеоявлений. "Пассивная радиолокация гроз"/ Ф.И. Яновский // Доклад на Научном совете АН СССР по проблеме "Статистическая радиофизика", Препринт. - Рига, 1990. - С. 1-10.

42. F. Yanovsky, Automated Dependent Surveillance: Aircraft Position and Weather Data // Proceedings Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications. Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (ESAV'08), Island of Capri, 2008, pp. 132 – 137.
43. Darr S. Safer Systems: A NextGen Aviation Safety Strategic Goal / S. Darr, W. Ricks, K.A, Lemos // IEEE Aerospace and Electronic SYSTEMS Magazine. – June 2010. ( ISSN 0885-8985). - Volume 25, #6 - p.9-14.
44. Manual of Aeronautical Meteorological Practice: ICAO Doc 8896 AN/893. – Montreal: ICAO, 200. - p.
45. Global Air Traffic Management Operational Concept: ICAO Doc 9854 . – Montreal: ICAO, 200. - p. 82
46. Глобальний аеронавігаційний план: ICAO Doc 9750. – Montreal: ICAO, 200. - p. 138
47. The Evolution of Meteorological Information Exchange in the Context of System-wide Information Management, the ICAO and WMO Meteorology Division Meeting 2014 MET/14-IP/6 CAeM-15/ INF. 6 17/1/14, Montreal, 7-18 July, 2014. [Електроний ресурс]. - Режим доступу:  
<http://www.icao.int/Meetings/METDIV14/Pages/default.aspx>
48. Major Contractfor ADS-B Weather System, Safety and Technology Trends, Monday, March, 31, 2008, [Електроний ресурс]. - Режим доступу:  
<http://www.aviationtoday.com/asw/categoris/military/20657.html>
49. Global Observing System. [Електроний ресурс]. - Режим доступу:  
[www.wmo.ch/web/www/OSY.GOS.html](http://www.wmo.ch/web/www/OSY.GOS.html)
50. Татаринів В.Н. Введення в сучасну теорію поляризації радіолокаційних сигналів / Татаринів В.Н., Татаринів С.В., Лигхард Л.Р. - Т: Томський державний університет, 2006. – 380 с.
51. Канарейкін Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризація радіолокаційних сигналів. М.:Сов. Радио, 1966. - 440с .

52. Борн М., Вольф. Е, Основы оптики/ Пер. с англ.; Редю Г.П. Мотулевич. М. Наука, 1970. – 855с.
53. Шерклифф У. Поляризованный свет/ Пер. с англ.; Под ред. Н.Д. Жевандрова. М.: Мир, 1965. – 264с.
54. Аналіз даних експериментальних досліджень поляризаційних параметрів радіолокаторів для безпечної навігації в умовах граду / І.М. Браун, Ф.Й. Яновський // Вісник НАУ. – 2005. - №1. – с.55-59.
55. Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail / N. Balakrishnan, D.S. J. Zrnice // Atmos. Sci. - 1990. – 47. - pp. 1525–1540.
56. Яновский Ф.И. Экспериментальные исследования поляризационных характеристик облаков и осадков / Ф.И. Яновский, И.М. Браун // Сибирский поляризационный семинар СибПол 2004.: Доклады. - Сургут, Россия, 2004.- с.80-87.
57. Пат. 4943568 України, 1991.15. Метод виявлення градових зон / А.В. Шупятський, Ф.Й. Яновський. - No 4943568; заявл. 15.1991; опубл.
58. Yanovsky F.J. Reliability of Detection of Radar Signals from Hailstones by Using Parametric and Non-Parametric Algorithm / F.J. Yanovsky, R.B. Sinitsyn, I.M. Braun // Proceedings EuRAD. – Paris, France, 2005. - pp. 121-124.
59. Braun I.M. Development and investigation of hail detection algorithms / I.M. Braun // Proc. of Second World Congress “Safety in Aviation” (MRRS 2005), September 19-21, 2005, National Aviation University, Kiev, Ukraine – X. 2005. -pp.155-158.
60. Яновський Ф.Й. *Радіолокаційні системи повітряних суден* / Яновський Ф.Й. – Київ: НАУ, 2013. – 688 с.
61. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5, МРЛ-6 в системах градозащиты. / [Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Ваксенбург С.И., Шевела Г.Ф.]. - Л.: Гидрометеиздат, 1980. - С.61-100.
62. Радиотеплолокация в метеорологии / [Степаненко В.Д., Щукин Г.Г., Бобылев Л.П., Матросов С.Ю.]. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 284 с.

63. Принципы построения автоматизированных систем метеорологического обеспечения авиации; под ред. Г.Г. Щукина. - Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 281 с.
64. Мельников В.М. Обнаружение града по асимметрии спектра метеорадиоэха / Мельников В.М., Черняк М.М., Тхамоков Б.Х. // Радиометеорология: Тр. VII Всесоюзн. Совещания, 1989. - Л.: Гидрометеиздат, 1989, с. 184-186.
65. Шамаев В.С. Самолетный поляризационный лазерный локатор "Светозар-3". Устройство и применение [Репринт] / В. Шамаев, А.Абрамочкин. – Томск, 1984. - 38 с.
66. Шупяцкий А.Б. Влияние микрофизических и электрических характеристик неоднородностей тропосферы на преобразования поляризационных параметров радиолокационных сигналов / А.Б. Шупяцкий, Ф.И. Яновский // 16 Всес. конф. по распространению радиоволн: Харьков. 1990 г.: Тезисы докладов, часть 2. – 1990. - С. 96.
67. Braun I.M. Development and investigation of hail detection algorithms / I.M Braun // *Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium MRRS 2005 : Second World Congress "Safety in Aviation"* // 19-21September, 2005. - National Aviation University, Kiev, Ukraine. - pp.155-158.
68. Sinitsyn R.B. Nonparametric Detection of Inhomogeneous Areas in Clouds // R.B. Sinitsyn I.M. Braun, F. J. Yanovsky // *The 11<sup>th</sup> Conference on Microwave Technique*, COMITE 2001, September 18-19, 2001: *Conference Proceeding*. - University of Pardubice, Czech Republic, 2001. - pp. 77-81.
69. Yanovsky F. Radar Development in Ukraine / F. Yanovsky // *International Radar Symposium (IRS 2014)*, June 16-18, 2014, Gdansk, Poland. : *Conference proc.* – 2014. – P. 61-65
70. Яновский Ф.И. Локализация зон градовой опасности с помощью поляризационных бортовых радиолокаторов / Яновский Ф.И. // *Международная НТК "Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов"*: Тезисы докладов. - Киев, 1991. - С. 103-104

71. Liu. H. Clasification of Hydrometeors Based on Polarimetric Radar measurements: Development of Fuzzy logic and Neuro-Fuzzy systems, and in Situ verification / Liu, V. Chandrasekar // J. Atmos. Oceanic Technol., 17, p. 140-164.
72. Pitertsev A. Polarimetric Method for Remote Predicting a Zone of Icing-in-Flight in Clouds and Precipitation / A. Pitertsev, F. Yanovsky // The 3<sup>rd</sup> Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS 2011), August 25-27, Kiev, Ukraine, 2011: Conference proc. – 08. 2011. – pp. 220-223.
73. Волынский М.С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли / М.С. Волынский. – М.: Знание, 1986.- 144с.
74. Авер'янова Ю.А. Оцінювання ступеня деполаризації відбитих від гідрометеорів радіохвиль амплітудним методом / Ю.А. Авер'янова, А.О. Аверьянов, Ф.Й. Яновський // Вісник НАУ. – К.: НАУ, 2012. - Т1. – с. 100-104.
75. Аверьянова Ю.А. Можливості використання поляриметричних радіолокаційних параметрів для визначення характеристик вітру / Ю.А. Аверьянова А.А. Аверьянов, Ф.И. Яновский // Вісник НАУ. - К.: НАУ, 2005. - Том 4- с. 34-39.
76. Averyanova Yu. The approach to estimating critical wind speed in liquid precipitation using radar polarimetry / Yu. Averyanova A. Averyanov, F. Yanovsky // 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kiev 2012, August 28-30, Ukraine.: Conference Proc. -09.2012. - pp.517-520.
77. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л.Г. - М: Наука, 1981. - 847 с.
78. Аверьянова Ю.А. Оцінка інтенсивності атмосферної турбулентності за допомогою поляриметричного радіолокатора / Аверьянова Ю.А., Аверьянов А.А., Яновський Ф.Й. // Вісник НАУ. - 2006. - № 2.- с. 38-40.
79. ПАТЕНТ на корисну модель и 2008 04248 Україна. МПК (2006) П01І 13\00. Поляриметричний радіолокатор / Авер'янова Юлія Анатоліївна, Аверьянов Анатолій Олексійович, Яновський Фелікс Йосипович.; Власник Національний

Авіаційний Університет. - №34917; Заявл.04.04.2008 ; опубл. 26.08.2008, Бюл.№ 16.

80. Averyanova Yu. The possibility to use polarimetric radar for atmospheric turbulence intensity estimate / Averyanova Yu. // Proc. of the National Aviation University. - 2006. № 3 (29). - P. 46-48.
81. Averyanova Yu. Polarization signal components estimate in weather radar / Yu. A. Averyanova, A. A. Averyanov, F.J. Yanovsky // 12th Intern. Conf. on Mathematical methods in electromagnetic theory, Odesa, 2008.: Proc. of Conference. – 07. 2008. - P. 360-362.
82. Averyanova Yu. The Estimate of Instantaneous Power of Polarization Spectrum Components in Polarmetric Weather Radar / Yu. Averyanova, A. Averyanov, F.J Yanovsky // 2nd Intern. Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS2008), 22-24 September, Kiev.: Conference proc. 09.2008. - P. 179-181.
83. Averyanova Yu.A. Polarization selective antennas for reflected wave depolarization determination / Yu.A. Averyanova, F.J.Yanovsky, A.A. Averyanov // International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT 2009), 06-09 October, 2009, Lviv, Ukraine, Conference proceedings. – X.2009. - PP. 256-258.
84. Авер'янова Ю.А. Концепція застосування поляризаційно-чутливих антен для локації об'єктів нестабільної форми / Ю.А. Авер'янова, А.А. Аверьянов, Ф.И.Яновський // Вісник НАУ -К.: НАУ, 2011. - Том 1- С. 27-33.
85. Авер'янова Ю.А. Оцінювання ступеня деполяризації відбитих від гідро метеорів радіохвиль амплітудним методом / Ю.А. Авер'янова А.А. Аверьянов, Ф.И. Яновський // Вісник НАУ -К.: НАУ, 2010. - Том 1- С. 100-104.
86. Frost W. Fundamentals and Applications [Handbook of Turbulence] // Frost W., Moudlen T. H. - Plenum Press, 1977. – 535 p.
87. Averyanova Yu. A. Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization / Averyanova Yu. A. // 34th European microwave Conference EuRAD 2004, 11-15 October 2004, Amsterdam. The Netherlands.: Conference proc. 10., 2004. - P. 20-32.



88. Ю.А.Авер'янова, Алгоритм оцінювання швидкості вітру поляриметричним радіолокатором / Ю.А.Авер'янова // Вісник - К.: НАУ, 2013. - Том 2- С. 44-49.
89. Pruppacher H.R. A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air / H.R. Pruppacher, K.V. Beard // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. - 1970. - Vol. 96 - P. 247–256
90. Beard K.H. A new model for equilibrium shape of rain drops / K.H. Beard, C.Chuang // Journal of Atmospheric Sciences. - 1987. - Vol. 28. – P. 1509–1524
91. Atlas D. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence / D. Atlas, R.C. Srivastava, R.S. Sefhon // Reviews of Geographical and Space Physics. - 1973. - Vol 11 #1. – P. 1-35
92. Pruppacher H.R. A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops / Pruppacher H.R., R.L. Pitter // Journal of Atmospheric Sciences. - 1971. -Vol. 28. – P. 86-94
93. Cherniakov M. Use of double frequency radar for measurements of rain parameter profile // M. Cherniakov, G. Khlopov, A. Linkova, O. Voitovich // International Radar Symposium (IRS 2011), September 7-9, 2011, Leipzig Germany. : Conference proc. – 2011. – P. 250-255
94. Linkova A. Combined Use of Radiometer and Double Frequency Radar for Measurment of Rain Intensity / Anna Linkova, Grygoriy Khlopov // Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS 2014), September 2014, Kyiv, Ukraine. : Conference proc. – 2014. –P. 35-37
95. Khlopov G. Application of Double Frequency Radar for Measurements of Rainparameters/ G. Khlopov, A. Linkova, S. Khomenko, O. Vojtovich // Radar Method and system Symposium (RMSW 2010), September, Kyiv, Ukraine.: Conference proc. – 2010.- P. 22.3-22.6
96. Дэйч М.Е. Динамика газов в двухфазных средах / М.Е. Дэйч, Г.А. Филипов // М.: Энергоиздат, 1981. – 471 с.

97. Tokay A. A field Study of Raindrop Oscillations. Part I: Observation of Size Spectra and evaluation of Oscillation Causes / A. Tokay, K. V Beard // *Journal of Applied Meteorology* - 1996. - Vol. 35. – P.1671-1687.
98. Kubesh R.J. Laboratory measurements of spontaneous oscillations for moderate-size raindrops / R.J. Kubesh, K.V Beard // *Journal of Atmospheric Sciences*. - 1993- Vol. 50. – P.1089-1098.
99. Горелик А.Г. Влияние вибрации капель дождя на поляризационные характеристики радиолокационного сигнала / А.Г. Горелик, В.В. Стерлядкин // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. – 1989. - Т. 25, N. 9. - С. 960 - 968.
100. Lamb G. *Hydrodynamics*, Cambridge University Press, 6th edition, 1975, pp. 738.
101. Стерлядкин В.В. Натурные измерения колебаний капель осадков // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. - 1988. - Т.24. N.6 . – С.613-621
102. Ляшевский А.С. Движение жидких капель в потоке газа / Ляшевский А.С. // *Известия вузов. Энергетика*. - 1963. - № 7. С. 75–81.
103. Комп'ютерне моделювання аеродинаміки рідких гідрометеорів / Ю.А. Аверьянова, А.А. Аверьянов // *Журнал «Технологические системы»*. – 2006.- № 3– С. 43-45.
104. Averyanova Yu. Turbulence Intensity Classification Based on Estimating Statistical Polarimetric Parameters/ Yuliya Averyanova, Felix Yanovsky, Anatoly Averyanov // *International Conference on Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP-2010)*, Kiev, Ukraine, October 13-14.: Conference proc. – 2010. - P.95-98.
105. Averyanova Yu. Statistical Algorithm for Turbulence Detection using Polarization Features of Radar Reflections from Rain/ Yu. Averyanova // *International Radar Symposium (IRS 2015)*, June 24-26, 2015, Dresden, Germany.: Conference proc. - P.593-596.

106. Санитарно-гигиеническая характеристика вредности, опасности, напряженности, тяжести труда членов экипажей воздушных судов Гражданской авиации России / В.М. Гладков. - 2011 г.
107. “Руководство по авиационной медицине»: Doc. 8984, издание второе. - ICAO, 2005 г. – 476 с.
108. Гладков В.М. Человеческий фактор [конспект лекций] / Гладков В.М. –К.: Укрэерорух, 2011.
109. «Руководство по обучению в области человеческого фактора»: Документ ICAO 96836 издание первое - ICAO, 1998г. – 370 с.
110. Бешелев С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Бешелев, Ф. Гурвич – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Статистика, 1980. – 23 с.
111. Миркин Б.Г. Проблема группового выбора/ Миркин Б.Г. – М.: Наука, 1974. – 256 с.
112. Гурвич, Ф. Г. Экспертиза: некоторые методологические вопросы [Текст] / Ф.Г. Гурвич // Вестн. АН СССР, 1978. — № 1. — с. 50—58.
113. Найтингейл М. Формальное определение ценности признаков. / Найтингейл М. – М: Статистика, 1972. - 155-166 с. – (В кн.: Статистическое измерение качественных характеристик).
114. Методы определения коэффициентов важности критериев / [Анохин А.М., Глотов В.А., Павельев В.В., Черкашин А.М.] // Автоматика и телемеханика. – 1997. – №8. – С. 3–35.
115. Медиковський М.О. Дослідження ефективності методів визначення вагових коефіцієнтів важливості / М.О.Медиковський, О.Б. Шуневич // - Вісник Хмельницького національного університету. - 2011. - №5 – С. 176 -181
116. Dalkey N. The Delphi Method and Experiment Study of Group Opinion / Dalkey N. // - Rand MemoEM – 1969. – 588p.
117. Flight Safety and Volcanic Ash: ICAO Doc 9974, First Edition. – 2012. – 46p.
118. Safety Management Manual (SMM) : ICAO Doc 9859, Third Edition. – 2013. – 251 p.

119. Авер'янова Ю.А. Інтерактивна глобальна мережа отримання, обміну та поширення метеорологічних даних / Авер'янова Ю.А. // - Вісник НАУ - К.: НАУ, 2012. - Том 4- С. 26-30.
120. Yanovsky F. J. Weather Data Obtaining and Dissemination Using ADS-B / F. J. Yanovsky, M. Zh. Bokal //9th Innovative Research Workshop & Exhibition, December 7 - 9, 2010.: EUROCONTROL Experimental Centre Brétigny-sur-Orge, France. – 12. 2010. #167 - pp. 1-5.
121. Аверьянова Ю.А. Динамічна складова глобальної інтерактивної мережі одержання та обміну метеорологічними даними / Ю.А Аверьянова., Ф.Й Яновський // - Вісник НАУ - К.: НАУ, 2011. - Том 4- с. 36-41.
122. Aviation Today Network. [Електроний ресурс] / Доступ до журн.: [www.aviationtoday.com/asw/categoris/military/20657.html](http://www.aviationtoday.com/asw/categoris/military/20657.html)
123. ICAO and WMO Meteorology division meeting, 2014, SWIM Developments and forseen deployment in Europe, Montreal 7-18 July, 2014.
124. Pitertsev A. Polarimetric radar as a device for detecting potentially dangerous zones of aircraft icing. Backscattering of electromagnetic waves from ice crystals in cloud / A. Pitertsev, F. J. Yanovsky // Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS -2014) : MRRS Proceedings/ - 2014 . – p. 38-41.
125. Yanovsky F.J. Doppler-Polarimetric Radar Observations of Turbulence in Rain / F.J. Yanovsky, C.M.H. Unal, W.J. Russchenberg // Report: IRCTR-S-006-03 (September 2002 – March 2003), TU-Delft, The Netherlands, 2003, 102.)
126. Yanovsky F. J. Retrieval of information about turbulence in rain by using Doppler–polarimetric radar/ F. J. Yanovsky, H. W. J. Russchenberg, C. M. H. Unal // IEEE Trans. - 2005. - Microwave Theory Tech. 53 – p. 444–450.
127. Unal C.M.H. Radar Doppler polarimetry applied to precipitation measurements: introduction of the spectral differential reflectivity/ C.M.H.Unal, D.N. Moisseev, F.J. Yanovsky, H.W.J. Russchenberg // Proceedings of the 30th International Conference on Radar Meteorology (American Meteorological Society, Boston), 2001. - P. 316–318.

128. Yanovsky F.J. Inferring microstructure and turbulence properties in rain through observations and simulations of signal spectra measured with Doppler–polarimetric radars / Yanovsky F.J. // Book chapter in: *Polarimetric Detection, Characterization, and Remote Sensing*, Springer, 2011. - pp. 501-545.
129. Doppler–polarimetric models of microwave remote sensing of rain / F. J. Yanovsky, H. W. J. Russchenberg, L. P. Ligthart // *Proceedings of the 11th Conference on Microwave Technique*, University of Pardubice, The Czech Republic, 2001. - pp. 47–62.
130. Yanovsky F. J. Phenomenological models of Doppler–polarimetric microwave remote sensing of clouds and precipitation / Yanovsky F. J. // *IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. IGARSS-02*. - Vol. 3, 2002, - P. 1905–1907.
131. Sinitsyn R.B. Ultrawideband Signal Processing Algorithms for Radars and Sodars / R.B. Sinitsyn, F.J. Yanovsky // *Proc. of Third International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, Sevastopol, Ukraine. - 2006. - pp. 66-71.
132. Sinitsyn R.B. Noise signal for sodar application / R.B. Sinitsyn, A.Y. Beletsky, F.J. Yanovsky // *Applied Radioelectronics*. - Vol.3, No 4. - pp. 35-38.
133. Maslikowski L. Short-Range C-Band Noise Radar for Meteorological Application / L. Maslikowski, D. Glushko, K. Kulpa, F. Yanovsky // *2013 IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2013. - pp. 473-475.
134. Maslikowski L. Atmospheric Precipitation Sensing with a Short-Range C-Band Noise Radar / L. Maslikowski, K. Kulpa, D. Glushko, F. Yanovsky // *Proceedings of IRS-2013*, Dresden, Germany, 2013. - pp. 791-798.
135. NextGen is now for general aviation. [Электроний ресурс] / Доступ до журн.: <http://www.faa.gov/news/updates/?newsId=77744>
136. von Grunigen, S., S. Willemse and T. Frei, 2014: Economic value of meteorological services to Switzerland’s airlines: The case of TAF at Zurich airport. *Weather, Climate Society*, 6: 264-272

137. Оценивая погоду и климат: экономическая оценка метеорологического и гидрологического обслуживания. ВМО - №1153

[http://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_1153\\_ru.pdf](http://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_1153_ru.pdf)

138. Final Report on National Aviation Weather Program 10-Year Accident Reduction Initiative.

139. ПАТЕНТ на корисну модель №106864 Україна.МПК (2016.01). Система одержання та поширення метеорологічних даних / Авер'янова Юлія Анатоліївна, Яновський Фелікс Йосипович.; Власник Національний Авіаційний Університет.- № и 2015 11020; заявл.11.11.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9

## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

## РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

1. Результати моделювання за формулами 4.10 та 4.11 та комп'ютерною моделлю рис.4.5

1.1 Розмір крапель 1 мм, поляризація зондувальної хвилі  $54.7^{\circ}$ , поляризації приймальних антен :  $54.7^{\circ}$ ,  $99.7^{\circ}$ ,  $144.7^{\circ}$ .

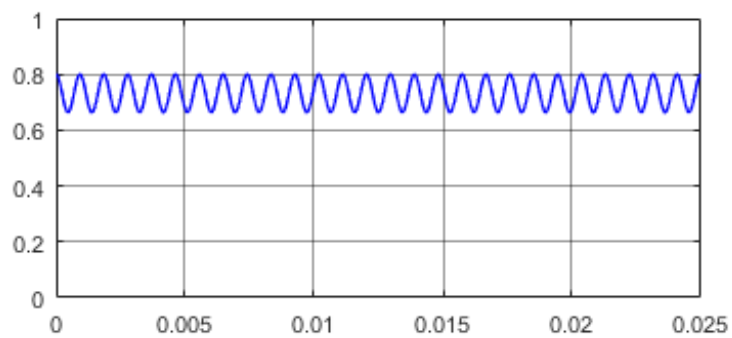


Рисунок А1- Зміна коефіцієнта форми краплі

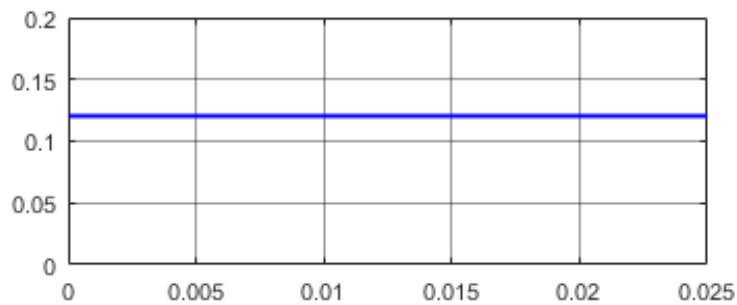


Рисунок А2 - Обвідна зондувальної хвилі

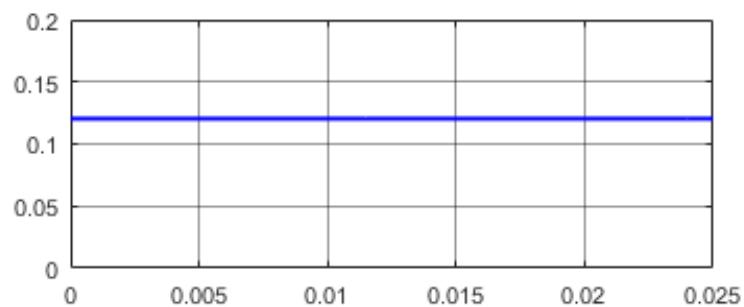


Рис. А3 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $54.7^{\circ}$

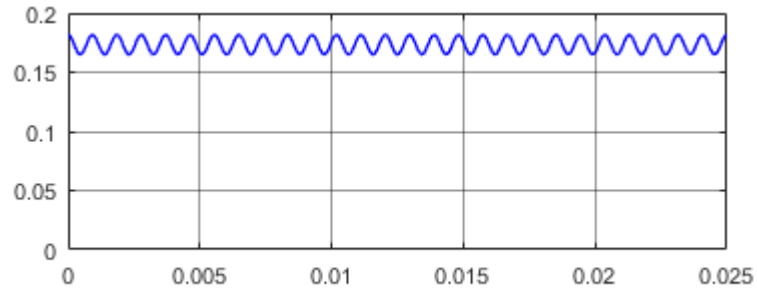


Рис. А4 Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $99.7^\circ$

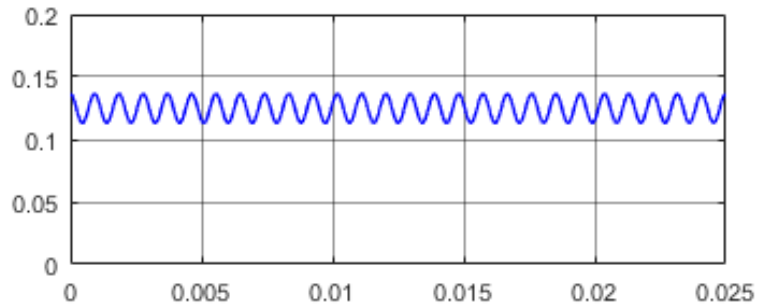


Рис. А5 Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $144.7^\circ$

1.2. Розмір крапель 3 мм, поляризація зондувальної хвилі  $54.7^\circ$ , поляризації приймальних антен :  $54.7^\circ, 99.7^\circ, 144.7^\circ$ .

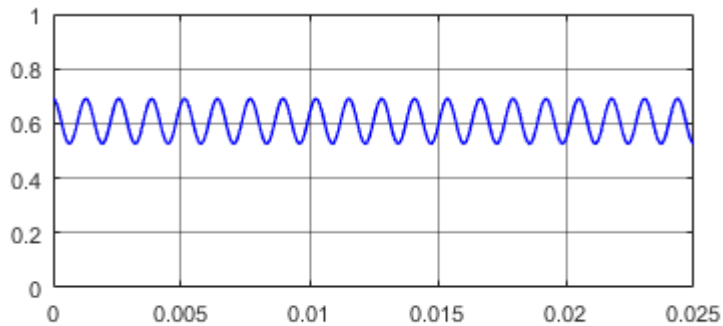


Рис. А6 Зміна коефіцієнта форми краплі

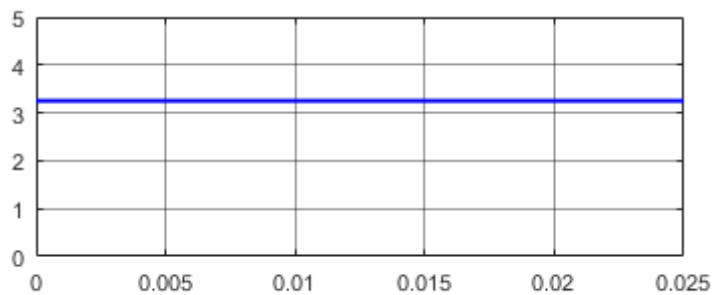


Рис. А7 Обвідна зондувальної хвилі



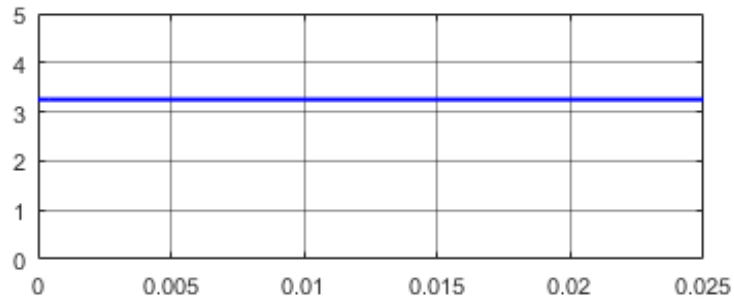


Рис. А8 Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $54.7^{\circ}$

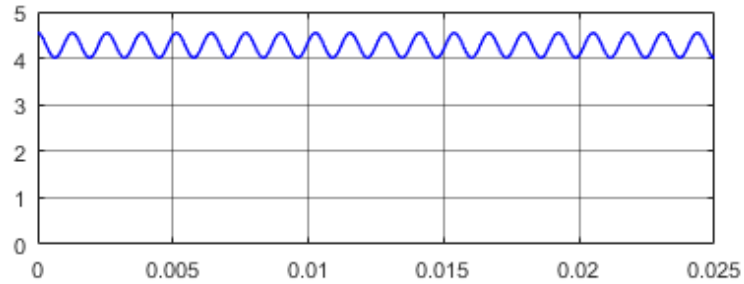


Рис. А9 Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $99.7^{\circ}$

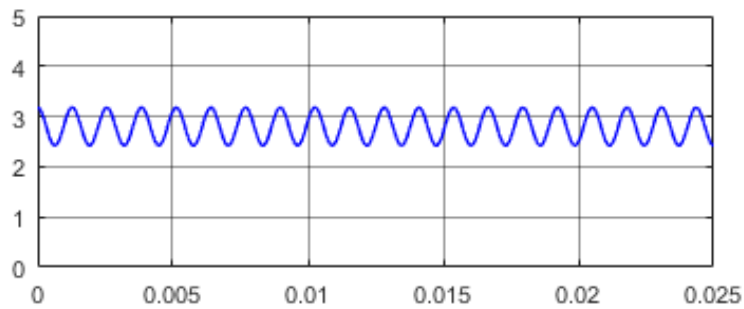


Рис. А10 - Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $144.7^{\circ}$

1.3. Розмір крапель 4 мм, поляризація зондувальної хвилі  $54.7^{\circ}$ , поляризації приймальних антен :  $54.7^{\circ}$ ,  $99.7^{\circ}$ ,  $144.7^{\circ}$ .

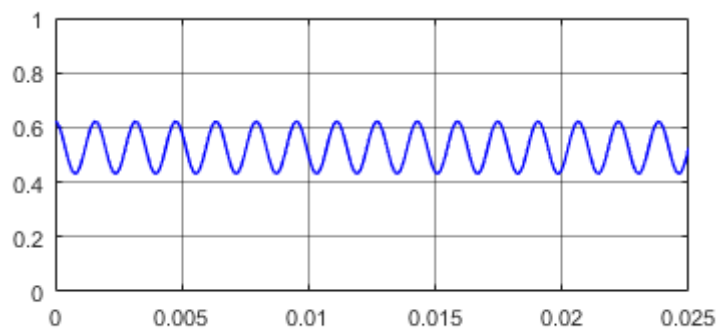


Рис. А11 Зміна коефіцієнта форми краплі

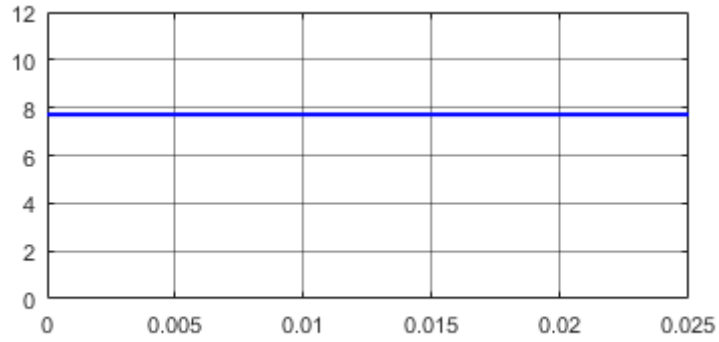
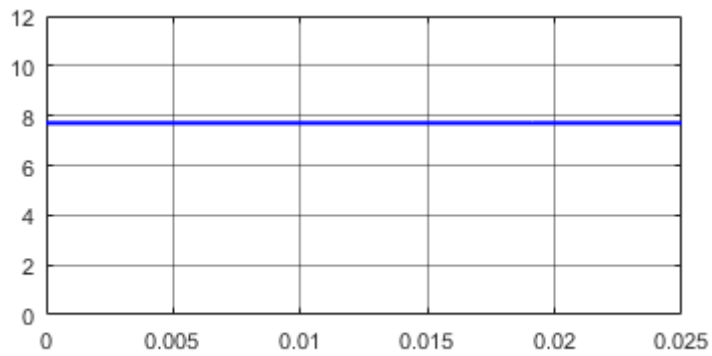
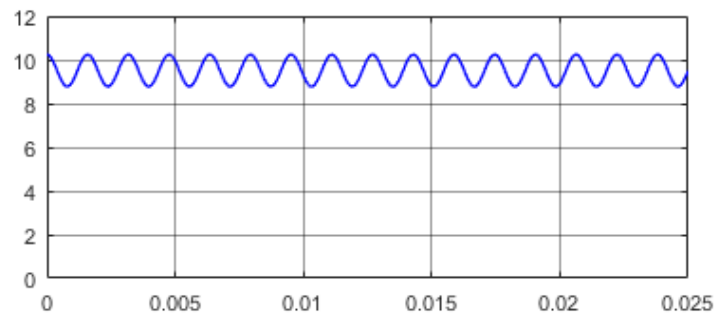
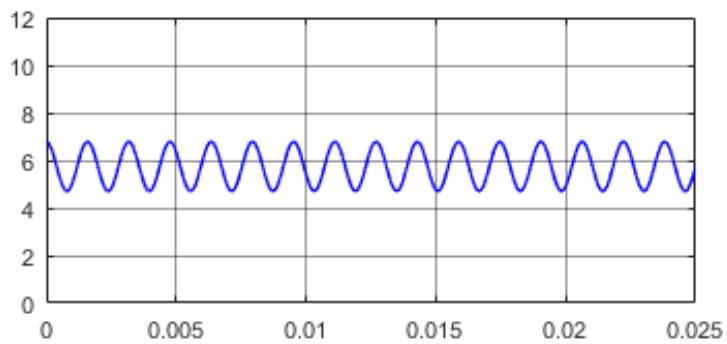


Рис. А12 Обвідна зондувальної хвилі

Рис. А13 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $54.7^{\circ}$ Рис. А14 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $99.7^{\circ}$ Рис. А15 Обвідна сигналу, що приймається антеною з поляризацією  $144.7^{\circ}$

2. Результати моделювання для випадку відбиття від ансамблю гідрометеорів за формулаю 4.12

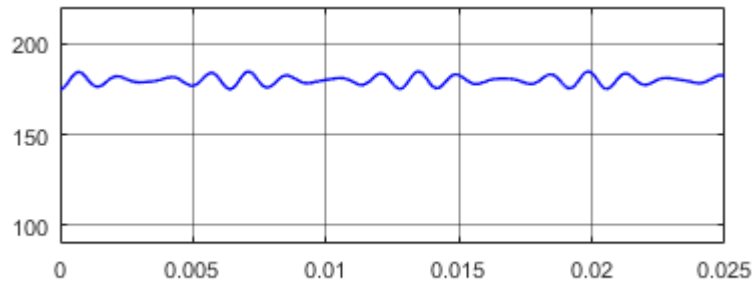


Рис. А16 Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $54.7^{\circ}$

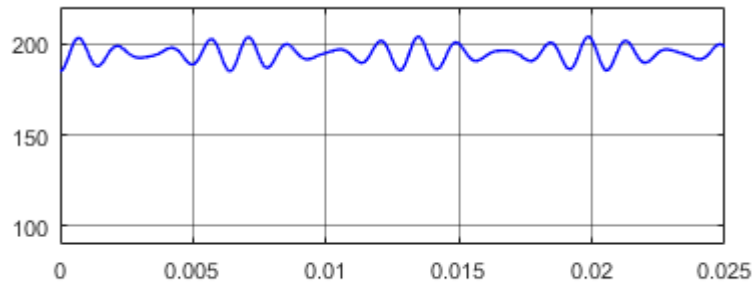


Рис. А16 Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $84.7^{\circ}$

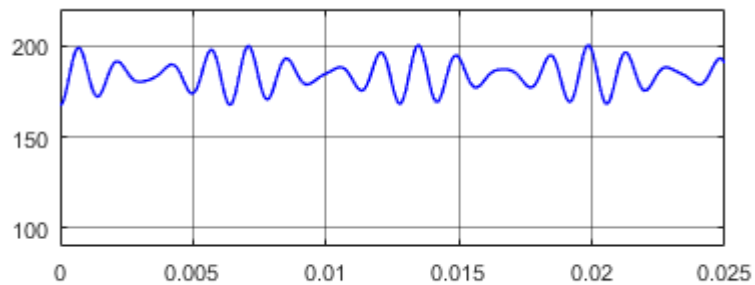


Рис. А17 Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $114.7^{\circ}$

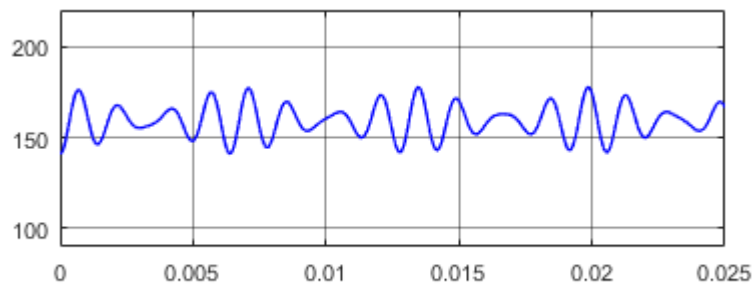


Рис. А18 Обвідна сигнлалу, що приймається антеною з поляризацією  $129.7^{\circ}$

### 3. Результати моделювання відповідно до до схеми 4.2.1.

3.1. Моделювання відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу з поляризаційною модуляцією. Впродовж осі  $y$  відкладено рівень обвідної промодульованого радіолокаційного сигналу  $S_2$ . Впродовж осі  $x$  відкладено час  $t$ .

S2

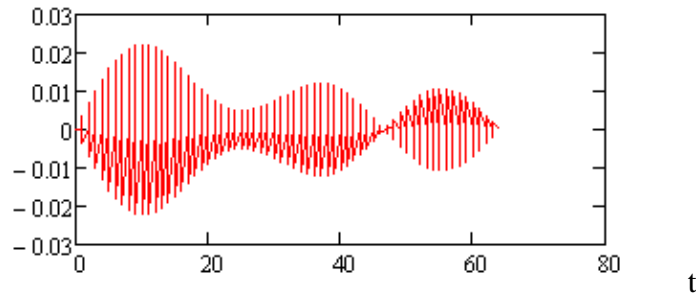


Рис. А19 Характер зміни обвідної за відсутності турбулентності

S2

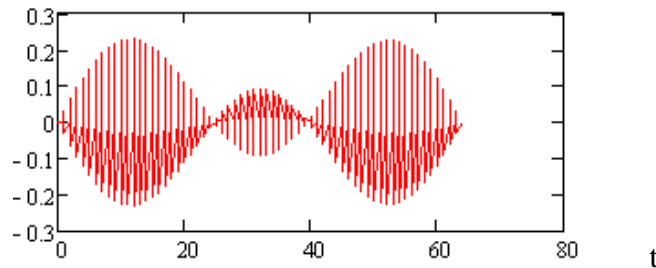


Рис. А20 Характер зміни обвідної за наявності слабкої турбулентності

S2

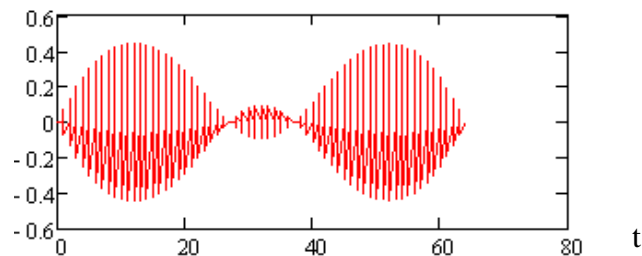


Рис. А21 Характер зміни обвідної за наявності помірної турбулентності

S2

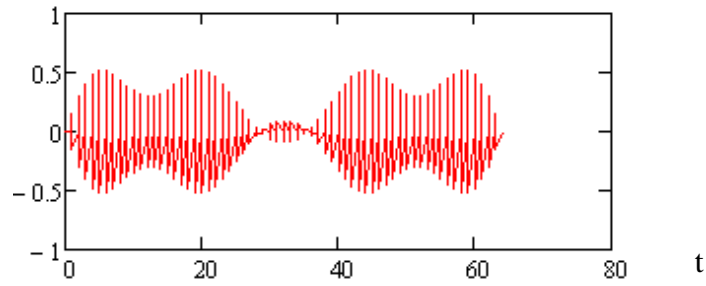


Рис. А22 - Характер зміни обвідної за наявності помірної турбулентності та наявності декількох сильних поштовхів

S2

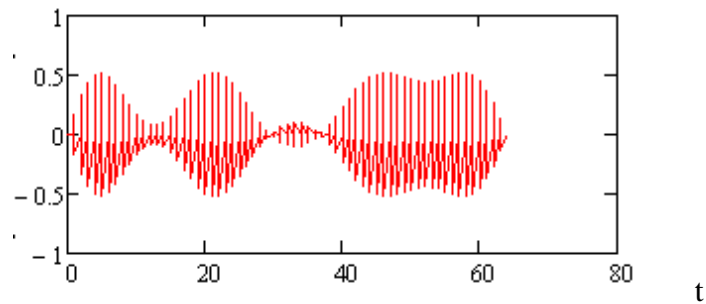


Рис. А23 - Характер зміни обвідної за наявності сильної турбулентності

S2

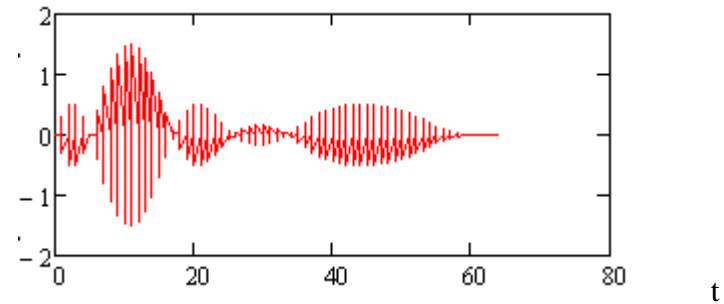


Рис. А24 - Характер зміни обвідної за наявності дуже сильної турбулентності

S2

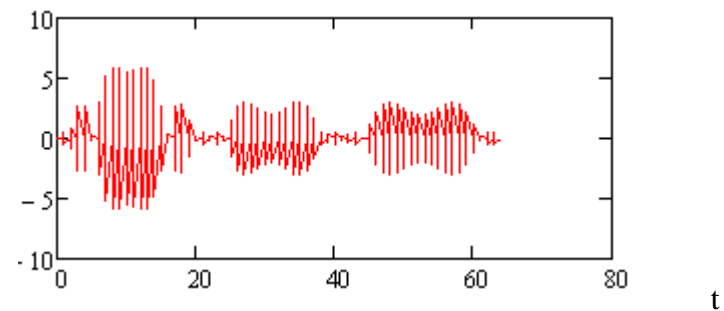


Рис. А25 - Характер зміни обвідної за наявності дуже сильної турбулентності та дуже сильних поштовхів

S2

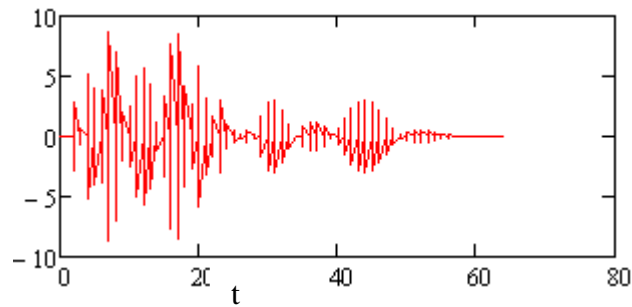


Рис. A26 Характер зміни обвідної за наявності дуже сильної турбулентності з великою кількістю дуже сильних поштовхів

3.2. Моделювання обвідної відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу з поляризаційною модуляцією (а) та її частотний спектр (б).

Рівень обвідної відкладено впродовж осі  $y$ . Час відкладено впродовж осі  $x$  для випадку змодельованої обвідної (а) та частота для випадку змодельованих спектрів (б).

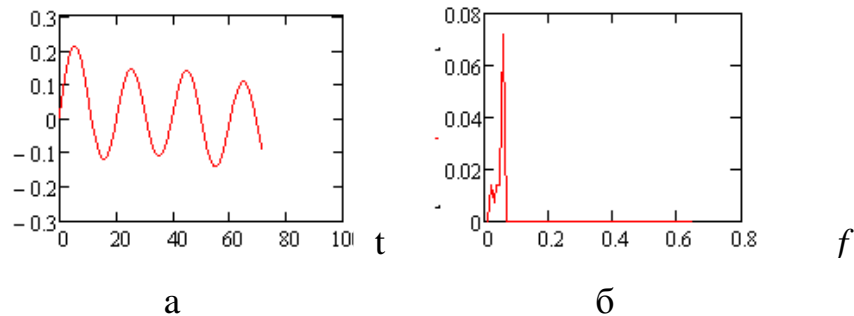
 $S_E$ 

Рис. A27 Форма обвідної (а) та частотний спектр (б) для випадку спокійної атмосфери

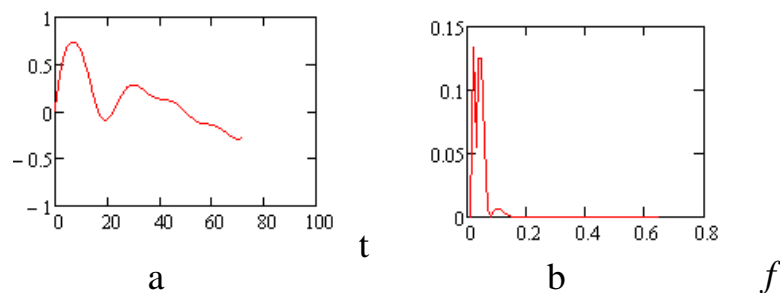
 $S_E$ 

Рис. A28 Форма обвідної (а) та частотний спектр (б) для випадку слабкої турбулентності

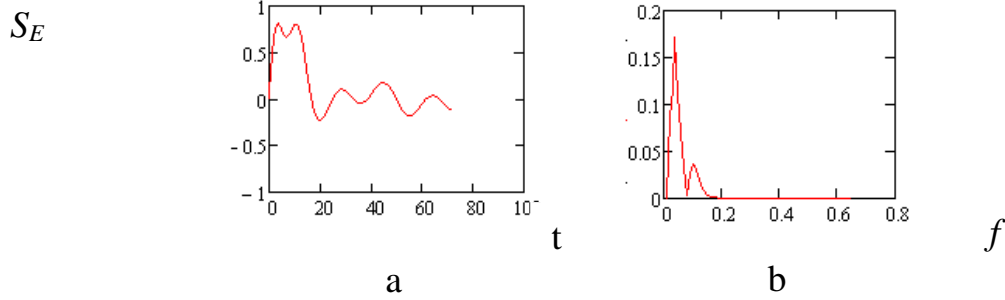


Рис. А29 Форма обвідної (а) та частотний спектр (b) для випадку помірної турбулентності

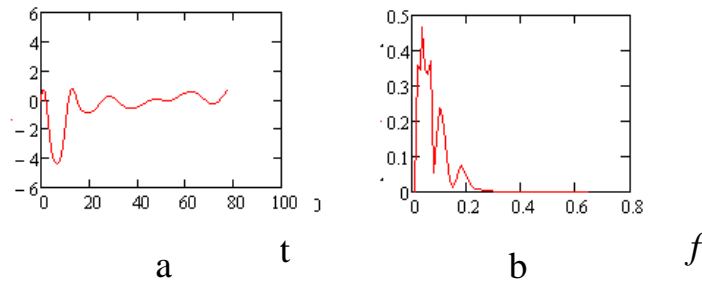


Рис. А30 Форма обвідної (а) та частотний спектр (b) для випадку сильної турбулентності

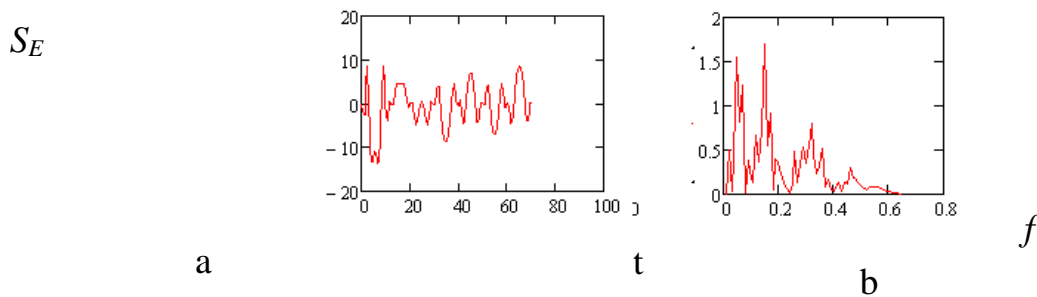


Рис. А31 Форма обвідної (а) та частотний спектр (b) для випадку дуже сильної турбулентності ( $\Delta n$  має порядок  $\pm 6g$  )

3.3. Моделювання відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу з поляризаційною модуляцією відповідно до моделі 4.15. Впродовж осі  $y$  відкладено рівень обвідної промодульованого радіолокаційного сигналу  $S_2$ . Впродовж осі  $x$  відкладено час  $t$ . Результати наведені для різних кутів поляризації приймальної антени та для відбиття від гідрометеорів розміром 1 мм.

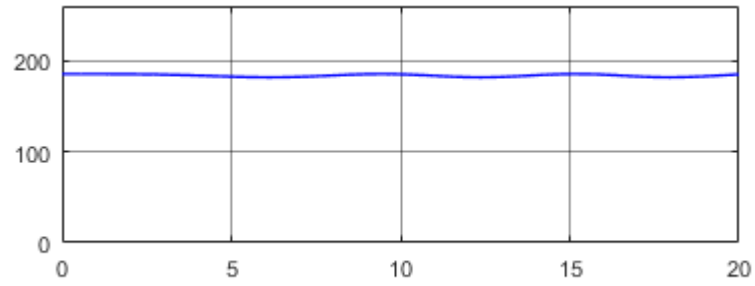


Рис. А32 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $54.7^{\circ}$

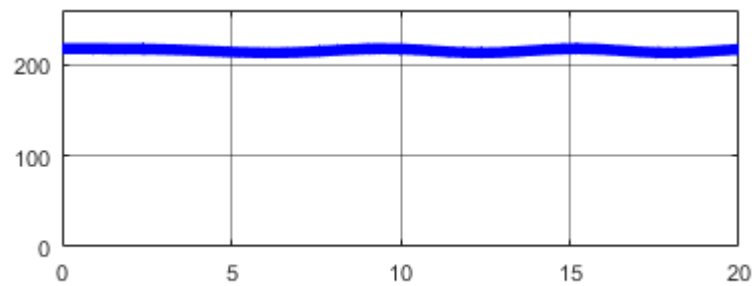


Рис. А33 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $69.7^{\circ}$

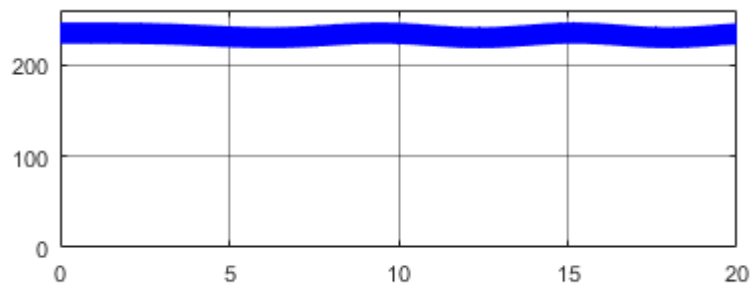


Рис. А34 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $84.7^{\circ}$

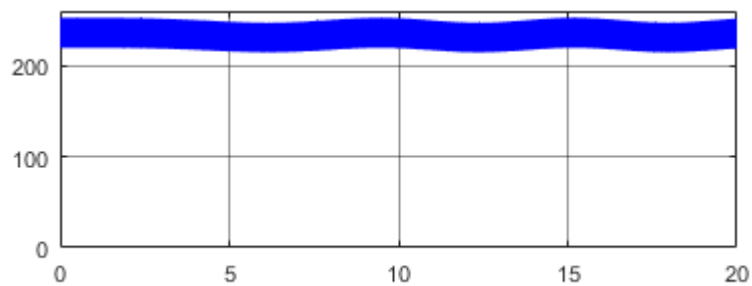




Рис. А35 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $99.7^{\circ}$

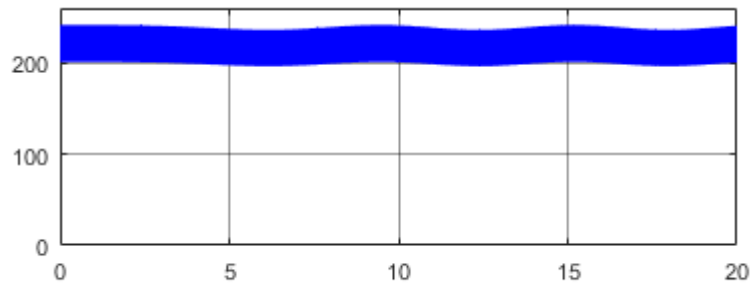


Рис. А36 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $114.7^{\circ}$

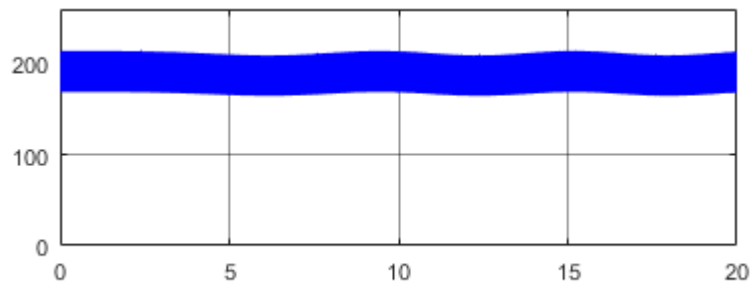


Рис. А37 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $129.7^{\circ}$

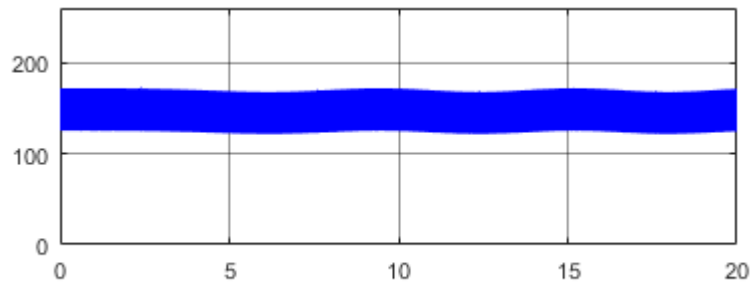
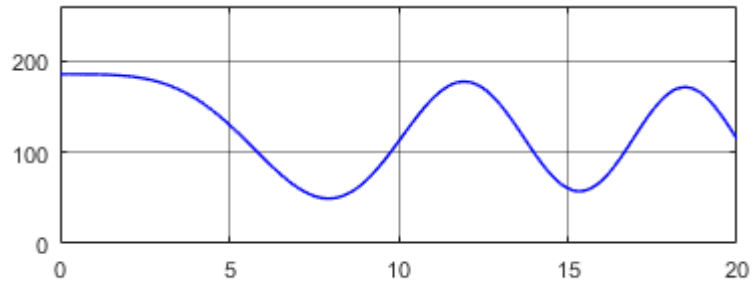


Рис. А38 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $144.7^{\circ}$

3.4. Моделювання відбитого від сукупності гідрометеорів радіолокаційного сигналу з поляризаційною модуляцією відповідно до моделі 4.15. Впродовж осі  $y$  відкладено рівень обвідної промодульованого радіолокаційного сигналу  $S_2$ . Впродовж осі  $x$  відкладено час  $t$ .

Результати наведені для різних кутів поляризації приймальної антени та для відбиття від ансамблю гідрометеорів з розмірами 1, 2 та 3 мм.



4.

Рис. А39 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $54.7^{\circ}$

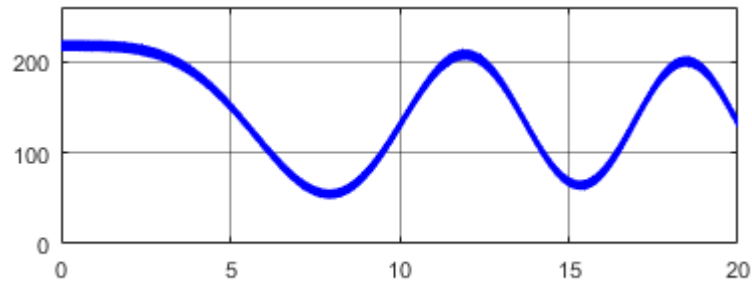


Рис. А40 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $69.7^{\circ}$

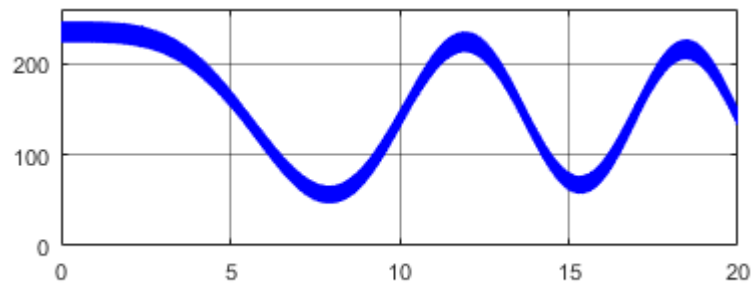


Рис. А41 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $84.7^{\circ}$

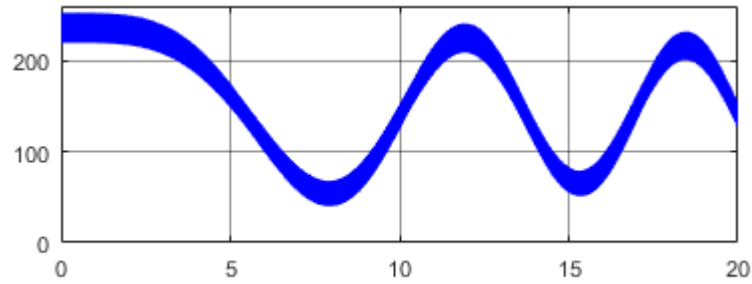


Рис. А42 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $99.7^{\circ}$

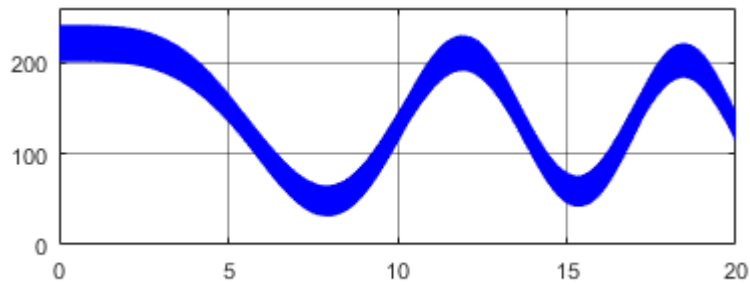


Рис. А43 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $114.7^{\circ}$

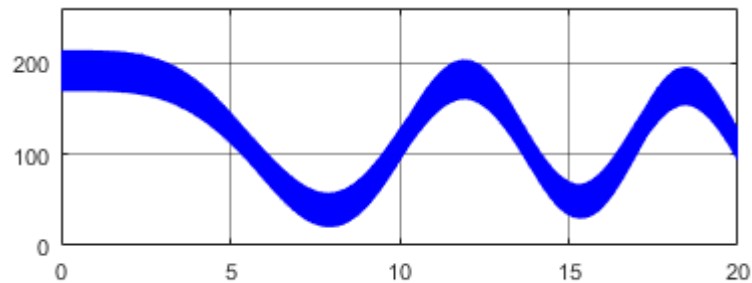


Рис. А44 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $129.7^{\circ}$

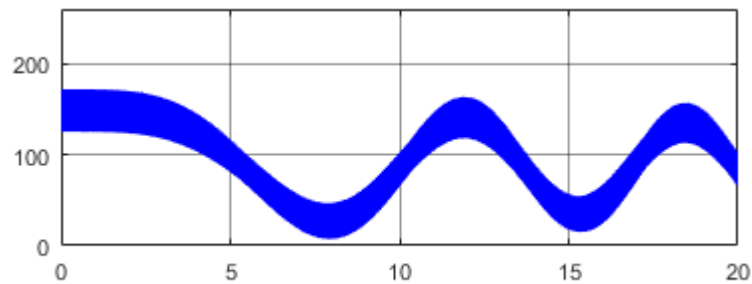


Рис. А45 Форма обвідної з поляризаційною модуляцією за наявності турбулентності на антені з поляризацією  $144.7^{\circ}$

## ДОДАТОК Б

## АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з науково-  
методичної роботи ХНУРЕ  
І.В. Рубан  
" 24 " 01 2013 р.



АКТ  
впровадження результатів дисертаційної роботи  
Авер'янової Юлії Анатоліївни

Комісія у складі:

Голови – головного наукового співробітника НДЧ ХНУРЕ, д.т.н., професора  
Леховицького Давіда Ісааковича,

та членів комісії:

провідного наукового співробітника НДЧ ХНУРЕ, к.т.н., доцента Рябухи Вячеслава  
Петровича,

провідного наукового співробітника НДЧ ХНУРЕ, к.т.н., с.н.с. Зарицького Валерія  
Івановича,

склала цей Акт про наступне.

Результати дисертаційної роботи Авер'янової Юлії Анатоліївни «Методологічні засади метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням поляриметричних засобів дистанційного зондування», зокрема матеріали її досліджень, що викладені у звіті з НДР № 685-ДБ 10 «Теоретико-експериментальне обґрунтування шляхів розширення функціональних можливостей метеорологічного радіолокатора та підвищення ефективності виявлення небезпечних метеорологічних явищ за рахунок використання поляризаційних властивостей зондувальних і відбитих сигналів» впроваджені у комплексному проєкті «Розроблення першого вітчизняного наземного когерентного метеорологічного радіолокатора», код фундаментальної НДР 2201020, початок 01 липня 2010 р., закінчення 30 червня 2013 р.

№	Назва впровадженого результату	Назва документу	Досягнутий ефект
1	Поляриметрична радіолокаційна система з багатопроменевим прийманням	Звіт № держ. реєстрації 0110U007697, 2012, розд.4.3, с. 176-181.	Підвищення якості метеоінформації, безпеки польотів їх регулярності та економічності
2	Методика вимірювання поляризаційного спектра	Звіт № держ. реєстрації 0110U007697, 2012, розд.3.4, с. 176-178.	Удосконалення радіолокаційних методів виявлення динамічних атмосферних явищ

Головний науковий співробітник  
НДЧ ХНУРЕ, д.т.н., професор

Д.І. Леховицький

Провідний науковий співробітник  
НДЧ ХНУРЕ, к.т.н., доцент

В.П. Рябуха

Провідний науковий співробітник  
НДЧ ХНУРЕ, к.т.н., с.н.с.

В.І. Зарицький

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор НАУ з  
навчально-виховної роботи

Іванова Т. В.  
« 19 » 2017 р.



АКТ  
впровадження результатів дисертаційної роботи  
Авер'янової Юлії Анатоліївни  
в навчальний процес НАУ

Ми, що підписалися нижче, директор Навчально-наукового інституту аеронавігації Мачалін І.О., завідувач кафедри аеронавігаційних систем Ларін В.Ю. і завідувач кафедри електроніки Яновський Ф.Й склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Авер'янової Юлії Анатоліївни «Методологічні засади метеорологічного забезпечення аеронавігації з використанням поляриметричних засобів дистанційного зондування» використовуються в навчальному процесі Навчально-наукового інституту аеронавігації на кафедрі аеронавігаційних систем та на кафедрі електроніки.

№	Що впроваджено	Форма впровадження	Ефект від впровадження
1	Поляриметричний метод радіолокаційного виявлення зон небезпечної турбулентності	Продовження розробки в магістерській дипломній роботі Візерської В.О. «Розробка алгоритму виявлення комплексних явищ погоди за допомогою метеорологічних радіолокаторів» (англ. мовою), лютий, 2011.	Підвищення якості підготовки магістрів
2	Моделі процесу відбиття від гідрометеорів, що вібрують	Постановка нової лабораторної роботи «Розсіяння поляризованих радіохвиль на об'єктах складної форми» з дисципліни «Радіоелектронні системи» з виконанням розрахунків і моделюванням в середовищі Матлаб, Київ, 2017	Підвищення якості підготовки магістрів за спеціальностями 8.050802.02 та 8.171 «Електронні системи».

Директор НН ІАН

І. Мачалін

Завідувач кафедри аеронавігаційних систем

В. Ларін

Завідувач кафедри електроніки

Ф. Яновський