

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

*Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису*

**Левченко Лариса Олексіївна**

УДК 534.8361:537.531:656.7(043.5)

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРЕННЯ**  
**АВІАЦІЙНОГО ШУМУ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НАВКОЛО**  
**АЕРОПОРТУ, ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСОБІВ ЇХ НОРМАЛІЗАЦІЇ**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека  
технічні науки

Галузь знань 21 – Національна безпека

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

\_\_\_\_\_ Л.О. Левченко

Науковий консультант: Запорожець Олександр Іванович, доктор технічних  
наук, професор

КИЇВ – 2020

## АНОТАЦІЯ

*Левченко Л.О.* Моделювання та прогнозування поширення авіаційного шуму, електромагнітних полів навколо аеропорту, обґрунтування засобів їх нормалізації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. Національний авіаційний університет, Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-практичної проблеми зниження та запобігання негативного впливу авіаційного шуму та електромагнітних полів на населення і довкілля навколо аеропорту.

Запропоновано удосконалення моделі ICAO DOC 9911 розрахунку контурів шуму врахуванням аеродинамічної конфігурації літака, уточненням оцінки поправки впливу земної поверхні та поправок на спрямованість випромінювання у задню напівсферу для різних типів двигунів літаків. Це дозволяє зменшити рівень експозиції шуму для одиночної події, підвищити точність встановлення зон регульованої забудови, зменшити кількість роздратованого населення від шуму в межах цієї зони із застосуванням ризик орієнтованого підходу додатково до збалансованого підходу для управління шумом, враховуючи неакустичні чинники вразливості населення.

Реалізовано комплекс моделей просторових поширень електромагнітних полів промислової частоти навколо розосереджених і локальних джерел. Удосконалено методологічні засади та автоматизовано моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних і кабельних ліній електропередачі, множинних джерел з різними закономірностями їх генерації та поширення у приміщеннях і на територіях.

Створено інформаційну систему екологічного моніторингу рівнів авіаційного шуму та електромагнітних полів, розроблено заходи і засоби захисту населення і довкілля від їх впливу.

Запропоновано методологічні, технологічні засади проектування і вироблення композитних металополімерних матеріалів для екранування

електромагнітних полів та захисту від шуму з керованими захисними властивостями.

Тема дослідження є актуальною та має важливе наукове та практичне значення.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає у:

- *вперше* обґрунтовано і реалізовано комплекс моделей просторових поширень електромагнітних полів промислової частоти навколо розосереджених і локальних джерел, найбільш критичних щодо електромагнітного впливу на населення і довкілля; це дозволяє розраховувати та прогнозувати електромагнітне навантаження на територіях і окремих об'єктах в умовах складної електромагнітної обстановки;

- *вперше* обґрунтовано і реалізовано визначати залежність «шум–режим роботи двигуна–аеродинамічна конфігурація літака–дистанція» замість залежності «шум–режим роботи двигуна–дистанція», рекомендованої чинним Керівництвом ІКАО Doc 9911 для обчислення контурів шуму навколо аеропорту, з урахуванням реальних умов експлуатації літаків та стану атмосфери;

- *вперше* запропоновано і реалізовано методологію оцінки ризику до визначення кількості роздратованого населення від експозиції авіаційного шуму з урахуванням акустичних та неакустичних чинників, що дозволяє оцінювати та регулювати реакцією населення, роздратованого впливом авіаційного шуму;

- *вперше обґрунтовано та розроблено* методологічні і технологічні засади проектування та вироблення універсальних композитних металополімерних матеріалів для захисту від впливу електромагнітних полів та шуму, що дозволяє керувати коефіцієнтом екранування електромагнітного поля: для ультрависоких частот 2,4 ГГц – 2,6 ГГц за вмісту дрібнодисперсної екрануючої металевої субстанції у полімерній матриці від 10% (за вагою) коефіцієнт екранування різко підвищується з 10,2 до 44,0; для магнітного поля промислової частоти за вмісту металевої екрануючої субстанції у полімерній матриці 5–20% (за вагою)

коефіцієнт екранування магнітного поля зростає з 1,2 до 15,0; при цьому найбільші значення індексу зниження шуму 41–44 дБ припадають на частоти звукових хвиль 6–8 кГц;

- *удосконалено*, обґрунтовано і запропоновано уточнену оцінку поправки впливу земної поверхні (інтерференції прямих і відбитих променів), яка у Керівництві з рекомендованого методу розрахунку контурів шуму навколо аеропорту (ICAO DOC 9911) є суттєво завищеною, що дозволяє підвищити точність методу розрахунку рівнів авіаційного шуму шляхом визначення поправки для кожного спектрального класу літаків (відповідно до класифікації міжнародної бази даних ANP, яка рекомендується до застосування в інтегральних моделях обчислення шуму від літаків) при зльоті і посадці та для двох типів поверхонь відбиття звукових променів – акустично м'якої і жорсткої;

- *удосконалено* поправку на спрямованість випромінювання у задню напівсферу на етапах наземного руху літаків в аеропорту у вигляді запропонованих залежностей четвертого порядку від кута спрямованості для різних літаків на відміну від залежності другого порядку, яке узагальнено описує будь-який тип літака у рекомендованому методі ICAO Doc 9911, що дозволяє додатково враховувати експозицію шуму, яка утворюється при рулінні літаків, випробуванні двигунів, використанні допоміжних силових установок, і якими раніше нехтували і не враховували у методі ICAO при розрахунку рівнів звуку в окремій точці і контурів шуму для одиночних подій та тривалих сценаріїв експлуатації літаків в аеропорту;

- *удосконалено* методологічні засади моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних і кабельних ліній електропередачі; це дозволило сформулювати основні засади прогнозування та керування електромагнітним навантаженням на території на стадіях проектування та модернізації цих об'єктів: удосконалення конструкцій ліній електропередачі, регулювання робочих струмів, що надає змогу за рахунок змін параметрів ліній

знизити рівні магнітних полів у 1,7-2,4 рази, обґрунтовано застосування екрануючих поверхонь і конструкцій тощо;

*отримали подальший розвиток:*

- методологія побудови просторових розподілів електромагнітних полів множинних джерел з різними закономірностями їх генерації та поширення у приміщеннях і на територіях, що дозволило раціоналізувати загальні схеми їх розміщення та впровадити заходи з електромагнітної безпеки на принципах розумної достатності;

- метод побудови контурів авіаційного шуму, який базується на ГІС-платформі і забезпечує прив'язку контурів шуму до цифрової мапи приаеродромної території, що дозволяє визначати ЗОЗ, зменшувати вразливість населення до роздратування від авіаційного шуму шляхом надання достовірної інформації про рівні звуку від окремих подій випромінювання шуму і для тривалих сценаріїв експлуатації літаків як адміністрації аеропорту, так населенню.

Практична значимість результатів дослідження підтверджена свідоцтвом про реєстрацію авторського права на твір у вигляді комп'ютерної програми, патентами на корисну модель, актами впровадження на підприємствах.

Результати дослідження впроваджені у Міжнародному аеропорту «Київ» імені Ігоря Сікорського, на Південній Електроенергетичній Системі ДП «НЕК Укренерго», на Київському підприємстві ТОВ «ЕКОТЕХЕНЕРГІЯ».

**Ключові слова:** моніторинг, оцінювання, моделювання, авіаційний шум, критерії шуму, електромагнітні поля, розосереджені та локальні джерела, інформаційна система, геоінформаційна система.

Список публікацій здобувача

***Публікації у наукометричних виданнях***

1. Халмурадов Б.Д., Левченко Л.О., Глива В.А., Перельот Т.М. Електромагнітна безпека та електромагнітна сумісність технічних засобів. *Системи обробки інформації*. 2015. Вип. 12 (137). С. 66–68. (*Index Copernicus*).

2. Левченко Л.О. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. *Системи обробки інформації*. 2016. № 1. С. 29–37. (*Index Copernicus*).

3. Левченко Л.О. Сучасний стан нормативно-правового забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 9 (146). С. 208–212. (*Index Copernicus*).

4. Коваленко В.В., Тихенко О.М., Левченко Л.О. Екранування електромагнітних полів локальних джерел. *Системи озброєння і військова техніка*. 2016. № 3(147). С. 64–68. (*Index Copernicus*).

5. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Оцінювання шумового впливу від повітряних суден в районі аеропорту. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ. 2017. Вип. 1/2017 (102). С. 121–128. (*Index Copernicus*).

6. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Удосконалення складової оцінювання авіаційного шуму для випадку його випромінювання у задній сектор. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ. 2017. Вип. 2/2017 (103). С. 54–63. (*Index Copernicus*).

7. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Моделювання рефракції при поширенні звуку на відкритому повітрі. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ. 2017. Вип. 3/2017 (104). С. 106–113. (*Index Copernicus*).

8. Glyva V., Kovalenko V., Levchenko L., Tykhenko O. Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Iss. 3/12 (87). P. 50–55. (*Scopus, Index Copernicus*).

9. Глива В.А., Ніколаєв К.Д., Левченко Л.О. Дослідження напруженостей зовнішніх полів різнорозмірного електротехнічного обладнання. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 5 (45). С. 9–11. (*Index Copernicus*).

10. Глива В.А., Ніколаєв К.Д., Колумбет В.П., Левченко Л.О. Методологія дослідження низькочастотних електромагнітних полів в умовах сталого

розвитку технологій. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 6 (46). С. 219–223. (*Index Copernicus*).

11. Левченко Л.О., Сідько О.С. Застосування гіс-технології для візуалізації результатів моделювання поширення авіаційного шуму. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2018. № 2 (48). С. 120–125. (*Index Copernicus*).

12. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust / Glyva V., Podkopaev S., Levchenko L., Karaieva N., Nikolaiev K., Tykhenko O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B.. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 1/5 (91). P. 10–17. (*Scopus, Index Copernicus*).

13. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen / Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K.. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6. No 5 (96). P. 54–61. (*Scopus, Index Copernicus*).

14. Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ходаковський О.В. Методологія зниження рівнів електромагнітних полів в умовах переходу на міжнародні стандарти електромагнітної сумісності. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Зб. наук. праць*. Дніпро: ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». 2018. Вып. 105. С. 174–179. (*Directoty of Research Journals Indexing, ResearchBib*).

15. O. Zaporozhhets, L. Levchenko, K. Synylo. Risk and exposure control of aviation impact on environment. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol.3. No 3. PP. 17– 24. (*Index Copernicus*).

16. Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures / Glyva V., Barabash O., Kasatkina N., Katsman M., Levchenko L., Tykhenko O., Nikolaiev K., Panova O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No 10 (103). P. 26 – 31. (*Scopus, Index Copernicus*).

17. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range / V. Glyva, N.

Kasatkina, V. Nazarenko, N. Burdeina, N. Karaieva, L. Levchenko, O. Panova, O. Tykhenko, B. Khalmuradov, O. Khodakovsky. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No 12 (103). PP. 40 – 47. (Scopus).

***Публікації у фахових виданнях***

18. Левченко Л.О., Глива В.А., Клапченко В.І., Репко А.Ю. Інформаційний супровід екологічного моніторингу. *Науково-технічна інформація*. 2009. № 1. С. 16–18.

19. Левченко Л.О., Лук'яненко С.О., Карпенко С.Г., Глива В.А. Оцінка економічної складової екологічних досліджень. *Науково-технічна інформація*. 2009. № 3. С. 7–9.

20. Левченко Л.О., Глива В.А., Євтушок О.Я. Моделювання розповсюдження авіаційного шуму поблизу аеропортів та його впливу на оточуюче середовище. *Теорія і практика будівництва*. 2010. № 6. С. 25–29.

21. Левченко Л.О., Євтушок О.Я. Сучасні підходи до зниження рівнів шуму поблизу підприємств з неперервним циклом виробництва. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2011. Вип. 20. С. 223– 28.

22. Левченко Л.О., Халмурадов Б.Д., Грицаюк А.М. Інформаційний супровід моніторингу стану довкілля у надзвичайних ситуаціях. *Містобудування і територіальне планування*. 2013. № 49. С. 279– 84.

23. Глива В.А., Левченко Л.О., Паньків Х.В. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання. *Управління розвитком складних систем*. 2014. Вип. 20. С. 174–179.

24. Здановський В.Г., Глива В.А., Левченко Л.О. Загальні підходи до моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2014. Вип. 27. С. 18–24.

25. Левченко Л.О., Перельот Т.М. Дослідження рівнів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі та їх нормування. *Містобудування та територіальне планування*. 2014. Вип. 53. С. 275–279.



26. Запорожець О.І., Клапченко В.І., Левченко Л.О., Панова О.В. Сучасні підходи до моделювання просторових змін геомагнітного поля у будівлях та спорудах. *Управління розвитком складних систем*. 2015. Вип. 21. С. 133–138.

27. Халмурадов Б.Д., Левченко Л.О., Глива В.А., Перельот Т.М. Проблеми узгодженості нормативної бази з електромагнітної сумісності та електромагнітної безпеки. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. № 4 (21). С. 103–106 (Google Scholar).

28. Глива В.А., Левченко Л.О., Перельот Т.М. Просторові критерії екранування низькочастотних магнітних полів. *Управління розвитком складних систем*. 2015. Вип. 22. С. 158–164.

29. Глива В.А., Николаев К.Д., Левченко Л.А., Вовк А.А. Источники магнитных полей в условиях сложного гармонического состава электрического тока силовой сети. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2017. №2 (41). С. 132–137.

#### ***Публікації у інших виданнях***

30. Глива В.А., Левченко Л.О., Яровой М.В. Інноваційні методи забезпечення неперервного моніторингу параметрів довкілля. *Проблеми науки*. 2008. № 6. С. 28–31.

31. Левченко Л.О. Визначення та прогнозування електромагнітної обстановки у приміщеннях методом моделювання. *Гігієна населених місць*. 2012. Вип. 60. С. 186–191.

32. Левченко Л.О., Глива В.А. Технічне та методичне забезпечення моделювання та прогнозування електромагнітної обстановки у приміщеннях. *Гігієна населених місць*. 2013. Вип. 61. С. 222–225.

33. Левченко Л.О., Сукач С.В., Коновалова О.В. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин для визначення зон безпечного перебування персоналу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2014. Вип. 6 (89). Ч. 1. С. 27–31.

34. Левченко Л.О. Концептуальний підхід до побудови системи моніторингу авіаційного шуму. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2015. Вип. 2 (34). С. 120–123 (*Google Scholar*).

35. Левченко Л.О. Моделювання шумового навантаження, утворюваного повітряними суднами. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2015. Вип. 3 (35). С. 170–173 (*Google Scholar*).

36. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Засади електромагнітного моніторингу міста в умовах підвищення електромагнітного навантаження на довкілля. *Екологічна безпека та природокористування*. 2015. Вип. 17. С. 28–34.

37. Левченко Л.О. Нормування електромагнітного навантаження на довкілля населених пунктів та шляхи його вдосконалення. *Містобудування та територіальне планування*. 2015. Вип. 55. С. 241–248.

38. Левченко Л.А., Перелёт Т.Н., Паньків К.В. Гармоники электрических токов промышленной частоты как источники магнитных полей и методы снижения их уровней. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2015. № 1. С. 14–22 (РИНЦ).

39. Левченко Л.О., Глива В.А., Карпенко С.Г. Просторові розподіли електромагнітних полів кабельних ліній електропередачі. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ. 2016. Вип. 1/2016 (33). С. 55–67 (*Index Copernicus*).

40. Козловська Т.Ф., Сукач С.В., Левченко Л.О. Критерії впливу електромагнітних полів на організм людини при плануванні працезохоронних заходів. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. Київ: НТУУ «КПІ», ЗАТ «Техновибух». 2016. Вип. 31. С. 87–95 (*BASE, WorldCat, Google Scholar*).

41. Левченко Л.О., Ходаковський О.В., Колумбет В.П. Застосування моделювання поширення електромагнітних полів для зниження їх впливу на людей і довкілля. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2016. Вип. 2(38). С. 129–132 (*Google Scholar*).

42. Глива В.А., Левченко Л.О., Коваленко В.В., Осадчий Б.М. Екранування магнітних полів лінійних струмонесучих елементів об'єктів енергетики. *Новини енергетики*. 2017. № 6. С. 28–31.

43. Левченко Л.О., Коваленко В.В., Осадчий Б.М. Методологія розрахункового визначення рівнів електромагнітних полів різнорідних джерел. *Новини енергетики*. 2017. № 8. С. 16–20.

***Матеріали і тези доповідей на науково-практичних конференціях***

44. Глива В.А., Левченко Л.О., Теренчук С.А. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів множинних джерел. *Новітні комп'ютерні технології: VII Міжнародна науково-технічна конференція, 14–17 вересня 2010 р.: Севастополь, 2010. С. 34–35.*

45. Глива В.А., Левченко Л.О., Паньків Х.В. Основні напрями робіт з моніторингу електромагнітного навантаження. *Безпека людини у сучасних умовах, IV Міжнародна науково-методична конференція, НТУ «ХПІ», 6–7 грудня 2012 р.: Харків, 2012. С. 131 – 134.*

46. Gliva V.A., Levchenko L.O. Determination and forecast of electromagnetic environment in the airport area using modelling method. *Aviation in the XXI-st century :The Fifth World Congress:, September 25 – 27, 2012: Kyiv, NAU, 2012. Vol. 2, P. 4.3.1–4.3.4.*

47. Khalmuradov Batyr, Glyva Valentyn, Levchenko Larisa. Forecasting of electromagnetic load on the environment. *Narodna A Medzinarodna Bezpechost 2013: IV Medzinarodna Vedecka Konferencia Zbornik vedeckych a odbornych prac: SLOVAKIA, 2013. P. 268–274.*

48. Glyva V.A., Kovalenko V.V., Kychata N.N., Levchenko L.A. Electromagnetic load on the airport staff and basic methods of its reducing. *Aviation in the XXI-st century: The Sixth world congress, September 23–25, 2014: Kyiv, 2014. Vol. 2, P. 5.2.14–5.2.18.*

49. Левченко Л.О., Карпенко С.Г., Шпак А.О. Заходи мінімізації еколого небезпечного впливу діяльності авіаційного транспорту. *Економічна безпека держави, науково-технологічні аспекти її забезпечення :VI Наук.-практ. семінар*

з міжн.участю ім. проф. І.В.Недіна, 21-22 жовтня, 2014 р.: Київ, 2014. *Економічна безпека держави: стратегія, енергетика, інформаційні технології* : монографія / за ред. С. О. Лук'яненко, Н. В. Караєвої. Київ : Тамподек ХХ, 2014. С. 136–142.

50. Глыва В.А., Перелёт Т.Н., Левченко Л.А. Электромагнитная обстановка и влияние на неё гармоник магнитного поля промышленной частоты. *Безпека людини у сучасних умовах: Матеріали VI Міжнародної науково-методичної конференції*, 4–5 грудня 2014 р.: Харків, 2014. С.103– 05.

51. Левченко Л.А., Система електромагнитного моніторингу міста в умовах підвищення електромагнитної навантаження на оточуюче середовище. *Стратегія якості в промисловості і освіті*: Сб. мат-лов XI Міжн. конф., 5–12 червня 2015 г., Технічний ун-т. Варна, Болгарія, 2015. Том 1. С. 346–351.

52. Левченко Л.О., Запорожець О.І., Глыва В.А., Шпак А.О. Система моделювання авіаційного шуму у зоні аеропорту. *Економічна безпека держави, науково-технологічні аспекти її забезпечення* :VII Наук.-практ. семінар з міжн.участю ім. проф. І.В.Недіна, 21-22 жовтня, 2015 р.: Київ, 2015. *Економічна безпека територіально-виробничих комплексів: енергетика, екологія, інформаційні технології* : монографія / за ред. С. О. Лук'яненко, Н. В. Караєвої. Київ : «МП Леся», 2015. С. 211–217.

53. Левченко Л.О., Глыва В.А. , Коваленко В.В. Моделювання магнітного поля електричних машин. *Інформаційні технології в освіті, науці і техніці*: Міжн. наук.-практ. конф., 12–14 травня 2016 р.: Черкаси: ЧДТУ, 2016. С. 128–129.

54. Левченко Л.О. Огляд програмного забезпечення з моделювання авіаційного шуму. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*: III Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 вересня 2016 р.: Херсон, 2016. С. 221–225.

55. Zaporozhets O., Levchenko L., Zbrozhek V. Considerations to assess accurately the aircraft noise level in rearward. *Aviation in the XXI-st century: The Seventh world congress*, September 19–21, 2016: Kyiv, 2016. P. 946–949.

56. Glyva V., Kichata N., Levchenko L. Measures for electromagnetic safety of radiotechnical objects of civil. *Aviation in the XXI-st century: The Seventh world congress*, September 19–21, 2016: Kyiv, 2016. P. 922–925.

57. Левченко Л.О., Сідько О.С. Можливості геоінформаційних технологій. *Людина, природа, техніка у XXI столітті: IV Міжн. наук.-практ. конф.*, 17–18 листопада 2016 р. Зб. мат-лів. Полтава: ФОП О.І. Кека, 2016. С. 34–35.

58. Левченко Л.О., Глива В.А., Ходаковський О.В., Кружилко В.О. Нормування рівнів електромагнітних полів повітряних ліній. *Безпека людини у сучасних умовах: VIII Міжн. наук.-метод. конф. та 115-а міжн. конф. EAS*, 8–9 грудня 2016 р. НТУ «ХПІ», ГО «СФБЖДЛ». Харків, 2016. С. 346–350.

59. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Сідько О.С. Вплив ефекту рефракції у моделі поширення шуму від літаків. *AVIA-2017: XIII Міжнародна науково-технічна конференція*, 19–21 квітня 2017 р.: Київ, 2017. С. 28.1–28.4.

60. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Сідько О.С. Методичний підхід щодо оцінювання шумового навантаження від літаків у зоні аеропорту. *Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві: VI Міжнародна науково-практична конференція*, 25–27 травня 2017 р.: Луцьк. 2017. С. 155–158.

61. Zaporozhets O., Levchenko L. Accuracy and Adequacy of Aircraft Noise Assessment Around the Airports. *International Symposium on Sustainable Aviation 2017*. Kiev, Ukraine 10 – 13 Sept., P. 103–110 (ProQuest Advanced Technologies).

62. Левченко Л.О., Запорожець О.І., Сідько О.С. Дослідження екологічного стану аеропорту. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика: IV Міжнародна науково-практична конференція*, 14–16 вересня 2017 р.: Херсон, 2017. С. 356–359.

63. Zaporozhets O., Levchenko L., Sidko O. The evaluating the ecological state of the airport. *Aviation 2017: Abstract Book of International Symposium on Sustainable*, September 10–13, 2017: Kyiv, 2017. P. 73.

64. Zaporozhets O., Levchenko L. Accuracy and Adequacy of Aircraft Noise Assessment Around the Airports. *Aviation 2017: Abstract Book of International Symposium on Sustainable*, September 10–13, 2017: Kyiv, 2017. P. 61.

65. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Блюкхер В. Застосування ГІС-платформи в умовах модернізації аеропорт. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика: V Міжнародна науково-практична конференція*, 13–15 вересня 2018 р.: Херсон, 2018. С. 257–62.

66. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Оцінювання впливу авіаційного шуму в районі аеропорту з використанням ГІС-технології. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: III Міжн. наук.-практ. конф.*, 14 вересня 2018 р.: Львів, 2018. С. 177.

67. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Блюкхер В. Ризик орієнтований підхід у забезпеченні екологічної безпеки авіатранспортної галузі. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: Міжн. науково-практ. конф.*, 14 вересня 2018 р.: Львів, 2018. С. 174–176.

68. Zaporozhets O., Levchenko L. Detailed flight operation data for accurate aircraft noise assessment. *Авіація у XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології: VIII Всесвіт. конгрес*, 10–12 жовт. 2018 р.: Київ, 2018. С. 7-40 – 7-44.

69. Zaporozhets O., Levchenko L., Blyukher V. Risk methodology as a tool for aircraft noise assessment and control. *Авіація у XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології: VIII Всесвіт. конгрес*, 10 – 12 жовт. 2018 р.: Київ, 2018. С. 7-66 – 7-71.

70. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Блюкхер В. Застосування ризик-методології для оцінювання впливу шуму повітряного судна поблизу аеропорту. *Сталий розвиток – XXI сторіччя: управління, технології, моделі (наукові читання ім.Ігоря Недіна)* : V Міжнародна наук.-практ. конференція, 23-24 жовтня 2018 р. : Київ, 2018. Сталий розвиток — XXI століття: управління, технології, моделі. Дискусії 2018 : колективна монографія / за ред. Хлобистова Є.В. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 531–538.

71. Запорожец О. І., Blykher В., Левченко Л. О. Ризик – орієнтований підхід як доповнення до збалансованого підходу управління авіаційним шумом. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф., 11-14 вересня 2019 р. Херсон: ХДМА, 2019. С. 133–136.

### ***Патенти***

72. Пат. 22961 Україна: МПК G01R29/08, G01H17/08. Автоматизований комплекс контролю рівнів електромагнітних полів та звукового тиску. Глива В.А., Левченко Л.О., Потапенко Г.Д. Заявл. 02.03.2007; опубл. 25.04.2007, Бюл. № 5.

73. Пат. 58604 Україна: МПК G01L9/00. Пристрій контролю захисних властивостей електромагнітних екранів. Глива В.А., Левченко Л.О., Панова О.В., Азнаурян І.О., Подобєд І.М. Заявл. 15.03.2014; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.

74. Пат. 90892 Україна: МПК G12B 17/00. Екрануючий комплект. Здановський В.Г., Левченко Л.О., Осадчій Д.Б., Паньків Х.В., Подобєд І.М. опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

75. Пат. 107696 Україна: МПК G01R 29/08 Спосіб визначення електромагнітного навантаження на середовище. Адаменко М.І., Дармофал Е.А., Коваленко В.В., Левченко Л.О. опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

76. Пат. 112161 Україна: МПК G12B 17/00. Поглинальний електромагнітний екран. Глива В.А., Коваленко В.В., Левченко Л.О., Матвєєва О.Л. Тихенко О.М. Заявл. 04.05.2016; опубл. 12.12.2016, Бюл. № 23.

77. Пат 112305 Україна: МПК G12B 17/00. Матеріал для екранування електромагнітних випромінювань. Глива В.А., Здановський В.Г., Коваленко В.В., Левченко Л.О., Тихенко О.М. Заявл. 10.06.2016; опубл. 12.12.2016, Бюл. № 23.

78. Пат. 113398 Україна: МПК G01R 29/08. Пристрій відводу електричного струму витоку від металевої конструкції. Глива В.А., Здановський В.Г., Коваленко В.В., Левченко Л.О., Перельот Т.М. Заявл. 13.07.2016; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 2.

79. Пат. 118352 Україна: МПК H05K 7/00, G12B 17/02. Пристрій екранування магнітного поля лінійного струмонесучого джерела. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Ходаковський О.В., Кружилко В.О. Заявл. 19.12.2016; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15.

80. Пат. 138018, Україна МПК G12B 17/00. Шумозахисний та електромагнітний екран. Глива В.А., Левченко Л.О., Ніколаєв К.Д., Панова О.В., Тихенко О.М., Ходаковський О.В.; заявник та патентовласник: Глива В.А., Левченко Л.О., Ніколаєв К.Д., Панова О.В., Тихенко О.М., Ходаковський О.В. № u 2019 05577; заявл. 23.05.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.

***Свідоцтво про авторське право***

81. А. с. 75642. Комп'ютерна програма «Оцінювання рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту» / О.І. Запорожець, Л.О. Левченко, О.С. Сідько // Дата реєстрації Міністерства економічного розвитку і торгівлі України – 1.11.2017 р., № АПС/2398–17, опубл. 29.12.2017 р.



## ANNOTATION

*Levchenko L.O.* Modeling and forecasting the distribution of aircraft noise, electromagnetic fields around the airport, substantiation of means of their normalization. – Qualifying scientific work as manuscript.

The thesis for the degree of doctor technical sciences, specialty 21.06.01 – ecological safety. – National Aviation University, Kyiv, 2020.

The dissertation is dedicated to solving the scientific and applied problem of reducing and preventing the negative impact of aircraft noise and electromagnetic fields on the population and the environment around the airport.

An improvement of the ICAO DOC 9911 model is proposed for calculating noise contours by taking into account the aerodynamic configuration of the aircraft, including an updated estimate of the correction for the influence of the earth's surface and corrections for the directivity of radiation in the rear hemisphere for various types of aircraft engines. This allows you to reduce the noise exposure level for one event, to increase the accuracy of the installation of regulated building zones, to reduce the number of annoying people from noise in this area, using a risk-based approach, in addition to a balanced approach for noise management, taking into account non-acoustic factors of population vulnerability.

It is proposed to reduce the error of the influence of the earth's surface by removing the effect of interference from the NPD dependences and taking into account the corrections for each spectral class of the aircraft (turbojet, turbofan, turbopropeller) during takeoff / landing for two types of sound reflection surfaces - soft and acoustically hard.

A correction for the directivity of the emission of sound waves into the rear hemisphere for weight categories of aircraft is proposed as a fourth-order dependence, unlike a second-order equation, which describes any type of engine in the ICAO model. This significantly increases the accuracy of calculating noise levels and allows you to take into account the noise generated during taxiing of aircraft, testing engines, using auxiliary power plants, which were previously neglected and not taken into

account in the ICAO model when calculating aircraft noise levels and constructing generalized noise contours outside the airport.

A risk-oriented approach is proposed in addition to a balanced approach to aviation noise management that provides the most accurate exposure estimation, the ability to manage non-acoustic factors of population vulnerability in order to reduce the number of irritated people as the end result of the impact of aviation noise around the airport.

The process of calculating and constructing aircraft noise contours using a GIS platform was automated. This allows you to identify areas of limited building, reduce the amount of annoyed people from exposure to aircraft noise by providing reliable information about the noise level of both the airport administration and the public in order to control the public's response to noise.

A complex of models for spatial distribution of industrial-frequency electromagnetic fields around dispersed and local sources most critical in terms of electromagnetic effects on people and the environment has been substantiated and implemented. This allows to obtain the integral value of the electromagnetic load on the territories and individual objects in a complex electromagnetic environment.

Methodological foundations have been improved and modeling of spatial distributions of electromagnetic fields of overhead and cable power lines, multiple sources with different patterns of their generation and distribution in buildings and territories have been automated, which have been allowed to rationalize the general layout of their placement and implement measures for electromagnetic safety on the principles of reasonable sufficiency.

Methodological and technological bases for the design and development of composite metal-polymer materials for shielding electromagnetic fields and noise by controlling the coefficient of shielding the magnetic field are proposed.

The practical significance of the research results is confirmed by a certificate of registration of copyright on a work in the form of a computer program, patents for a utility model, acts of implementation at enterprises.

**Keywords:** *monitoring, evaluation, modeling, aviation noise, noise criteria, electromagnetic fields, dispersed and local sources, information system, geoinformation system.*

## **List of publications**

### **Publications in scientometric editions**

1. Khalmuradov B.D., Levchenko L.O., Glyva V.A., Perelot T.M. Elektromahnitna bezpeka ta elektromahnitna sumisnist tekhnichnykh zasobiv. *Systemy obrobky informatsii*. 2015. Vyp. 12 (137). S. 66–68. (*Index Copernicus*).
2. Levchenko L.O. Modeliuvannia prostorovykh rozpodiliv elektromahnitnykh poliv povitrianykh linii elektroperedachi. *Systemy obrobky informatsii*. 2016. № 1. S. 29–37. (*Index Copernicus*).
3. Levchenko L.O. Suchasnyi stan normatyvno-pravovoho zabezpechennia otsiniuvannia rivniv aviatsiinoho shumu. *Systemy obrobky informatsii*. 2016. Vyp. 9 (146). S. 208–212. (*Index Copernicus*).
4. Kovalenko V.V., Tykhenko O.M., Levchenko L.O. Ekranuvannia elektromahnitnykh poliv lokalnykh dzherel. *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*. 2016. № 3 (147). S. 64–68. (*Index Copernicus*).
5. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O. Otsiniuvannia shumovoho vplyvu vid povitrianykh suden v raioni aeroportu. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. Kremenchuk: KrNU. 2017. Vyp. 1/2017 (102). C. 121–128. (*Index Copernicus*).
6. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O. Udoskonalennia skladovoi otsiniuvannia aviatsiinoho shumu dlia vypadku yoho vyprominiuvannia u zadnii sektor. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. Kremenchuk: KrNU. 2017. Vyp. 2/2017 (103). C. 54–63. (*Index Copernicus*).
7. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O. Modeliuvannia refraktsii pry poshyrenni zvuku na vidkrytomu povitri. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. Kremenchuk: KrNU. 2017. Vyp. 3/2017 (104). C. 106–113. (*Index Copernicus*).

8. Glyva V., Kovalenko V., Levchenko L., Tykhenko O. Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Iss. 3/12 (87). P. 50–55. (*Scopus, Index Copernicus*).

9. Glyva V.A., Nikolaiev K.D., Levchenko L.O. Doslidzhennia napruzhenosti zovnishnikh poliv riznorozmirnoho elektrotekhnichnoho obladnannia. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*. 2017. № 5 (45). S. 9–11. (*Index Copernicus*).

10. Glyva V.A., Nikolaiev K.D., Kolumbet V.P., Levchenko L.O. Metodolohiia doslidzhennia nyzkochastotnykh elektromahnitnykh poliv v umovakh staloho rozvytku tekhnolohii. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*. 2017. № 6 (46). S. 219–223. (*Index Copernicus*).

11. Levchenko L.O., Sidko O.S. Zastosuvannia his-tekhnolohii dlia vizualizatsii rezultativ modeliuvannia poshyrennia aviatsiinoho shumy. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*. 2018. № 2 (48). S. 120–125. (*Index Copernicus*).

12. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust / Glyva V., Podkopaev S., Levchenko L., Karaieva N., Nikolaiev K., Tykhenko O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Iss. 1/5 (91). P. 10–17. (*Scopus*).

13. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen / Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6. No 5 (96). P. 54–61. (*Scopus, Index Copernicus*).

14. Levchenko L.O., Panova O.V., Tykhenko O.M., Khodakovskyy O.V. Metodolohiia znyzhennia rivniv elektromahnitnykh poliv v umovakh perekhodu na mizhnarodni standarty elektromahnitnoi sumisnosti. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Zb. nauk. prats. Dnipro: DVNZ «Prydniprovaska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury»*. 2018. Vyp. 105. S. 174–179. (*Directory of Research Journals Indexing, Research Bib*).

15. O. Zaporozhhets, L. Levchenko, K. Synylo. Risk and exposure control of aviation impact on environment. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol.3. No 3. PP. 17– 24. (*Index Copernicus*).

16. Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures / Glyva V., Barabash O., Kasatkina N., Katsman M., Levchenko L., Tykhenko O., Nikolaiev K., Panova O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O.. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No 10 (103). P. 26 – 31. (*Scopus, Index Copernicus*).

17. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range / V. Glyva, N. Kasatkina, V. Nazarenko, N. Burdeina, N. Karaieva, L. Levchenko, O. Panova, O. Tykhenko, B. Khalmuradov, O. Khodakovskyy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No 12 (103). PP. 40 – 47. (*Scopus*).

### **Publications in professional editions**

18. Levchenko L.O., Glyva V.A., Klapchenko V.I., Repko A.Yu. Informatsiinyi suprovid ekolohichnoho monitorynhu. *Naukovo-tekhnichna informatsiia*. 2009. № 1. S. 16–18.

19. Levchenko L.O., Luk'ianenko S.O., Karpenko S.H., Glyva V.A. Otsinka ekonomichnoi skladovoi ekolohichnykh doslidzhen. *Naukovo-tekhnichna informatsiia*. 2009. № 3. S. 7–9.

20. Levchenko L.O., Glyva V.A., Yevtushok O.Ya. Modeliuvannia rozpovsiudzhennia aviatsiinoho shumu poblyzu aeroportiv ta yoho vplyvu na otochuiuche seredovyshe. *Teoriia i praktyka budivnytstva*. 2010. № 6. S. 25–29.

21. Levchenko L.O., Yevtushok O.Ya. Suchasni pidkhody do znyzhennia rivniv shumu poblyzu pidpriemstv z neperervnym tsyklom vyrobnytstva. *Visnyk NTUU «KPI». Serii «Hirnytstvo»*. 2011. Vyp. 20. S. 223–228.

22. Levchenko L.O., Khalmuradov B.D., Hrytsaiuk A.M. Informatsiinyi suprovid monitorynhu stanu dokillia u nadzvychainykh situatsiiakh. *Mistobuduvannia i terytorialne planuvannia*. 2013. № 49. S. 279–284.

23. Glyva V.A., Levchenko L.O., Pankiv Kh.V. Modeliuvannia prostorovykh rozpodiliv elektromahnitnykh poliv elektrotekhnichnoho obladdannia. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*. 2014. Vyp. 20. S. 174–179.

24. Zdanovskyi V.H., Glyva V.A., Levchenko L.O. Zahalni pidkhody do modeliuvannia prostorovykh rozpodiliv elektromahnitnykh poliv elektrotekhnichnoho obladdannia. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*. 2014. Vyp. 27. S. 18–24.

25. Levchenko L.O., Perelot T.M. Doslidzhennia rivniv elektromahnitnykh poliv povitrianykh linii elektroperedachi ta yikh normuvannia. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia*. 2014. Vyp. 53. S. 275–279.

26. Zaporozhets O.I., Klapchenko V.I., Levchenko L.O., Panova O.V. Suchasni pidkhody do modeliuvannia prostorovykh zmin heomahnitnoho polia u budivliakh ta sporudakh. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*. 2015. Vyp. 21. S. 133–138.

27. Khalmuradov B.D., Levchenko L.O., Glyva V.A., Perelot T.M. Problemy uzghodzhenosti normatyvnoi bazy z elektromahnitnoi sumisnosti ta elektromahnitnoi bezpeky. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2015. № 4 (21). S. 103–106 (Google Scholar).

28. Glyva V.A., Levchenko L.O., Perelot T.M. Prostorovi kryterii ekranuvannia nyzkochastotnykh mahnitnykh poliv. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system*. 2015. Vyp. 22. S. 158–164.

29. Glyva V.A., Nikolaev K.D., Levchenko L.A., Vovk A.A. Istochniki magnitnykh poliv v usloviyah slojnogo garmonicheskogo sostava elektricheskogo toka silovoy seti. *Visti Donetskogo girnichoho institutu*. 2017. №2 (41). S. 132–137.

#### **Publications in other editions**

30. Glyva V.A., Levchenko L.O., Yarovoi M.V. Innovatsiini metody zabezpechennia neperervnoho monitorynhu parametriv dovkillia. *Problemy nauky*. 2008. № 6. S. 28–31.

31. Levchenko L.O. Vyznachennia ta prohnozuvannia elektromahnitnoi obstanovky u prymishchenniakh metodom modeliuvannia. *Hihiiena naselenykh mist*. 2012. Vyp. 60. S. 186–191.

32. Levchenko L.O., Glyva V.A. Tekhnichne ta metodychne zabezpechennia modeliuвання ta prohnozuvannia elektromahnitnoi obstanovky u prymishchenniakh. *Hihiena naselenykh mist. 2013. Vyp. 61. S. 222–225.*

33. Levchenko L.O., Sukach S.V., Konovalova O.V. Modeliuвання prostorovykh rozpodiliv mahnitnykh poliv elektrychnykh mashyn dlia vyznachennia zon bezpechnoho perebuvannia personalu. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnogo universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho. Kremenchuk: KrNU, 2014. Vyp. 6 (89). Ch. 1. S. 27–31.*

34. Levchenko L.O. Kontseptualnyi pidkhid do pobudovy systemy monitorynhu aviatsiinoho shumu. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku. 2015. Vyp. 2 (34). S. 120–123 (Google Scholar).*

35. Levchenko L.O. Modeliuвання shumovoho navantazhennia, utvoriuvanoho povitrianymy sudnamy. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku. 2015. Vyp. 3 (35). S. 170–173 (Google Scholar).*

36. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O. Zasady elektromahnitnogo monitorynhu mista v umovakh pidvyshchennia elektromahnitnogo navantazhennia na dovkillia. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia. 2015. Vyp. 17. S. 28–34.*

37. Levchenko L.O. Normuvannia elektromahnitnogo navantazhennia na dovkillia naselenykh punktiv ta shliakhy yoho vdoskonalennia. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. 2015. Vyp. 55. S. 241–248.*

38. Levchenko L.A., Perelot T.N., Pankiv K.V. Garmoniki elektricheskikh tokov promyishlennoy chastoty kak istochniki magnitnykh poliv i metody snizheniya ih urovney. *Mashinostroenie i bezopasnost jiznedeyatelnosti. 2015. № 1. S. 14–22 (RINTS).*

39. Levchenko L.O., Glyva V.A., Karpenko S.H. Prostorovi rozpodily elektromahnitnykh poliv kabelnykh linii elektroperedachi. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy. Kremenchuk: KrNU. 2016. Vyp. 1/2016 (33). S. 55–67 (Index Copernicus).*

40. Kozlovska T.F., Sukach S.V., Levchenko L.O. Kryterii vplyvu elektromahnitnykh poliv na orhanizm liudyny pry planuvanni pratseokhoronnykh

zakhodiv. *Visnyk NTUU «KPI». Seriiia «Hirnydstvo»*. Kyiv: NTUU «KPI», ZAT «Tekhnovybukh». 2016. Vyp. 31. S. 87–95 (BASE, World Cat, Google Scholar).

41. Levchenko L.O., Khodakovskiy O.V., Kolumbet V.P. Zastosuvannia modeliuvannia poshyrennia elektromahnitnykh poliv dlia znyzhennia yikh vplyvu na liudei i dovkillia. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku*. 2016. Vyp. 2 (38). S. 129–132 (Google Scholar).

42. Glyva V.A., Levchenko L.O., Kovalenko V.V., Osadchyi B.M. Ekranuvannia mahnitnykh poliv liniinykh strumonesuchykh elementiv obiektiv enerhetyky. *Novyny enerhetyky*. 2017. № 6. S. 28–31.

43. Levchenko L.O., Kovalenko V.V., Osadchyi B.M. Metodolohiia rozrakhunkovoho vyznachennia rivniv elektromahnitnykh poliv riznoridnykh dzherel. *Novyny enerhetyky*. 2017. № 8. S. 16–20.

#### **Materials and abstracts of reports at scientific and practical conferences**

44. Glyva V.A., Levchenko L.O., Terenchuk S.A. Modeliuvannia prostorovykh rozpodiliv elektromahnitnykh poliv mnozhyunnykh dzherel. *Novitni komp'iuterni tekhnolohii: VII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia*, 14–17 veresnia 2010 r.: Sevastopol, 2010. S. 34–35.

45. Glyva V.A., Levchenko L.O., Pankiv Kh.V. Osnovni napriamy robit z monitorynhu elektromahnitnoho navantazhennia. *Bezpeka liudyny u suchasnykh umovakh: IV Mizhnarodna naukovo-metodychna konferentsiia*, NTU «KhPI», 6–7 hrudnia 2012 r.: Kharkiv, 2012. S. 131–134.

46. Gliva V.A., Levchenko L.O. Determination and forecast of electromagnetic environment in the airport area using modelling method. *Aviation in the XXI-st century :The Fifth World Congress*., September 25–27, 2012: Kyiv, NAU, 2012. Vol. 2, P. 4.3.1–4.3.4.

47. Khalmuradov Batyr, Glyva Valentyn, Levchenko Larisa. Forecasting of electromagnetic load on the environment. *Narodna A Medzinarodna Bezpechost 2013: IV Medzinarodna Vedecka Konferencia Zbornik vedeckych a odbornych prac: SLOVAKIA*, 2013. P. 268–274.



48. Glyva V.A., Kovalenko V.V., Kychata N.N., Levchenko L.A. Electromagnetic load on the airport staff and basic methods of its reducing. *Aviation in the XXI-st century: The Sixth world congress, September 23–25, 2014: Kyiv, 2014. Vol. 2, P. 5.2.14–5.2.18.*

49. Levchenko L.O., Karpenko S.H., Shpak A.O. Zakhody minimizatsii ekoloho nebezpechnoho vplyvu diialnosti aviatsiinoho transportu. *Ekonomichna bezpeka derzhavy, naukovo-tekhnologichni aspekty yii zabezpechennia* :VI Nauk.-prakt. seminar z mizhn.uchastiu im. prof. I.V.Nedina, 21-22 zhovtnia, 2014 r.: Kyiv, 2014. *Ekonomichna bezpeka derzhavy: stratehiia, enerhetyka, informatsiini tekhnologii* : monohrafiia / za red. S.O. Luk'ianenko, N.V. Karaievoi. Kyiv: Tampodek KhKh, 2014. S. 136–142.

50. Glyva V.A., Perelot T.N., Levchenko L.A. Elektromagnitnaya obstanovka i vliyanie na neë garmonik magnitnogo polya promyishlennoy chastoty. *Bezpeka lyudini u suchasnih umovah: Materiali VI Mijnarodnoï naukovo-metodichnoï konferentsii*,4–5 grudnya 2014 r.: Harkiv, 2014. S. 103– 105.

51. Levchenko L.A., Sistema elektromagnitnogo monitoringa goroda v usloviyah povyisheniya elektromagnitnoy nagruzki na okrujayuschuyu sredu. *Strategiya kachestva v promyishlennosti i obrazovanii: Sb. mat-lov XI Mejd. konf.*, 5–12 iyunya 2015 g., Tehnicheskiy un-t. Varna, Bolgariya, 2015. Tom 1. S. 346–351.

52. Levchenko L.O., Zaporozhets O.I., Glyva V.A., Shpak A.O. Systema modeliuвання aviatsiinoho shumy u zoni aeroportu. *Ekonomichna bezpeka derzhavy, naukovo-tekhnologichni aspekty yii zabezpechennia: VII Nauk.-prakt. seminar z mizhn. uchastiu im. prof. I.V. Nedina, 21-22 zhovtnia, 2015 r.: Kyiv, 2015. Ekonomichna bezpeka terytorialno-vyrobnychkykh kompleksiv: enerhetyka, ekolohiia, informatsiini tekhnologii* : monohrafiia / za red. S.O. Luk'ianenko, N.V. Karaievoi. Kyiv : «MP Lesia», 2015. S. 211–217.

53. Levchenko L.O., Glyva V.A., Kovalenko V.V. Modeliuвання mahnitnoho polia elektrychnykh mashyn. *Informatsiini tekhnologii v osviti, nautsi i tekhnitsi: Mizhn. nauk.-prakt. konf.*, 12–14 travnia 2016 r.: Cherkasy: ChDTU, 2016. S. 128–129.

54. Levchenko L.O. Ohliad prohramnoho zabezpechennia z modeliuvannia aviatsiinoho shumy. *Bezpeka zhyttiediialnosti na transporti ta vyrobnytstvi – osvita, nauka, praktyka*: III Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, 13–15 veresnia 2016 r.: Kherson, 2016. S. 221–225.

55. Zaporozhets O., Levchenko L., Zbrozhek V. Considerations to assess accurately the aircraft noise level in rearward. *Aviation in the XXI-st centure: The Seventh world congress*, September 19–21, 2016: Kyiv, 2016. P. 946–949.

56. Glyva V., Kichata N., Levchenko L. Measures for electromagnetic safety of radiotechnical objects of civil. *Aviation in the XXI-st centure: The Seventh world congress*, September 19–21, 2016: Kyiv, 2016. P. 922–925.

57. Levchenko L.O., Sidko O.S. Mozhlyvosti heoinformatsiinykh tekhnolohii. *Liudyna, pryroda, tekhnika u XXI stolitti*: IV Mizhn. nauk.-prakt. konf., 17–18 lystopada 2016 r. Zb. mat-liv. Poltava: FOP O.I. Keka, 2016. S. 34–35.

58. Levchenko L.O., Glyva V.A., Khodakovskiy O.V., Kruzhylo V.O. Normuvannia rivniv elektromahnitnykh poliv povitrianykh linii. *Bezpeka liudyny u suchasnykh umovakh*: VIII Mizhn. nauk.-me tod. konf. ta 115-a mizhn. konf. EAS, 8–9 hrudnia 2016 r. NTU «KhPI», HO «SFBZhDL». Kharkiv, 2016. S. 346–350.

59. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O., Sidko O.S. Vplyv efektu refraktsii u modeli poshyrennia shumy vid litakiv. *AVIA-2017: XIII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia*, 19–21 kvitnia 2017 r.: Kyiv, 2017. S. 28.1–28.4.

60. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O., Sidko O.S. Metodychnyi pidkhid shchodo otsiniuvannia shumovoho navantazhennia vid litakiv u zoni aeroportu. *Informatsiini tekhnolohii v osviti, nautsi i vyrobnytstvi*: VI Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, 25–27 travnia 2017 r.: Lutsk. 2017. S. 155–158.

61. Zaporozhets O., Levchenko L. Accuracy and Adequacy of Aircraft Noise Assessment Around the Airports. *Proceedings of International Symposium on Sustainable Aviation 2017. International Symposium on Sustainable Aviation 2017. Kiev, Ukraine 10–13 Sept.*, P. 103–110 (*ProQuest Advanced Technologies*).

62. Levchenko L.O., Zaporozhets O.I., Sidko O.S. Doslidzhennia ekolohichnoho stanu aeroportu. *Bezpeka zhyttiediialnosti na transporti ta*

*vyrobnytstvi – osvita, nauka, praktyka*: IV Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, 14–16 veresnia 2017 r.: Kherson, 2017. S. 356–359.

63. Zaporozhets O., Levchenko L., Sidko O. The evaluating the ecological state of the airport. *Aviation 2017: Abstract Book of International Symposium on Sustainable*, September 10–13, 2017: Kyiv, 2017. P. 73.

64. Zaporozhets O., Levchenko L. Accuracy and Adequacy of Aircraft Noise Assessment Around the Airports. *Aviation 2017: Abstract Book of International Symposium on Sustainable*, September 10–13, 2017: Kyiv, 2017. P. 61.

65. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O., Blyukher B. Zastosuvannia HIS-platformy v umovakh modernizatsii aeroportu. *Bezpeka zhyttiediialnosti na transporti ta vyrobnytstvi – osvita, nauka, praktyka*: V Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, 13–15 veresnia 2018 r.: Kherson, 2018. S. 257–262.

66. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O. Otsiniuvannia vplyvu aviatsiinoho shumu v raioni aeroportu z vykorystanniam HIS-tekhnologii. *Ekolohichna bezpeka yak osnova staloho rozvytku suspilstva. Yevropeyskyi dosvid i perspektyvy*: III Mizhn. nauk.-prakt. konf., 14 veresnia 2018 r.: Lviv, 2018. S. 177.

67. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O., Bliukher B. Ryzyk orientovanyi pidkhid u zabezpechenni ekolohichnoi bezpeky aviatransportnoi haluzi. *Ekolohichna bezpeka yak osnova staloho rozvytku suspilstva. Yevropeyskyi dosvid i perspektyvy*: Mizhn. naukovo-prakt. konf., 14 veresnia 2018 r.: Lviv, 2018. S. 174–176.

68. Zaporozhets O., Levchenko L. Detailed flight operation data for accurate aircraft noise assessment. *Aviatsiia u XXI stolitti – Bezpeka v aviatsii ta kosmichni tekhnologii*: VIII Vsesvit. konhres, 10–12 zhovt. 2018 r.: Kyiv, 2018. S. 7-40–7-44.

69. Zaporozhets O., Levchenko L., Blyukher B. Risk methodology as a tool for aircraft noise assessment and control. *Aviatsiia u XXI stolitti – Bezpeka v aviatsii ta kosmichni tekhnologii*: VIII Vsesvit. konhres, 10–12 zhovt. 2018 r.: Kyiv, 2018. S. 7-66–7-71.

70. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O., Blyukher B. Zastosuvannia ryzyk-metodologii dlia otsiniuvannia vplyvu shumu povitrianooho sudna poblyzu aeroportu. *Stalyi rozvytok – XXI storichchia: upravlinnia, tekhnologii, modeli (naukovi chytannia*

*im. Ihoria Nedina*) : V Mizhnarodna nauk.-prakt. konferentsiia, 23–24 zhovtnia 2018 r.: Kyiv, 2018. Stalyi rozvytok – XXI stolittia: upravlinnia, tekhnolohii, modeli. Diskusii 2018: kolektyvna monohrafiia / za red. Khlobystova Ye.V. Kyiv: NTUU «KPI im. Ihoria Sikorskoho», 2018. S. 531–538.

71. Zaporozhets O. I., Blyukher B., Levchenko L.O. Ryzyk – oriientovanyi pidkhyd yak dopovnennia do zbalansovanoho pidkhotu upravlinnia aviatsiinym shumom. *Bezpeka zhyttiediialnosti na transporti ta vyrobnytstvi – osvita, nauka, praktyka*: materialy VI Mizhnar. nauk.-prakt. konf., 11–14 veresnia 2019 r. Kherson: KhDMA, 2019. S. 133–136.

### **Patents**

72. Pat. 22961 Ukraina: MPK G01R29/08, G01H17/08. Avtomatyzovanyi kompleks kontroliu rivniv elektromahnitnykh poliv ta zvukovoho tysku. Glyva V.A., Levchenko L.O., Potapenko H.D. Zaiavl. 02.03.2007; opubl. 25.04.2007, Biul. № 5.

73. Pat. 58604 Ukraina: MPK G01L9/00. Prystrii kontroliu zakhysnykh vlastyvosti elektromahnitnykh ekraniv. Glyva V.A., Levchenko L.O., Panova O.V., Aznaurian I.O., Podobied I.M. Zaiavl. 15.03.2014; opubl. 11.04.2011, Biul. № 7.

74. Pat. 90892 Ukraina: MPK G12B 17/00. Ekranuiuchyi komplekt. Zdanovskiy V.H., Levchenko L.O., Osadchii D.B., Pankiv Kh.V., Podobied I.M. opubl. 10.06.2014, Biul. № 11.

75. Pat. 107696 Ukraina: MPK G01R 29/08 Sposib vyznachennia elektromahnitnoho navantazhennia na seredovyshe. Adamenko M.I., Darmofal E.A., Kovalenko V.V., Levchenko L.O. opubl. 24.06.2016, Biul. № 12.

76. Pat. 112161 Ukraina: MPK G12B 17/00. Pohlynalnyi elektromahnitnyi ekran. Glyva V.A., Kovalenko V.V., Levchenko L.O., Matvieieva O.L., Tykhenko O.M. Zaiavl 4.05.2016; opubl. 12.12.2016, Biul. № 23.

77. Pat 112305 Ukraina: MPK G12B 17/00. Material dlia ekranuvannia elektromahnitnykh vyprominiuvan. Glyva V.A., Zdanovskiy V.H., Kovalenko V.V., Levchenko L.O., Tykhenko O.M. Zaiavl. 10.06.2016; opubl. 12.12.2016, Biul. № 23.

78. Pat. 113398 Ukraina: MPK G01R 29/08. Prystrii vidvodu elektrychnoho strumu vytoku vid metalevoi konstruktsii. Glyva V.A., Zdanovskiy V.H.,

Kovalenko V.V, Levchenko L.O., Perelot T.M. Zaiavl. 13.07.2016; opubl. 25.01.2017, Biul. № 2.

79. Pat. 118352 Ukraina: MPK H05K 7/00, G12B 17/02. Prystrii ekranuvannia mahnitnoho polia liniinoho strumonesuchoho dzherela. Zaporozhets O.I., Levchenko L.O., Khodakovskiy O.V., Kruzhylo V.O. Zaiavl. 19.12.2016; opubl. 10.08.2017, Biul. № 15.

80. Pat. 138018 Ukraina: MPK G12B 17/00. Shumozaxysnyi ta elektromagnitnyi ekran. Glyva V.A., Levchenko L.O., Nikolayev K.D., Panova O.V., Tykhenko O.M., Khodakovskiy O.V.; zayavnyk ta patentovlasnyk: Glyva V.A., Levchenko L.O., Nikolayev K.D., Panova O.V., Tykhenko O.M., Khodakovskiy O.V., № u 2019 05577; Zaiavl. 23.05.2019; opubl. 11.11.2019, Biul. № 21.

### **Certificate of copyright**

81. A.s. 75642. Komp'uterna prohrama «Otsiniuvannia rivniv aviatsiinoho shumu v raioni aeroportu» / O.I. Zaporozhets, L.O. Levchenko, O.S. Sidko // Data reiestratsii Ministerstva ekonomichnoho rozvytku i torhivli Ukrainy – 1.11.2017 r., № APS/2398–17, opubl. 29.12.2017 r.

## ЗМІСТ

	Стор.
АНОТАЦІЯ.....	1
ЗМІСТ.....	29
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	33
ВСТУП.....	35
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМНИХ ЗАДАЧ МОНІТОРИНГУ ТА НОРМАЛІЗАЦІЇ РІВНІВ АВІАЦІЙНОГО ШУМУ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ.....	48
1.1. Акустичний шум та електромагнітні поля антропогенного походження як біологічно активний чинник.....	48
1.2. Аналіз нормативно-правового забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму.....	50
1.2.1. Міжнародне нормативно-правове забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму.....	51
1.2.2. Національне нормативно-правове забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму.....	55
1.3. Аналіз сучасного стану нормативно-правової бази нормування електромагнітних полів.....	61
1.4. Сучасні підходи щодо захисту людей і довкілля від впливу акустичного шуму та електромагнітних полів.....	64
1.4.1. Порівняльний аналіз методів зниження авіаційного шуму.....	64
1.4.2. Заходи і засоби електромагнітної безпеки та зниження впливу електромагнітних полів.....	71
1.5. Аналіз сучасних програмних засобів з моделювання авіаційного шуму й електромагнітних полів та їх поширення у просторі і часі.....	76
1.5.1. Сучасні програмні засоби з моделювання авіаційного шуму.....	77
1.5.2. Сучасні програмні засоби з моделювання електромагнітних полів та їх поширення у просторі і часі.....	90
Висновки до розділу 1.....	94

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ РІВНІВ АВІАЦІЙНОГО ШУМУ ТА РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ.....	97
2.1. Методичний підхід оцінювання шумового навантаження у зоні аеропорту. ....	97
2.1.1. Побудова траєкторії руху повітряного судна за лінеаризованими рівняннями руху.....	112
2.1.2. Етап розбігу перед зльотом.....	116
2.1.3. Набір висоти з постійною швидкістю.....	123
2.1.4. Набір висоти з прискоренням та прибиранням закрилків.....	125
2.1.5. Посадка і зниження перед посадкою.....	127
2.1.6. Зниження з постійною повітряною швидкістю.....	129
2.1.7. Алгоритм побудови контурів шум.....	132
2.1.8. Розрахунок рівня шуму при одиночному впливі одного прольоту повітряного судна.....	134
2.1.9. Порівняльний аналіз профілів польоту повітряного судна при виконанні реальних операцій та розрахованих за методологією ICAO DOC 9911.....	139
2.1.9.1. Аналіз параметрів профілю рейсу зльоту/набору висоти... ..	143
2.1.9.2. Аналіз параметрів профілю зниження/посадки.....	144
2.1.10 Недоліки при моделюванні контурів шуму за методологією ICAO DOC 9911.....	147
2.2. Методи і методики контролю кількісних значень та моделювання просторових поширень електромагнітних полів.....	152
Висновки до розділу 2.....	161
РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ПОВІТРЯНИХ СУДЕН В РАЙОНІ АЕРОПОРТУ.....	164
3.1. Зменшення негативного впливу шуму від діяльності авіаційного транспорту у зоні аеропорту.....	164
3.2. Удосконалення методу розрахунку рівнів шуму для оцінки одиночної події.....	165
3.2.1. Моделювання ефектів бічного затухання звуку для всіх	166

спектральних класів літаків.....	
3.2.2. Моделювання рефракції при поширенні звуку на відкритому повітрі.....	170
3.2.3. Удосконалення складової оцінювання авіаційного шуму для випадку його випромінювання у задню напівсферу від літака.....	183
3.2.4. Удосконалення інтегрованої моделі обчислення шуму з використанням аеродинамічної конфігурації.....	196
3.3. Підхід до побудови інформаційної системи екологічного моніторингу авіаційного шуму в районі аеропорту.....	198
Висновки до розділу 3.....	200
<b>РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ РОЗПОДІЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ І ЛОКАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАХОДІВ І ЗАСОБІВ ЇХ НОРМАЛІЗАЦІЇ</b>	<b>202</b>
4.1. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі та визначення умов їх зниження до нормативних рівнів.....	202
4.2. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів кабельних ліній електропередачі та визначення умов їх мінімізації.....	226
4.3. Моделювання просторових розподілів магнітних полів локальних джерел, визначення та прогнозування зон їх мінімальних значень.....	240
4.4. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів багатьох джерел та його застосування для прогнозування електромагнітної обстановки.....	245
Висновки до розділу 4.....	250
<b>РОЗДІЛ 5 ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ АВІАЦІЙНОГО ШУМУ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА НАСЕЛЕННЯ ТА ДОВКІЛЛЯ.....</b>	<b>252</b>
5.1. Інформаційна система екологічного моніторингу авіаційного шуму.....	252
5.2. Сценарій виконання польоту.....	264
5.3. Верифікація результатів моделювання рівнів авіаційного шуму.....	274
5.4. Обґрунтування методології оцінки та регулювання ризику.....	287



роздратування населення авіаційним шумом.....	
5.5. Ризик орієнтований підхід до оцінювання впливу шуму повітряного судна поблизу аеропорту.....	296
5.5.1 Програма зниження кількості роздратованого населення від впливу авіаційного шуму.....	299
5.5.2. Копінгова спроможність для управління роздратуванням населення від авіаційного шуму.....	307
5.6. Загальні засади електромагнітного моніторингу, нормування та зниження електромагнітного навантаження на населення та довкілля....	314
5.7. Заходи і засоби нормалізації рівнів електромагнітних полів, генерованих розосередженими та локальними джерелами.....	324
5.8 Впровадження результатів дослідження та їх ефективність.....	342
Висновки до розділу 5.....	345
ВИСНОВКИ.....	348
Список використаних джерел.....	353
Додаток А. Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження	394
Додаток Б. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір	407
Додаток В. Інструкція користувача щодо оцінювання рівнів авіаційного шуму	409
Додаток Г. Інструкція користувача щодо оцінювання електромагнітних випромінювань повітряних та кабельних ліній електропередачі	422
Додаток Д. Інструкція користувача щодо оцінювання електромагнітних випромінювань множинних джерел	428

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АШ	– авіаційний шум
ВООЗ	– Всесвітня організація охорони здоров'я
ГДР	– гранично допустимий рівень
ЕМП	– електромагнітні поля
ЗПС	– злітно-посадкова смуга
КТА	– контрольна точка аеропорту
ЛЕП	– лінії електропередачі
МСА	– міжнародна стандартна атмосфера
ПС	– повітряні судна
ПЛ	– повітряні лінії
СЗЗ	– санітарно-захисна зона
ТСО	– група стандартів на ергономіку, екологію і безпеку рідкокристалічних дисплеїв
ТРДД	– дозвукові літаки з турбореактивними двоконтурними двигунами
$B$	– індукція магнітного поля
$E$	– напруженість електричного поля
$H$	– напруженість магнітного поля
$K_{\epsilon}$	– коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі
$K_{\epsilon}$	– коефіцієнт екранування електромагнітного поля
$K_n$	– коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії
SA	– питома поглинена енергія
SAR	– питома поглинена потужність
W	– щільність потоку енергії
ICAO	– International Civil Aviation Organization
ECAC	– European Civil Aviation Conference
CAEP	– Committee on Aviation Environmental Protection
EUROCONTROL	– European Organisation for the Safety of Air Navigation

JAA	– Joint Aviation Authorities
EASA	– European Aviation Safety Agency
IATA	– International Air Transport Association
ANP	– Aircraft and Noise Performances Database
NPD	– Noise-power-distance
TO	– Takeoff
AIP	– Aeronautical Information Publication
QGIS	– Quantum GIS, вільна кросплатформена геоінформаційна система
«Київ»	– Міжнародний аеропорт «Київ» імені Ігоря Сікорського.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день згідно «Загального керівництва з охорони навколишнього середовища, здоров'я та праці», розробленого Всесвітнім банком для різних галузей промисловості і транспорту, найбільш небезпечними фізичними чинниками щодо негативного впливу на населення та довкілля визначено акустичний шум та електромагнітні поля техногенного походження. Тільки ці фізичні чинники нормуються у національних нормативних актах з планування та забудови населених пунктів. А відповідно із Законом України «Про оцінку впливу на довкілля» обов'язковим є здійснення оцінки їх впливу на довкілля до прийняття рішення про провадження планової діяльності. До таких пріоритетних об'єктів належать будівництво і реконструкція аеропортів і аеродромів, ліній електропередачі та їх модернізація.

В Україні у зв'язку з постійним зростанням обсягів повітряних перевезень збільшується акустичне навантаження на довкілля, крім того є намагання забудовників наблизити свою діяльність якнайближче до аеропорту. Однак аеропорт, як об'єкт господарювання, зобов'язаний виконувати нормативи по шуму і визначати зони обмеження забудови (ЗОЗ), в тому числі для прогнозних сценаріїв польотів, які повинні передбачити нормальний взаємовигідний розвиток як аеропорту, так і території навколо нього. В районі аеропорту зони обмеження забудови визначаються розрахунковим шляхом, який передбачає обчислення рівнів авіаційного шуму (АШ) для поточних та прогнозних сценаріїв виконання польотів, враховуючи національні та міжнародні норми.

Крім того, має місце тенденція щодо збільшення енергоспоживання аеропортом як для поточного його функціонування (обслуговування злітно-посадкових смуг, перону, терміналів), так і появи на ринку літаків з електродвигунами, що призведе до суттєвої зміни інфраструктури аеропорту – появи станцій підзарядки акумуляторних батарей та відповідної інфраструктури їх обслуговування після кожного приземлення електrolітака. Це означає, що аеропорт повинен мати потужний енергоресурс, що підвищує розгалуженість і

струмонавантаження силових мереж аеропорту, використання розосереджених джерел електромагнітних полів (ЕМП), якими є лінії електропередачі, які проходять біля аеропорту і що зумовлює підвищення гігієнічно значущих рівнів ЕМП. На підставі цього чиннику визначаються як ЗОЗ, так і санітарно-захисні зони (СТЗ) навколо джерел ЕМП.

Встановлення ЗОЗ та регулювання діяльності людини в їхніх межах з метою зниження експозиції АШ та його впливу на здоров'я людини є одним із стратегічних елементів збалансованого підходу ІКАО до регулювання рівнів АШ навколо аеропорту. Досягнуті успіхи виробниками літаків у зниженні випромінювання АШ (перший стратегічний елемент збалансованого підходу), які зафіксовані у стандартах ІКАО (Додаток 16 до Конвенції ІКАО, том 1 «Авіаційний шум», Розділ 14), зумовили як достатньо низькі рівні шуму літаків, так і закономірно знизили потенціальну ефективність зниження рівнів АШ експлуатаційними методами, що визначається третім елементом збалансованого підходу ІКАО. Крім того, у формулюванні цілі ІКАО з охорони довкілля від впливу АШ сьогодні вимагається зменшення не експозиції АШ, а зменшення кількості населення, яке потерпає від її впливу. Тому, по-перше, вимоги до процедур встановлення ЗОЗ, включаючи більш високу точність визначення границь ЗОЗ, та до методів захисту від шуму (зниження експозиції АШ в межах ЗОЗ) є більш суворими, а сам елемент «планування (зонування) та управління землекористуванням» є більш актуальним для збалансованого підходу взагалі. По-друге, результатами впливу експозиції АШ є роздратування населення шумом літаків, яке тільки на 20-30% зумовлено акустичними чинниками, а інші 80-70% зумовлено соціальними, техногенними, економічними, культурними та іншими чинниками, регулювання яких також суттєво визначає результати роздратування людини від впливу АШ і може бути реалізовано як в структурі збалансованого підходу, так і паралельно до нього.

Вимоги стосовно високої точності визначення границь ЗОЗ і СЗЗ потребують вдосконалення методів розрахунку поширення авіаційного шуму і електромагнітних полів розосереджених та локальних джерел, в тому числі для

потреб інформаційної системи екологічного моніторингу рівнів авіаційного шуму та електромагнітних полів з метою використання їхніх результатів для обґрунтування, розроблення і впровадження комплексу організаційно-технічних заходів зі зниження впливу цих фізичних чинників на населення і довкілля, що є актуальною науково-практичною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана в рамках науково-дослідних робіт Національного авіаційного університету:

– договір № 770-Х14/1 від 10.11.2014 «Розроблення карт зон обмеження забудови, санітарно-захисної зони і зони громадської безпеки для аеродрому Київ/Антонов-2 з пояснювальними записками до них та висновками стосовно використання земель в межах цих зон» (Святошин);

– договір № 770-Х14/2 від 10.11.2014 «Розроблення карт зон обмеження забудови, санітарно-захисної зони і зони громадської безпеки для аеродрому Київ/Антонов-2 з пояснювальними записками до них та висновками стосовно використання земель в межах цих зон» (Гостомель);

– науково-дослідна робота № 990-ДБ15 «Розроблення засобів еколого-економічної оптимізації багатокритеріальної оцінки збалансованого розвитку авіаційної діяльності в Україні». Етап 2. Розроблення моделі регіональної та глобальної емісії і споживання палива при виконанні польотів повітряними кораблями цивільної авіації України та обґрунтування методів багатокритеріальної оптимізації багатофункціональної системи діяльності аеропорту і забезпечення польотів з урахуванням пріоритетних чинників впливу на довкілля (проміжний), 2016;

– «Дослідження впливу фізичних та біологічних факторів на стан атмосферного повітря» (№ ДР 0109U006481);

– «Дослідження частотно-амплітудних характеристик електромагнітних полів низьких та наднизьких частот та визначення методів їх реалізації» (НДР № 80/10.02.01);

а також в рамках науково-дослідної роботи «Моделювання акустичного забруднення аеропорту з використанням ГІС-платформи» (№ ДР 0117U006085), виконаної в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

У вищенаведених роботах автор був виконавцем, а в останній - науковим керівником.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є зниження та запобігання негативного впливу авіаційного шуму та електромагнітних полів на населення і довкілля шляхом підвищення точності встановлення границь зон регульованої забудови навколо аеропорту на основі удосконалення моделей поширення авіаційного шуму, електромагнітних полів розосереджених та локальних джерел, а також розроблення і удосконалення комплексу заходів зниження їх впливу. Для досягнення поставленої мети було визначено і вирішено наступні **завдання**:

– проаналізувати міжнародний та національний досвід щодо методів розрахунку поширення авіаційного шуму та електромагнітних полів, прогнозування їх зміни у просторі і часі, а також заходи і засоби захисту населення і довкілля від впливу цих фізичних чинників з урахуванням вимог міжнародних та національних нормативно-правових актів щодо несприятливого впливу авіаційного шуму при розрахунку їх рівнів у зоні аеродрому на прилеглий території;

– удосконалити метод розрахунку рівнів звуку для оцінювання одиночної події випромінювання шуму для етапів злету та посадки літака відповідно до чинної політики ІКАО та національної політики охорони довкілля і здоров'я населення;

– обґрунтувати уточнену поправку на ефект впливу земної поверхні для обчислення рівнів звуку авіаційного шуму в результаті інтерференції прямих і відбитих звукових променів;

– удосконалити поправку на спрямованість випромінювання звуку у задню напівсферу від літака для основних категорій повітряних суден для врахування впливу шуму, що утворюється під час наземних операцій руху літаків;

– здійснити моделювання поширення авіаційного шуму з урахуванням наступних чинників і умов: різноманітність типів і категорій літаків, що експлуатуються, та їх акустичних, льотно-технічних характеристик для відповідних режимів на етапах зльоту та посадки, конкретної геометрії руху літаків аеропорту протягом злітно-посадкового циклу (розміщення місць стоянки, руліжних доріжок, злітно-посадкових смуг, маршрутів прильоту/вильоту), наближених до реальних умов завантаження чинним парком літаків маршрутів прильоту/вильоту і стану атмосфери;

– автоматизувати процес побудови контурів авіаційного шуму та застосувати інструменти ГІС-технології з прив'язкою до географічних координат аеропорту для нанесення побудованих контурів шуму на цифрову мапу аеропорту;

– на підставі розрахованих добового еквівалентного та максимального рівнів шуму з урахуванням їх порогових значень визначити межі захисту від негативного впливу авіаційного шуму на населення, обґрунтувати засоби зі зниження його впливу та визначити границі зон регульованої забудови;

– визначити засоби активного регулювання реакцією роздратування населення від експозиції авіаційного шуму з урахуванням неакустичних чинників впливу авіаційного шуму на населення, що проживає навколо аеропорту;

– здійснити моделювання поширення електричних і магнітних полів промислової частоти навколо повітряних і кабельних ліній електропередачі за різних робочих напруг та миттєвих значень електричного струму у них, на основі яких розробити заходи і засоби нормалізації їх рівнів;

– здійснити моделювання просторових розподілів електромагнітних полів множинних джерел з різними закономірностями їх поширення, визначити умови їх раціонального розміщення, а також моделювання просторових розподілів



магнітного поля навколо потужних електричних машин та визначити зони його максимальних і мінімальних значень;

– обґрунтувати та розробити комплекс організаційно-технічних заходів з нормалізації рівнів авіаційного шуму та електромагнітних полів, які впливають на населення і довкілля, зокрема розробити інноваційні матеріали для зниження рівнів електромагнітних полів та шуму.

*Об'єкт дослідження* – процеси поширення та оцінювання рівнів авіаційного шуму та електромагнітних полів розосереджених і локальних джерел навколо аеропорту.

*Предмет дослідження* – методи розрахунку поширення та оцінювання авіаційного шуму та електромагнітних полів розосереджених і локальних джерел, прогнозування змін рівнів цих фізичних чинників у просторі і часі та визначення умов зонування житлової забудови.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань застосовувалися сучасні методи досліджень: принципи системного аналізу для структурування процесів поширення та оцінювання рівнів авіаційного шуму і електромагнітних полів; метод сегментації для побудови моделі поширення контурів авіаційного шуму; метод розрахунку рівня звуку при одиночному прольоті повітряного судна для оцінювання рівня шуму; методи оцінювання шумового навантаження, методи моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних та кабельних ліній електропередачі; методи моделювання просторового розподілу магнітного поля дипольно-квадрупольних джерел та множинних джерел; натурні вимірювання рівнів авіаційного шуму та електромагнітних полів з використанням повіреного атестованого обладнання для верифікації результатів моделювання.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає у:

- *вперше* обґрунтовано і реалізовано комплекс моделей просторових поширень електромагнітних полів промислової частоти навколо розосереджених і локальних джерел, найбільш критичних щодо електромагнітного впливу на

населення і довкілля; це дозволяє розраховувати та прогнозувати електромагнітне навантаження на територіях і окремих об'єктах в умовах складної електромагнітної обстановки;

- *вперше* обґрунтовано і реалізовано визначати залежність «шум–режим роботи двигуна–аеродинамічна конфігурація літака–дистанція» замість залежності «шум–режим роботи двигуна–дистанція», рекомендованої чинним Керівництвом ІКАО Doc 9911 для обчислення контурів шуму навколо аеропорту, з урахуванням реальних умов експлуатації літаків та стану атмосфери;

- *вперше* запропоновано і реалізовано методологію оцінки ризику до визначення кількості роздратованого населення від експозиції авіаційного шуму з урахуванням акустичних та неакустичних чинників, що дозволяє оцінювати та регулювати реакцією населення, роздратованого впливом авіаційного шуму;

- *вперше обґрунтовано та розроблено* методологічні і технологічні засади проектування та вироблення універсальних композитних металополімерних матеріалів для захисту від впливу електромагнітних полів та шуму, що дозволяє керувати коефіцієнтом екранування електромагнітного поля: для ультрависоких частот 2,4 ГГц – 2,6 ГГц за вмісту дрібнодисперсної екрануючої металеві субстанції у полімерній матриці від 10% (за вагою) коефіцієнт екранування різко підвищується з 10,2 до 44,0; для магнітного поля промислової частоти за вмісту металеві екрануючої субстанції у полімерній матриці 5–20% (за вагою) коефіцієнт екранування магнітного поля зростає з 1,2 до 15,0; при цьому найбільші значення індексу зниження шуму 41–44 дБ припадають на частоти звукових хвиль 6–8 кГц;

- *удосконалено*, обґрунтовано і запропоновано уточнену оцінку поправки впливу земної поверхні (інтерференції прямих і відбитих променів), яка у Керівництві з рекомендованого методу розрахунку контурів шуму навколо аеропорту (ІКАО, DOC 9911) є суттєво завищеною, що дозволяє підвищити точність методу розрахунку рівнів авіаційного шуму шляхом визначення

поправки для кожного спектрального класу літаків (відповідно до класифікації міжнародної бази даних ANP, яка рекомендується до застосування в інтегральних моделях обчислення шуму від літаків) при зльоті і посадці та для двох типів поверхонь відбиття звукових променів – акустично м'якої і жорсткої;

- *удосконалено* поправку на спрямованість випромінювання у задню напівсферу на етапах наземного руху літаків в аеропорту у вигляді запропонованих залежностей четвертого порядку від кута спрямованості для різних літаків на відміну від залежності другого порядку, яке узагальнено описує будь-який тип літака у рекомендованому методі ICAO Doc 9911, що дозволяє додатково враховувати експозицію шуму, яка утворюється при рулінні літаків, випробуванні двигунів, використанні допоміжних силових установок, і якими раніше нехтували і не враховували у методі ICAO при розрахунку рівнів звуку в окремих точці і контурів шуму для одиночних подій та тривалих сценаріїв експлуатації літаків в аеропорту;

- *удосконалено* методологічні засади моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних і кабельних ліній електропередачі; це дозволило сформулювати основні засади прогнозування та керування електромагнітним навантаженням на території на стадіях проектування та модернізації цих об'єктів: удосконалення конструкцій ліній електропередачі, регулювання робочих струмів, що надає змогу за рахунок змін параметрів ліній знизити рівні магнітних полів у 1,7-2,4 рази, обґрунтовано застосування екрануючих поверхонь і конструкцій тощо;

*отримали подальший розвиток:*

- методологія побудови просторових розподілів електромагнітних полів множинних джерел з різними закономірностями їх генерації та поширення у приміщеннях і на територіях, що дозволило раціоналізувати загальні схеми їх розміщення та впровадити заходи з електромагнітної безпеки на принципах розумної достатності;

- метод побудови контурів авіаційного шуму, який базується на ГІС-платформі і забезпечує прив'язку контурів шуму до цифрової мапи приаеродромної території, що дозволяє визначати ЗОЗ, зменшувати вразливість населення до роздратування від авіаційного шуму шляхом надання достовірної інформації про рівні звуку від окремих подій випромінювання шуму і для тривалих сценаріїв експлуатації літаків як адміністрації аеропорту, так населенню.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у наступному:

- запропонований і реалізований удосконалений метод розрахунку рівня експозиції звуку, максимального рівня звуку для оцінки одиночної події з високою точністю з одночасним урахуванням розрахунку еквівалентного рівня та добових індексів звуку для етапів зльоту і посадки дозволяє дослідити вплив усіх можливих умов експлуатації з урахуванням кожного типу літака, особливостей конкретного аеропорту і виявити, чи виконуються нормативи гігієнічних вимог щодо встановлених рівнів шуму як для конкретних точок, так і для територій в межах контурів шуму для нормативних рівнів звуку, а також дослідити зашумленість території аеропорту та враховувати зони житлової забудови в його околиці;
- запропонована уточнена оцінка поправки на ефект впливу земної поверхні – інтерференції прямих і відбитих звукових променів, забезпечує підвищену точність методу розрахунку контурів шуму навколо аеропорту, особливо для рівнів звуку від одиночних подій випромінювання авіаційного шуму;
- запропонована поправка на спрямованість випромінювання шуму у задню напівсферу на етапах наземного руху літаків в аеропорту дозволяє спрогнозувати та зменшити негативний вплив авіаційного шуму на населення, обрати найбільш прийнятні параметри операцій руління, зльоту та посадки з урахуванням типу літака, просторових характеристик аеропорту та особливостей його експлуатації;

- розраховані контури авіаційного шуму, які відображаються на мапі аеропорту, дозволяють визначити границі зон регульованої забудови та обґрунтувати програми захисту населення, що мешкає в їх межах;
- запропонована методологія ризику до визначення кількості роздратованого населення від експозиції авіаційного шуму з урахуванням акустичних та неакустичних чинників дозволяє оцінювати та регулювати вразливість населення до роздратування від впливу авіаційного шуму;
- здійснене моделювання електромагнітних полів повітряних та кабельних ліній електропередачі придатне для прогнозування електромагнітного навантаження на довкілля як на стадіях проектування нових ліній, так і під час модернізації тих, що перебувають у експлуатації; моделювання дозволяє оптимізувати конфігурації розщеплення фаз, міжфазні відстані, конфігурації підвісу дротів тощо;
- моделювання розподілу електромагнітних полів багатьох джерел дозволяє за будь-якої їх кількості та закономірностей поширення полів раціоналізувати їх взаємне розташування з точки зору електромагнітної безпеки як у приміщеннях, так і на територіях;
- розроблені композитні металополімерні матеріали для зниження рівнів електромагнітних полів та шуму придатні для виготовлення екрануючих поверхонь великих площ облицювання будівель та споруд.

Розроблений та удосконалений метод розрахунку авіаційного шуму дозволив впровадити результати дослідження у вигляді інформаційної системи екологічного моніторингу шляхом її інтеграції до складу програмних ресурсів у Міжнародному аеропорту «Київ» імені Ігоря Сікорського. Результати дисертаційної роботи впроваджено у Південній Електроенергетичній Системі ДП «НЕК Укренерго», що дозволило визначити межі перевищення гранично допустимих рівнів магнітного поля, яке утворюється на електроустаткуванні відкритого розподільчого пристрою 330 кВ ПС «Усатове», що становило 1550 А/м, а також визначити зони обмеження перебування людей поблизу

електроустаткування, встановлені і промарковані попереджувальними знаками маршрути переміщення обслуговуючого персоналу, охорони. Впровадження результатів дослідження на Київському підприємстві ТОВ «ЕКОТЕХЕНЕРГІЯ» за результатами моделювання було запропоновано раціональне розміщення технічних засобів, що дозволило нормалізувати рівні магнітних полів. На території трансформаторної підстанції та відкритого розподільчого пристрою за результатами розрахунків було визначено і позначено відповідними знаками зону безпечного перебування та пересування персоналу.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційного дослідження, що проводились відповідно до мети та завдань, отримані здобувачем самостійно.

У публікаціях у співавторстві здобувачу належить:

[5, 20-22, 52, 54, 60, 62-64] – метод розрахунку рівнів авіаційного шуму з урахуванням особливостей конкретного аеропорту та типів літаків, критерії оцінювання шуму;

[6] – модель обчислення поправки на спрямованість випромінювання у задню напівсферу для кожної групи (категорії) літаків Jumbo, Heavy, Large, Regional Jet, Propeller при маневруванні на землі;

[7, 59, 60] - запропоновано удосконалення загальної моделі поширення авіаційного шуму з урахуванням ефекту рефракції, що дозволяє врахувати температурний градієнт та градієнт швидкості вітру у вертикальній площині;

[55, 61, 62, 68] – запропонований підхід щодо уточнення точності та адекватності оцінки авіаційного шуму;

[11, 57, 65, 66] – ідея та реалізація застосування геоінформаційної технології для візуалізації контурів шуму;

[15, 67, 69-71] – застосування ризик-методології для оцінювання впливу шуму;

[1, 10, 14, 27, 29, 37-40, 50, 58] – визначення інформаційних показників, критичних для оцінювання електромагнітної обстановки;

[23, 24, 26, 32, 33, 36, 39, 41, 43, 44, 46, 53] – розроблення математичного апарату, моделювання просторових поширень електромагнітних полів локальних та розосереджених джерел, геомагнітного поля, визначення зон мінімальних значень магнітного поля з урахуванням його вищих гармонік та визначення умов мінімізації рівнів електричних та магнітних полів за рахунок раціоналізації розміщення обладнання та конструкцій повітряних ліній електропередачі;

[4, 8, 12, 16, 17] – інформаційні показники, розрахунковий апарат та технологічні засади виготовлення та застосування електромагнітних екранів;

[13] – розрахунковий апарат та автоматизація проектування універсального електромагнітного та шумозахисного екрана;

[9, 25, 28, 42, 46-48, 56] – експериментальна перевірка адекватності моделювання просторових розподілів електромагнітних полів та ефективності застосування екранування;

[18, 19, 22, 30, 35, 36, 45, 51] – визначення критичних інформаційних показників та розроблення цілісної системи моніторингу електромагнітної обстановки та засад його автоматизації.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Обговорювалися та доповідалися на наступних конференціях: «Новітні комп'ютерні технології: VII міжнародна науково – технічна конференція» (Севастополь, 2010 р.); IV, VI, VIII Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини у сучасних умовах» (Харків, 2012, 2014, 2016 рр.); The Fifth, Sixth, Seventh, Eighth World Congress «AVIATION IN THE XXI-st CENTURY» – «Safety in Aviation and Space Technologies», (Kyiv, Ukraine 2012, 2014, 2016, 2018 рр.); Medzinarodna Vedecka Konferencia «Narodna A Medzinarodna Bezpechost» (Братислава (Словакія), 2013 р.); Недінські читання (Київ, 2014, 2015, 2018 рр.); XI Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании» (Варна (Болгария), 2015 г.); III, IV Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології в освіті, науці і техніці» (Черкаси, 2016 р., Луцьк, 2017 р.); III, IV, V, VI Міжнародна науково–практична конференція «Безпека

життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика» (Херсон, 2016, 2017, 2018, 2019 рр.); IV Міжнародна науково-практична конференція «Людина, природа, техніка у XXI столітті» (Полтава, 2016 р.), XIII Міжнародна науково-технічна конференція «ABIA-2017» (Київ, 2017 р.), International Symposium on Sustainable Aviation 2017 (Kyiv, Ukraine, 2017); VII Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності в XXI столітті», (Дніпро, 2018).

**Публікації.** За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 71 наукову роботу. Серед них у виданнях, що індексуються у наукометричних базах даних, – 17; у фахових виданнях України – 12; інших виданнях України – 14, одноосібно – 8; матеріалів і тез доповідей на міжнародних наукових конференціях – 28. Отримано патентів – 9; свідоцтво про авторське право – 1.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 431 сторінки, з них 352 сторінки основного тексту, 160 рисунків, 24 таблиці, 5 додатків. Список використаних джерел містить 386 найменувань.



## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРОБЛЕМНИХ ЗАДАЧ МОНІТОРИНГУ ТА НОРМАЛІЗАЦІЇ РІВНІВ АВІАЦІЙНОГО ШУМУ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

1.1. Акустичний шум та електромагнітні поля антропогенного походження як біологічно активний чинник

Одними з найбільш вагомих фізичних чинників несприятливого впливу на людей і довкілля є акустичний шум та електромагнітні поля техногенного походження. Найпоширенішими джерелами таких впливів є авіаційний, автомобільний, залізничний, індустриальний шум, повітряні та підземні лінії електропередачі, потужні джерела розподілу, генерації та споживання електроенергії.

Високий рівень шуму, який утворюється при зльоті, наборі висоти та виході літака із району аеропорту, а також при зниженні та заході на посадку літака, викликає багато проблем як зі здоров'ям людей, так і їх працездатністю.

Відповідно до наказу МОЗ України від 22 лютого 2019 року N 463 «Державні санітарні норми допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови» дію шуму різних рівнів можна охарактеризувати таким чином. Допустимий рівень шуму  $L_{A_{екв}}$  до 50 дБА, зазвичай, не викликає шкідливого впливу на людину в процесі її трудової діяльності. Максимальний рівень шуму  $L_{A_{max}}$  з рівнем 50-60 дБА може мати наступні ознаками несприятливого впливу шуму на людину: загальне роздратування, порушення сну, неможливість зосередитись на виконанні конкретної роботи, зниження працездатності, у першу чергу, розумової, зменшення концентрації уваги, збільшення числа помилок, розвивається стомлення, погіршується робота серця, печінки, виникає безсилля та перенапруга нервових клітин. За рівнів шуму 65-90 дБА можливий його

фізіологічний вплив: пульс прискорюється, тиск крові підвищується, судини звужуються, що погіршує постачання органів кров'ю. Дія шуму з рівнем 90 дБА і вище може призвести до функціональних порушень в органах та системах організму людини: знижується слухова чутливість, погіршується діяльність шлунку та кишківника, з'являється відчуття нудоти, головний біль, шум у вухах. При рівні шуму 120 дБА та вище здійснюється механічний вплив на орган слуху, що виявляється у порушенні зв'язків між окремими частинами внутрішнього вуха, можливий навіть розрив барабанної перетинки. Такі високі рівні шуму впливають не лише на органи слуху, а й на весь організм. Звукові хвилі, проникаючи через шкіру, викликають механічні коливання тканин організму, внаслідок чого відбувається руйнування нервових клітин, розриви дрібних судин тощо.

Встановлено, що більше половини населення Західної Європи проживає в районах, де рівень шуму  $L_{A_{екв}}$  становить 55-70 дБА.

Особливо несприятливу дію шуму відзначають навіть за незначних рівнів шуму у години відпочинку і насамперед сну, коли найбільш повно повинні відновлюватись сили людини. Як і у багатьох країнах так і в Україні діє заборона щодо порушення тиші у житлових масивах з 23<sup>00</sup> до 7<sup>00</sup>.

Як показано у дослідженнях вітчизняних та закордонних вчених, несприятливий вплив шуму спостерігається не тільки за перевищення гранично допустимих його рівнів, а й за хронічного впливу шуму малої інтенсивності та переривчастого шуму [1–4]. Однак головною особливістю впливу шуму на людей є значна диференціація реакції осіб щодо їх роздратування на однакові рівні шуму. Численні дослідження медиків та гігієністів свідчать про несприятливий і навіть шкідливий вплив електромагнітних полів широкого частотного спектра на організм людини та окремі його системи, а саме, нервову, імунну, ендокринну, репродуктивну [5–8]. Зокрема доведено, що електромагнітний чинник суттєво впливає на плід під час вагітності, появу вроджених і надбаних вад розвитку, підвищення кількості онкологічних захворювань, розвиток неврастенічного синдрому.

Необхідно зауважити, що статистичні дані щодо біологічної дії електромагнітних полів та випромінювань є дещо суперечливими (це стосується, в основному, гранично допустимих рівнів практично в усіх діапазонах частот). Саме тому Всесвітньою організацією охорони здоров'я на електромагнітні впливи поширено принцип ALARA (As Low As Reasonable – настільки низький, наскільки це розумно досяжне), який раніше стосувався тільки іонізуючих випромінювань.

Важливим аспектом біологічної дії фізичних чинників є перебування людей у зонах одночасного впливу кількох з них. Згідно з сучасною концепцією комбінованого впливу спостерігається підсилення впливу кожного з них [9–11].

Наведене обумовлює необхідність пошуку адекватних рішень щодо максимально можливого зниження впливу на людей електромагнітних полів та акустичного шуму з урахуванням сучасного розвитку науки, технічних можливостей та економічної ситуації.

## 1.2. Аналіз нормативно-правового забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму

Рівень розвитку авіаційного транспорту є одним з якісних показників науково-технічного потенціалу розвитку країни. Аеропорт є важливою складовою інфраструктури мегаполіса, в якому повітряний транспорт виконує різні функції. Основними з них є пасажирські та вантажні перевезення. Ряд аеропортів було побудовано достатньо давно, і на даний момент перебувають у зоні житлової забудови. Найбільше шумове забруднення навколишнього середовища відбувається в зоні аеропортів під час посадки і зльоту повітряних суден, а також під час прогріву їх двигунів. У таких аеропортах злітно-посадкова смуга розташована достатньо близько від житлових будинків, тому під впливом наземних робіт двигунів повітряних суден рівень звукового тиску на території житлової забудови може значно перевищувати допустимий.

Проблема несприятливого впливу авіаційного шуму як на населення, яке проживає навколо аеропорту, так і на довкілля, є поширено в усьому світі і вона залишається актуальною. Між тим підходи до її вирішення у різних країнах є різними, оскільки це пов'язано з культурою, економікою і політикою кожної країни. На даний момент ще не створена єдина система оцінки наслідків впливу авіаційного шуму на оточуюче середовище і населення та вартості і обсягів нанесених збитків.

Регулювання несприятливого впливу АШ здійснюється відповідно до вимог міжнародних та національних нормативно-правових актів. Національні нормативно-правові акти повинні бути гармонізовані з міжнародними, які в цивільній авіації є домінуючими.

#### 1.2.1. Міжнародне нормативно-правове забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму

Україна є повноправним членом таких впливових міжнародних організацій, як Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO), Європейська конференція цивільної авіації (ECAC), Європейська організація з безпеки аеронавігації (EUROCONTROL) та є кандидатом в члени Об'єднаних Авіаційних Властей (JAA), частину повноважень яких було передано Європейській агенції з безпеки авіації (EASA).

На ICAO покладені завдання координації дій держав при експлуатації міжнародних повітряних ліній, сприяння розвитку повітряного транспорту та забезпечення безпеки міжнародних польотів. Одним з найважливіших завдань ICAO є стандартизація – встановлення Міжнародних стандартів, Рекомендованої практики і процедур, що охоплюють 18 технічних галузей авіації, зокрема:

- 14. Аеродроми – Технічні умови на проектування та експлуатацію;
- 16. Захист навколишнього середовища (авіаційний шум) – Сертифікація по шуму повітряного судна і викиду газів від двигунів.

На сьогоднішній день визначальний вплив на навколишнє середовище здійснюють типи ПС, що відповідають вимогам глави 2 Тому 1 Додатку 16 до Конвенції ІСАО [12]. Основними нормативними документами ІСАО, пов'язаних з авіаційним шумом в аеропортах і яких необхідно дотримуватися є: «Керівництво по проектуванню аеропортів» [13], «Інструктивний матеріал по збалансованому у підході до управління авіаційним шумом» [14], «Керівництво з виконання польотів» [15], «Керівництво з рекомендованого методу розрахунку контурів шуму навколо аеропорту» [16], «Додаток 16 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію. Авіаційний шум» [17], «Процедури сертифікації по шуму повітряних суден» [18].

Діяльність Міжнародної асоціації повітряного транспорту (ІАТА) спрямована на координацію дій світових авіакомпаній для забезпечення безпеки і ефективності повітряних перевезень у всіх регіонах земної кулі. Ця асоціація забезпечує понад 95% світових регулярних міжнародних авіаперевезень під прапорами більш ніж 130 незалежних держав, що об'єднує в даний час 272 авіакомпанії.

Головним її завданням є допомога авіакомпаніям мінімізувати витрати і максимізувати обслуговування клієнтури за допомогою розробки та втілення стандартів обслуговування пасажирів і клієнтури, а також процедур обслуговування в аеропортах, встановлення узгоджених тарифів на пасажирські перевезення на міжнародних маршрутах. Ці стандарти ІАТА використовуються у всьому світі, як персоналом авіакомпаній, так і обслуговуючими агентами та іншим персоналом, які беруть участь у повітряному транспорті. ІАТА постійно розробляє і вводить в дію нові вимоги до експлуатаційної діяльності авіакомпаній та до авіаційного обладнання, націлені на підвищення безпеки польотів, а також щорічно публікує звіти про стан безпеки польотів турбореактивних і турбогвинтових літаків.

Основними директивами Євросоюзу, які стосуються шумового забруднення, є: «Встановлення правил і процедур впровадження

експлуатаційних обмежень, пов'язаних з шумом на аеродромах» [19], «Оцінка та контроль шуму навколишнього середовища» [20].

Важливими міжнародними документами також є: ISO 1996/1 R «Акустика. Опис та вимірювання шуму навколишнього середовища» [21], «Рівні шуму для сертифікованих США та іноземних повітряних суден», [22], «Попередньо затверджений список заміни літаків» [23].

Підхід до вирішення проблеми АШ в окремих аеропортах з урахуванням екологічних і економічних аспектів запропонований у 2004 році у документі Міжнародної організації цивільної авіації (ICAO) DOC 9829 «Інструктивний матеріал щодо збалансованого підходу до управління авіаційним шумом». Друга редакція цього документа наведена у [14].

Сутність цього підходу полягає у тому, що кожний аеропорт повинен розробити програму збалансованого підходу, яка містить чотири складові:

- зниження шуму у джерелі,
- планування і організація землекористування,
- експлуатаційні прийоми зниження шуму,
- експлуатаційні обмеження щодо повітряних суден.

Зниження шуму у джерелі передбачає запровадження встановлених ICAO Стандартів сертифікації по шуму, зняття з експлуатації повітряних суден відповідно глави 2 Додатка 16 ICAO.

Планування і організація землекористування встановлює зони і контури шуму для визначення граничних рівнів шумів, що виникають у ході експлуатаційної діяльності аеропорту. Це дозволяє визначити межі житлових районів, в яких заборонені або обмежені види діяльності, у результаті яких виникають критичні рівні шуму.

Експлуатаційні прийоми зниження шуму передбачають визначення маршрутів мінімального шумового впливу (маршрути вильоту), застосування системи контролю траєкторії польоту і шумового впливу, удосконалення схем польоту.

Експлуатаційні обмеження передбачають обмеження нічних польотів, а в певних напрямках заборона злетів і посадки в нічний час, відповідно заборона використання злітно-посадкових смуг у нічний час та маршрутів вильоту в нічний час.

Слід зазначити, що основним джерелом шуму, яке виходить від літака, є двигун. На 39-й Сесії Асамблеї ІКАО у жовтні 2016 року розглядалася проблема авіаційного шуму, на якій було прийнято резолюцію «А39-1» [24]. В цій резолюції було прийнято норму щодо поступового зняття з експлуатації дозвукових реактивних повітряних суден, рівні шуму яких перевищують вимоги Тому І Додатку 16 до Конвенції з цивільної авіації [25].

Для кожної категорії (класу) повітряних суден норми по шуму містяться у окремій главі Додатка 1. Слід зазначити, що були введені нові обмеження по шуму для категорії «дозвукових реактивних повітряних суден», які на 7 EPN dB більш жорсткіші, ніж були раніше. Крім того, якщо раніше рівні шуму нормувалися у трьох різних сертифікованих точках, а саме: збоку від ЗПС під час розбігу (режим злету двигунів), на наборі висоті та під час посадки, то тепер у Главі 4 рівень шуму літака нормується за сумою трьох сертифікованих точок, так званий кумулятивний рівень, за умови, що у кожній з цих трьох точок виконується як мінімум нормативне обмеження Глави 3.

На 9-й Нараді Комітету з охорони навколишнього середовища від впливу авіації (CAEP/9) Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) (Канада, Монреаль, 4 - 5 лютого 2013 року), був прийнятий узгоджений новий стандарт по шуму, який на 7 EPNdB нижче за діючого стандарту, буде застосовуватися до повітряних суден нової конфігурації, що вводяться у експлуатацію у 2017 році та до повітряних суден меншої ваги – до 2020 року [24]. Відповідно до цього стандарту у 2017 році гранично допустимі рівні шуму у дозвукових реактивних літаків для максимальної злітної ваги літака 27 200 кг рівень шуму становить 95 дБ, для максимальної злітної ваги 34 000 кг – 85 дБ.

У таблиці 1.1 наведено прогнозну оцінку величини запасу кумулятивних рівнів шуму літаків за стандартом Глави 4 Додатку 16 Том1 ІКАО [25]:

Таблиця 1.1

Прогнозна оцінка величини запасу кумулятивних рівнів шуму повітряних суден за стандартом ІСАО

Категорія повітряного судна	Прогноз на 2020 рік			Прогноз на 2030 рік	
	Маса двигуна, т	Запас по шуму (EPNдБ)		Маса двигуна, т	Запас по шуму (TRL6) EPNдБ
		TRL6	TRL8		
<b>ТУРБОГВИНТОВІ ЛІТАКИ</b>					
45 т (номінальний)		12,5	12±4		
53 т (максимальний)		10	9,5±4		
<b>ДАЛЬНЬОМАГІСТРАЛЬНІ ПОВІТРЯНІ СУДНА З ДВОМА ДВИГУНАМИ (LR2)</b>					
230 т (номінальний)	10±1	22	20,5±4	13±1	28±4
290 т (максимальний)	10±1	18,5	17±4	13±1	10±1
<b>ДАЛЬНЬОМАГІСТРАЛЬНІ ПОВІТРЯНІ СУДНА З ЧОТИРМА ДВИГУНАМИ (LR4)</b>					
440 т (номінальний)	9±1	22	21±4		
550 т (максимальний)	9±1	16	14,5±4		

Для запобігання несприятливого впливу шуму на здоров'я людини вирішальне значення мають наявності гігієнічних нормативів допустимих рівнів шуму і заходи щодо усунення шуму або зниження його експозиції, тому кожна країна щодо цього питання має свої особливості.

### 1.2.2. Національне нормативно-правове забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму

Відповідно до Закону України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» [26] до факторів середовища життєдіяльності належать біологічні, хімічні, фізичні соціальні, що впливають або можуть впливати на здоров'я людини чи на здоров'я майбутніх поколінь. Серед фізичних факторів визначено і шум, а також вібрація, ультразвук,



інфразвук, теплове, іонізуюче, неіонізуюче та інші види випромінювання. Фізичні фактори підлягають гігієнічній регламентації шляхом встановлення критеріїв їх допустимого впливу на здоров'я людини. Згідно статті 24 «Захист населення від шкідливого впливу шуму, неіонізуючих випромінювань та інших фізичних факторів» органи виконавчої влади, органи місцевого самоврядування, підприємства повинні здійснювати відповідні організаційні, господарські, технічні, технологічні, архітектурно-будівельні та інші заходи щодо попередження утворення та зниження шуму до рівнів, установлених санітарними нормами для відповідного часу доби.

Нове будівництво, реконструкція, капітальний ремонт аеропортів та аеродромів з основною злітно-посадковою смугою завдовжки 2100 метрів та більше відносяться до об'єктів, що становлять підвищену екологічну небезпеку. Тому відповідно до Закону «Про екологічну експертизу» [27] такі об'єкти підлягають обов'язковій державній експертизі при проектуванні генеральних планів населених пунктів, схем районного планування, впровадженні нової техніки, технологій (у тому числі тих, що закуповуються за кордоном), які можуть створити потенційну загрозу навколишньому природному середовищу. Згідно Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» [28] обов'язковим є здійснення оцінки впливу на довкілля до прийняття рішення про провадження планової діяльності. До таких пріоритетних об'єктів належать будівництво аеропортів з основною злітно-посадковою смугою довжиною 2100 метрів і більше, а також будівництво повітряних ліній електропередачі напругою 220 кВ або більше і довжиною понад 15 км та їх модернізація.

Закон України «Про охорону атмосферного повітря» [29] згідно статті 21 «Відвернення і зниження шуму» з метою відвернення, зниження і досягнення безпечних рівнів виробничих та інших шумів вимагає впровадження малошумних машин і механізмів; розміщення аеродромів та інших об'єктів з джерелами шуму під час планування і забудови населених пунктів відповідно до встановлених законодавством санітарно-гігієнічних вимог, будівельних норм та карт шуму; застосування технічних засобів з необхідними акустичними

властивостями; запровадження організаційних заходів з використанням раціональних схем і режимів руху транспортних пересувних засобів.

Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів (далі - Правила) [30] визначають основні гігієнічні вимоги до планування і забудови як нових, так і існуючих міських та сільських поселень України, їх санітарного упорядкування та оздоровлення. Для підприємств з технологічними процесами, які є джерелами шуму, ультразвуку, вібрації, статичної електрики, електромагнітних та іонізуючих випромінювань та інших шкідливих факторів слід встановлювати санітарно-захисну зону. Розташування аеродромів (вертодромів), що будуються, слід передбачати за межами міських та сільських поселень відповідно до вимог ДБН 360-92\* «Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень» (п.7.18) з дотриманням умов Повітряного кодексу України (ст.41, 54). Траси польотів повітряних суден не повинні перетинати сельбищної території міських і сільських поселень. Відстань від межі льотного поля аеродрому (вертодрому), радіо- та метеолокаційних станцій, станцій випробовування двигунів літаків та інших об'єктів аеродрому, трас прольоту літаків (вертольотів) до межі існуючої або перспективної забудови та зон масового відпочинку повинна забезпечувати на цих територіях гігієнічні нормативи шуму відповідно до застарілого стандарту 222 83-88 «Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения», «Санитарных норм допустимого шума в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки» N 3077-84 (v7-84400-84), а також гранично допустимі рівні електромагнітних випромінювань. Також цей документ містить державні вимоги допустимих рівнів на території щодо умов впливу авіаційного шуму. Гігієнічна оцінка стану навколишнього середовища в населених пунктах проводиться на підставі гігієнічних нормативів, затверджених у встановленому порядку, а саме, для фізичних факторів (електромагнітні випромінювання, шум, вібрація) – гранично допустимі рівні (ГДР). Авіаційний транспорт є одним із джерел зовнішнього техногенного акустичного забруднення в населених пунктах з непостійними

акустичними характеристиками, до яких відносяться еквівалентні та максимальні рівні звуку ( $L_{\text{Аекв}}$ ,  $L_{\text{Амакс}}$ ). Гігієнічна оцінка акустичного режиму здійснюється на основі побудованих карт розподілу рівнів звуку аеропортів, карт зон акустичного дискомфорту територій поблизу основних джерел акустичного забруднення. В Додатках 18 та Додатках 19 [30] встановлені зони, які визначають придатність території на околицях аеропорту до забудови, а саме, зони розподіляються на А (територія без обмежень для будівництва споруд будь-якого призначення), Б та В (території з обмеженнями), Г (непридатна територія до житлової забудови), а також наведені значення для еквівалентного рівня звуку  $L_{\text{Аекв}}$  та максимального рівня звуку  $L_{\text{Амакс}}$  в дБА для денного від 07.00 до 23.00 і нічного періодів від 23.00 до 07.00).

Відповідно до ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму» [31] допустимі рівні авіаційного шуму на території житлової забудови, розташованої поблизу аеропортів, слід приймати згідно з ГОСТ 22283 [32]. Для пасажирських залів аеропортів допустимими рівнями шуму визначено, що еквівалентний рівень звуку  $L_{\text{Аекв}} = 60$  дБА, а максимальний рівень звуку  $L_{\text{Амакс}} = 75$  дБА. У ДСТУ-Н Б В.1.1-32:2013 «Настанова з проектування захисту від шуму в приміщеннях засобами звукопоглинання та екранування» [33] встановлено основні правила застосування і проектування акустичних екранів для зниження рівнів звукового тиску у місцях постійного перебування персоналу. У ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 «Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сельбищних територій» [34] наведено розрахунок  $L_{\text{Аекв}}$  для денного та нічного часу доби та  $L_{\text{Амакс}}$  для реактивних та гвинтових літаків.

У ДСТУ-Н Б В.1.1-34:2013 «Настанова з розрахунку та проектування звукоізоляції огорожувальних конструкцій житлових і громадських будинків» [35] представлено розрахунок ізоляції повітряного шуму акустично однорідною огорожувальною конструкцією. У ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 «Настанова з розрахунку рівнів шуму в приміщеннях і на територіях» [36] визначено розрахунок рівнів шуму у приміщеннях і на територіях як для постійного шуму, так і для непостійного.

Невід'ємною умовою сталого економічного та соціального розвитку України є охорона навколишнього природного середовища, забезпечення екологічної безпеки життєдіяльності людини. Одним з напрямів державної політики у сфері охорони навколишнього природного середовища відповідно до Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» [37] є організація моніторингу навколишнього природного середовища, яка формує екологічне інформаційне забезпечення для систематичного інформування населення про стан навколишнього середовища. Згідно цього закону однією із складових екологічної інформації є шум як один з фізичних факторів, окрім вібрації, електромагнітного випромінювання, які впливають або можуть вплинути в районі аеропорту на стан навколишнього природного середовища та здоров'я людей.

Повітряний Кодекс України [38] та Авіаційні правила України обмежують шкідливий вплив АШ. Повітряний Кодекс України визначає державне регулювання діяльності в галузі авіації та використання повітряного простору України, спрямоване на гарантування безпеки авіації, забезпечення інтересів держави, національної безпеки та потреб суспільства і економіки у повітряних перевезеннях та авіаційних роботах. Авіаційні правила України встановлюють: правила та порядок виконання польотів; правила та порядок аеронавігаційного обслуговування; вимоги до систем управління безпекою польотів; правила, порядок, обсяг і критерії оцінки, проведення перевірок, інспектування та аудиту, їх види, прийнятні методи визначення відповідності.

Відповідно до статті 83 «Захист навколишнього природного середовища від шкідливого впливу польотів цивільних повітряних суден» суб'єкти авіаційної діяльності зобов'язані під час експлуатації повітряних суден на землі та в повітрі дотримуватися встановлених нормативів вмісту забруднюючих речовин у відпрацьованих газах та впливу фізичних факторів і вживати заходів щодо зменшення обсягів викидів (емісії) забруднюючих речовин і зменшення рівня шуму, електромагнітного та радіаційного випромінювання.

Згідно статті 84 «Захист населення від шкідливого впливу викидів (емісії) забруднюючих речовин, шуму, електромагнітного випромінювання, ризику авіаційних подій під час експлуатації повітряних суден» максимальний допустимий рівень шуму під час експлуатації повітряного судна, емісії авіаційних двигунів та електромагнітного випромінювання об'єктів авіаційної діяльності не повинен перевищувати гранично допустимого рівня, встановленого авіаційними правилами України. У разі якщо рівень шуму під час експлуатації цивільного повітряного судна перевищує встановлений гранично допустимий рівень шуму, уповноважений орган з питань цивільної авіації має право обмежити або заборонити польоти такого повітряного судна.

Обмеження та заборона встановлюються з урахуванням заходів, спрямованих на зменшення рівня шуму в аеропорту та поблизу нього на основі збалансованого підходу до регулювання авіаційного шуму, включаючи:

- 1) технічне зниження рівня шуму від повітряних суден до значень, встановлених авіаційними правилами України;
- 2) просторове зонування території навколо аеропорту з урахуванням умов авіаційного шуму та інших несприятливих екологічних факторів (викидів забруднюючих речовин, електромагнітного випромінювання об'єктів авіаційної діяльності та ризику авіаційних подій), відповідне її планування і забудову;
- 3) запровадження експлуатаційних заходів під час зльоту і посадки повітряних суден, відповідну організацію повітряного руху з метою зменшення впливу авіаційного шуму та інших несприятливих екологічних факторів.

Фактичні витрати на заходи, спрямовані на зменшення та запобігання негативному впливу шуму та викидів забруднюючих речовин в аеропорту та на території поблизу нього, що визначаються авіаційними правилами України, повинні здійснюватися за рахунок плати (аеропортових зборів) за шум повітряного судна та емісію авіаційних двигунів з урахуванням рекомендацій Міжнародної організації цивільної авіації та відповідно до авіаційних правил України тільки в тих аеропортах, де існують проблеми, пов'язані з авіаційною діяльністю. Однак на сьогоднішній день це не реалізовано.

### 1.3. Аналіз сучасного стану нормативно-правової бази нормування електромагнітних полів

Основними нормативними документами (актами) щодо регламентації впливу електромагнітних полів на людей і довкілля є санітарні норми [39-40]. У них наведено гранично допустимі рівні електромагнітних полів у діапазонах частот 30 кГц – 300 ГГц та окремо для полів промислової частоти 50 Гц.

Крім конкретних обмежень для кожного діапазону у документах міститься ГДР для усіх радіотехнічних об'єктів ультрависоких частот, які не увійшли у таблиці, і становить  $10 \text{ мкВт/см}^2$  або  $6 \text{ В/м}$ . Ця норма розповсюджується, зокрема, на засоби мобільного зв'язку згідно Наказу МОЗ № 266 від 13.03.2017 р «Зміни до Державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань» [41].

Слід відмітити, що за робочими частотами мобільний зв'язок практично збігається з частотами радіотехнічного обладнання цивільної авіації, для яких ГДР складає  $10, 15, 25 \text{ мкВт/см}^2$  у зоні житлової забудови. При цьому визначити внесок кожного з джерел у загальну електромагнітну обстановку практично неможливо, принаймні приладами, рекомендованими наведеними санітарними нормами.

У обох санітарних нормах наведено ГДР для електричної складової електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц. Стосуються вони пристроїв електропередачі – повітряних ліній (кабельні лінії у нормативах згадуються тільки у рекомендаціях поступового переходу на них у населених пунктах).

Регламентація повітряних ліній за електричним полем обумовлена його постійним значенням через залежність напруженості електричного поля виключно від робочої напруги лінії. А напруженість магнітного поля залежить від миттєвого значення електричного струму і є величиною змінною.

На сьогоднішній день норматив передбачає напруженість електричного поля у житлових будинках не більше  $0,5 \text{ кВ/м}$ , на території житлової забудови –  $1 \text{ кВ/м}$ , поза житловою зоною –  $5 \text{ кВ/м}$ . Вважається, що захист від впливу

магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти забезпечується наявністю санітарно-захисної зони, але такі зони передбачаються для ПЛ напругою від 330 кВ. Для ліній 35, 110, 200, 220 кВ СЗЗ не регламентується. Як буде показано нижче, вплив магнітних полів повітряних ліній для деяких видів діяльності перевищує чинні національні та міжнародні норми.

Нормативні значення магнітних полів передбачені (як тимчасові) для кабельних ліній електропередачі. Вони наведені у офіційній методиці розрахунку електричних та магнітних полів ліній електропередачі [42] і складають 0,5 мкТл у житлових будівлях та 10 мкТл – на території житлової забудови. За відсутності загальних вимог з цього параметра в Україні фахівці орієнтуються саме на ці дані.

Розглядаючи міжнародні нормативи щодо ГДР електричних і магнітних полів промислової частоти 50/60 Гц, то найбільш поширеним з них є норматив Міжнародної комісії з неіонізуючих випромінювань (ICNIRP) [43], який є невід’ємною складовою Загальноєвропейської директиви з електромагнітної безпеки [44]. У цьому нормативі існують поняття «основні обмеження» та «контрольовані рівні». Він містить наступні обмеження.

Густина електричного струму для голови і тулуба людини, викликаного електричним і магнітним полями, не повинна перевищувати 10 мА/м<sup>2</sup>. Контрольований рівень магнітного поля для частот 0,025 – 0,82 кГц визначається як  $25/f$ , де  $f$  – частота змінного току. Тобто для частоти 50 Гц він становить 100 мкТл для населення. При цьому у найбільш цитованому нормативі для житлового середовища [45] незначним вважається рівень магнітного поля 0,02 – 0,10 мкТл, а таким, що сильно впливає на людей, 0,10 – 0,50 мкТл. Але у цьому ж нормативі наводиться, що ВООЗ рекомендує допустимий рівень магнітного поля 0,3 – 0,4 мкТл, а стандарт добровільної сертифікації виробників електронного обладнання ТСО – 0,2 мкТл.

Розгляньте свідчить, що питання щодо ГДР, принаймні для населення, остаточно не з’ясоване, тому у практичній роботі з електромагнітної безпеки слід використовувати попереджувальний підхід, виходячи з принципу ALARA.

Слід зауважити, що структура національних нормативів, крім відмінності кількісних даних, суттєво відрізняється. У санітарних нормах України ГДР є фіксованим для окремих діапазонів або смуг частот. У міжнародних нормах він змінюється неперервно зі зміною частоти поля. Крім того, майже в усіх закордонних нормативних актах крім згаданої густини електричного струму, наведеного у тілі людини, використовуються питома поглинена енергія SA (Дж/кг) та питома поглинена потужність SAR (Вт/кг). В Україні дозовий підхід базується на часі перебування людини під впливом поля визначеної напруженості  $(\text{В/м})^2 \cdot \text{год}$ , густина електричного струму  $(\text{А/м})^2 \cdot \text{год}$  або щільності потоку енергії  $(\text{Вт} \cdot \text{год/м}^2)$ .

Щодо методів і засобів захисту людей від електромагнітних впливів, то більш менш системно вони розглядаються у санітарних нормах роботи з джерелами електромагнітних полів [46]. Серед них – захист відстанню та часом (дистанціювання людей від джерел електромагнітних полів та обмеження часу перебування у зонах їх впливу), використання захисних екранів та раціональне розміщення, з точки зору електромагнітної безпеки, джерел електромагнітних полів.

Щодо екранування електромагнітних полів, то у нормативні надано перелік захисних матеріалів без регламентації умов їх використання у залежності від частотно-амплітудних та геометричних характеристик джерела поля.

Раціональне розміщення джерел впливу на людей ніяким чином не нормується, але це можливе лише за допомогою моделювання поширення електромагнітного поля окремого та багатьох джерел з наступною раціоналізацією і взаємним розташуванням. Основою для такого моделювання є фундаментальні закони поширення полів локальних та розосереджених джерел полів, їх гранично допустимі рівні та наявні або розроблені методики розрахунку кількісних значень напруженостей електричних та магнітних полів у часі і просторі.



1.4. Сучасні підходи щодо захисту людей і довкілля від впливу акустичного шуму та електромагнітних полів

#### 1.4.1. Порівняльний аналіз методів зниження авіаційного шуму

Незважаючи на той факт, що сучасні реактивні пасажирські літаки є менш шумними у порівнянні з літаками, створеними раніше, однак зростання обсягу повітряних перевезень та збільшення інтенсивності експлуатації літаків потребує вдосконалення технологій боротьби з авіаційним шумом [47], оскільки екологічна ситуація в аеропортах істотно не поліпшується, а навіть в наступні десятиліття може і погіршитися [48–54]. Проблема зниження авіаційного шуму залишається однією з ключових технічних проблем та є складовою забезпечення екологічної безпеки, яка посідає друге місце після безпеки польотів у цивільній авіації. У роботі [55] автор пропонує застосування літакоцентрованої екологічної моделі для визначення шумового впливу та емісії забруднюючих речовин на оточуюче середовище. Концепція такої моделі полягає у тому, що для оцінювання екологічних параметрів повітряного судна літак розглядається цілком. Складовими такої літакоцентрованої екологічної моделі є:

- авіаційний двигун є основним джерелом шуму та викиду забруднюючих речовин;
- шасі генерує шум на зльоті та посадці та впливає на аеродинамічну якість;
- реактивний струмінь та його взаємодія із закрилками являють собою джерело шуму;
- вибір траєкторії руху та режимів роботи двигунів визначають основні фактичні екологічні показники;
- допоміжна силова установка є джерелом шуму тільки при наземних операціях;
- планер створює внесок як джерело шуму та впливає на аеродинамічну якість та тягу літака.

Інші дослідники також вважають, що для вибору методології зниження шуму авіаційного транспорту слід визначити джерела, які визначають загальний рівень шуму. На даний час основним транспортним засобом в авіації є літак з ТРДД, для яких основними джерелами шуму є: двигуни, шасі, механізація крила і планер [51]. Двигун реактивного літака з його елементами (вентилятор, компресор, камера згоряння, турбіни, реактивне сопло) генерує акустичне випромінювання [56–58]. Слід зазначити, що потужним джерелом шуму є реактивний струмінь, випромінювання якого утворюється при його змішуванні з навколишнім середовищем. Шляхи зменшення шуму авіаційних двигунів розглянуто у низці робіт [48, 49, 51]. Основним джерелом шуму ТРДД з великим ступенем двоконтурності зазвичай є вентилятор. У роботі [51] автор розглядає наступні напрями зниження шуму вентилятора:

- стрілоподібність лопаток робочого колеса (РК);
- стрілоподібність і нахил лопаток спрямлюючого апарату (СА);
- перехід на надвисоку ступінь двоконтурності;
- регульоване сопло зовнішнього контуру;
- лопатки СА з звукопоглинальними конструкціями (ЗПК);
- РК і СА з елементами активного управління шумом;
- зниження обертової швидкості вентилятора за рахунок проектування двигунів зі ступенем двоконтурності  $m = 10 \dots 15$  і вище;
- «безвтулочний» вентилятор, що дозволяє знизити швидкість потоку, що набігає на вході в вентилятор.

Дані методи дозволяють для сучасних двигунів зі ступенем двоконтурності знизити тональний шум вентилятора на 2,5–4,5 дБ, а широкосмуговий шум - на 1,5–3,5 дБ. При цьому вплив стрілоподібності і нахилу лопаток СА на випромінювану у задню півсферу тональний шум очікується в діапазоні 3–5 дБ. Крім цього, на зниження шуму вентилятора істотно вплине установка різних видів ЗПК в мотогондолі і повітрозабірнику двигуна, а також застосування скошеного повітрозабірника ( $\approx 3$  дБ). Застосування безшовних ЗПК у повітрозабірнику двигуна знижує шум

всмоктування на 1–4 дБ, облицювання губи повітрязабірника - на 1–3 дБ. Для поліпшення ефективності шумоглушення можлива комбінація активних і пасивних ЗПК, а також криволінійність каналу за вентилятором.

Шум турбіни сучасного ТРДД став другим за важливістю джерелом шуму двигуна. Основними методами зниження шуму турбіни є [51]:

- високотемпературні глушники шуму (потенційне зниження 2–4 дБ);
- вигнутий досить довгий затурбінний канал ( $\approx 3$  дБ);
- вибір чисел лопаток РК і СА та їх взаємного розташування, оптимізація зазорів з метою зменшення слідової взаємодії (велике потенційне зниження).

Попуга А.І. [51] вважає, що єдиним реальним шляхом зниження шуму реактивного струменя ТРДД з великим та надвеликим ступенем двоконтурності на сьогоднішній день є застосування шевронного або шліцьового пристрою для сопел зовнішнього і внутрішнього контурів. Крім цього, розглядається застосування шевронів змінної геометрії, методу скошеного сопла, впорскування рідини, мікроструменя, високочастотного збудження та ін.

Багато робіт присвячено методам зниження шуму реактивного струменя газотурбінного двигуна [59–82]. Так у роботі [59] наведено порівняльний аналіз методів зниження шуму вихлопного струменя авіадвигуна, а саме, використання ежекторного сопла у комбінації з пелюстковими змішувачами потоків, встановлення проникних розсікачів, одношарових та двошарових шумопоглинаючих облицювань, застосування шевронів на виході з реактивного сопла. Показано, що змішування потоків у ТРДД є практично єдиним способом знизити шум авіадвигуна та поліпшити його акустичні характеристики без погіршення його внутрішньої газодинаміки та економічності. Однак у сучасних двигунів зі змішуванням потоків відношення швидкостей на вході у камеру змішування нижче оптимальних, що призводить до заниження потенційно можливого ефекту як щодо зниження шуму, так і економічності. У роботі [60] пропонуються наступні методи зниження шуму реактивного струменя газотурбінного двигуна: шевронні сопла, мікрострумені, плазмові актуатори, екранування тощо. Низка робіт присвячена використанню

шевронних сопел для зниження шуму [62, 65–69]. Застосування мікроструменів наведено у роботах [62, 65–71].

Використання плазмових актуаторів розглянуто у роботах [72–74, 82]. Показано, що плазмові актуатори, які розташовуються заподліцо на внутрішній поверхні сопла та періодично збуджуються поверхневим бар'єрним високочастотним розрядом, є ефективним засобом впливу для широкополосного зниження шуму за наявності збудження струменя на  $St > 2$  ( $St$  – число Струхалія).

В роботах авторів [83–86] створено експериментальну установку, яка складається із заглушеної камери та генератора вихрових кілець і дозволяє вивчати акустичні ефекти, пов'язані з генерацією шуму турбулентними потоками.

Що стосується шляхів зменшення шуму планера, то основними джерелами шуму планера є шасі, механізми збільшення підйомної сили, власне планер та аеродинамічний вплив між ними [51]. Застосування обтічників і кришок на шасі є хорошими методами зниження шуму цього вузла. Згідно з оцінкою потенційний ефект від їх застосування сягатиме  $\approx 3$  дБ. Крім того, передбачається оптимізація положення і форми кришки шасі, заповнення пустот, приведення погано обтічних стійок до більш обтічної форми. Оптимізація конструкції передкрилків з направляючими і закрилків в аеродинамічній трубі та їх акустичне облицювання дозволить знизити їх шум на 3 дБ. Окрім технічних рішень у роботі [87] як один з експлуатаційних прийомів зниження шуму розглянуто на прикладі літака Boeing 747–400 вплив різних режимів польоту на глісаді на акустичні параметри на території житлової забудови. Встановлено, що найбільш несприятлива акустична обстановка виникає при зльоті літака по глісаді у точках, розташованих за 10 км від ЗПС. Для зменшення рівня шуму літака на глісаді пропонується підвищити висоту зльоту літака та збільшення відстані проходження хвиль до землі, що посилить затухання звуку. Як зазначалося вище, ІКАО з 2018 року посилило діючі норми по шуму на місцевості для цивільних літаків на 7 EPNдБ (Глава 14 Додатку 16 [25]). Провідними науковцями України та Росії проаналізовано

новий стандарт ІСАО щодо шуму літаків цивільної авіації [51, 53, 54, 88, 89]. Визнано, що літаки нового покоління з турбореактивними двоконтурними двигунами з високим ступенем двоконтурності дозволили суттєво знизити рівень шуму магістральних літаків на місцевості. Однак залишається проблема взаємодії струменя та крила літака, яка спирається на поділ звукового поля на окремі азимутальні компоненти. В Росії запроваджена федеральна цільова програма «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», в рамках якої виконується проект «Развитие и реализация многомикрофонных методов акустических измерений применительно к исследованиям эффекта интеграции силовой установки с планером самолета» [90]. Метою цього проекту є розроблення модифікованого методу азимутальної декомпозиції, який може бути застосований до шуму взаємодії струменя і крила. Цей метод дозволяє за вимірюваннями в далекому полі визначати амплітуду і спрямованість випромінювання азимутальних мод джерела шуму аж до квадрупольних складових з помилкою менше 1 дБ. Аналіз наукових публікацій європейських фахівців показав наступне. У роботі [91] було розглянуто діяльність 248 європейських аеропортів для визначення найбільш впливових факторів щодо впровадження заходів по зменшенню шумів в аеропортах. Багато аеропортів давно ввели різні заходи для зменшення впливу шуму. Кількість і типи введених заходів відрізняються між аеропортами. Автори проаналізували співвідношення специфічних характеристик, пов'язаних з аеропортами, а саме: кількість злітно-посадкових смуг та повітряних суден, відстань від міста та населення міста, що обслуговується, валовий внутрішній продукт (ВВП) на душу населення та кількість впроваджених заходів щодо зменшення шумів. Автори дійшли висновку, що незважаючи на збільшення кількості польотних операцій та злітно-посадкових смуг, близького розташування аеропорту до населеного пункту, більш високої щільності населення та більш високого ВВП кількість запроваджених заходів по зниженню шуму не має істотного функціонального зв'язку з спостережуваними факторами, за винятком окремих випадків.

Моніторинг рівнів шуму в аеропортах європейських міст досліджено в багатьох роботах [92–96]. Більшість дослідників зосереджують увагу на негативному впливі шуму повітряного руху на здоров'я людини та навколишнє середовище. Деякі дослідники орієнтовані на експлуатаційні заходи для зменшення негативних наслідків шуму. У роботі [92] розглянуто аналітичні та напівемпіричні методи моделювання поширення шуму, а також сприйняття населенням шуму в аеропорту Відень, столиці Австрії. Автори [93] досліджували вплив шуму на населення, що проживає поряд з аеропортом, протягом дня і вночі у шести європейських аеропортах та виявили певну кореляцію між шумом за кількістю населення. У статті [94] запропоновано базову регресійну модель - «the hedonic pricing method» щодо обчислення фінансових витрат, пов'язаних із впливом шуму. Suau-Sanchez [95] запропонував структуру шуму, що дратує, в аеропорту. У роботі [96] Von der Lippe була запропонована формула обчислення кореляції даних по шуму в різних містах в залежності від кількості жителів міста. У монографії [97] показано, що авіаційний шум в районі аеропорту залежить від типів літаків, що обслуговуються, кількості польотів кожного типу літака, часу доби та метеорологічних умов. Автори публікації [98] провели дослідження допомогою своєї професійної системи моніторингу шуму в аеропорту "Загреб". В роботі показано як за допомогою частотного спектра шуму при підході без радіолокаційних даних визначається висота та модель літака. Тобто джерела шумів повітряного судна можуть використовуватися як інструмент для виявлення повітряних суден та підвищення безпеки польотів. Jagniatinskis та співавтори [58] проаналізували вплив кількості польотів на зазвичай використовувані екологічні шумові показники: еквівалентний та максимальний рівень звуку для довготривалого інтервалу їх спостереження. Ozkurt та співавтори [99] проаналізували вплив шуму аеропорту Ізмір Аднана Мендереса на стан здоров'я населення. Було виявлено, що кількість людей, які потенційно піддаються високому рівню шуму та загрожує декількома хворобами, такими як гіпертонія та порушення сну, є значною в навколишньому районі аеропорту. Цей

же автор у публікації [100] за допомогою програмного забезпечення SoundPLAN моделював шум для оцінювання рівнів шуму як для поточних польотів, так і для майбутніх інтенсивностей на прикладі аеропорту Анкара Есенбога. Bentes в роботі [101] проаналізував рівень шуму в районі навколо Міжнародного аеропорту Вірапоспо шляхом кількісного визначення частки людей, що піддаються впливу шуму в навколишніх зонах, використовуючи моделювання, інтегровані моделі шуму та географічні інформаційні системи. В роботі [102] представлена автоматизована система «Automatic Identification System», що використовується для розробки заходів по зменшенню шумів з метою зменшення впливу шуму на населення та забезпечення розвитку аеропорту. Zachary та співавтори [103] описують багатоіндикаторну оцінку та проблему мінімізації шуму для авіаційного співтовариства. Guarnaccia та інші [104] для вивчення поведінки рівнів шумів аеропорту скористалися неоднорідною моделлю Пуассона, яка застосовувалася для підрахунку кількості разів, коли рівень шуму перевищує певний поріг у відсотковому інтервалі часу. Asensio та інші [105] проаналізували програми шумоізоляції в аеропорту для зменшення впливу шуму на людей, не впливаючи на оперативну спроможність аеропорту. В роботах [106–107] для оцінки управління землекористуванням, як ефективного інструменту захисту від авіаційного шуму, наведено повну стратегічну оцінку зменшення шуму, оцінку стратегічних шумопоглинальних досліджень та оцінку шумових дій. Prats та співавтори [108] запропонував оптимізацію процедур зменшення шумів повітряного судна, використовуючи багатоцільову стратегію оптимізації, яка використовує ціль, лексикографічний та ієрархічний методи оптимізації. В Іспанії Sanchez-Perez та інші [109] представили нову модель розпізнавання класу літальних апаратів на основі сегментації шумового сигналу, а в документі [110] представлено адаптивне шумопоглинання (an adaptive noise cancelling (ANC)) та частотно-часове застосування для виявлення дефектів рельсових та залізничних колій. Ці документи є єдиними, що використовують шумові параметри для виявлення типів літаків або виявлення можливих збоїв в структурі транспортного засобу.

В роботі [111] дослідники довели, що шум повітряного судна може бути використаний не тільки в негативному аспекті, а і в позитивному як інструмент для досягнення наступних цілей:

- визначення моделі літальних апаратів без радара на основі шумів повітряного судна та широкочастотних спектрів (від 16 Гц до 16 кГц і більше) під час перельоту терміналу моніторингу шуму, що є додатковою фінансовою та оперативною перевагою особливо для малих аеропортів із системами контролю шуму, які не пов'язані з управлінням повітряним рухом;
- визначення висоти повітряного судна за рівнем шуму під час підходу або вильоту за визначеною траєкторією та кутом нахилу;
- перевірка на можливі збої у конструкції та / або двигуні повітряного судна за частотним спектром.

#### 1.4.2. Заходи і засоби електромагнітної безпеки та зниження впливу електромагнітних полів

Розроблення та впровадження заходів захисту населення і довкілля від впливу електромагнітних полів, а також обирання достатніх за ефективністю засобів захисту повинні базуватися на надійних експериментальних даних. Тому експериментальним дослідженням фактичних рівнів електромагнітних полів найбільш поширених джерел приділяється багато уваги. Специфікою електромагнітного впливу на довкілля є неможливість визначення параметрів джерел у лабораторних умовах, тобто достовірні дані можна отримати лише за результатами натурних вимірювань. Крім того, з практичних міркувань доцільно розділити електромагнітні поля за довжиною хвилі (частотою) на, власне, поля та випромінювання. Електромагнітні поля промислової частоти мають довжину хвилі 6 тис. км, тому усі біологічні об'єкти завжди перебувають у ближній зоні поля ( $R \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ ), де  $\lambda$  – довжина електромагнітної хвилі,  $R$  – відстань від джерела поля. Тобто, такі поля можна вважати квазістаціонарними. Це



обумовлює необхідність визначення їх параметрів окремо за напруженістю електричної ( $E$ , В/м) та магнітної ( $H$ , А/м) складових електромагнітного поля. Крім того, у багатьох нормативах нормується індукція магнітного поля ( $B$ , Тл), яка враховує магнітні властивості середовища розповсюдження поля. Електромагнітні поля ультрависоких і вищих частот можна вважати випромінюваннями через перебування об'єктів впливу у дальній (хвильовій) зоні поля ( $R \gg \frac{\lambda}{2\pi}$ ). Наприклад, найбільша довжина поширених джерел мобільного зв'язку GSM-900 – 0,33 м. Це обумовлює випромінювання та нормування цих факторів за щільністю потоку енергії ( $W$ , Вт/м<sup>2</sup>).

Відповідно наведеної специфіки відрізняються перелік і зміст організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки.

Усі джерела електромагнітних полів та випромінювань умовно можна розділити на дві групи:

- розосереджені (повітряні та кабельні лінії електропередачі, сегменти силової мережі електроживлення тощо);
- локальні (трансформатори, турбогенератори, електропривод, базові станції мобільного зв'язку тощо).

Дослідженням впливу кожного джерела на населення і довкілля приділяється досить багато уваги. У роботах [112–114] наведено результати досліджень фактичних рівнів високовольтних ліній електропередачі змінного струму. Зокрема виявлено, що за межами санітарних зон повітряних ліній напругою 330 кВ спостерігається перевищення ГДР магнітного поля за номінальних навантажень. Це ж притаманне лініям, для яких не передбачені СЗЗ. У роботі [115] показано, що для отримання безпечного для населення рівня магнітного поля 0,5 мкТл потрібне зниження магнітного поля для ЛЕП 330 кВ у 6 разів, 110 кВ – у 4 рази, 10 кВ – 2,8 рази, 0,4 кВ – 0,4 рази. Зниження магнітного поля до рівня 0,5 мкТл відбувається на відстані 110 м для ЛЕП 330 кВ (СЗЗ – 20 м). Для ліній 110, 10 та 0,4 кВ цей показник відповідно складає 55, 20 та 5 м. При цьому експериментально показано, що у будівлях, навіть

залізобетонних, послаблення рівня магнітного поля практично не відбувається. Ці дані також не підтверджуються роботами [116, 117], хоча методика визначення ступенів послаблення магнітного поля промислової частоти будівельними матеріалами у лабораторних умовах викликає певні сумніви. У першу чергу це стосується геометричних критеріїв розташування та розмірів досліджуваних зразків матеріалів. Такі критерії є дуже важливим аспектом електромагнітної безпеки і будуть розглянуті нижче. У дослідженнях [116–118] у якості методів зниження рівнів пропонується традиційне дистанціювання об'єктів впливу від джерела поля (повітряні лінії), зниження модулів магнітних моментів – зменшення площ струмових контурів за рахунок зменшення відстані між дротами різних фаз та зменшення векторної суми магнітних моментів шляхом оптимізації геометрії підвісу дротів на опорах, тобто векторна компенсація розщеплених дротів. Ефективність пропонованих методів не викликає сумнівів, але вони придатні тільки для проектування повітряних ліній. Зниження впливу на населення ліній, що перебувають у експлуатації, потребує розроблення та впровадження спеціальних заходів і засобів. Найефективнішим з них є екранування магнітної складової електромагнітного поля спеціальними екрануючими поверхнями, умови використання яких є складними і потребують окремого розгляду разом з задачами екранування електромагнітних полів локальних джерел.

Сучасною тенденцією у галузі передавання електроенергії як в Україні, так і в усьому світі є поступовий перехід на підземні кабельні лінії. Доцільність їх використання обумовлена меншими витратами на їх прокладання та значно нижчими рівнями впливу на населення і довкілля. Реалізація таких систем стала можлива у результаті розроблення надійних високовольтних кабелів сухого типу [119, 120]. На сьогоднішній день питанню визначення їх електромагнітного впливу приділяється багато уваги. У роботі [121] розглянуто фактичні рівні електромагнітних полів кабельної лінії напругою 330 кВ та їх можливі впливи на здоров'я населення та працівників. У ній також розглядаються магнітні поля трансформаторних підстанцій, до яких підключено цю лінію. У роботі [122]

виконано гігієнічну оцінку та визначено пріоритетні чинники, що створюються високовольтними кабельними лініями напругами 110 - 330 кВ та їх обладнанням. Зокрема показано, що не дивлячись на нижчі, порівняно з повітряними лініями, рівні магнітних полів перевищення ГДР на нормативній висоті 0,5 м має місце, що потребує вирішення. Одним із способів зниження таких полів є екранування самої кабельної лінії. Так, у статті [123] наведено результати дослідження магнітного поля трифазних кабельних ліній з одножильних кабелів за двостороннього заземлення їх екранів. Недоліком цієї роботи є проведення досліджень у лабораторних умовах. На практиці рівні магнітних полів критично залежать від магнітних властивостей середовища їх поширення, що потрібно враховувати при використанні розрахункових методів для прогнозування напруженості магнітного поля на поверхні землі.

Слід відмітити, що усі дослідження стосуються електромагнітних полів тільки промислової частоти, хоча на практиці у розглянутих лініях існують електроструми та генеровані ними магнітні поля гармонік та інтергармонік промислової частоти [124, 125]. Але такі явища нормуються за максимальними амплітудами і унеможливаються або мінімізуються електротехнічними заходами і засобами [126–128]. У багатьох випадках здійснюється автоматичне управління зовнішнім магнітним полем технічного об'єкта зі зворотними зв'язками [129].

Як зазначалося, електромагнітні поля локальних джерел потребують окремого розгляду. Передумовою розроблення заходів і засобів захисту від їх впливу є визначення не тільки амплітудних значень, а й закономірностей просторових поширень. Це є предметом ідентифікації електромагнітних полів [130]. Так, у роботі [131] показано, що більшість сучасних технічних засобів масового використання, наприклад, персональні комп'ютери, мають структуру магнітного або електричного поля, подібну до поля диполя. Це ж стосується магнітних полів багатьох трансформаторів. Такі відомості дозволяють змоделювати взаємне розташування технічного засобу та захисного екрана, який побудований на явищі віддзеркалювання, що дозволяє з великою точністю

прогнозувати потрібне зниження рівня магнітного поля. У роботах [132, 133] показано, що за різних закономірностей зниження напруженостей поля різних гармонік можна визначити структуру загального магнітного поля багатополюсної електричної машини. Це явище можливо ефективно застосовувати для визначення заходів електромагнітної безпеки [134]. У статтях [135, 136] показано практичне втілення такого підходу для екранування вбудованих трансформаторних підстанцій та лінійних низьковольтних джерел магнітних полів – сегментів мереж електроживлення. У великих населених пунктах є багато джерел постійного магнітного поля – контактні мережі електричного транспорту. У експериментальній роботі [137] наведено результати досліджень рівнів магнітних полів міського електричного транспорту у Росії та країнах Євросоюзу. Показано, що максимальні значення індукції магнітного поля у трамваях складають 500 мкТл, метрополітені – 450 мкТл, тролейбусі – 350 мкТл. Але наші попередні дослідження, проведені у місті Києві, свідчать, що наведені значення є завищеними і потребують уточнення, що буде показано у наступних розділах. Дослідження [138] присвячене розробленню методів оцінювання електромагнітних полів на об'єктах електротранспорту. Наведені дані суттєво відрізняються від представлених вище і також потребують уточнення. Недоліком цих робіт є констатація фактів без надання рекомендацій щодо зниження впливу магнітних полів на населення. Втім у них показано, що стаціонарність магнітних полів є уявною. Вони мають коливання від долей герц до кількох герц, при цьому ці коливання є непередбачуваними. Тому здійснити моделювання поширень магнітних полів з прийнятним збігом з експериментом не уявляється можливим. У цій ситуації доцільним є розроблення засобів захисту від їх впливу, причому прийнятних для одночасного захисту від впливу магнітних полів промислової частоти. Це обумовлене не тільки наведеними труднощами, а й тим, що частина міських транспортних електричних засобів, вироблених у Європі, працює на змінному струмі нестандартної частоти (16,67 Гц), а міський техногенний магнітний шум має досить широкий частотний діапазон – 0,01–30 Гц, що показано у [139].

Щодо міського електричного транспорту, то у багатьох випадках локальні зміни постійного магнітного поля можна вважати спотворенням геомагнітного поля. Зниження рівня геомагнітного поля є шкідливим для здоров'я людей [140]. Раніше таке спотворення розглядалося як несприятливий фактор виробничого середовища [141, 142]. Але в останні роки приділяється багато уваги цій проблематиці у побутових умовах. Цей параметр нормується у міжнародному нормативі [45]. На стадії затвердження національний норматив, який забороняє зниження геомагнітного поля нижче 20 мкТл у виробничих і 30 мкТл у побутових умовах. У роботах [143–145] досліджено реальні рівні та механізми ослаблення геомагнітного поля. Але чіткого уявлення, принаймні щодо вагомості впливів на значення стаціонарної складової змінного електромагнітного поля немає. У якості нормалізації індукції поля пропонується система компенсації [146], але вона технічно є складною, має велику вартість та придатна для використання тільки у виробничих умовах.

#### 1.5. Аналіз сучасних програмних засобів з моделювання авіаційного шуму й електромагнітних полів та їх поширення у просторі і часі

Проаналізовані вищенаведені методи обчислення і зниження шуму реактивного газотурбінного двигуна стосуються реалізації технічних рішень, які потребують від виробників повітряних суден великих людських, фінансових ресурсів та часу щодо їх реалізації. Тому такі методи є неприйнятними в умовах експлуатації авіаційної техніки. Саме застосування програмних засобів відповідно до вимог ІСАО для моделювання авіаційного шуму в районі аеропорту дозволяє мінімізувати фінансові, людські, технічні ресурси з урахуванням особливостей конкретного аеропорту для виявлення реальної екологічної обстановки щодо впливу авіаційного шуму на навколишнє середовище. Використання набору сценаріїв середнього та максимального добового завантаження від різних категорій повітряних суден в районі аеропорту з урахуванням нормативних значень дозволяє моделювати шум,

оцінити, спрогнозувати негативний вплив авіаційного шуму та визначити зони його впливу на навколишнє середовище при експлуатації різних категорій літаків як у поточний період, так і появи у майбутньому нових потужностей, модернізації існуючих або введенні в дію нових злітно-посадкових смуг, визначенні зон житлової забудови.

#### 1.5.1. Сучасні програмні засоби з моделювання авіаційного шуму

Проведення постійного моніторингу авіаційного шуму від літаків у зонах аеропортів потребує наявності відповідного програмного забезпечення, яке дозволяє оцінювати рівні авіаційного шуму та виявляти несприятливі умови, що призводять до перевищення нормативних значень рівнів шуму.

Фахівці з моделювання авіаційного шуму різних країн повинні самостійно створювати комп'ютерні програми з розрахунку рівнів авіаційного шуму, враховуючи логічну схему методології, наведеної в Керівництві Doc 9911 [16], особливості конкретного аеропорту, міжнародну базу даних акустичних та льотно-технічних характеристик ANP, точність розрахунків.

До програмних засобів оцінювання авіаційного шуму, розроблених закордоном і визнаних експертами авіації, належать американські системи NOISEMAP, CDAs та INM («The Integrated Noise Model») [147], німецькі системи AzB [148] та SoundPLAN v 7.4 [149], французька система [150], іспанська система SONDEO, розроблена компанією Anotec Consulting [151], англійська система ANCON2 [152, 153], норвезька система NORTIM [154], голландська система [155], швейцарська система FLULA2 [156], російська система AcousticLAB-avia [157], українська система IsoBell'a [159]. Ці системи дозволяють проводити моніторинг рівнів шумового навантаження, а також отримати значення максимального та еквівалентного рівнів звуку у окремих точках. Американська програмна система моделювання шуму INM [147] розроблена спільно Управлінням відділу навколишнього середовища та енергетики Федерального управління цивільної авіації США, Департаментом

транспорту США, корпорацією АТАС. Ця програма використовується більш ніж в 1000 організаціях в 65 країнах. INM забезпечує оцінювання поточного впливу авіаційного шуму навколо аеропорту; оцінювання змін впливу шуму в результаті нових або розширених злітно-посадкових смуг; оцінювання впливу шуму від нових оперативних процедур.

У Технічному керівництві INM версії 7.0 описані основні технічні компоненти програмної системи, в тому числі методологія траєкторії польоту.

Методика розрахунку шуму у часі включає в себе опис: обчислення геометрії польоту і фізичних параметрів; процесу інтерполяції рівня шуму сегменту польоту; коригування атмосферного поглинання; регулювання фракції шуму сегменту польоту з урахуванням показників; регулювання швидкості повітряного судна з урахуванням показників; оновлення моделі поперечного затухання шуму (вплив земної поверхні); регулювання моделі спрямованості випромінювання шуму для спостерігачів на етапі розбігу чи іншому етапі, а також для обчислення метрик, пов'язаних з операціями розбігу; нові можливості моделювання вертолітного шуму і пов'язані з ними коригування; метрики обчислювального процесу; розробка рекурсивно-розділеної сітки, яка використовується для розрахунку контурів шуму.

Програма INM має два режими видачі результатів:

1 – точки, в яких розраховується рівень звуку, та саме значення рівня звуку в цих точках,

2 – повний звіт для кожного типу літака, а саме: усі вихідні дані, маршрути польоту, характеристики шуму, результати з рівнем звуку або сітка контуру.

Згідно стандарту ISO 1996-1:2016 був виведений денний-нічний рівень шуму. Вважається, що еквівалентний рівень шуму ( $L_N$ ) між 22.00 та 7.00 повинен бути збільшений на 10 дБ, перш ніж поєднуватись з еквівалентним рівнем шуму ( $L_D$ ) за період від 7.00 до 22.00, щоб отримати денний-нічний рівень [21]:

$$L_{dn} = 10 \lg \left[ \frac{1}{24} \left( 15 \cdot 10^{0,1L_D} + 9 \cdot 10^{0,1(L_N+10)} \right) \right].$$

де  $L_d$  та  $L_n$  відповідно денний/нічний еквівалентний рівень шуму.

$L_d$  та  $L_n$  відносяться до вимірювання або розрахунку шуму на найбільш відкритому фасаді - на відкритому повітрі, що відображає довготривалий середній вплив. Таким чином,  $L_d$  і  $L_n$  репрезентують всі одиночні шумові події завдяки специфічному джерелу шуму, що відбуваються протягом більш тривалого періоду часу, наприклад, протягом року.

У Німеччині використовують дві основні моделі розрахунку шуму AzB [148] та SoundPLAN v 7.4 [149]. Модель AzB була розроблена у 70-х роках минулого століття і використовується для комерційних аеропортів та військових аеродромів, у яких експлуатуються реактивні літаки. У поточній версії AzB реалізований алгоритм розрахунку шуму без застосування методу сегментації, тобто ця програмна система не відповідає методології ECAC DOC 29, яка рекомендована в Євросоюзі. Однак очікується, що у майбутньому ця версія буде оновлена.

Особливості цієї моделі полягають у наступному. База даних шуму містить дані спектра для кожної категорії повітряних суден (окремо для вильоту і заходу на посадку) на основі даних виробників, а також відповідно комплексній оцінці даних моніторингу шуму в аеропортах Німеччини. База даних продуктивності містить профілі за замовчуванням на основі інформації, отриманої від місцевих операторів повітряних суден. Типи літаків в даний час об'єднані в 20 категорій цивільних літаків, дві групи гелікоптерів і набір груп військових повітряних суден. Бічне поширення шуму моделюється за допомогою аналітичного виразу для розподілу рухів, перпендикулярних наземній трасі. Бічне затухання враховує тільки вплив земної поверхні (не у відповідності з SAE AIR1751).

Еквівалентний рівень звуку визначається відповідно до німецького закону щодо шуму, який утворюється при повітряному русі і визначається наступним

чином:

$$L_{eq(4)} = 13,3 \times \lg \left[ \frac{1}{T} \times \sum_{i=1}^N g_i \times 10^{L_{Amax,i}/13.3} \times t_{10} \right],$$

де  $L_{Amax}$  – максимальний А-зважений рівень звуку і-ї події шуму;

$t_{10}$  – відповідає часу, коли нижче 10дБ;



$T$  – це період відліку часу, що представляє 6 місяців з найбільшою кількістю повітряних перевезень протягом одного року. Підсумовування ведеться по всіх подіях шум, що виникає в цей період відліку часу;

$g_{i\ m}$  – ваговий коефіцієнт, який залежить від часу доби (6 – 22 год. і 22 – 6 год.).

Розрахунок виконується з двома різними наборами цих вагових коефіцієнтів. Отриманий  $L_{eq(4)}$  приймає найбільше з двох значень. Окремо розраховується максимальний рівень шуму, використання спектральних даних дозволяє враховувати різні атмосферні умови.

Програма моделювання шуму SoundPLAN v 7.4 розроблена для операційних систем Windows XP, Vista, Seven 32 і 64 біт, яка здійснює моделювання поширення шуму і оцінювання забруднюючих речовин. В цій програмі враховуються акустичні впливи, кліматичні умови, що дозволяє змінювати розмір акустичних бар'єрів з урахуванням акустичних впливів. В якості джерела шуму можуть використовуватися транспортні засоби, залізниця, аеропорт. SoundPLAN дозволяє зобразити всеосяжну картину шуму операцій польоту навколо аеропортів, а саме, пасажирських та вантажних перевезень повітряними суднами, наземних операцій випробувань двигунів, рулювання, розбігу, роботи допоміжних силових установок, візків деренчання, багажних контейнерів, кондиціонерів та джерел трафіку. SoundPLAN дозволяє створювати, оцінювати і порівнювати кілька сценаріїв для різних повітряних суден для операцій відправлення і прибуття. SoundPLAN має три режими розрахунку: оцінки окремих приймачів, пряме покоління конкретних контурів шуму і розрахунок карт шуму.

У Франції [150] для моделювання шуму і побудови контурів шуму для цивільних і військових аеропортів використовується американську модель INM і відповідно до Європейської директиви № 2002-49 ЕС застосовується критерій шуму  $L_{den}$  - добовий еквівалентний рівень звука, який в даний час є офіційним критерієм для додатків планування землекористування, таких як план експозиції шуму або карти роздратування шуму:

$$L_{DEN} = 10 \times \lg \frac{1}{24} \left[ 12 \times 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{evening}+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{night}+10}{10}} \right]$$

де  $L_{day}$ ,  $L_{evening}$ ,  $L_{night}$  відповідно денний, вечірній та нічний  $A$  – зважені усередненні рівні звуку.

У Франції денний час  $06h^{00}$ - $18h^{00}$ , вечірній –  $18h^{00}$ - $22h^{00}$ , нічний –  $22h^{00}$ - $06h^{00}$ . Перед будь-якою зміною маршрутизації або до встановленням преференцій шуму для маршрутів руху обов'язково виконується аналіз впливу шуму з використанням критерія  $L_{Amax}$ , який порівнює вплив шуму двох різних траєкторій. Для пом'якшення впливу АШ у Франції застосовують наступні заходи: обмеження на пересування, обмеження у нічний час, планування землекористування, шумоізоляційні схеми, процедури відправлення «низький шум» і шум пільгових маршрутів.

Політика планування землекористування спрямована на зниження впливу авіаційного шуму за рахунок обмеження кількості жителів, які постраждали від авіаційного шуму навколо аеродромів. Ця політика застосовується до понад 250 аеродромів, які входять до складу французької цивільної авіації. Такий підхід дозволяє контролювати розвиток аеродрому і обмежувати нову забудову у найгаласливіших зонах. План експозиції шуму прийнятий після публічного розслідування. План експозиції шуму визначає чотири зони планування землекористування (A, B, C, D) навколо аеродрому. Ці чотири зони окреслюють контури шуму  $L_{den}$  (добовий еквівалентний рівень експозиції шуму), як це наведено у таблиці (табл.1.2).

Таблиця 1.2

## Зони плану експозиції шуму у Франції

Зона	Верхня межа ( dBA)	Нижня межа ( dBA)
A	–	70
B	70	65 – 62
C	65 – 62	57 – 55
D	57 – 55	50

Остаточні кордони зон В і С встановлюються місцевим представником держави після консультації з комісією в складі асоціацій резидентів, місцевих громад та представників авіації. План експозиції шуму заснований на огинаючій трьох прогнозних сценаріях: короткостроковій, середньостроковій і довгостроковій перспективі. Початок відліку – це типовий день року, який ділиться на три періоди (день, вечір і ніч). Карта роздратування шуму визначає межі схеми ізоляції шуму. Карта роздратування шуму заснована на одній короткостроковій перспективі (один рік) сценарію прогнозу. Контури 70, 62 до 65, і 55 дБА  $L_{den}$  приймаються для розмежування зони I, II, і III. Ці зони, як правило, відрізняються від зон планування землекористування (табл.1.3).

Таблиця 1.3

## Зони карти роздратування шуму у Франції

Зона	Верхня межа ( dBA)	Нижня межа ( dBA)
I	–	70
II	70	65 – 62
III	65 – 62	55

Іспанська модель SONDEO [151] дозволяє оцінити контури шуму навколо аеропорту з використанням критеріїв  $L_{den}$  і  $L_{night}$  та кількість людей, що піддаються впливу в межах цих контурів. Ця програмна система також була розроблена для оцінювання контурів шуму навколо двигуна. Завдяки модульній структурі SONDEO легко адаптується конкретних місцевих умов і дозволяє провести об'єктивний аналіз результатів і встановлення тенденцій впливу шуму як для детального вивчення одного аеропорту, так і у пакетному режимі для ряду аеропортів. В даний час SONDEO містить докладні дані про 51 аеропорт ЄС.

Англійська модель шуму ANCON 2 [152, 153] будує контури шуму на замовлення уряду, операторів аеропортів, відомства цивільної авіації. Для розрахунку шуму двигуна використовується сегментована модель, яка повністю відповідає методології ECAC. Основні особливості моделі ANCON 2 полягають у наступному. База даних шуму містить NPD таблиці на основі даних

виробників авіаційної техніки і коригуються в міру необхідності за допомогою локальних вимірювань. База даних ANP містить стандартні дані моделювання для 70 категорій літаків. Бічне затування поділяється на бічну направленість і наземне затування, які моделюються незалежно один від одного.

У якості метрик шуму використовується денний еквівалентний рівень  $L_{eq}$  (16h) (07 – 23 годин) і нічний  $L_{eq}$  (8h) (23 – 07 год.), які оцінюються окремо. Деякі схеми ізоляції шуму враховують експозицію шуму в нічний час, виражену в термінах як  $L_{eq}$  і середню SEL.

Для пом'якшення наслідків впливу шуму у Великобританії вживаються заходи, які включають шум пільгових маршрутів, обмеження шуму при вильоті, чергування ЗПС, запровадження зборів, пов'язаних з шумом, планування землекористування, схеми ізоляції шуму, а також квоти нічного руху. Такі заходи застосовуються у трьох лондонських аеропортах, визначених урядом – Хітроу, Гатвік і Станстед і підлягають контролю. В інших аеропортах заходи встановлюються і управляються локально, хоча вони, як правило, засновані на тих з певних аеропортів. Планування землекористування в усіх аеропортах ґрунтується на консультації уряду з місцевим органам влади. Контури шуму широко використовуються для різних цілей.

Норвезька модель шуму NORTIM [154] спочатку була заснована на моделі INM, однак з часом NORTIM була оновлена з урахуванням наступних ефектів: впливу землі, установки двигуна і даних шуму для деяких типів повітряних суден. Основним джерелом для NORTIM є база даних шуму – NPD–таблиці з останньої оновленої бази даних INM, включаючи військові дані NOISEMAP. Особливістю NORTIM є моделювання ефектів поширення звуку на місцевості, спеціальні процедури для бокового затування, а також надання залежних характеристик направленості для повітряних суден. Однак до сих пір не використовується спектральна інформація.

Відмінними рисами NORTIM є врахування рельєфу для розрахунку поширення звуку. Це включає в себе як топографію (тобто піднесення точки приймача), так і рельєф крутизни, який впливає на поглинання землі.

Зазвичай будуються контури шуму, які генеруються засобами ГІС.

Для оцінки авіаційного шуму використовуються два показники  $L_{eq}$  – еквівалентний рівень шуму та  $L_{DEN}$ . Максимальний рівень шуму  $L_{Amax}$  використовується в якості додаткової метрики. Він формується для середнього семиденного періоду і визначається як третій найвищий з щоденних максимальних рівнів сім виміряних протягом кожного 24-годинного періоду.

NORTIM обчислює такі метрики:  $TA$ ,  $L_{dn}$ ,  $L_{eq}$ ,  $L_{eq,den}$ ,  $L_{eq,night}$ ,  $L_{Amax,den}$ ,  $L_{Amax,night}$  та визначає зони шуму.

Детальна інформація про точки сітки дає результати розрахунків для всіх показників, доступних з NORTIM. Відсортований список внеску може бути згенерований на основі вибраних користувачем метрик. Райони зонування шуму навколо аеропорту, аеродрому або вертодрому розділені на зони шуму і визначається як:

Таблиця 1.4

## Зонування шуму в Норвегії

I зона	$L_{eq} > 50 \text{ dB}$ або $L_{Amax} > 80 \text{ dB}$ у денний час $7^{00} - 22^{00}$
II зона	$L_{eq} > 60 \text{ dB}$ або $L_{Amax} > 95 \text{ dB}$ у денний час $7^{00} - 22^{00}$ або $L_{Amax} > 80 \text{ dB}$ у нічний час $22^{00} - 7^{00}$
III зона	$L_{eq} > 65 \text{ dB}$ або $L_{Amax} > 100 \text{ dB}$ у денний час $7^{00} - 22^{00}$ або $L_{Amax} > 85 \text{ dB}$ у нічний час $22^{00} - 7^{00}$
IV зона	$L_{eq} > 70 \text{ dB}$ або $L_{eq} > 105 \text{ dB}$ у денний час $7^{00} - 22^{00}$ або $L_{Amax} > 100 \text{ dB}$ у нічний час $22^{00} - 7^{00}$

Голландська модель шуму [155] дає приписи тільки про те як повинен бути розрахований вплив шуму, які дані стосовно шуму і продуктивності повинні бути використані. Вони передбачені Законом про голландську авіацію, але не пов'язані з будь-якою конкретною комп'ютерною програмою. Тобто, різні програми розрахунку доступні у використанні як для комерційних, так і для наукових цілей. Жодна офіційна процедура не доступна для перевірки зазначених комп'ютерних програм. У якості показників шуму використовуються

європейські  $L_{den}$  та  $L_{night}$ , які засновані на рівні звукової експозиції SEL. Показники  $L_{den}$  і  $L_{night}$  розраховуються за допомогою простого методу моделювання на основі таблиць NPD, які містять  $L_{Amax}$  на основі даних виробників авіаційної техніки. SEL-значення шумового події обчислюється шляхом інтегрування дискретних вкладів шуму літального апарату вздовж траєкторії польоту. Відповідно до Закону голландської авіації для зменшення роздратування, викликане шумом повітряних суден, правила вимагають навколо голландських аеропортів: створити зони шуму; встановити правила для вимірювання, реєстрації та розрахунку впливу шуму; забезпечити дотримання зон шуму; забезпечити ізоляцію житлових приміщень, розташованих в межах конкретних контурів шуму. Крім того, було проведено: заміну попереднього національного індексу шуму на європейський показник шуму  $L_{den}$ ; заміну індексу шуму в нічний час  $L_{Aeq}$  ( $23^{00}$ – $06^{00}$ ) на європейський показник  $L_{night}$  ( $23^{00}$ – $07^{00}$ ); заміну зони шуму за допомогою обмеженого числа контрольних точок навколо аеропорту з певною межею впливу шуму в кожній точці; введення загального обсягу шуму. У тому випадку, або обмеження шуму в будь-якій контрольній точці або перевищення загального обсягу шуму з урахуванням фактичного впливу шуму, повинні бути прийняті відповідні заходи для запобігання подальшого збільшенню впливу шуму. Це може бути закриття конкретних ЗПС, зміна системи пріоритетів ЗПС, заходи щодо обсягів парку повітряних суден і т.д.

Швейцарська система моделювання шуму FLULA2 [156] будує контури шуму для цивільних і військових аеропортів, уряду і операторів аеропортів. Основні особливості моделі FLULA2 полягають у наступному. База даних повітряних суден містить конкретні дані по шуму для зльоту і посадки для 75 найбільш часто використовуваних типів літаків у Швейцарії. База даних продуктивності моделює чотири ситуації: одна посадка (на основі вимірів в заключному підході), два зльоти відповідно до злітної ваги (повна тяга і "стандартна" тяга), і продуктивність на підйомі. Посадки і дві умови злету мають індивідуальні характеристики шуму. Характеристики направленості

забезпечують А-зважений рівень звуку залежно від відстані і кута поздовжнього випромінювання на літаку. Поздовжня направленість, яка використовується в імітаційній моделі, в першу чергу, є важливою для криволінійних польотів і для військових літаків з яскраво вираженими характеристиками направленості. База даних враховує напрямок залежних спектральних характеристик літального апарату, поглинання спектрального повітря (на основі стандарту ISO 9613-1 для  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  / 70% відносної вологості повітря) і забезпечує результуючий А-зважений рівень у приймачі на заданій відстані на висоті приймача 10 м над землею. Досить високе положення приймача зменшує шкідливий вплив ефекту землі на низьких частотах. У програмі моделювання FLULA відсутня глобальна корекція SEL або рівень  $L_{\max}$  для бічного затухання. Ефект поверхні землі застосовується до тих звукових компонентів, які надходять на приймач під кутом менше  $15^{\circ}$ . Оскільки це не має нічого спільного з повітряним судном, затухання землі застосовується для усіх звукових випадків нижче  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , навіть якщо дивитись на повітряне судно спереду або ззаду. Максимальний ефект землі на куті ковзного падіння ( $0^{\circ}$ ) становить 10 дБ.

Згідно Правил для захисту від авіаційного шуму застосовуються обмеження з різними вимогами для невеликих аеродромів, цивільних і військових аеропортів. Для цивільних аеропортів межа для денного часу доби (від 06 до 22 год.) становить шістнадцять годин і застосовується показник шуму  $L_{\text{eq}}$ . В той же час як для нічного часу застосовуються три значення  $L_{\text{eq}}$  для кожної години, а саме: 22–23 год., 23–24 год. і 05–06 год.. Для нічного проміжку часу між 00 і 05 год існує нічна заборона. Одна година для  $L_{\text{eq}}$  в нічний час має подвійну функцію: накладається обмеження на максимально допустимий шум від однієї події для мінімізації порушення сну, в той час як з іншого боку, вона також чутлива до кількості рухів. Коли межі шуму перевищуються в конкретній області, застосовуються обмеження землекористування для нових розробок і за рахунок коштів аеропорту повинні бути встановлені звуконепроникні вікна в існуючих будинках. Границі шуму, які застосовуються до цивільних аеропортів для діапазону денного часу, становлять від 53 дБА  $L_{\text{eq}}$  для планування

землекористування в найбільш чутливій області шуму до 75 дБА для негайного запуску і захисту шуму в промислових районах. Типова границя шуму для проживання становить 60 дБА. Границя шуму для однієї години  $L_{eq}$  в нічний час, як правило, на 10 дБ нижче, ніж 16 годин  $L_{eq}$  у денний час.

До заходів щодо пом'якшення наслідків впливу шуму у міжнародних аеропортах відносяться: збори за посадку, переважне використання злітно-посадкової смуги, використання процедури вильоту з "низьким рівнем шуму" відповідно до "ІСАО А", а також нічна заборона роботи аеропорту від 00 до 05 год.

Всі показники шуму, що використовуються в Швейцарії, засновані на А-зваженому  $L_{eq}$ . Для цивільних аеропортів застосовуються такі правила: один  $L_{eq}$  розрахований на 16 годин денного часу (06 – 22 год.), для нічного часу застосовуються три  $L_{eq}$  на одну годину для 22 – 23 год., 23 – 24 год. і 05 – 06 год. Усі  $L_{eqs}$  розраховані на «середній день» або «середній нічний час» на основі всіх рухів повітряних суден на рік, що відбуваються у відповідному періоді часу дня або ночі.

Російська модель шуму AcousticLAB-avia [157] реалізує метод АШ, який здійснює розрахунки рівнів АШ в обраних точках та контурів рівнів АШ, використовуваних для оцінки і регулювання несприятливого впливу АШ на навколишнє середовище. Основною характеристикою АШ є оціночний еквівалентний рівень звукового тиску. Крім того, в залежності від виду розв'язуваної задачі - оцінки, контролю, зниження несприятливого впливу АШ на населення, ін. можуть бути використані інші характеристики, такі як максимальний коригований за шкалою "А" рівень звукового тиску і комбінований добовий рівень звуку.

Програмні засоби для оцінки даних профілю політ-шум були розроблені на основі баз даних і програми NoBel, яка розраховує характерні авіаційні джерела шуму і шум літака в цілому:

– PROGRAM INM\_coeff – розраховує коефіцієнти С і D для стандартних аеродинамічних конфігурацій кожного типу літака, описані у відповідних



Керівництвах з льотної експлуатації літаків, а також для двох специфічних конфігурацій з закрилками 2 і 5 градусів їх відхилення;

- PROGRAM SAETOlength – розраховує еквівалентну довжину розбігу і коефіцієнт В відповідно до вимог методики ICAO;

- PROGRAM Thrust\_coeff – розраховує методом апроксимації найменших квадратів коефіцієнти рівнянь тяги двигунів;

- Program NOIRAD – розраховує NPD-дані (Noise-Power-Distance), використовуючи дані і моделі характерних авіаційних джерел шуму у форматі методу ICAO;

- Program AcousticLAB-avia – за результатами експериментальних досліджень розраховує експлуатаційний контур шуму конкретного аеропорту.

В Україні розроблена модель шуму IsoBell'a [159], яка є аналогом програми INM та пройшла сертифікацію ICAO. Модель реалізує графо-аналітичний метод оцінювання авіаційного шуму, який був затверджений у 1987 р. і використовується й досі, та написаний для п'яти характерних груп літаків. Траєкторія злету / посадки літака описана для кожної групи літака. Метод базується на рівнянні руху центру мас на злеті / посадці та враховує:

- парк повітряних суден, що експлуатуються, а саме: типові аеродинамічні характеристики, характеристики двигуна – тип двигуна, кількість двигунів, максимальна вага, потужність, параметр злету;

- характеристики аеропорту (параметри КТА, кількість та опис ЗПС – їх позначення, координати лівого і правого торців ЗПС, магнітний курс зльоту від лівого та правого торців ЗПС);

- маршрути зльоту/посадки, число польотів (прибуттів або відправлень) кожного типу повітряного судна, що припадають на кожен магістральну лінію шляху, з розбивкою у відповідних випадках за часом доби, кількість магістральних ліній шляху;

- перелік критеріїв оцінки шуму,

- дані сценарію експлуатації в аеропорту (*метеодані* – середня температура, середній атмосферний тиск, середня відносна вологість повітря,

середня швидкість зустрічного вітру), розподіл повітряних суден між ЗПС і маршрутами польоту протягом періодів доби (день, вечір, ніч) з призначенням до них процедури зльоту/посадки та параметру відстані (зльотної маси).

В результаті обчислення за моделлю шуму IsoBell'a отримуємо контури шуму та рівні шуму в окремих точках. До недоліків моделі IsoBell'a слід віднести наступне:

- програмний продукт був створений достатньо давно, на сьогоднішній день відбулося ряд новацій у міжнародних вимогах цивільної авіації, які в ньому не враховані;

- розробники мови Compact Visual Fortran, на якій реалізовано головний розрахунковий модуль, заявили про припинення подальшої її підтримки;

- відсутній інтерфейс для введення вихідних даних для розрахунку сценарію, вони задаються у наборі файлів, крім того, оскільки головний модуль працює з достатньою кількістю різних файлів, які в процесі реалізації сценарію необхідно часто зчитувати та перезаписувати, то час, який витрачається на відкриття, зчитування, перезаписування та закриття файлу є достатньо великим;

- графо-аналітичний метод розглядає лише стандартний зліт та посадка;

- відповідно до нормативної бази в Україні оцінювання авіаційного шуму здійснюється тільки за двома критеріями –  $L_{Amax}$  (максимальне значення шуму) та  $L_{Aeq}$  (еквівалентний рівень шуму), однак оскільки Україна увійшла у Європейську спільноту в системах моделювання авіаційного шуму європейських країн та інших країн світу закладені ще інші критерії оцінювання шуму, тому й Україна не повинна бути прив'язані лише до двох критеріїв, закладених в Україні. Таким чином, виникає потреба як в удосконаленні методологічної складової методу розрахунку АШ, так і розробленні нового програмного забезпечення для моделювання рівнів АШ і побудови контурів АШ, яке:

- враховує зміни, які відбулися у міжнародних вимогах цивільної авіації щодо зниження негативного впливу АШ з урахуванням національних вимог та міжнародної БД ANP акустичних та льотно-технічних характеристик повітряних суден;

– реалізується з використанням сучасних мов і технологій програмування, які забезпечують: зручний інтерфейс для моделювання відповідного сценарію оцінювання рівнів АШ; використання набору критеріїв оцінювання АШ, впроваджені у країнах Євросоюзу та інших країнах; врахування особливостей експлуатації у конкретному аеропорті та типу конкретного повітряного судна; виявлення несприятливого впливу АШ від турбореактивних та турбогвинтових літаків; графічну візуалізацію контурів шуму ГІС-засобами для накладання їх на карту, дослідження зашумленості території аеропорту і врахування зони житлової забудови.

#### 1.5.2. Сучасні програмні засоби з моделювання електромагнітних полів та їх поширення у просторі і часі

З метою визначення можливих спотворень геомагнітного поля на стадії проектування громадських об'єктів доцільно провести їх моделювання, виходячи з фундаментальних фізичних принципів. Проведення моделювання дозволить визначити прийнятні за ефективністю засоби компенсації спотворень геомагнітного поля, а також визначити потрібні властивості та місця розміщення електромагнітних екранів для захисту від змінних електромагнітних полів. Роботи з екранування на сьогоднішній день носять, в основному, експериментальний характер [160–165]. Розрахункові методи, у тому числі і з оптимізації розміщення захисних поверхонь, мало прийнятні для практичного використання через розгляд абстрактних нескінченних площин, циліндрів, тощо [166–171]. Наведене обумовлює необхідність отримання адекватних моделей просторових змін електромагнітних полів джерел різних груп. Виконання такого моделювання потребує наявності вихідних даних у достатньому обсязі, тим більше, що оцінка можливого несприятливого впливу електромагнітних полів та випромінювань на довкілля є обов'язковою при проектуванні і будівництві об'єктів цивільного призначення [172]. Але більшість робіт у цьому напрямі мають фрагментальний характер і стосуються або одного типу джерел, або

конкретного об'єкта, що було показано вище. Системні роботи щодо електромагнітного моніторингу населених міст фактично відсутні.

Поодинокі дослідження, не дивлячись на публікації в останні роки, базуються на застарілих даних і не витримують критики [173, 174]. Дослідження електромагнітних полів об'єктів енергетичних систем з точки зору контролю природного середовища [175] розглядає лінії електропередачі, трансформатори і навіть магнітні поля усередині тролейбусів. В основному представлені результати вимірювання та розрахунку електричних і магнітних полів ліній електропередачі напругами 35–330 кВ. У цій же роботі наведено приклади розрахунків (моделювання) поширення цих полів навколо повітряних ліній. Але результати щодо моделювання мають суттєві розбіжності з результатами вимірювань електричних і магнітних полів аналогічних повітряних ліній, тому потребують уточнення як експериментальні дані, так і заходи моделювання цих полів.

При проведенні моделювання просторових розподілів та динаміки електромагнітних полів завжди постає питання вибору методу моделювання. Якщо основні математичні співвідношення відомі і є фундаментальними, то обрання програмного продукту важливе з точки зору зменшення обсягів робіт та отримання моделі з максимальною збіжністю розрахункових і експериментальних даних [176]. Як показано у роботі [177], найбільш прийнятним є метод кінцевих елементів, на базі якого розроблено програмне забезпечення для розрахунку електромагнітних полів Ansoft/Ansys, Infolytica та ін. Для розв'язку диференціальних рівнянь, які описують квазістаціонарні поля, використовують пакети TMAG-Studio та Ansoft Maxwell. На сьогоднішній день професіоналами - електротехніками широко використовується мультифізичне програмне забезпечення COMSOL [178]. У роботах [179–181] він використаний для моделювання електромагнітних процесів у магнітопровідних середовищах, багатовиткових обмотках трансформаторів, високовольтних кабелях тощо. Зокрема, він використаний для моделювання розподілу електричного потенціалу та напруженості електричного поля повітряної лінії електропередачі, а також для

розрахунку розподілу електричного поля у тілі людини. Слід зазначити, що цей пакет побудований на базі пакету Matlab, який більш широко використовується, простіший у практичній роботі та придатний для застосування у екологічних дослідженнях. На сьогоднішній день більшість досліджень щодо структури магнітних полів, як найбільш важливих у електротехніці, стосується локальних джерел (трансформатори, електричні машини) і розглядають поле усередині пристрою. Це критично з точки зору стабільності і надійності роботи цього обладнання та втрат енергії [182–184]. На сьогоднішній день багато уваги приділяється моделюванню електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. Частково це обумовлене зношеністю та потребою у їх модернізації [185], а частково – підвищенням навантаження та розгалуженням електричних мереж [186].

У дослідженні [187] на основі експериментальних даних отримані моделі електричного поля, створюваною повітряною лінією напругою 500 кВ. Зроблено висновок щодо доцільності стохастичного підходу, наприклад імітаційного моделювання. У дослідженні [188] ґрунтовно розглянуто магнітні поля повітряних і кабельних ліній, порівняно їх значення з ГДР на межі СЗЗ. Зокрема показано особливості розрахунків магнітного поля трифазних ліній за електричної поляризації магнітного поля. Показано, що за певного розташування фаз кабельної лінії можна забезпечити нормативні рівні магнітного поля без застосування феромагнітного екрана. Сучасний підхід до розрахунку напруженості або індукції магнітного поля трифазної повітряної лінії здійснюється, виходячи з розгляду послідовної системи магнітних диполів [189]. Але підвищення точності розрахунків суттєве тільки поблизу дротів повітряної лінії. У зонах впливу на людей відмінності від розрахунків моделювання, виходячи з нормативної методики, є некритичними. Але вказане напрацювання доцільно використовувати, наприклад, для активного екранування магнітного поля повітряних ліній [190].

Фактично такі методи, а також врахування гармонік магнітного поля покладено в основу визначення, нормування та керування магнітним полем

технічних об'єктів [191, 192]. Але їх не використовують для визначення можливостей зниження рівнів полів, або принаймні зон їх мінімальних значень.

На сьогоднішній день недостатньо уваги приділяється моделюванню просторових розподілів електромагнітних полів багатьох джерел. Раніше виконані роботи стосуються, в основному, виробничого середовища [19]3. Більш сучасна робота [194] стосується моделювання електромагнітного поля у житлових приміщеннях, розташованих поблизу ліній електропередачі. Але ця робота тільки констатує проникнення магнітного поля, практично без ослаблення усередину приміщення та повне екранування електричного поля. У дослідженні [195] закладено основи моделювання поширення несприятливих фізичних факторів у виробничому середовищі, що можливо поширити й на території великих площ. Це ж стосується моделювання спотворень геомагнітного поля у будівлях і спорудах через вплив феромагнітних конструктивних елементів та масивного обладнання [196, 197].

Актуальною задачею сьогодення є захист населення від впливу електромагнітних випромінювань ультрависоких частот – випромінювань базових станцій мобільного, радіорелейного зв'язку, радіолокаційного обладнання [198, 199]. Але електромагнітне навантаження на території населених місць добре досліджено. Це пояснюється двома факторами: однотипністю обладнання, яке використовується практично в усьому світі, та заздалегідь відомими діаграмами направленості усіх відомих випромінювачів [200, 201]. Відповідно розроблені й моделі раціонального і найбільш безпечного розташування джерел випромінювань ультрависоких і вищих частот [202, 203]. Однак наведене не означає відсутності необхідності захисту населення від впливу таких випромінювань. За певних умов, за наявності відбивальних поверхонь (підстилаючої поверхні, дахів, металевих облицювальних матеріалів) може спостерігатися перевищення ГДР для цього частотного діапазону. Існує багато досліджень і прикладних розробок щодо екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких і вищих частот [204–207]. Але виходячи зі складної динаміки електромагнітної обстановки у населених пунктах з

неоднорідним рельєфом та щільною висотною забудовою необхідне розроблення та обґрунтування захисних поверхонь потрібними коефіцієнтами екранування на принципах розумної достатності.

#### Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз міжнародного і вітчизняного законодавства щодо впливу АШ на населення, виявлено розбіжності щодо: критеріїв оцінювання рівнів АШ, визначення зон планування землекористування та забудови, застосування заходів щодо обмеження впливу шуму на населення у зоні аеропорту та прилеглий території.

2. Проаналізовано технічні рішення щодо методів зниження шуму реактивного газотурбінного двигуна, які потребують від виробників повітряних суден значних людських, фінансових ресурсів та часу щодо їх реалізації, тестування та втілення у конкретні моделі літаків, тому такі методи є неприйнятними в умовах експлуатації авіаційної техніки.

3. Доведено, що саме застосування програмних засобів для моделювання рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту з використанням набору сценаріїв середнього та максимального добового завантаження від різних категорій повітряних суден дозволяє мінімізувати фінансові, людські, технічні ресурси з урахуванням особливостей конкретного аеропорту для виявлення реальної екологічної обстановки щодо впливу авіаційного шуму на навколишнє середовище.

4. Проведено порівняльний аналіз програмних засобів різних країн щодо моделювання поширення АШ, виявлено розбіжності у їх реалізації, а також встановлено недоліки вітчизняного аналогу моделювання АШ IsoBell'a, обґрунтовано необхідність удосконалення методології розрахунку АШ та розроблення програмного забезпечення з використанням сучасних мов і технологій програмування.

5. В міжнародному документі ICAO DOC 9911 запропоновано метод обчислення авіаційного шуму, який застосовується у програмних системах.

Однак шуми, що утворюються при рулінні літаків, випробуванні двигунів, використанні допоміжних силових установок, вважалися такими, що ними можна нехтувати і вони не впливають на узагальнюючі контури шуму за межами аеропорту. Таким чином, запропонований метод є недостатньо точним для розрахунків рівнів АШ, оскільки у цьому методі не враховано вплив землі і випромінювання у задній сектор наземної операції руління на етапах пробігу і розбігу, що знижує точність розрахунків при моделюванні рівнів АШ.

6. У цьому ж документі ICAO DOC 9911 для операцій розбігу при відправленні та пробігу при прибутті поправка щодо випромінювання у задній сектор розраховується за однаковою залежністю другого порядку для будь-якої категорії повітряного судна. Між тим, кожна категорія повітряних суден має свою особливість і цей факт необхідно враховувати при обчисленні випромінювання у задній сектор наземної операції руління на етапах розбігу-пробігу. Тому необхідно віднайти і запропонувати функції апроксимації направленості випромінювання у задній сектор для основних категорій повітряних суден, які б враховували особливості відповідних двигунів.

7. Обґрунтовано необхідність і потребує удосконалення розрахунку більш точної поправки додаткового поглинання АШ при інтерференції прямих і відбитих акустичних хвиль.

8. Методологія розрахунку рівнів АШ, яка рекомендованого країнам – членам ICAO, для оцінювання рівнів шуму використовує лише один критерій –  $L_{Aeq}$ , вітчизняне законодавство у якості нормативу визначає два критерія –  $L_{Aeq}$  та  $L_{Amax}$ , між тим у країнах Євросоюзу встановлено ряд інших критеріїв –  $L_{AeqD}$  (еквівалентний рівень шуму вдень),  $L_{AeqN}$  (еквівалентний рівень шуму вночі),  $L_{Adep}$  (добовий еквівалентний рівень звуку), SEL (рівень звукової експозиції), EPNL (ефективний рівень шуму, що сприймається). Ці критерії потребують реалізації для гармонізації з країнами Євросоюзу.

9. Необхідно автоматизувати процес побудови контурів АШ із застосуванням ПС-платформи, що дозволить нанести контури шуму на мапу аеропорту і запропонувати заходи зі зниження впливу АШ на населення.



10. Недостатньо розроблено методологічні засади моделювання поширення та просторових змін електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі з урахуванням структур підвісу та розщеплення фаз, стріли провисання тощо. Не повністю реалізовано моделювання розповсюдження магнітних полів високовольтних кабельних ліній з урахуванням розташування фазних дротів, екранування та електрофізичних властивостей ґрунтів у зонах їх прокладання.

11. Не розроблено загальних засад моделювання просторових розподілів та динаміки змін напруженостей магнітних полів локальних джерел з урахуванням гармонічного складу електричних струмів, різних закономірностей зміни напруженості різних просторових гармонік поля тощо.

12. Не реалізовано у повному обсязі моделювання розподілу магнітного поля багатьох джерел у окремому приміщенні території тощо, яке придатне для здійснення раціоналізації та оптимізації розміщення технічних засобів з точки зору електромагнітної безпеки та прогнозування електромагнітної обстановки на стадіях проектування.

13. Відсутні методологічні засади використання моделювання поширення електромагнітних полів для розроблення і впровадження організаційно-технічних заходів зі зниження впливу цього фактору на людей і довкілля.

Виходячи з проведеного аналізу нормативної бази, методологічних засад моделювання поширення авіаційного шуму та електромагнітних полів, аналізу заходів зі зниження негативного впливу цих фізичних факторів обґрунтовано актуальність дослідження, сформульовано мету, об'єкт, предмет та задачі дослідження.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ РІВНІВ АВІАЦІЙНОГО ШУМУ ТА РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

#### 2.1. Методичний підхід оцінювання шумового навантаження у зоні аеропорту

Поява нових видів повітряних суден, вибір режимів їх зльоту і посадки, побудова нових та реконструкція старих аеропортів, збільшення інтенсивності пасажирських та вантажних перевезень потребують вирішення проблеми несприятливого впливу авіаційного шуму як на людей, які безпосередньо проживають біля зони аеропорту, так і на фахівців, які його обслуговують. Це потребує наявності системи моніторингу авіаційного шуму. Розрізняють інструментальні системи моніторингу та інформаційні. В інструментальних системах моніторингу підсистема спостереження щодо акустичного фактору ґрунтується на системі датчиків, розташованих в районі та біля аеропорту, що є забруднювачем навколишнього середовища. Інформаційна система отримує та оперує інформацією, що надходить в процесі звітності підприємства про стан та відповідні показники функціонування об'єктів – забруднювачів. Головною задачею інструментальної та функціональної підсистем є забезпечення об'єктивною та достовірною інформацією для спостереження, оцінки та прогнозу стану навколишнього середовища. Для систем моніторингу авіаційного шуму, які функціонують в районі аеропорту, визначені наступні цілі: контроль відповідності показників шуму визначеним законодавством вимогам, визначення методів зниження шуму, отримання інформації щодо визначення компенсації, платежів або штрафів за збитки, завдані шумом, накопичення об'єктивних статистичних даних про рівні авіаційного шуму в районі аеропорту та його околицях, використання отриманих даних про рівні шуму для

планування і забудови земельних ділянок, підтвердження результатів моделювання та розрахунків рівнів авіаційного шуму в аеропорту вимірюваним значенням протягом тривалого часу. Таким чином, для створення інформаційної системи моніторингу авіаційного шуму необхідно застосувати методичний підхід щодо оцінювання шумового навантаження у зоні аеропорту шляхом моделювання з урахуванням санітарно-гігієнічних нормативів впливу шуму відповідно до національних та міжнародних законодавчих актів. Слід зазначити, що основним документом, яким повинні керуватися фахівці різних країн з моделювання рівнів авіаційного шуму, є документ Комітету ІКАО із захисту навколишнього середовища від впливу авіації (САЕР), який розробив Керівництво по рекомендованому методу розрахунку контурів шуму навколо аеропортів DOC 9911 [16]. Таким чином, фахівці з моделювання авіаційного шуму самостійно повинні створювати національні комп'ютерні програми з розрахунку рівнів авіаційного шуму, враховуючи логічну схему методології, наведеної в Керівництві, міжнародну базу даних акустичних та льотно-технічних характеристик ANP, яка створювалася протягом багатьох років виробниками повітряних суден [208], особливості конкретного аеропорту, точність розрахунків. Також треба враховувати той факт, що дана методологія призначена для оцінювання впливу шуму від реактивних або важких гвинтових літаків, які експлуатуються у аеропорту, однак не може бути застосована для оцінки впливу вертольотів.

Запропонована методологія розглядає етапи зльоту, посадки літаків і застосовується тільки для розрахунку довготривалого усередненого (за рік) рівня впливу шуму, а саме - «шуму у повітрі». Така методологія не враховує так званий «шум на землі», а саме, шум, що утворюється під час наземних операцій руління ПС, шум від допоміжних силових установок, випробувань авіаційних двигунів. У Європі для розрахунку шуму використовують документ DOC 29 4<sup>th</sup> Edition [209], який є аналогом документа ІКАО DOC 9911, але з деякими відмінностями. Моделі у цих документах описують однакові фізичні явища, але відрізняються різними рівнями деталізації та деякими варіантами у конкретних

алгоритмах. Обидва методи базуються на вимогах стандарту для розрахунку шуму повітряного судна SAE AIR-1845 [210].

Точність обчислення рівнів звуку [209, 210] є достатньо високою для еквівалентних рівнів звуку  $L_{Aeq}$  або добових індексів шуму для сценаріїв польотів протягом доби, або окремого періоду доби (день, вечір, ніч, тощо), може дорівнювати кільком децибелам. Головне застосування цих методів – це обчислення контурів шуму, які використовуються для визначення зон обмеження забудови (ЗОЗ) навколо аеропортів та обґрунтування заходів зниження впливу шуму на населення в межах цих зон (рис. 2.1). Слід зазначити, що точність обчислення рівнів звуку за вимогами стандарту SAE AIR-1845 є нижчою у порівнянні з методами обчислення шуму від повітряних суден, що враховують внески окремих акустичних джерел ПС (рис. 2.2), а також дозволяють визначати спектральні рівні звукового тиску (РЗТ), наприклад в третино-октавних смугах частот (рис. 2.3), у тому числі з урахуванням ефектів розповсюдження звукових хвиль в атмосферному повітрі. Останнім часом зростають вимоги до точності обчислення рівнів звуку у зв'язку з високою вартістю заходів зниження впливу шуму на населення, враховуючи вартість вилучених земель для організації ЗОЗ.

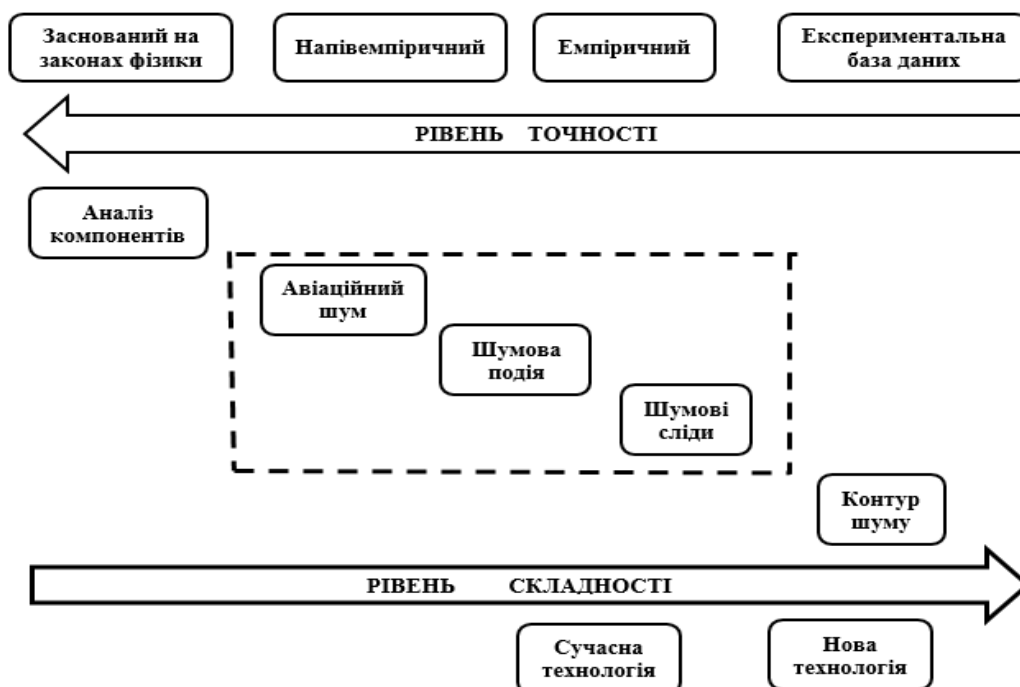


Рис. 2.1. Схема необхідних потреб та застосувань на кількох рівнях

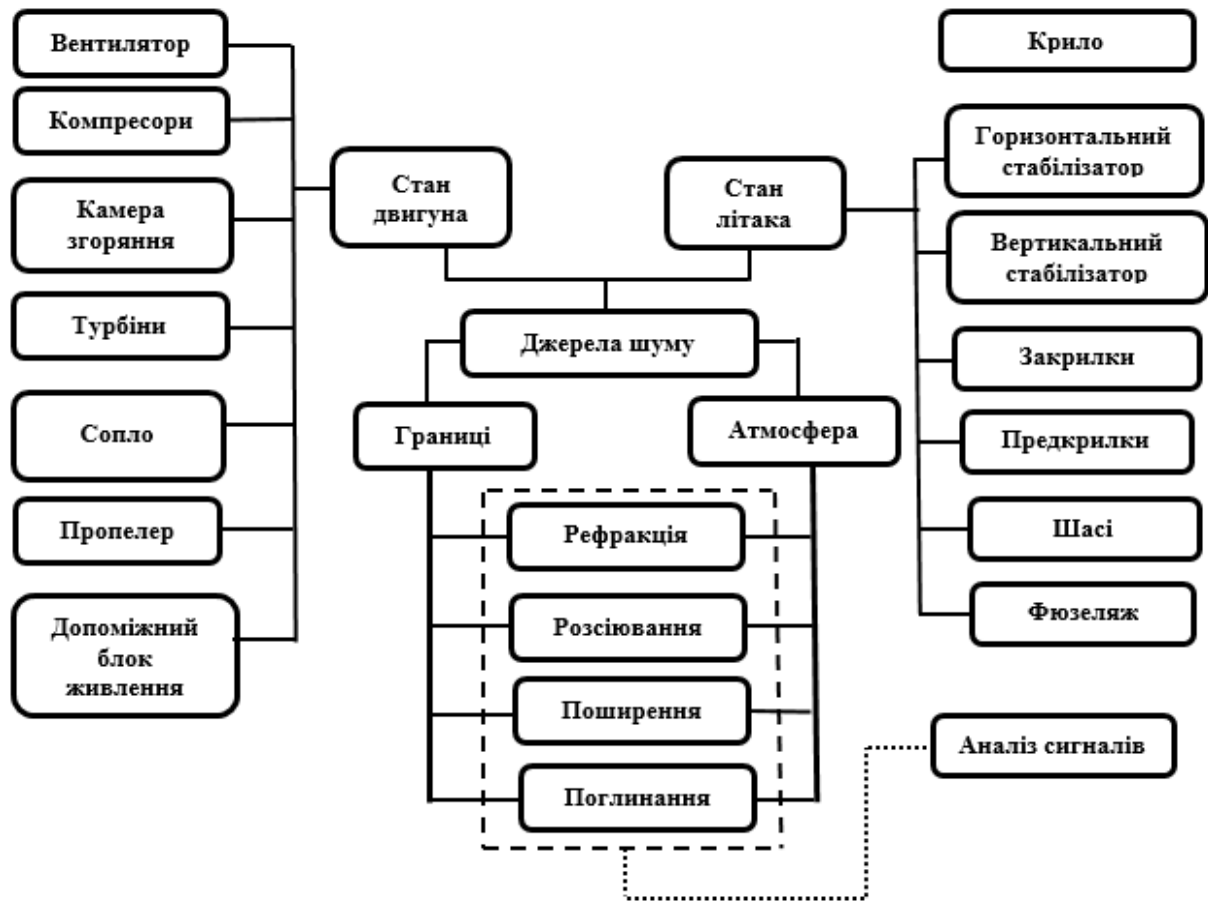
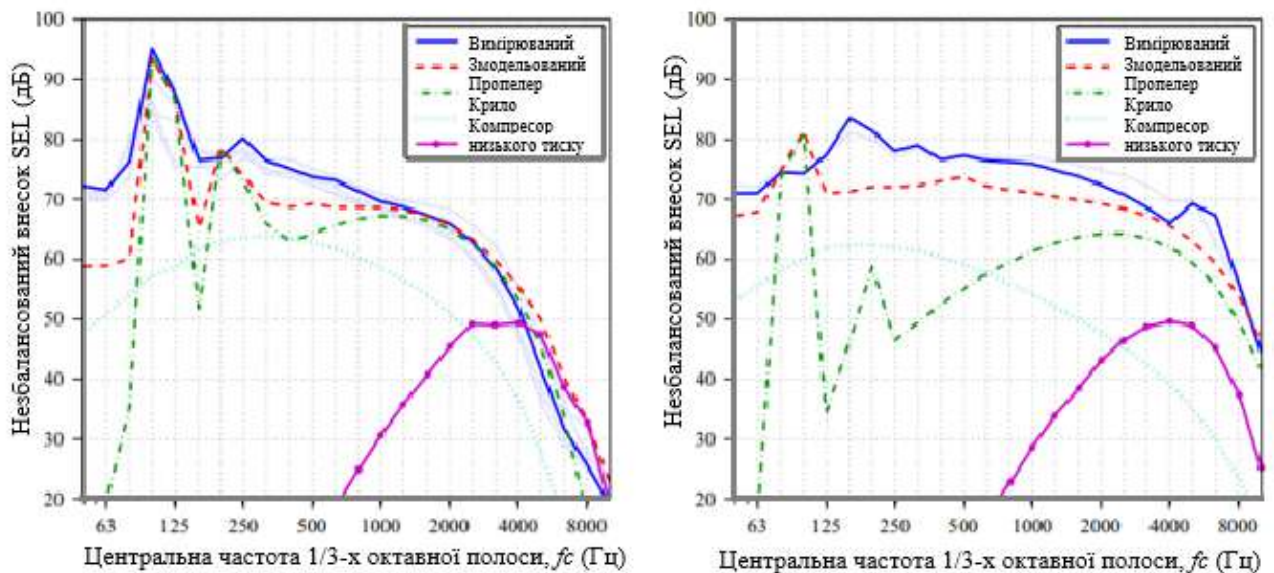


Рис. 2.2. Схема моделі шуму повітряного судна



а) Виліт

б) Прибуття

Рис. 2.3. Порівняння обчислених та вимірних спектральних рівнів шуму в точках під траєкторіями вильоту та прибуття літака Bombardier Dash8-Q400, адаптованих з [211]

В більшості країн, що є членами ІСАО, сьогодні для визначення ЗОЗ використовується лише один критерій – еквівалентний рівень звуку  $L_{Aeq}$  або добовий індекс шуму, що складається з еквівалентних рівнів звуку для денного, вечірнього та нічного періодів доби (в різних комбінаціях). Однак в Україні національне законодавство здійснює оцінку та регулювання акустичного навантаження навколо аеропортів (як і в інших можливих ситуаціях регулювання шуму навколишнього середовища) за двома критеріями: максимальний рівень звуку  $L_{Amax}$  та еквівалентний рівень звуку  $L_{Aeq}$  для денного та нічного часу доби. Національний нормативний документ (Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів [32]) використовує індикатор  $L_{Amax}$ , що визначається або вимірюваннями, або обчислюваннями, як гігієнічний критерій обмеження на забудову в районі аеропорту. Тому для України метод розрахунку шуму ІСАО DOC 9911 є дещо проблемним, але рекомендованим до використання. На рис. 2.4 наведена схема використання даних траєкторій польоту (або обчислених, або отриманих від сучасних радарів спостереження за польотами в районі аеропорту), акустичних характеристик ПС для обчислення рівнів звуку в окремих точках або у вузлах розрахункової сітки (як правило для існуючих типів ПС вони отримуються під час сертифікації цих суден на виконання вимог міжнародних та національних стандартів до рівнів шуму літаків та вертольотів). Для оцінювання рівнів звуку окремої шумової події або максимального рівня звуку  $L_{Amax}$ , або рівня експозиції звуку  $L_{Aекс}$  підходи та спрощення, які закладені в стандарт SAE AIR-1845 [210] та відповідно в методи ІСАО та ЕСАС [209] є занадто «грубими». Вони спричиняють значне відхилення вимірюваних рівнів звуку окремої події (окремого польоту ПС) від обчислених значень. Наприклад, на рис. 2.5 значення відхилень вимірюваних значень від результатів обчислення рівня експозиції звуку досягають 10 дБА, це безумовно не відповідає сучасним вимогам щодо обчислювальної точності. У середньому результати розрахунку з використанням програми INM (версія 5.1) приблизно на 5 дБ нижчі, ніж вимірювані величини  $L_{Aекс}$  (SEL) ближче до ЗПС і на 10 дБ нижчі від вимірюваних  $L_{Aекс}$  далеко (до 20-30 км) від ЗПС.

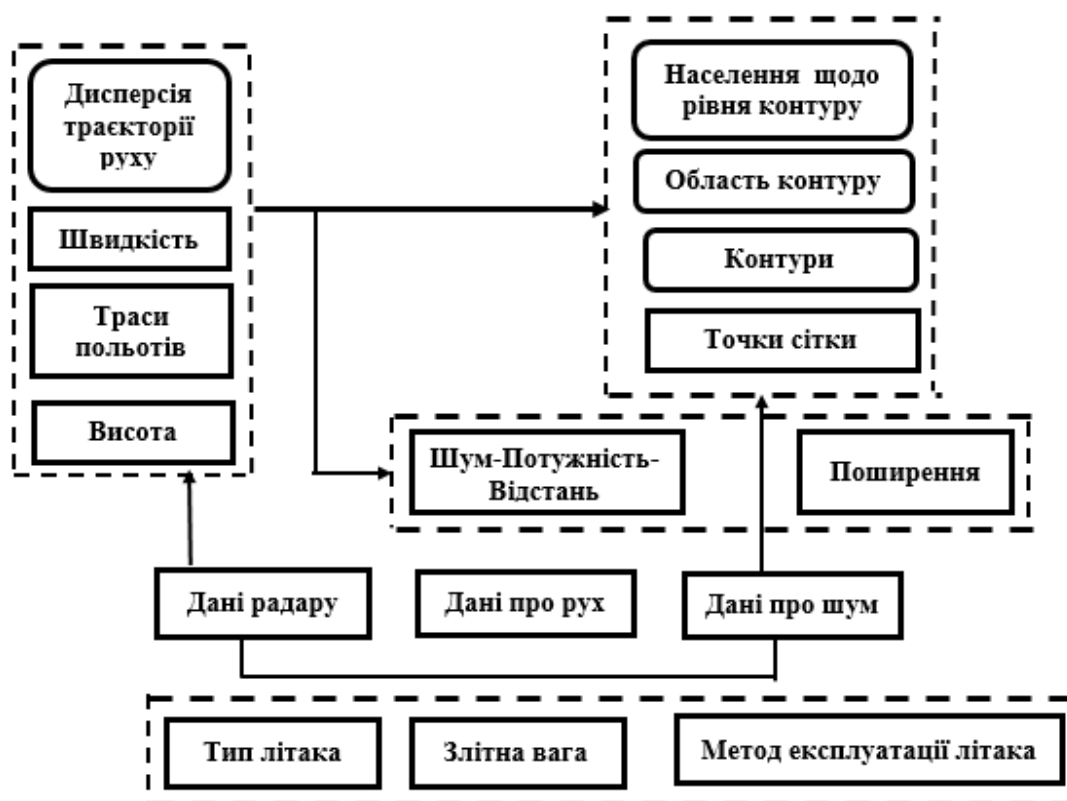
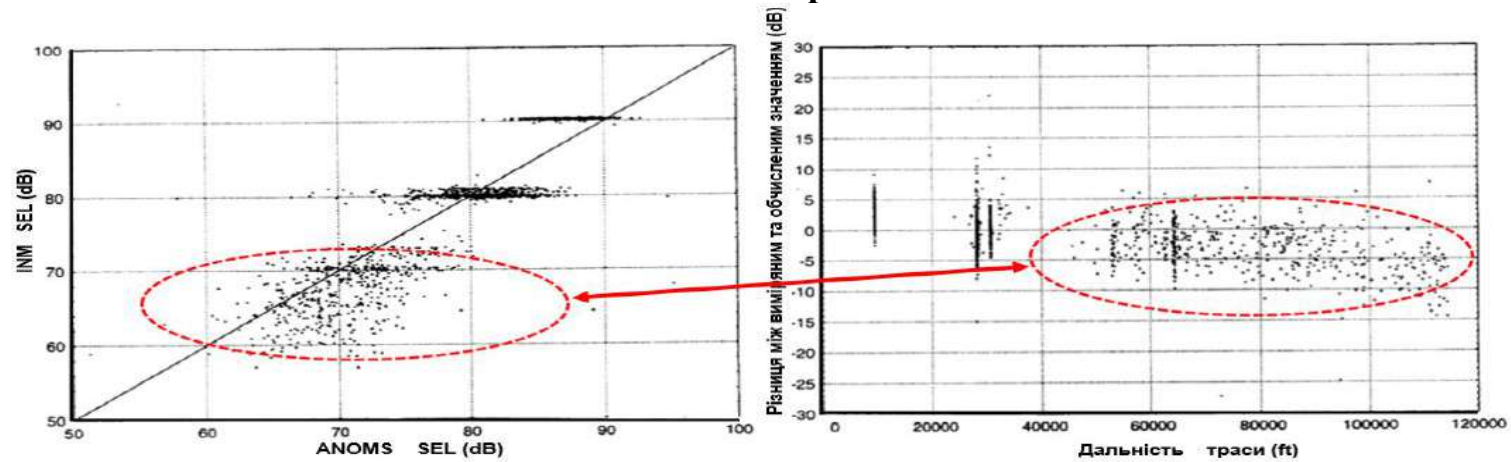


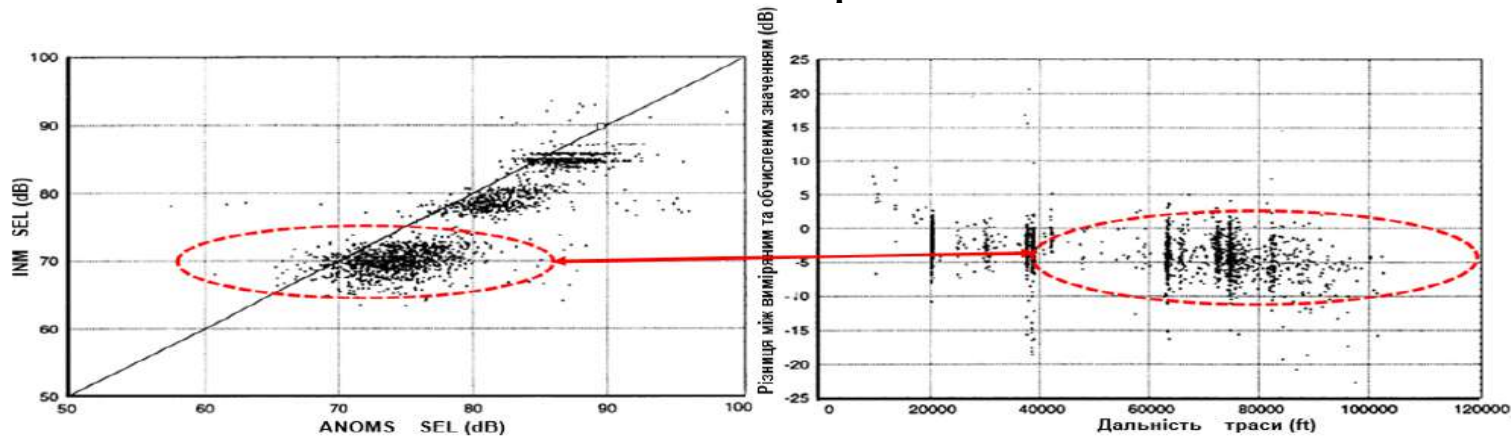
Рис. 2.4. Схема типового методу обчислення шуму ПС [212]

Така ситуація є типовою для більшості аналізів, виконаних в інших місцях. Наприклад, вимірювання проводились поблизу міського аеропорту Харків (таблиця 2.1), який експлуатує ПС на коротких та середніх дистанціях польоту: А-320, А-319, В-737, В-738, В-735, ЕМВ-195, МД-83, АТР-72, АТР-42, F-70, SAAB-2000, RJ-85 та ін.. Було обрано 5 точок контролю шуму на відстанях до 2 км від ЗПС, дві з них дуже близько обрано до номінальних маршрутів прильоту/вильоту за даними АПІ аеродрому, три – на відстані до 1 км в стороні від нього. Проаналізовані дані для вимірюваних максимальних рівнів (табл. 2.1) вказують, що діапазон змін рівня звуку у кожній точці є досить великим, навіть для того самого типу ПС та того самого етапу / режиму польоту, але їх відмінність від обчислених значень є набагато більшою. Аналогічні ефекти змін виміряних рівнів звуку та їх відмінності від обчислених значень спостерігались також під час проведення досліджень в інших аеропортах України (Бориспіль, Київ/Жуляни, Одеса, Львів, тощо).

### Зниження перед посадкою



### Зліт та набір висоти



а)

б)

Рис. 2.5. Порівняння вимірних (системою моніторингу і управління шумом в аеропорту ANOMS) та розрахованих програмою INM 5.1 рівнів експозиції звуку *SEL* для літака типу B-733 [213]): а) кореляція між виміряними та розрахованими даними; б) різниця між виміряним та обчисленим значенням як функція від відстані до торця ЗПС



Таблиця 2.1

Статистичні дані вимірюваних максимальних рівнів звуку навколо аеродрому  
Харьків

Дані рівнів звуку	$L_{Amax}$ , дБ (А)				
	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
Максимальні	99,6	84,2	77,8	85,2	78,4
Мінімальні	86,5	78,2	69,0	81,2	73,0
Усереднені	91,2	80,1	73,3	82,8	75,1
$\sigma$	3,9	1,7	2,2	1,2	1,4
$\pm\Delta$	1,7	0,8	1,0	0,5	0,6

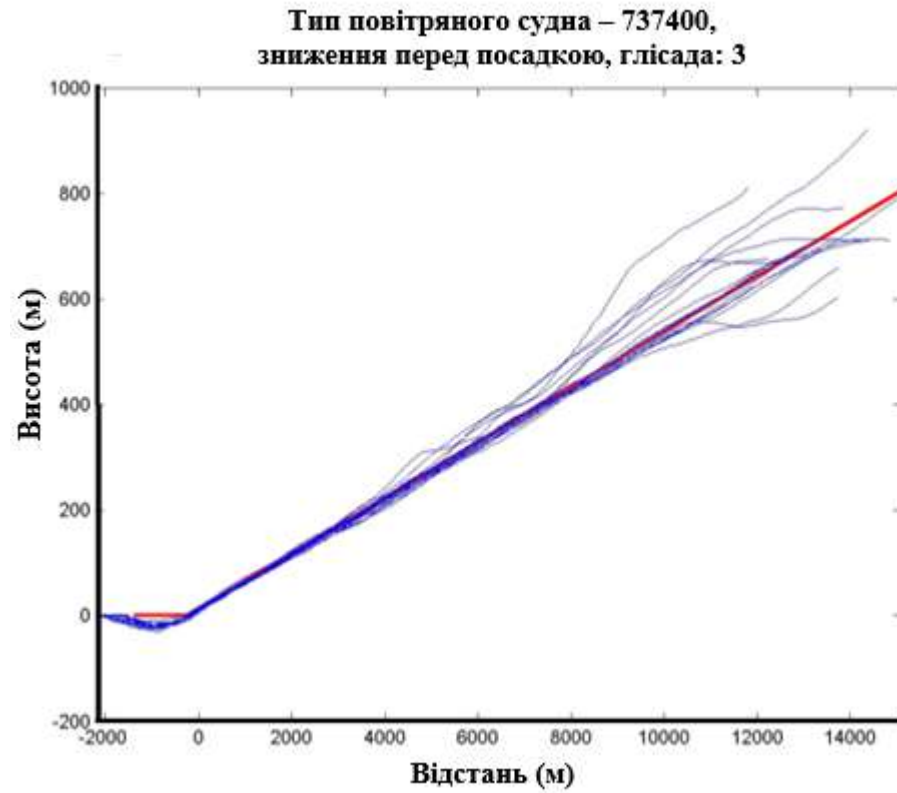
Всі поточні програмні продукти, такі як INM, є інтегрованими моделями, оскільки їх акустична складова ґрунтується на оцінці лінійних джерел, що представляють інтегрований за часом шум від повної шумової події – окремого прольоту ПС над точкою контролю шуму. Дані шуму в їхніх базах даних, як правило, поставляються виробниками ПС у вигляді кривих «шум-потужність-відстань» (Noise-Power-Distance – NPD) [210], які подаються для стандартних значень температури та вологості повітря. Акустична основа імітаційної моделі авіаційного шуму складається з точкових джерел, які рухаються динамічно в часі. Вона включає ефекти геометричного поширення звукових хвиль, поглинання їх акустичної енергії повітрям та ефекту взаємодії з поверхнею землі (інтерференція прямих та відбитих від поверхні хвиль). Різні моделі розглядають ті самі фізичні явища, але здійснюють це з різним рівнем деталізації та різним набором конкретних алгоритмів обчислення. Профілі польоту (траєкторії польоту в вертикальній площині) визначаються програмним забезпеченням за допомогою рішення системи збалансованих рівнянь руху, які рекомендуються існуючими методами і стандартом [209, 210], використовуючи дані для необхідних коефіцієнтів з бази даних ANP, що сьогодні підтримується Eurocontrol ([www.aircraftnoisemodel.com](http://www.aircraftnoisemodel.com)).

Зазвичай траєкторії польоту в реальному режимі експлуатації ПС

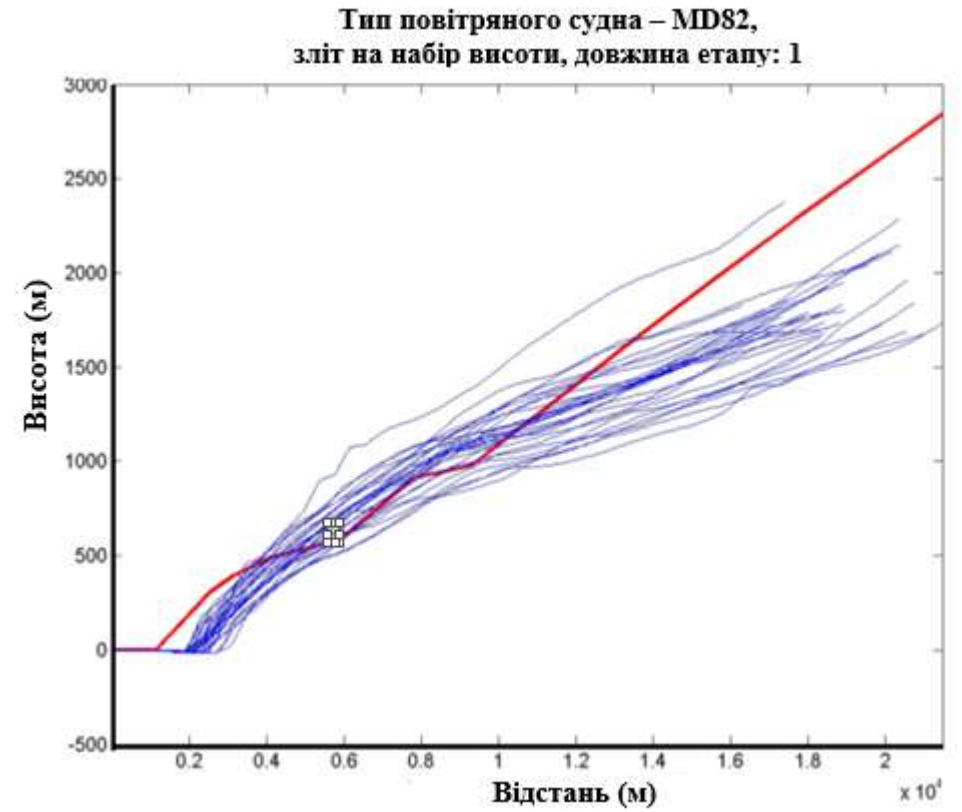
значно відрізняються від результатів прогнозування для збалансованого руху тих же типів ПС (рис. 2.6, [214]). Відмінності спостерігаються не тільки для залежностей висота-відстань (для профіля польоту), але і для швидкості польоту та налаштувань тяги двигунів, які значно більше (ніж відстань до точки оцінки шуму) впливають на результати обчислювання рівнів шуму.

На сьогодні досягнуто багато результатів порівняння між вимірюваннями та розрахунками рівнів звуку в окремих точках, в тому числі контурів шуму для значень рівнів звуку, що нормуються національними та міжнародними стандартами (правилами). На рис. 2.7 для літаків типу А-320 та В-737-400 під час зльоту/набору висоти виміряні значення  $L_{Amax}=75$  дБА представлені в різних точках у порівнянні з контурами, обчисленими програмою INM. Контур шуму, побудований за виміряними в аеропортах значеннями  $L_{Amax}=75$  дБА, є довшим до 4 км від розрахованого контуру.

Різниця між виміряними в експлуатації та збалансованими даними для параметрів польоту на етапі зниження перед посадкою обумовлює більш високі значення  $L_{Amax}$  – на 2-3 дБА, ніж вони розраховуються в цих же точках за допомогою INM (рис. 2.8). Такі самі результати можна знайти і для контурів шуму (результати обчислення програмою IsoBella рис.2.9) – для результатів з вхідними даними для параметрів польоту, що спостерігаються під час експлуатації для етапу зниження і посадки, тобто ближче до торця ЗПС, контури шуму накривають більші площі (відповідні їм різниці від результатів для збалансованого руху становлять  $L_{Amax} \sim 2$  дБА на відстані 1000 м від торця ЗПС). Результат обчислення контуру шуму за програмою IsoBella для етапу зльоту/набирання висоти рівень шуму  $L_{Amax} = 75$  дБА, який визначається вхідними даними для параметрів польоту, що спостерігаються при експлуатації, довший на 1,5 км.



а)



б)

Рис. 2.6. Профілі польоту (висота - відстань), що спостерігаються в експлуатації (синього кольору) у порівнянні з обчисленнями для системи рівнянь збалансованого руху ПС (червоного кольору):

а) зниження перед посадкою; б) зліт та набір висоти [214]

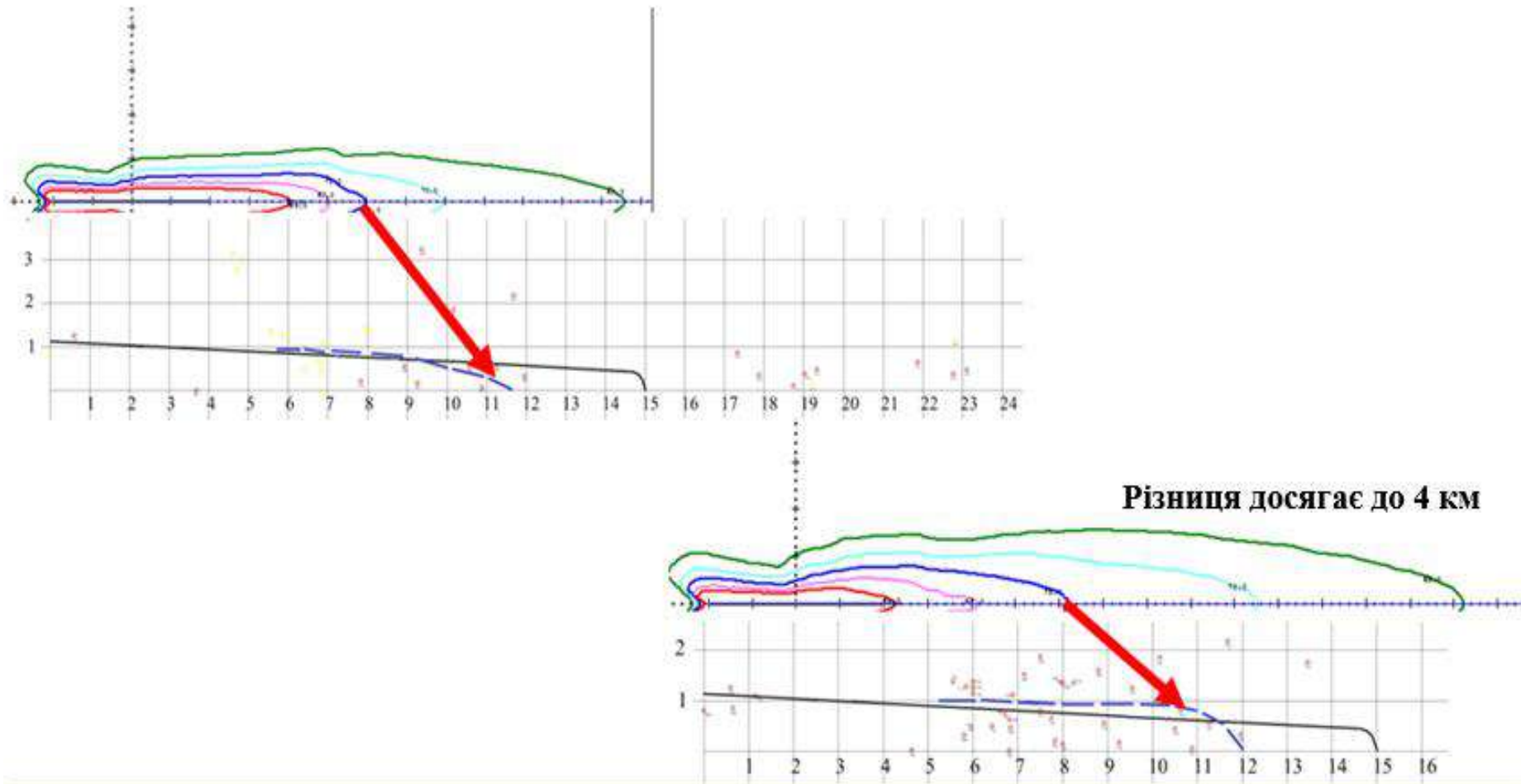


Рис. 2.7. Порівняння вимірних та розрахованих контурів шуму для літаків типу А-320 і В-737-400 під час зльоту/набору висоти

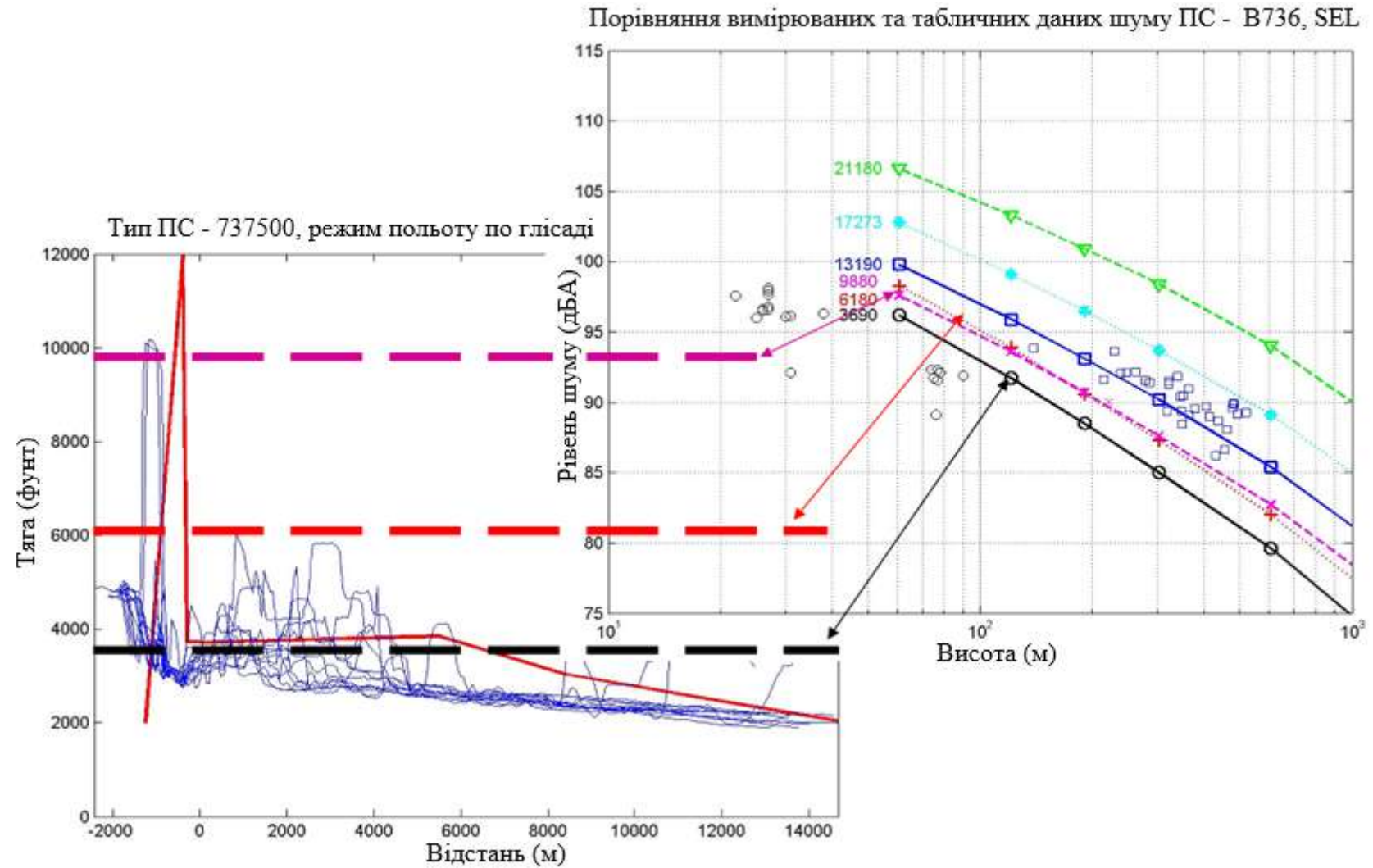


Рис. 2.8. Порівняння спостережуваної в експлуатації (пурпурний колір) та збалансованої (чорний колір) кривих NPD-залежностей для В-737-400/500/600 в режимі польоту по глісаді

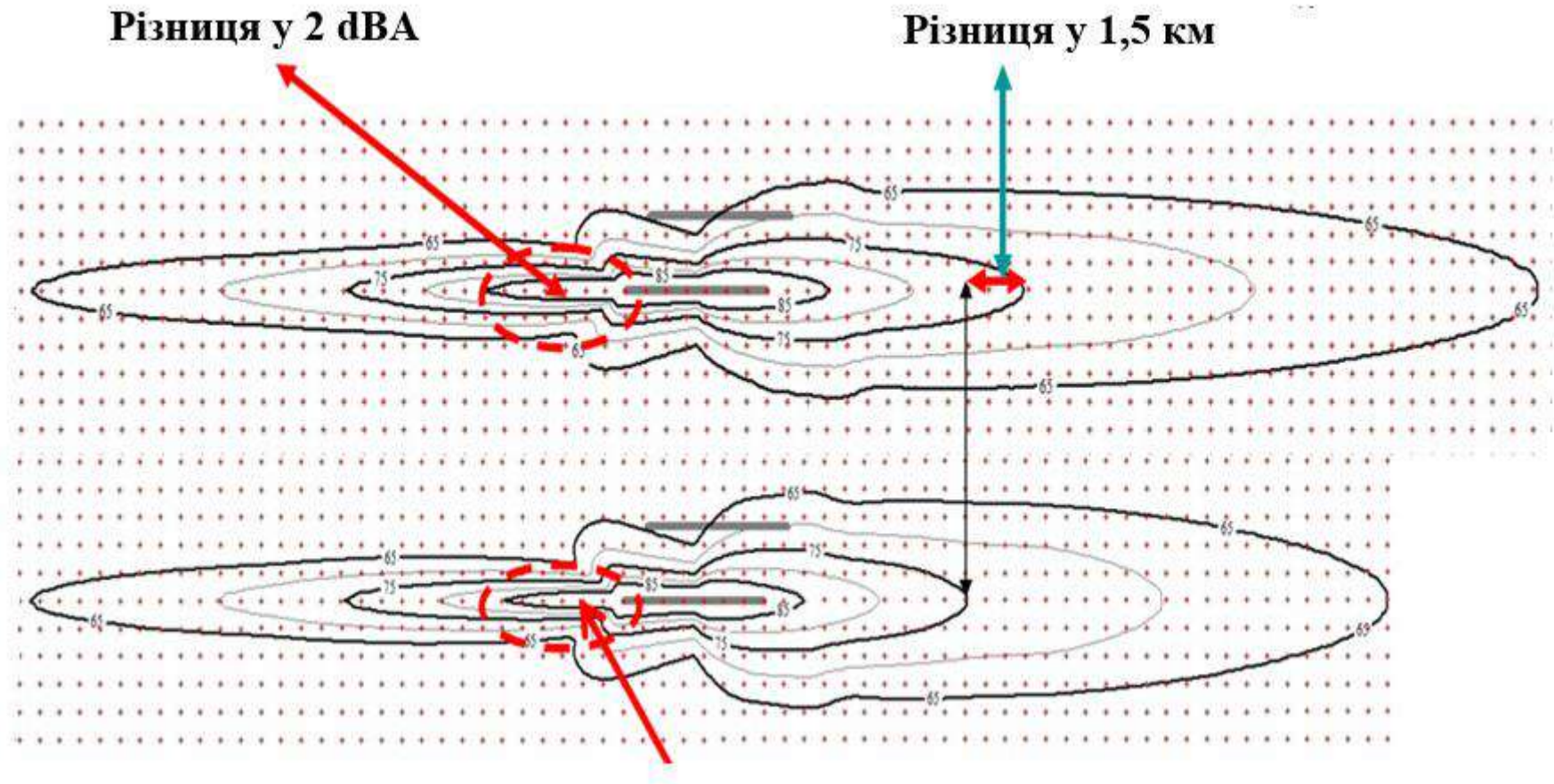


Рис. 2.9. Результати обчислення контурів шуму за програмою IsoVella для літака В-737-400 (етапи зниження перед посадкою та зльоту/набору висоти): верхній – для параметрів польоту, що спостерігаються при експлуатації, і нижній – за даними рішення системи рівнянь збалансованого руху ПС

При порівнянні вимірних та змодельованих рівнів шуму ефект точності визначення контурів шуму для аеродрому з високою добовою інтенсивністю польотів наведений на рис. 2.10. Контур для денного еквівалентного рівня звуку у 57 дБА (нормативне значення за стандартами Великобританії) зміщується до 2 км вбік виконання польотів, якщо неточність становить 1 дБА.

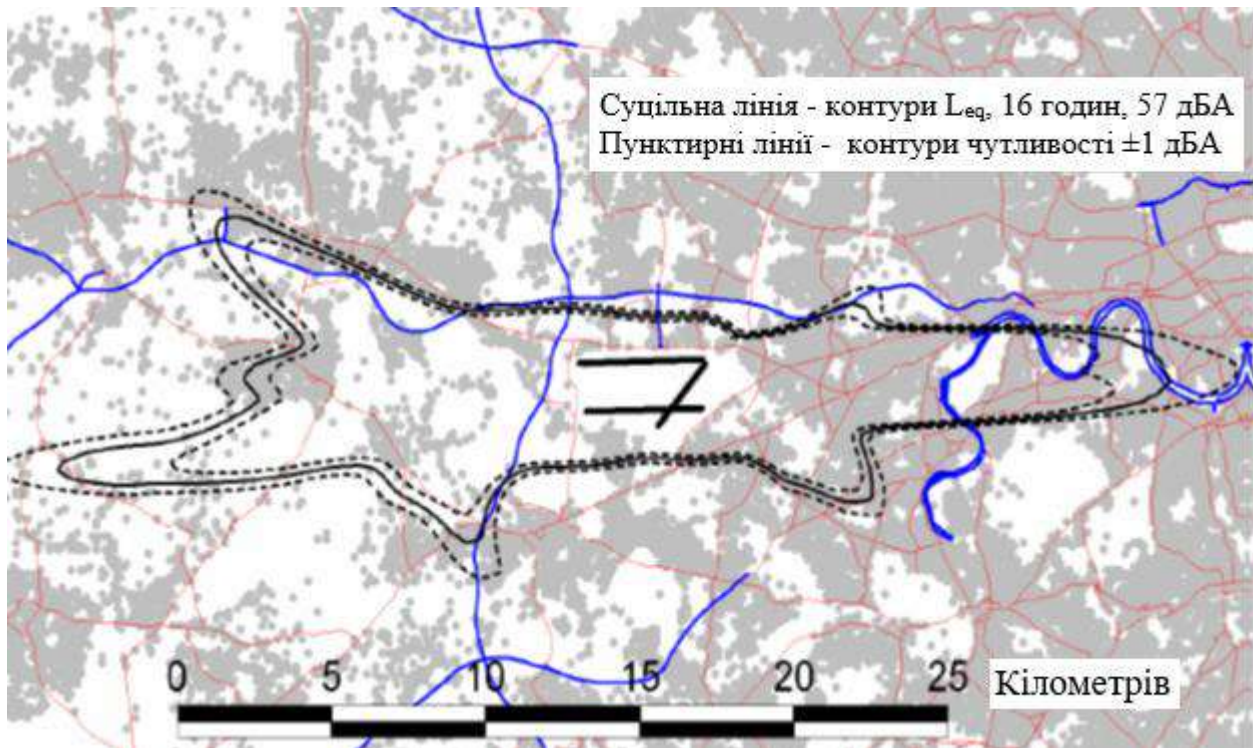


Рис. 2.10. Вплив помилки у 1 дБ на контури шуму [215]

Неточність, в першу чергу, обумовлена надто спрощеним описуванням параметрів траєкторії польоту. Наприклад, для етапу польоту по глісаді, який за вимогами стандарту [210] є ділянкою польоту зі стаціонарними значеннями параметрів польоту, характерні значні зміни швидкості польоту, аеродинамічної конфігурації ПС. На рис. 2.11 наведені три етапи зміни положення закрилків та передкрилків, випуск шасі, але всі ці зміни супроводжуються значними відхиленнями тяги двигунів від збалансованих значень. Аналогічні зміни спостерігаються уздовж траєкторії зльоту/набору висоти (рис. 2.12 - прибрати шасі, поетапно прибрати механізацію крила, прискорення польоту, що, у свою чергу, також відображаються на змінах тяги двигунів).

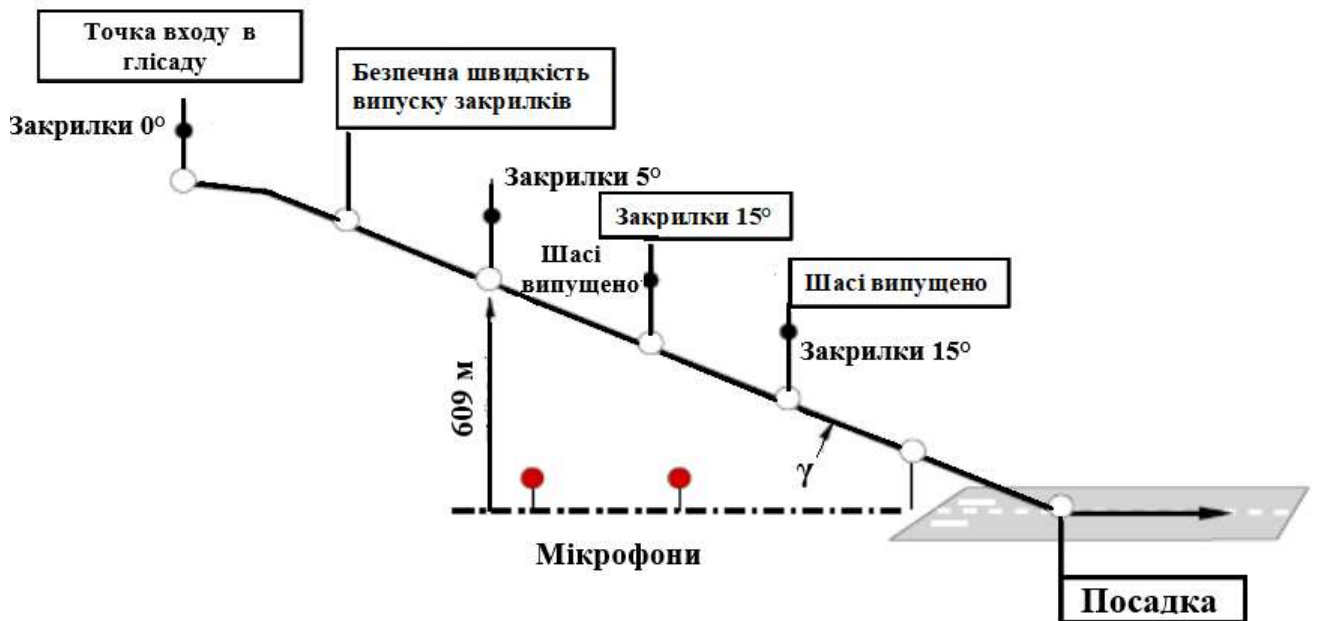


Рис. 2.11. Типова процедура заходу на посадку комерційного ПС

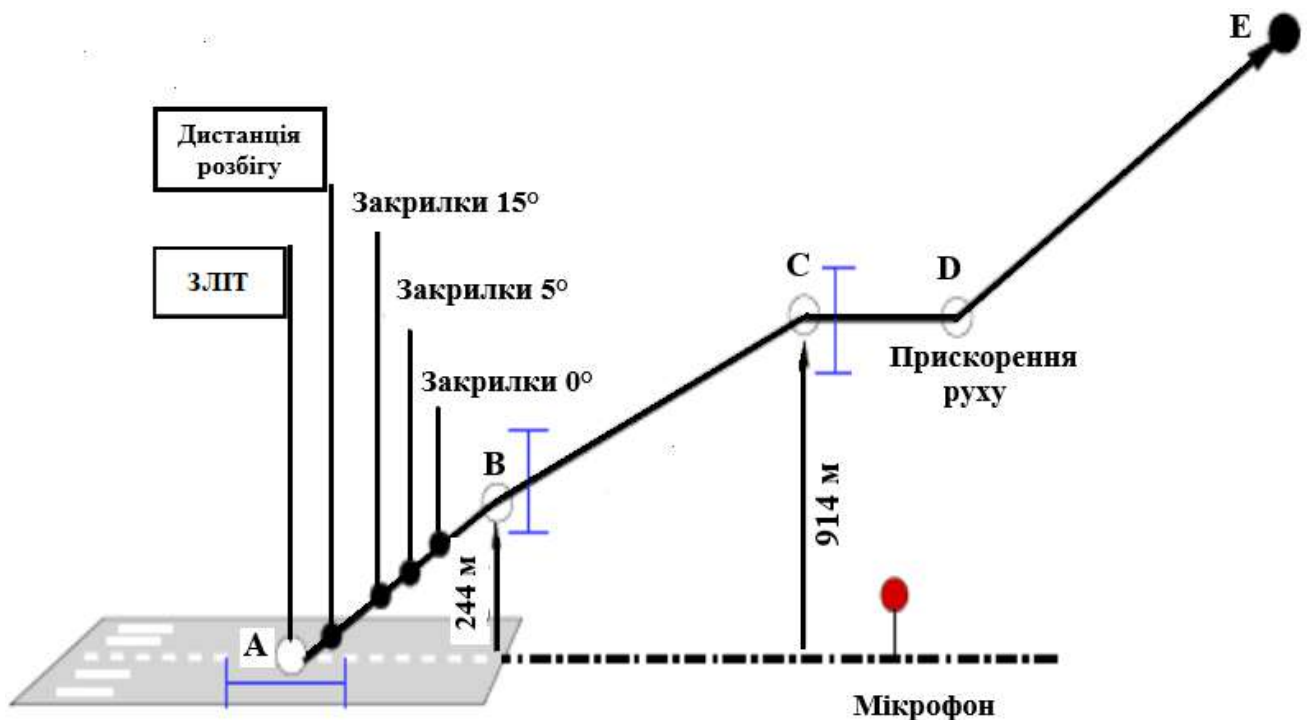


Рис. 2.12. Типова процедура розбігу і набору висоти ПС

Але існують значні обмеження в доступності необхідних даних – аеродинамічних характеристик ПС в різних аеродинамічних конфігураціях, висотних та швидкісних характеристик двигунів, тому дослідження параметрів польоту ПС з використанням системи диференціальних рівнянь для подальшої оцінки рівнів звуку авіаційного шуму в районі аеродромів (аеропортів) є фактично неможливим в умовах поза конструкторським бюро.



### 2.1.1. Побудова траєкторії руху повітряного судна за лінеаризованими рівняннями руху

В обох документах DOC 9911 та DOC 29 4<sup>th</sup> Edition при побудові траєкторії руху ПС використовується система лінеаризованих рівнянь, отриманих від системи диференціальних рівнянь збалансованого руху ПС [216, 217]. Рівняння руху ПС записують у швидкісній системі координат, проектуючи сили, які діють на літак, на осі OX і OY. Ці рівняння описують рух центру мас ПС у вертикальній площині. Рівняння руху центру мас ПС має вигляд:

$$m \frac{d\vec{V}_k}{dt} = \vec{R}_a + \vec{P} + \vec{G},$$

де  $m$  – маса ПС,  $V_k$  – швидкість ПС,  $t$  – поточний час польоту.

Головний вектор аеродинамічних сил  $\vec{R}_a$  може бути розкладений по осях швидкісної системи координат з наступними складовими:  $X_a$  – сила лобового опору;  $Y_a$  – аеродинамічна підйомна сила;  $Z_a$  – аеродинамічна бокова сила.

Сила тяги  $\vec{P}$  зазвичай лежить у площині симетрії ПС OXY і складає деякий кут  $\varphi_p$  (кут встановлення двигуна) з протилежним напрямком осі OX. Сила тяжіння  $\vec{G} = m\vec{g}$ , яка прикладена у центрі мас ПС, спрямована по місцевій вертикалі вниз. Слід зазначити, що за відсутності вітру наземна швидкість ПС співпадає з його повітряною швидкістю, і на більшій частині траєкторії політ здійснюється без ковзання або воно є незначним.

Для розгляду етапів набору висоти і зниження ПС перед посадкою використовується система збалансованого руху ПС, яка складається з чотирьох диференціальних рівнянь та має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{P}{m} \cos(v - \Theta - \varphi) - C_{Xa} \frac{\rho v^2 S}{2m} - g \sin \Theta; \\ \frac{d\Theta}{dt} = \frac{P}{mV} \sin(v - \Theta - \varphi) + C_{Ya} \frac{\rho v^2 S}{2m} - \frac{g}{V} \cos \Theta; \\ \frac{dx}{dt} = V \cos \Theta; \\ \frac{dy}{dt} = V \sin \Theta. \end{cases} \quad (2.1)$$

Перше рівняння описує прискорення ПС, в тому числі при розбігу на злітно-посадковій смузі, але з урахуванням тертя о поверхню ЗПС. Друге рівняння описує етап розбігу (зміну кута набору висоти). Третє рівняння описує висоту польоту, четверте – поточну дальність польоту. У наведеній системі диференціальних рівнянь використовуються наступні фазові траєкторні змінні:

– швидкість польоту  $V$ , кут нахилу траєкторії набору висоти  $\Theta$ , поздовжня координата  $x$ , вертикальна координата  $y$ ;

і параметри управління рухом ПС:

– тяга двигунів  $P$ , кут відхилення закрилків  $\delta$  і кут тангажу  $v = (\alpha + \Theta - \varphi)$ , де  $\alpha$  – кут атаки,  $\varphi$  – кут установки двигунів,  $C_{Xa}$  – коефіцієнт сили лобового опору,  $C_{Ya}$  – коефіцієнт аеродинамічної підйомної сили,  $m$  – маса ПС,  $\rho$  – щільність повітря,  $g$  – прискорення сили тяжіння,  $S$  – площа крила ПС.

Маса ПС у процесі польоту може помітно змінюватись, тому до динамічних рівнянь слід додати рівняння, що описує зміну маси ПС у процесі польоту [218]:  $\dot{m} = -\mu_c$ , де  $\mu_c$  – посекундна витрата маси палива.

Рух ПС досліджується в інтервалі часу від 0 до  $T$ , де  $T$  – час моделювання. При цьому також контролюється кут нахилу траєкторії, який не повинен перевищувати гранично допустимий  $\theta_k$ .

При виведенні лінеаризованих рівнянь руху ПС допускаються наступні припущення:

1. ПС розглядається як абсолютно тверде тіло змінної маси, що має 6 ступенів свободи.

2. Моменти інерції ПС є постійними.

3. ПС має вертикальну площину симетрії.
4. Не враховуються вплив вітру, сферичність і обертання землі.
5. Вважається, що ЗПС є рівною, твердою та сухою.
6. Зльот відбувається при нормальній роботі усіх двигунів, систем і агрегатів літака.
7. Сили, які діють на літак у горизонтальному польоті, прикладені до центру мас ПС.

Траекторія польоту за вимогами стандарту розбивається на обмежену кількість прямих відрізків, уздовж яких параметри польоту можуть бути як стаціонарними, так і змінними, але, як правило, кінці відрізків траекторії визначаються для моментів суттєвої зміни цих параметрів. Наприклад, при зльоті ПС розглядаються: момент відриву від ЗПС, початок прибирання механізації крила, переведення режиму роботи двигунів з максимального (на зльоті) до номінального (режиму набирання висоти крейсерського польоту), тощо. Також вимогою стандарту є умова, що протягом окремого відрізка поточний рівень експозиції шуму за захунок зміни параметрів польоту не повинен змінюватись понад 1,5 дБА. Таким чином, кількість відрізків траекторії зльоту може сягати 10 і більше (рис. 2.13).

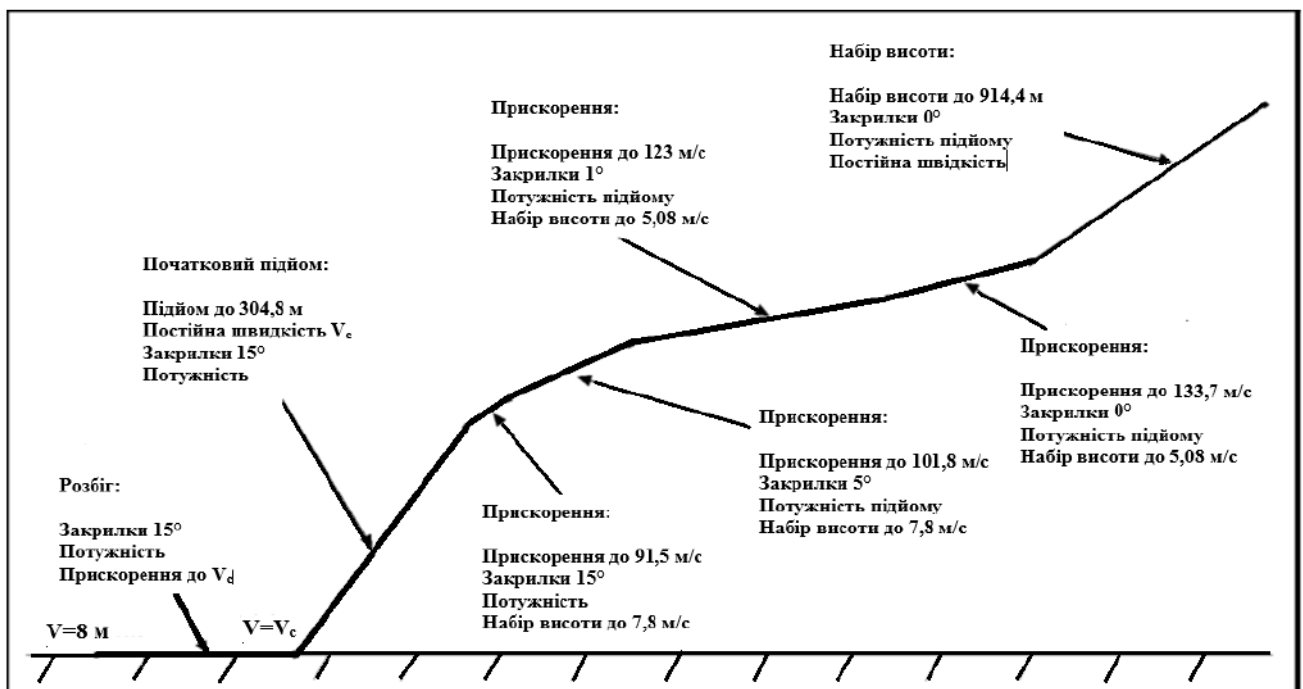


Рис. 2.13. Профіль вильоту ПС на етапі розбігу/зльоту на прикладі В-737-300

Профіль вильоту ПС повинен починатися з наземного етапу розбігу ПС по ЗПС. Після відриву ПС від ЗПС наступними є сегменти (відрізки) набору висоти на постійній швидкості до заданої висоти. Далі визначаються сегменти, що прискорюють ПС до швидкості набору висоти крейсерського польоту та уборки механізації крила від зльотного положення до аеродинамічної конфігурації виконання крейсерського польоту. Цей вибір сегментів в алгоритмі обчислення профіля польоту (траєкторії набору висоти у вертикальній площині) наведено на рис. 2.14. Стрілки вказують на можливу комбінацію сегментів в алгоритмі до висоти траєкторії, що розглядається в задачі обчислення рівнів звуку авіаційного шуму.

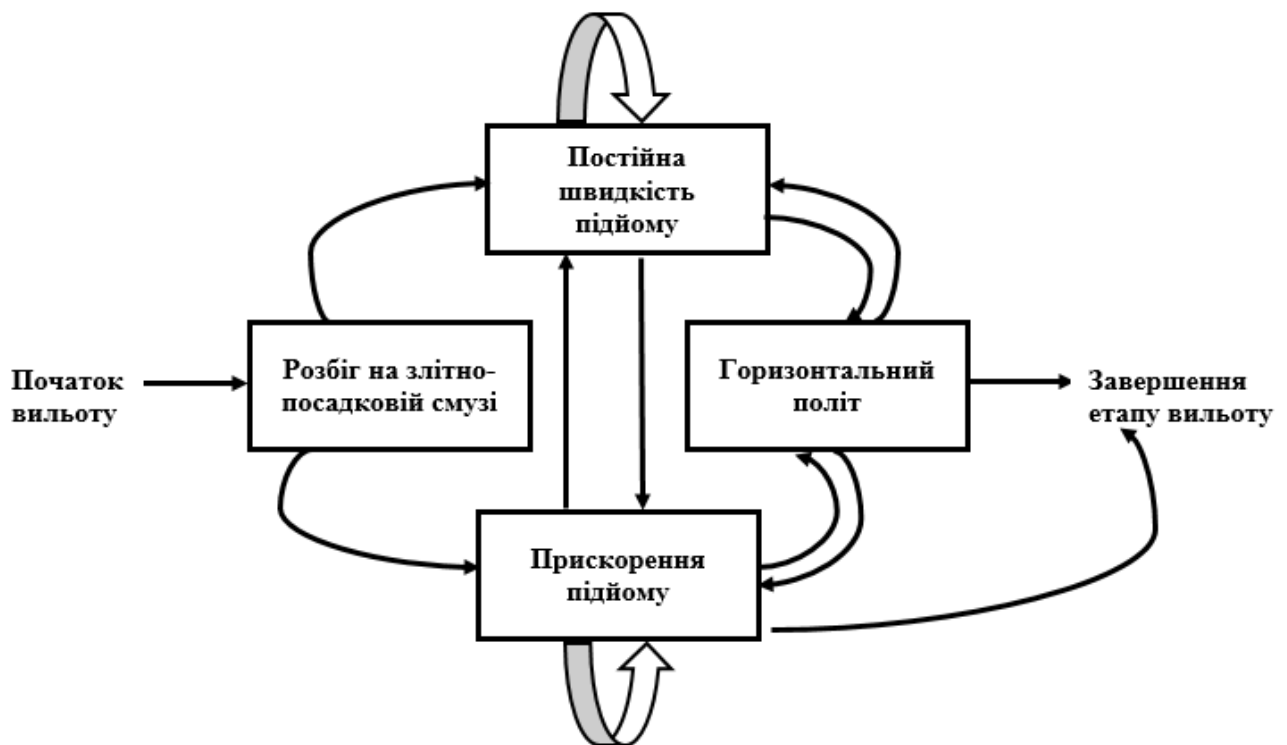


Рис. 2.14. Послідовність сегментів для профілю вильоту ПС

Профіль польоту ПС на етапах зниження та посадки, як правило, складається з 7-8 сегментів. Профіль прильоту повинен закінчуватися етапом (відрізком) пробігу ПС по ЗПС під час його посадки. Попередні сегменти профілю можуть включати в себе зниження і польоту на висоті заданого ешелону (на постійній висоті). Сегменти, як правило, визначаються для того, щоб привести ПС з початкової повітряної швидкості та чистої аеродинамічної

конфігурації до швидкості заходу на посадку, з випущеною механізацією крила і шасі. Вибір сегментів для профілю прильоту наведено на рис. 2.15.

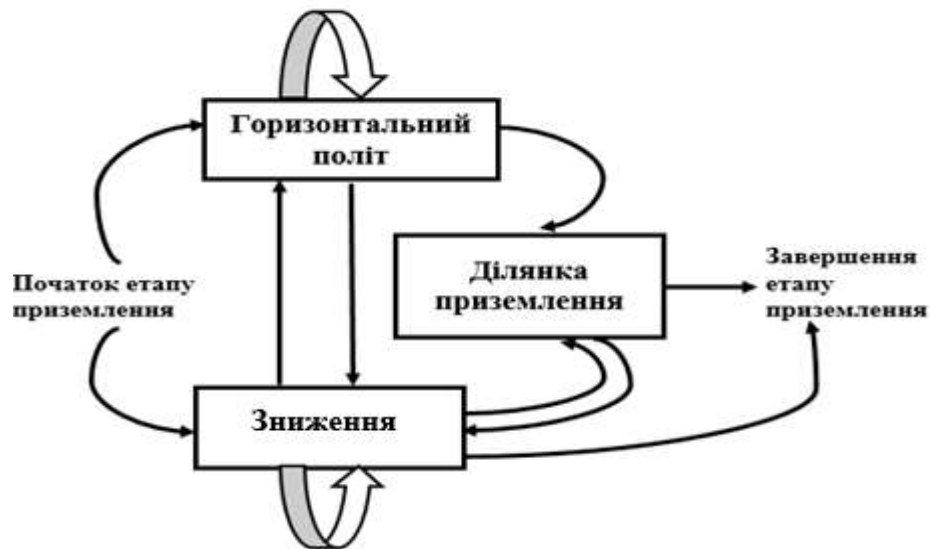


Рис. 2.15. Послідовність сегментів для для профілю прильоту ЛС

Методологія SAE-AIR-1845 використовує набір рівнянь, розроблених для кожного типу сегмента, що стосується конфігурації ЛС/тяги двигунів відповідно до швидкості повітряного судна та пройденої відстані. Довідкові дані повітряних суден як множина коефіцієнтів для визначення аеродинамічних характеристик і тяги двигунів зберігаються в міжнародній базі ANP в розмірності відповідно до Англійської системи. Перед розробкою альтернативної методології важливо розуміти методологію SAE, включаючи походження специфічних аеродинамічних коефіцієнтів і коефіцієнтів тяги двигуна. Рівняння для кожного типу сегмента будуть аналізуватися по черзі та еквівалентні вирази, розроблені для коефіцієнтів SAE-AIR-1845.

### 2.1.2. Етап розбігу перед зльотом

Етап розбігу є початковим етапом перед зльотом. Повітряне судно, що знаходиться у нерухомому стані на ЗПС, починає розганятися уздовж ЗПС з малим кутом атаки (переднє колесо рухається на землі) і набуває швидкості безпечного руху ( $V_s$ ), а саме, швидкості звалювання ЛС під час злету [219]. У

разі раптової відмови критичного двигуна в процесі розбігу забезпечується можливість збереження керування ПС з непрацюючим двигуном та дотримання режиму прямолінійного зльоту з використанням мінімальної еволютивної швидкості зльоту ( $V_{mc}$ ). Якщо в результаті відмови критичного двигуна або з інших причин, пілот повинен прийняти рішення або продовжити зліт, або його перервати. Це забезпечується встановленням швидкості прийняття рішення ( $V_1$ ). За умови відсутності критичних ситуацій під час розбігу пілот за допомогою керма починає змінювати кутове положення ПС для створення кута тангажу, піднімаючи переднє колесо від поверхні землі, на швидкості відриву переднього колеса ( $V_R$ ). Під час цього маневру кут атаки ПС може бути обмеженим, щоб уникнути торкання фюзеляжу поверхні ЗПС. Повітряне судно продовжує рухатися здовж ЗПС з мінімальною швидкістю відриву на зльоті ( $V_{mu}$ ) до тих пір, поки швидкість не збільшиться до значення швидкості відриву від землі на зльоті ( $V_{LOF}$ ) з усіма працюючими двигунами. У цей момент ПС відривається від злітно-посадкової смуги і повільно набирає висоту перешкоди, а саме, 10,7 м. На цьому етапі швидкість ПС збільшується до безпечної швидкості зльоту ( $V_2$ ). На рис. 2.16 наведено критичні швидкості під час зльоту.

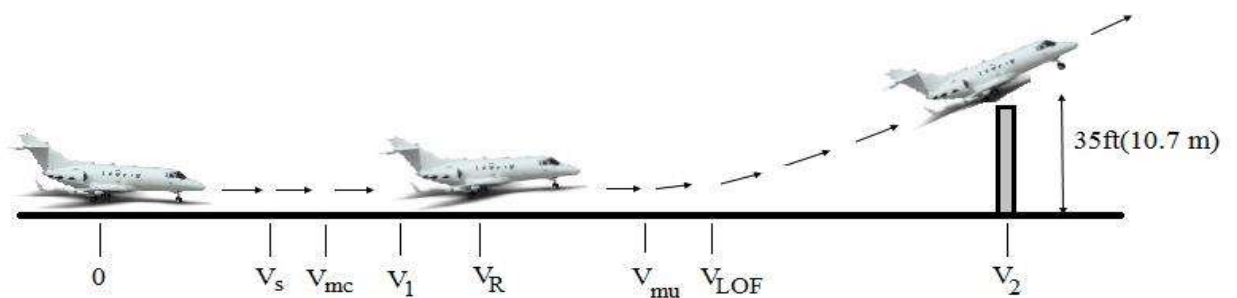


Рис. 2.16. Критичні швидкості під час зльоту

де  $V_s$  ( $V_{stall}$ ) – швидкість звалювання,

$V_{mc}$  – мінімальна еволютивна швидкість зльоту,

$V_1$  – швидкість прийняття рішення,

$V_R$  – швидкість відриву переднього колеса, яка може дорівнюватися  $V_1$  або  $1,05 V_{mc}$ ,

$V_{mu}$  – мінімальна швидкість відриву на зльоті,

$V_{LOF}$  – швидкість відриву від землі,  $V_{LOF} \geq 1,1 V_{mu}$ ,

$V_2$  – безпечна швидкість зльоту,  $V_2 \geq 1,2 V_s$  та  $V_2 \geq V_{mc}$ .

Горизонтальна відстань від точки початку розбігу до точки відриву, де протягом 1500 – 2500 м швидкість різко змінюється від нуля до 80–100 м/с, оцінюється як еквівалентна злітна дистанція (рис. 2.17).



Рис. 2.17. Розбіг перед зльотом (еквівалентна злітна дистанція)

Еквівалентна злітна дистанція або довжина розбігу на ЗПС розраховується за формулою [16]:

$$S_g = \frac{B * \theta_{am} * (G / \delta_{am})^2}{N * (F_n / \delta_{am})}, \quad (2.2)$$

де:

$B$  – коефіцієнт з бази даних ANP для відхилення закрилків, визначених для умов MSA і зустрічного вітру у 4,12 м/с,

$\theta_{am} = (T + 273,15) / (T_0 + 273,15)$  відношення температури повітря на висоті до стандартної температури повітря на середньому рівні моря:  $T_0 = 15,0$  °C,

$G$  – повна вага ПС в момент звільнення гальм,

$\delta_{am} = \rho / \rho_0$ , відношення атмосферного тиску на рівні ПС ( $\rho$ ) до значення стандартного повітряного тиску на середньому рівні моря ( $\rho_0 = 101,325$  кПа),

$N$  – кількість двигунів, що забезпечують необхідну тягу,

$F_n / \delta_{am}$  – приведена наявна тяга на кожний двигун.

Для рівноприскореного руху шлях розраховується за формулою [220]:

$$S = Ut + \frac{at^2}{2}, \quad a = \frac{V - U}{t},$$

де  $U$  – початкова швидкість,  $a$  – прискорення,  $V$  – кінцева швидкість,  $t$  – час.

Тому довжина відрізка етапу пробігу ПС уздовж ЗПС розраховується як:

$$S = \frac{(V^2 - U^2)}{2a}. \quad (2.3)$$

Передбачається, що початкова швидкість  $U$  дорівнює нулю, а кінцева швидкість  $V$  дорівнює безпечній швидкості набору висоти  $V_2$ . Рівняння (2.2) передбачає постійне прискорення уздовж відрізка етапу пробігу. На практиці прискорення буде змінюватися під час руху по поверхні ЗПС. Безпечна швидкість набору висоти  $V_2$  для цивільного ПС зазвичай визначається через швидкість звалювання  $V_{stall}$ :  $V_2 = 1,2V_{stall}$ .

Швидкість звалювання  $V_{stall}$  визначається за формулою [221]:

$$V_{stall} = \sqrt{\frac{G}{0,5\rho S C_{L_{MAX}}}}, \quad (2.4)$$

де  $C_{L_{MAX}}$  – максимальне значення коефіцієнта підйомної сили для поточної аеродинамічної конфігурації ПС.

Визначимо, що з рівняння газу властивостями повітря є  $\rho = \sigma\rho_0$ ,  $\sigma = \delta / \theta$ , де  $\sigma$  – коефіцієнт, який визначає зміну густини повітря з висотою над рівнем моря.

Тоді формулу (2.3) можна переписати у вигляді:

$$V_{stall} = \sqrt{\frac{1}{0,5\rho_0 S C_{L_{MAX}}}} \times \left(\frac{\theta}{\sigma}\right)^{0,5} \sqrt{G}. \quad (2.5)$$

Враховуючи, що  $V_2 = 1,2V_{stall}$ , отримуємо значення коефіцієнта підйомної сили на етапі розбігу як:  $C_{L_{TO}} = \frac{C_{L_{MAX}}}{1,2^2}$ . Підставляючи його у формулу (2.4),

отримуємо формулу обчислення швидкості:  $V_{stall} = \sqrt{\frac{1}{0,5\rho_0 S C_{L_{TO}}}} \times \left(\frac{\theta}{\sigma}\right)^{0,5} \sqrt{G}$ .

Тобто у порівнянні з формулою у стандарті SAE

$$V_2^2 = C^2 \left(\frac{\theta_{am}}{\delta_{am}}\right) G \quad (2.6)$$

можна отримати формулу для обчислення коефіцієнта  $C$ :



$$C = \sqrt{\frac{1}{0,5\rho_0 S C_{L_{To}}}}, \text{ де } C \text{ визначає швидкість висоти набору } V_2 \text{ і є функцією}$$

площі крила, коефіцієнту підйомної сили при зльоті.

На відміну від рівнянь збалансованого руху (2.1) протягом етапу розбігу ПС необхідно брати до уваги дію сили тертя колес шасі об поверхню ЗПС (рис. 2.18).

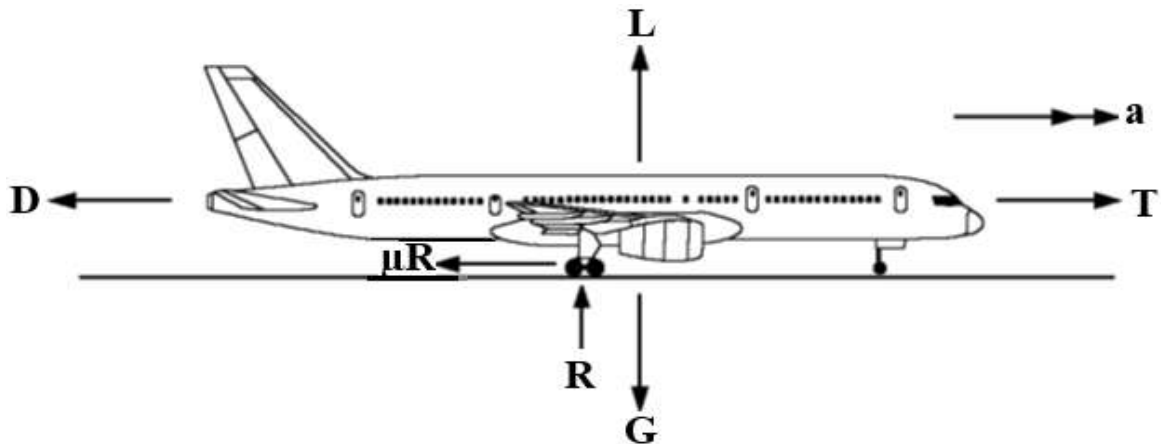


Рис. 2.18. Сили, які діють на ПС, під час руху по ЗПС

Тобто рівняння балансу сил, які горизонтально діють на ПС під час руху по ЗПС, виглядає як:

$$T - D - \mu R = ma, \quad (2.7)$$

де  $T$  – сила тяги, що виробляється двигунами,  $D$  – сила лобового опору,

$R$  – сила тертя в колесах,  $m$  – маса ПС,  $a$  – прискорення ( $dv/dt$ ),

$\mu$  – коефіцієнт тертя колес о поверхню ЗПС (зазвичай дорівнює 0,03).

Рівняння балансу сил, які діють вертикально на ПС під час руху по ЗПС, має вигляд:

$$L + R - G = 0,$$

де  $L$  – аеродинамічна підйомна сила, яка діє по вертикалі,

$G$  – сила тяжіння ( $G = mg$ ),  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

Тоді  $R = mg - L$ . (2.8)

Підставляємо (2.5) у (2.4) і отримуємо

$$ma = T - D - \mu(mg - L).$$

Тобто усереднене прискорення протягом розбігу ПС уздовж ЗПС дорівнює

$$a = \frac{T - D - \mu(mg - L)}{m}. \quad (2.9).$$

У рівнянні (2.9) тяга повітряного судна дорівнює максимальній статичній тязі. Однак під час руху по ЗПС тяга буде зменшуватися завдяки ефектам збільшення швидкості руху ПС. Як тільки відомо початкове прискорення, швидкість ПС в кінці сегмента може бути розрахована з використанням

$$V=U+a\Delta t,$$

де спочатку  $U$  дорівнює нулю, а  $\Delta t$  – невелике прирощення у часі.

Прирощення у часі має бути достатньо малим, щоб припущення про постійне прискорення протягом сегмента залишалось дійсним. Оскільки дані профілю польоту потрібні з інтервалом 0,5 секунди, вважається за доцільним щоб інтервал часу дорівнював 0,5 секунди. Менші значення інтервалу часу призведуть до незначного підвищення точності розрахунку, але значно підвищать обсяги необхідного обчислення. Відстань, яка пройдена під час руху у сегменті, розраховується як:

$$\Delta s = U \Delta t + 0,5a\Delta t^2 .$$

Швидкість в кінці сегмента стає початковою швидкістю для наступного сегмента. Відстань, яка пройдена під час кожного сегмента, додається, щоб отримати загальну пройдену відстань. Цей покроковий розрахунок продовжується до тих пір, поки ПС не досягне швидкості відриву від землі. Зазвичай це визначається як  $1,1V_{\text{stall}}$ , однак типові експлуатаційні процедури збільшують це значення на 5,144 м/с. Таким чином, швидкість відриву від землі визначається як:

$$V_{\text{lof}} = 1,1V_s + 5,144 = 1,10 \sqrt{\frac{mg}{0,5\rho SC_{L_{\text{max}}}}} + 5,144. \quad (2.10)$$

Рівняння (2.10) записано у міжнародній системі SI, тобто відповідає збільшенню на 5,144 м/с.  $S$  – рекомендована площа крила,  $m$  – маса зльоту,  $C_{L_{\text{max}}}$  – максимальний коефіцієнт підйомної сили. Ці дані надаються виробниками відповідної моделі ПС.

За законами Ньютона  $Ma=T-D$ , де  $M$  – число Маха,  $G/g$ .

Так як сила тяги та сила лобового опору залежать від швидкості і ваги ПС, тому протягом розбігу можна застосувати спрощену формулу для визначення сили опору через силу тяги:  $D=k_1T$ .

Відповідно прискорення розбігу ПС уздовж ЗПС дорівнює:

$$a = \frac{(1-k_1)T}{M} = \frac{(1-k_1)Tg}{G} = k_2 \frac{T}{G}, \quad (2.11)$$

Підставляючи у рівняння (2.3) значення  $V^2$  (2.6) та значення  $a$  (2.11), обчислюємо довжину розбігу за формулою:

$$S = C^2 \left( \frac{\theta_{am}}{\delta_{am}} \right) G \times \frac{1}{2k_2(T/G)},$$

$$\text{де } k_3 = \frac{C^2}{2} k_2, \quad \text{тоді } S = k_3 \frac{\theta}{\delta} \frac{G^2}{T}.$$

З урахуванням впливу атмосферних умов отримуємо:

$$S = k_3 \theta (G / \delta_{am})^2 / (T / \delta_{am}). \quad (2.12)$$

Порівнюючи цю формулу з SAE-AIR-1845 (рівняння (2.2)), можна зробити висновок, що  $k_3$  дорівнює коефіцієнту  $B$  з бази даних ANP. Аналізуючи рівняння (2.12), показано, що коефіцієнт  $B$  є розмірним з одиницями SI (м/кгс), а також є функцією від коефіцієнта  $C$  (визначення швидкості безпечного набору висоти). У базі даних ANP коефіцієнт  $B$  враховує відхилення закрилків, визначений для умов МСА і зустрічного вітру зі швидкістю 4,12 м/с. Для кожного типу ПС інформація про його аеродинамічні коефіцієнти міститься у таблиці аеродинамічних коефіцієнтів БД ANP. А саме, для кожного ПС в залежності від типу операції (відправлення/прибуття) та значення ідентифікатора положення закрилків вибирається коефіцієнт  $B$ . В цій таблиці є ще також коефіцієнти  $C$  і  $D$ , які враховують інші значення положення закрилків, а також  $R$  – зворотня аеродинамічна якість ( $C_D / C_L$ , де  $C_D$  – коефіцієнт лобового опору,  $C_L$  – коефіцієнт підйомної сили ПС). Ці коефіцієнти використовуються для обрахунку значення тяги і довжини відрізків траєкторії польоту (рис. 2.11 та рис 2.12).

### 2.1.3. Набір висоти з постійною швидкістю

Передбачається, що під час набору висоти ПС буде рухатися по траєкторії польоту дуги кругового руху, поки градієнт набору висоти ПС дорівнюється початковому градієнту набору висоти. Передбачається, що ПС прискорюється від еквівалентної швидкості відриву від землі  $V_{LOF}$  до безпечної швидкості зльоту  $V_2$ . Середня швидкість під час переходу задається як

$$V_{trans} = \frac{V_{lof} + V_2}{2}.$$

Усереднений кут набору висоти для етапу (відрізку) набору висоти із заданою аеродинамічною конфігурацією при постійній еквівалентній швидкості задається як [16]:

$$\gamma = \arcsin\left(1,01\left\{\left[N(F_n / \delta_{am})_{avg} / (G / \delta_{am})_{avg}\right] - R\right\}\right), \quad (2.13)$$

де коефіцієнт 1,01 враховує збільшений градієнт підйому, пов'язаний з зустрічним вітром зі швидкістю 4,12 м/с, та прискоренням, яке притаманно набору висоти з еквівалентною повітряною швидкістю 82,31 м/с,

$F_n / \delta_{am}$  – приведена наявна тяга на кожний двигун на двигун,

$N$  – кількість двигунів,

$R$  – зворотня аеродинамічна якість, а саме, відношення коефіцієнту опору до коефіцієнту підйомної сили  $C_D / C_L$  (вважається, що шасі прибране) для заданого налаштування закрилків та конфігурації ПС.

Відстань, пройдена вздовж земної поверхні, для зазначеного приросту висоти  $\Delta h$ , може бути обчислена як:

$$S_c = \frac{\Delta h}{\tan \gamma}.$$

Для розуміння рівняння (2.13), альтернативна формула розроблена з використанням стандартної теорії механіки польоту. На рис. 2.19 показано вільне тіло ПС, що піднімається при постійній еквівалентній швидкості руху повітря. Незважаючи на те, що ПС піднімається на постійній еквівалентній

швидкості, справжня повітряна швидкість збільшується завдяки впливу градієнта зниження температури та щільності повітря при збільшенні висоти.

Рівняння балансу сил для відрізка польоту з прискоренням [221]:

$$T - D - G \sin \theta = Ma. \quad (2.14)$$

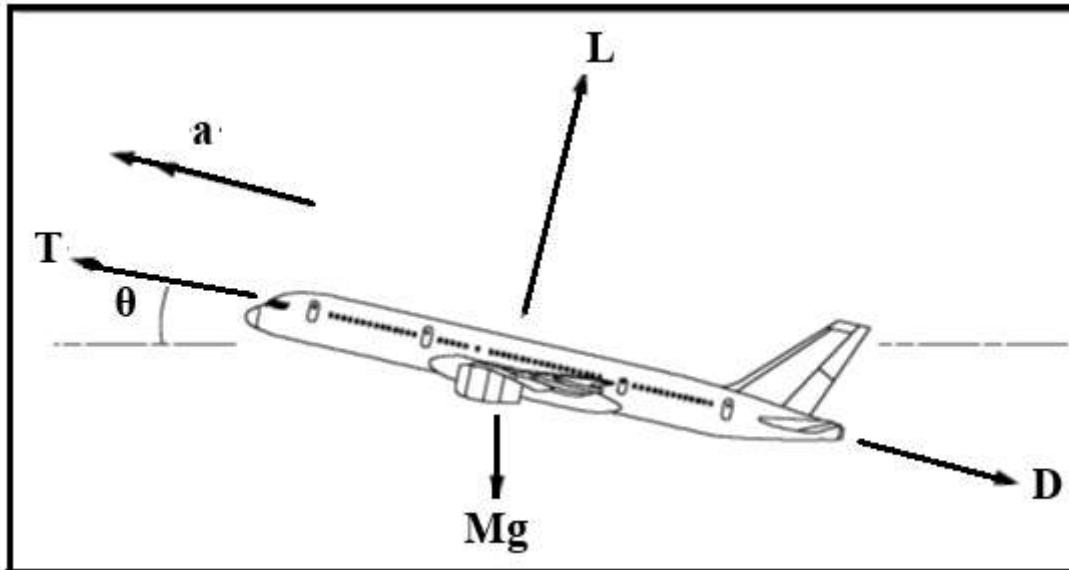


Рис.2.19. Сили, які діють при наборі висоти та прискоренні ПС

Враховуючи  $a = dV/dt$  та  $M = G/g$ ,  $\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh} \cdot \frac{dh}{dt}$ , отримуємо:

$$T - D - G \sin \theta - \frac{G}{g} \cdot \frac{dV}{dt} \cdot \frac{dh}{dt} = 0.$$

Враховуючи  $\frac{dh}{dt} = C$  та  $\sin \theta = \frac{C}{V}$ , отримуємо:

$$\frac{(T - D)}{G} = \sin \theta + \frac{1}{g} \cdot \frac{dV}{dh} \cdot V \sin \theta.$$

Після перетворень кут набору висоти  $\theta$  дорівнює:

$$\theta = \arcsin \left\{ \frac{(T - D)}{W \left( 1 + \frac{V}{g} \cdot \frac{dV}{dh} \right)} \right\} \quad (2.15)$$

З урахування швидкості вітру:

$$\theta = \arcsin \left\{ \left( \frac{V}{V - V_w} \right) \frac{(T - D)}{G \left( 1 + \frac{V}{g} \cdot \frac{dV}{dh} \right)} \right\}$$

Та параметрів атмосфери:

$$\theta = \arcsin \left\{ \frac{\left( \frac{V}{V - V_w} \right) \left[ \frac{T / \delta}{G / \delta} \right] - \frac{D}{L}}{\left( 1 + \frac{V}{g} \cdot \frac{dV}{dh} \right)} \right\}, \quad (2.16)$$

де константа дорівнює

$$\text{Constant} = \frac{\left( \frac{V}{V - V_w} \right)}{\left( 1 + \frac{V}{g} \cdot \frac{dV}{dh} \right)}. \quad (2.17)$$

Припускаючи, що еквівалентна повітряна швидкість у 82,3 м/с, відповідає числу Маха приблизно 0,24 і припускаючи, що швидкість вітру у 4,12 м/с, константа (2.17) дорівнює:

$$\text{Constant} = \frac{\left( \frac{160}{160 - 8} \right)}{\left( 1 + 0,5668 \cdot 0,24^2 \right)} = 1,017.$$

Результат майже не відрізняється від константи 1,01, яка використовується в рівнянні (2.13) за методологією SAE.

#### 2.1.4. Набір висоти з прискоренням та прибиранням закрилків

У підпункті описується та аналізується метод, який використовується SAE-AIR-1845 для визначення пройденої відстані від початкової швидкості  $V_{ta}$  до кінцевої швидкості  $V_{tb}$  при підйомі із заданою вертикальною швидкістю або середньою швидкістю набору висоти. Профіль польоту містить сегменти прискорення після початкового сегмента підйому з постійною швидкістю, щоб

повітряна швидкість була досить високою та закрилки могли бути надійно прибрані у польотне положення.

Горизонтальна або наземна відстань шляху (поточна дальність польоту), яка пройдена при прискоренні від початкової істинної повітряної швидкості  $V_{ta}$  до кінцевої істинної повітряної швидкості  $V_{tb}$ , та підйом по заданій середній істинній вертикальній швидкості або середній швидкості набору висоти  $V_{tz}$ , може бути розрахована з використанням:

$$S_a = \frac{(1/2g)(0,95)(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{\left[ N(F_n / \delta_{am})_{avg} / (G / \delta_{am})_{avg} \right] - R_{avg} - (V_{tz} / V_{tavg})}. \quad (2.18)$$

Безрозмірний коефіцієнт 0,95, який враховує ефект швидкості зустрічного вітру у 4, 12 м/с при наборі висоти зі швидкістю 82, 3 м/с. Одиниці для  $V_{ta}$ ,  $V_{tb}$  і  $g$  повинні бути узгоджені з одиницями для  $S_a$ .

Висота набору уздовж відрізка польоту з прискоренням,  $\Delta h$ , визначається:

$$\Delta h = (S_a V_{tz} / V_{tavg}) / 0,95.$$

Прискорення в даному випадку дорівнює  $a = \frac{(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{2S}$ .

Якщо у рівняння балансу сил (2.14) підставити прискорення, отримаємо:

$$T - D - G \sin \theta = M \frac{(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{2S}.$$

Враховуючи, що  $M=G/g$ , та поділивши обидві частини на  $G$ , отримаємо:

$$\frac{T}{G} - \frac{D}{G} - \sin \theta = \frac{(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{2Sg}.$$

З урахуванням перетворень та для малих кутів  $\sin \theta = \theta$  отримаємо довжину сегменту:

$$S = \frac{(1/2g)(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{\left[ (T/G) - (D/G) - \theta \right]}.$$

Або з урахуванням коефіцієнтів стану атмосфери:

$$S = \frac{(1/2g)(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{\left[ (T/\delta_{am}) / (G/\delta_{am}) \right] - R - (V_{tz} / V_{tavg})}$$

А з урахуванням швидкості вітру (відносно еквівалентної швидкості польоту 82,3 м/с):

$$S = \left( \frac{160-8}{160} \right) \frac{(1/2g)(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{\left[ (T/\delta_{am}) / (G/\delta_{am}) \right] - R - (V_{tz} / V_{tavg})}$$

Таким чином, отримаємо формулу, що відповідає стандарту і методології SAE:

$$S = \frac{(0,95)(1/2g)(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{\left[ (T/\delta_{am}) / (G/\delta_{am}) \right] - R - (V_{tz} / V_{tavg})} \quad (2.19)$$

Рівняння (2.19) є ідентичним рівнянню (2.18).

#### 2.1.5. Посадка і зниження перед посадкою

Захід на посадку зазвичай вимагає зниження і гальмування літака для підготовки до останньої ділянки заходу на посадку, де ПС виконує політ з закрилками для заходу на посадку і з випущеним шасі. Співвідношення між індикаторною повітряною швидкістю при заході на посадку ( $V_{CA}$ ) і повною посадковою вагою  $G$  визначається рівнянням:

$$V_{CA} \approx D * \sqrt{G}, \quad (2.20)$$

де коефіцієнт  $D$  відповідає положенню закрилків для посадки.

Для кожного типу ПС інформація про його аеродинамічні коефіцієнти міститься у таблиці аеродинамічних коефіцієнтів БД ANP. А саме, для кожного ПС в залежності від типу операції (відправлення/прибуття) та значення ідентифікатора положення закрилків вибирається коефіцієнт положення закрилків ( $B$ ,  $C$  і  $D$ ). Також у таблиці аеродинамічних коефіцієнтів є значення  $R$  – зворотної аеродинамічної якості ( $R=C_D/C_L$ , де  $C_D$  – коефіцієнт лобового



опору,  $C_L$  – коефіцієнт підйомної сили ПС). Ці коефіцієнти використовуються для обрахунку значення тяги і довжини відрізків.

Моделювання профіля прибуття ПС також використовує сегментований підхід для генерації польоту. При заході на посадку ПС зменшує швидкість польоту до швидкості приземлення, щоб довести ПС до конфігурації посадки. Нарешті ПС приземляється і швидкість зменшується до швидкості рулювання, використовуючи гальмування та зворотну тягу. Послідовність сегментів наведена на рис. 2.20. Стрілка вказує на можливий вибір сегментів.

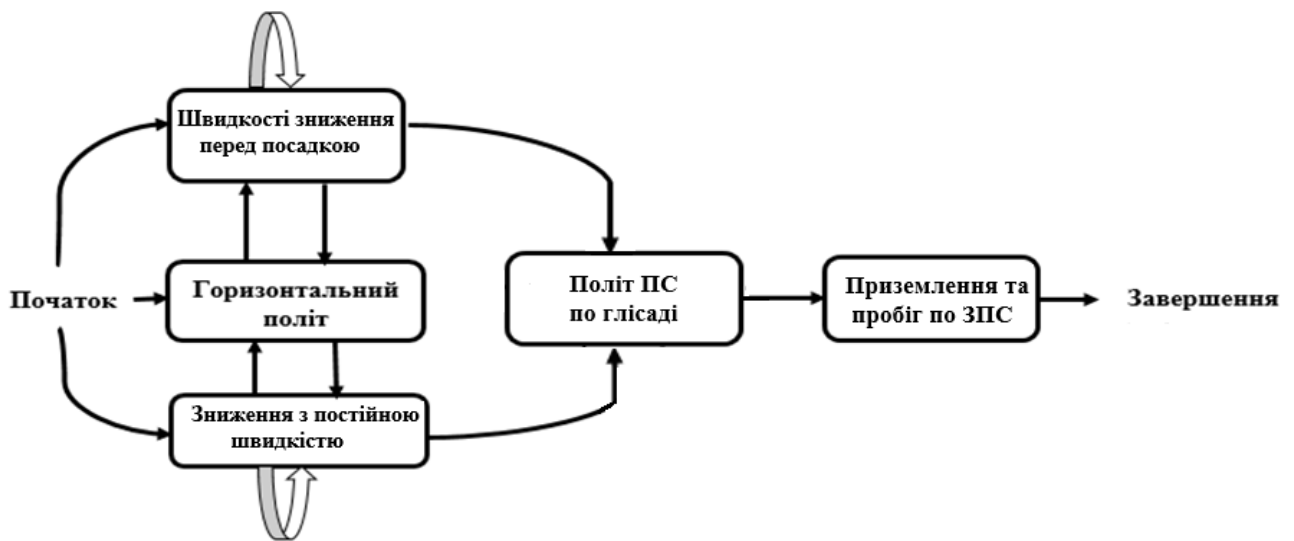


Рис. 2.20. Послідовність сегментів для профілю прибуття ПС

Швидкість безпечного зниження ПС перед посадкою становить  $V_{app} = 1,3V_{stall}$ ,

де  $V_{stall}$  – швидкість звалювання ПС в посадковій аеродинамічній конфігурації:

$$V_{app} = 1,3 \sqrt{\frac{G}{0,5\rho_0 S C_{L_{max}}}}, \quad (2.21)$$

$C_{L_{max}}$  є максимальним коефіцієнтом підйомної сили для кута відхилення закрилків у положення при посадці.

Відповідно до SAE коефіцієнт  $D$  пов'язаний з  $C_{L_{max}}$  через наступний вираз:

$$D = 1,3 \sqrt{\frac{1}{0,5\rho_0 S C_{L_{max}}}}.$$

### 2.1.6. Зниження з постійною повітряною швидкістю

Методологія SAE передбачає, що рівняння (2.13) можна використовувати для зниження з постійною повітряною швидкістю. Константа у рівнянні (2.13) змінюється для врахування польоту із швидкістю зустрічного вітру у 4, 12 м/с та уповільнення, яке притаманне під час польоту при зниженні з постійною швидкістю руху. Таким чином, маємо рівняння для кута зниження:

$$\gamma = \arcsin\left(1,01\left\{\left[\frac{N(F_n / \delta_{am})_{avg}}{(G / \delta_{am})_{avg}}\right] - R\right\}\right). \quad (2.22)$$

Під час фази наближення до посадки кут зниження залишається постійним і є від'ємним, на відміну від кута набору висоти. Для операцій з цивільним ПС кут зниження (глісади) зазвичай становить  $-3^\circ$ . Фактичне значення приведеної тяги на кожний двигун може бути отримано шляхом вирішення рівняння (2.22) відносно тяги ПС:

$$(F_n / \delta_{am})_{avg} = (1/N)(G / \delta_{am})_{avg} \left\{R + [(\sin \gamma) / 1,03]\right\}. \quad (2.23)$$

Рівняння (2.23) також застосовується для рівня польоту, де  $\gamma = 0$ . Коефіцієнт  $R$  є відношенням коефіцієнту лобового опору до коефіцієнту підйомної сили ПС для посадочного положення закрилків з або без випущеного шасі. Методологія SAE рекомендує встановлювати положення закрилків відповідно до виконання фактичних операцій польоту. Це реалізовано у БД INM як залежності закрилки / швидкість, що стосується встановлення закрилків для повітряної швидкості посадки. Типові профілі заходу на посадку починаються зі швидкості маневрування ПС 128,6 м/с з прибраними закрилками та закінчуються кінцевою швидкістю посадки, що визначається рівнянням (2.21) з прибраними закрилками для посадки та випущеними шасі.

Сили, які діють при зниженні ПС:

$$T = D + Mg \sin \theta + M \frac{dV}{dh} \frac{dh}{dt}, \quad (2.24)$$

де  $dh/dt$  – швидкість зниження ПС, яку можна виразити як  $V\theta$ .

Враховуючи, що для малих кутів  $\sin \theta = \theta$ , отримаємо

$$T = D + Mg\theta \left( 1 + \frac{V}{g} \frac{dV}{dh} \right).$$

Відзначимо, що для набору висоти при постійній еквівалентній швидкості у рівнянні  $\frac{V}{g} \frac{dV}{dh} = 0,5668M^2$  для підняття в тропосфері істинна повітряна швидкість збільшується. Однак для зниження в тропосфері істинна повітряна швидкість знижується, і ми маємо:

$$\frac{V}{g} \frac{dV}{dh} = -0,5668M^2.$$

Еталонна повітряна швидкість 82,31 м/с відповідає числу Маха приблизно 0,242. Таким чином:

$$1 + \frac{V}{g} \frac{dV}{dh} = 1 - 0,5668 \times 0,242^2 = 0,9668.$$

Після врахування зустрічного вітру у 4,12 м/с, константа стає 1,034, що приблизно відповідає використаному коефіцієнту 1,03 в рівнянні (2.22) з аналізу SAE.

Опір розраховується з використанням відповідних значень істинної повітряної швидкості ПС та щільності повітря. Аеродинамічні коефіцієнти для конфігурації польоту ПС отримані від виробника. Відстань, пройдена при приземленні з урахуванням впливу зустрічного вітру ( $V_w$ ), обчислюється як

$$S_g = \left[ \frac{V - V_w}{V} \right] \frac{(h_1 - h_2)}{\tan \theta}. \quad (2.25)$$

Згідно методології SAE відстань, яка пройдена ПС від торкання поверхні ЗПС, до повної зупинки ПС, обчислюється як

$$S_{\text{arrival}} = 0,9 * S_{\text{max arrival}} - 954,$$

де  $S_{\text{max arrival}}$  – максимальна дистанція посадки.

Таким чином, систему збалансованого руху ПС у вигляді диференціальних та лінеаризованих рівнянь можна представити у вигляді табл. 2.2.

Таблиця 2.2

## Профіль польоту для збалансованого руху ПС

Система збалансованого руху ПС	Лінеаризовані рівняння зльоту/набору висоти	Лінеаризовані рівняння зниження/посадки
$\left\{ \begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{P}{m} \cos(v - \Theta - \varphi) - C_{Xa} \frac{\rho v^2 S}{2m} - g \sin \Theta; \\ \frac{d\Theta}{dt} &= \frac{P}{mV} \sin(v - \Theta - \varphi) + C_{Ya} \frac{\rho v^2 S}{2m} - \frac{g}{V} \cos \Theta; \\ \frac{dx}{dt} &= V \cos \Theta; \\ \frac{dy}{dt} &= V \sin \Theta. \end{aligned} \right.$ <p>Перше рівняння описує прискорення при розбігу ПС на злітно-посадковій смузі. Друге рівняння описує етап розбігу (зміну кута набору висоти). Третє рівняння описує висоту польоту, четверте – поточну дальність польоту. У наведеній системі диференціальних рівнянь використовуються наступні фазові траєкторні змінні:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– швидкість польоту <math>V</math>, кут нахилу траєкторії набору висоти <math>\Theta</math>, поздовжня координата <math>x</math>, вертикальна координата <math>y</math>;</li> <li>і параметри управління рухом ПС:</li> <li>– тяга двигунів <math>P</math>, кут відхилення закрилків <math>\delta</math> і кут тангажу <math>v = (\alpha + \Theta - \varphi)</math>, де <math>\alpha</math> – кут атаки, <math>\varphi</math> – кут установки двигунів, <math>C_{Xa}</math> – коефіцієнт сили лобового опору, <math>C_{Ya}</math> – коефіцієнт аеродинамічної підйомної сили, <math>m</math> – маса ПС, <math>\rho</math> – щільність повітря, <math>g</math> – прискорення вільного падіння, <math>S</math> – площа крила ПС.</li> </ul>	<p>Прискорення розбігу ПС уздовж ЗПС</p> $a = \frac{(1 - k_1)T}{M} = \frac{(1 - k_1)Tg}{W} = k_2 \frac{T}{W}$ <p>Еквівалентна зльотна дистанція або довжина розбігу на ЗПС:</p> $S_g = \frac{B * \theta_{am} * (W / \delta_{am})^2}{N * (F_n / \delta_{am})}$ <p>Усереднений кут набору висоти:</p> $\gamma = \arcsin \left( 1,01 \left\{ \left[ N (F_n / \delta_{am})_{avg} / (W / \delta_{am})_{avg} \right] - R \right\} \right)$ <p>Висота польоту:</p> $\Delta h = (S_a V_{tz} / V_{tavg}) / 0,95$ <p>Поточна дальність польоту:</p> $S_a = \frac{(0,95)(1/2g)(V_{tb}^2 - V_{ta}^2)}{\left[ (T / \delta_{am}) / (W / \delta_{am}) \right] - R - (V_{tz} / V_{tavg})}$ <p>Швидкість звалювання</p> $V_{stall} = \sqrt{\frac{1}{0,5 \rho_0 S C_{L_{to}}}} \times \left( \frac{\theta}{\sigma} \right)^{0,5} \sqrt{W}$ <p>Безпечна швидкість набору висоти:</p> $V_2 = 1,2 V_{stall}$ <p><math>T</math> – сила тяги, що виробляється двигунами,  <math>D</math> – сила лобового опору (<math>D = k_1 T</math>),  <math>g</math> – прискорення вільного падіння  <math>W</math> – повна вага в момент звільнення гальм,  <math>M</math> – число Маха, (<math>W/g</math>),  <math>B</math> – коефіцієнт з бази даних ANP для відхилення закрилків, визначених для умов МСА і зустрічного вітру у 4 м/с,  <math>\theta_{am}</math> – <math>(T + 273,15) / (T_0 + 273,15)</math> відношення температури повітря на висоті до стандартної температури повітря на середньому рівні моря: <math>T_0 = 15,0</math> °C,</p>	<p>Кут зниження:</p> $\gamma = \arcsin \left( 1,01 \left\{ \left[ N (F_n / \delta_{am})_{avg} / (W / \delta_{am})_{avg} \right] - R \right\} \right)$ <p>Приведена тяга на кожний двигун:</p> $(F_n / \delta_{am})_{avg} = (1/N)(W / \delta_{am})_{avg} \left\{ R + [(\sin \gamma) / 1,03] \right\}$ <p>Дистанція при приземленні з урахуванням зустрічного вітру</p> $S_g = \left[ \frac{V - V_w}{V} \right] \frac{(h_1 - h_2)}{\tan \theta}$ <p>Швидкість безпечного зниження ПС перед посадкою:</p> $V_{app} = 1,3 \sqrt{\frac{W}{0,5 \rho_0 S C_{L_{max}}}}$ <p><math>W</math> – повна вага ПС в момент звільнення гальм,  <math>\delta_{am} = \rho / \rho_0</math>, відношення атмосферного тиску на рівні ПС (<math>\rho</math>) до значення стандартного повітряного тиску на середньому рівні моря (<math>\rho_0 = 101,325</math> кПа),  <math>N</math> – кількість двигунів, що забезпечують тягу,  <math>F_n / \delta_{am}</math> – приведена наявна тяга на кожний двигун,  <math>R</math> – зворотня аеродинамічна якість (<math>R = C_D / C_L</math>).  0,95 – коефіцієнт, що враховує ефект швидкості зустрічного вітру 4 м/с при наборі висоти зі швидкістю 82,3 м/с;  <math>V_{ta}</math> – істинна повітряна швидкість,  <math>V_{tb}</math> – кінцева повітряна швидкість,  <math>V_{tz}</math> – середня істинна вертикальна швидкість набору висоти,  <math>C_{L_{to}}</math> – коефіцієнт підйомної сили на етапі розбігу  <math>V_w</math> – швидкість зустрічного вітру  <math>\Theta</math> – кут зниження</p>

### 2.1.7. Алгоритм побудови контурів шуму

Основним видом розрахунку шуму у цій методології є визначення рівня звуку в окремій точці спостереження під час одиничного прольоту ПС. Такий процес здійснюється для усіх прольотів літака в кожній із заданої множини точок, що входять у контур шуму. У кожній точці рівні шуму одиничного впливу підсумовуються або осереднюються для отримання "сумарного рівня" або значення індексу шуму.

Контур шуму являє собою лінію постійного значення сумарного рівня або індексу шуму літака навколо аеропорту. Контури шуму будуються для різних цілей і, в певній мірі, регламентують вимоги до джерел і попередньої обробки вихідних даних. Контури, що відображають вплив шуму за певний період часу, можуть бути отримані на основі зареєстрованих фактичних даних про операції літаків, які виміряні за допомогою радіолокаційних станцій щодо параметрів траєкторій польотів і т. д. Контури, які використовуються для цілей майбутнього планування, у міру необхідності ґрунтуються більше на прогнозах щодо повітряного руху та маршрутів польоту у майбутньому, наприклад, протягом наступних п'яти років, а також льотно-технічних і шумових характеристиках майбутніх літаків.

Процес побудови контурів шуму складається з наступних етапів:

- попереднє оброблення сценарних даних аеропорту,
- визначення геометрії траєкторій польотів, профілів швидкості і тяги,
- розрахунок рівня шуму окремого прольоту,
- сумарні дані про польоти,
- розрахунок контурів шуму,
- подальша обробка та експорт даних до ГІС-системи для відображення контурів на мапі аеропорту.

Згідно методології DOC 9911 траєкторія польоту ПС поділяється на сегменти. Метод сегментації враховує особливості змін параметрів польоту уздовж усієї траєкторії польоту ПС. При цьому для розрахунку рівня звуку при

одиначному прольоті ПС для кожного сегмента використовується дані з БД ANP, яка по кожному ПС містить криві залежності шум-потужність-відстань (NPD – noise-power-distance). Вони визначають для усталеного прямолінійного відрізка польоту, заданих атмосферних умовах, конкретної конфігурації польоту рівні звуку при одиначному впливі (як максимальні, так і інтегровані у часі), що безпосередньо сприймаються під ПС в залежності від відстані. З метою моделювання шуму використовується приведена розташовувана тяга, яка пов'язана з шумом параметром потужності. Через БД ANP визначаються базові рівні звуку одиначного впливу і коригуються з урахуванням різниці між фактичними, тобто тими, що моделюються, і вихідними атмосферними умовами, швидкістю літака і різницею між рівнями звуку, що випромінює вниз і у бічному напрямку (обумовлено бічною направленістю або ефектом місця встановлення двигуна та бічним затуханням).

Таким чином, траєкторія польоту визначається як ряд суміжних прямолінійних відрізків, кожний з яких розглядається як кінцева частина безкінечної траєкторії, для якої відомі значення NPD і бічні коригування. За максимальний рівень даної шумової події береться максимальне значення з відповідних величин по окремим сегментам. Інтегрований у часі рівень звуку шумової події обчислюється шляхом підсумування значень рівня шуму від кожного відрізка, які вносять суттєвий вклад у сумарний рівень звуку даної шумової події. Слід зазначити, що при проведенні сертифікаційних вимірювань виробники ПС для встановлення залежностей NPD проводять стандартні заміри рівнів шуму на висоті 1,2 м над поверхнею землі. При цьому для моделювання рівнів шуму припускається, що рівні звукових подій не залежать від висоти, на якій знаходиться мікрофон.

Крім того, оскільки траєкторія польоту визначається як ряд суміжних прямолінійних відрізків і для розрахунку шуму на кожному відрізку застосовується або метод інтерполяції, або екстраполяції перед застосуванням стандартних даних NPD необхідно враховувати акустичні імпедансні характеристики, які враховують зміни температури та атмосферного тиску

відносно еталонних атмосферних умов. Тому застосовується методика розрахунку поглинання звуку в атмосфері, яка застосовується до конкретного спектрального класу ПС. У БД ANP є спектральні класи (Spectral\_classes) як для злету так і посадки. Для злету спектральні класи розбиті на 27 типів, для посадки – на 20 типів. У кожній групі є базовий спектр.

Для критерію оцінювання середніх рівнів шуму за тривалий час  $L_{Aeq}$  за методологією ICAO DOC 9911 прийняті спрощення при практичному моделюванні, які вважаються достатніми. До таких спрощень належить наступне посилення – розкид траєкторій польоту, профілі польоту і польотні конфігурації на всіх підлініях шляху є ідентичними тим, які характерні для магістральної шляховий лінії. Рекомендується використовувати мінімальне число підліній шляху – 6, що істотно зменшить обсяг обчислень. Однак для розрахунку за критеріями оцінювання рівнів шуму  $L_{Amax}$  та  $SEL$  при одиночному прольоті ПС такі спрощення є недостатніми.

#### 2.1.8. Розрахунок рівня шуму при одиночному впливі одного прольоту повітряного судна

Авіаційний шум утворюється повітряним судном або його елементами і розглядається як поодинокі звукова подія та визначається як шкідливий чинник щодо впливу на навколишнє середовище. При цьому шум може змінюватися або бути відсутнім на значній частині регламентованого часового інтервалу під час вимірювання. Відповідно до міжнародних стандартів ISO 1996/1 Second edition 2003-08-01 [222] та ISO 3891:2014. Acoustics — Procedure for describing aircraft noise heard on the ground [223] визначено два основних показника впливу шуму:

- еквівалентний рівень впливу тривалого шуму, спектр якого скоригований за шкалою «А» вимірювача шуму і вимірний протягом часу  $T$  (тобто це сумарний середньоквадратичний рівень звуку  $L_{A(t)}$  для моменту часу  $t$  з інтервалом 1 с):

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{T} \int \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right],$$

де  $p_A^2(t)$  – А– зважений миттєвий звуковий тиск на час роботи Т,

$p_0^2$  – тиск еталонного звуку (дорівнює 20 мкПа);

– рівень експозиції звуку  $L_{AE}$  (Sound Exposure Level – SEL) або ефективний рівень впливу шуму, який являє собою рівень постійного звуку з тривалістю 1 с і є мірою фізичної енергії події шуму, яка враховує як інтенсивність, так і тривалість події шуму:

$$L_{AE} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{t_0}{T} \int \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right], \text{ де } t_0=1 \text{ с.}$$

SEL використовується для визначення кількості енергії, яка має місце при одиночному прольоті повітряного судна або у ізольованій події випромінювання шуму.  $L_{Aeq}$  та  $L_{AE}$  пов'язані між собою наступною залежністю:

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{AEi}} \right),$$

де  $n$  – кількість ізольованих подій випромінювання за період спостереження Т.

Еквівалентний рівень впливу шуму регламентується інтервалами часу: доба, 16 годин денного часу доби з 7<sup>00</sup> до 23<sup>00</sup>, що становить 57600 с, та 8 годин нічного часу з 23<sup>00</sup> до 7<sup>00</sup>, що становить 28800 с. Рівні звукової експозиції вимірюються при кожному впливі з наступним підсумовуванням вимірних рівнів окремо для денного та нічного часу доби.

При моделюванні рівнів шуму використовується база даних ANP виробників повітряних суден, яка містить для різних типів літаків спектральні характеристики шуму у третинооктавних смугах частот у діапазоні від 50 Гц до 10 кГц, прив'язаних до поточного часу з інтервалом 0,5 с.



$$L_E = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{L(t)/10} dt \right),$$

де  $t_0$  – початковий момент часу,

$L(t)$  – рівень звуку в момент часу без визначення шкали.

Інтегральний інтервал  $[t_1, t_2]$  вибирається таким чином, щоб забезпечити охоплення всього істотного внеску звуку при даній шумовій події. В межах цього інтервалу рівень звуку  $L(t)$  знаходиться в межах 10 дБ від значення максимального рівня шуму  $L_{max}$  ( $L_{max}$  – це максимальний миттєвий рівень, що виникає під час шумової події). Рівні впливу звуку, які наводяться виробниками повітряних суден в міжнародній базі ANP, це значення, які до 10 дБ нижче максимального рівня шуму. В цій базі містяться таблиці, в яких  $L_{max}$  та  $L_E$  наводяться як функції від дальності поширення звуку  $d$  (для конкретних типів літаків, їх модифікацій, конфігурацій польоту – заходу на посадку, виліт, положення закрилків) та режимів потужності  $P$ . Ці значення відносяться до польоту, який встановився, при заданих вихідних швидкостях  $V_{ref}$  у 82,3 м/с впродовж теоретично нескінченної прямолінійної траєкторії польоту. Тобто, маючи вихідні значення  $P$  та  $d$ , через базу даних ANP визначаються вихідні базові рівні  $L_{max}(P, d)$  та  $L_{E\infty}(P, d)$ . Рівень звуку при одиничному впливі розраховується шляхом інтерполяції значень в базі даних ANP у випадку, якщо табличні значення  $P$  та  $d$  не будуть точними. Між табличними значеннями потужності використовується лінійна інтерполяція, а для табличних значень відстані застосовується логарифмічна (рис.2.21). Якщо  $P_i$  та  $P_{i+1}$  є параметрами потужності двигунів, для яких у таблиці зазначаються значення рівня звуку в залежності від відстані, то рівень звуку  $L(P)$  на заданій відстані для проміжного значення  $P$  (між  $P_i$  та  $P_{i+1}$ ) визначається за формулою [16]:

$$L(P) = L(P_i) + \frac{L(P_{i+1}) - L(P_i)}{P_{i+1} - P_i} * (P - P_i).$$

Для будь-якого заданого режиму потужності та значень відстані  $d_i$  та  $d_{i+1}$ , для яких є табличні дані по шуму, то рівень звуку  $L(d)$  для проміжного значення відстані  $d$  обчислюється за формулою:

$$L(d) = L(d_i) + \frac{L(d_{i+1}) - L(d_i)}{\lg d_{i+1} - \lg d_i} * (\lg d - \lg d_i).$$

За допомогою двох вище наведених рівнянь розраховується рівень звуку  $L(P, d)$  для будь-яких потужності та відстані, які охоплюються базою даних NPD. Для значень відстані  $d$ , які не охоплюються даними NPD, рівень шуму від відстані екстраполюється даними з останніх двох значень, тобто у напрямку всередину від  $L(d_1)$  та  $L(d_2)$  або назовні від  $L(d_{i-1})$  та  $L(d_i)$ , де  $i$  – загальна кількість точок NPD на кривій.

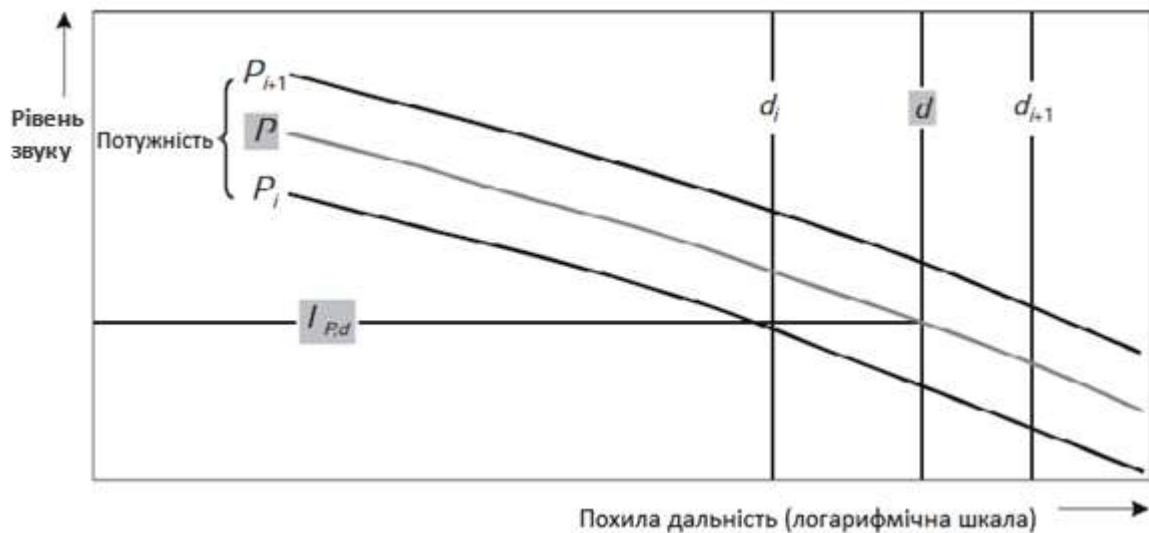


Рис. 2.21. Інтерполяція кривих залежності шум – потужність – відстань

Таким чином, всередині рівень звуку обчислюється як

$$L(d) = L(d_2) + \frac{L(d_1) - L(d_2)}{\lg d_2 - \lg d_1} * (\lg d_2 - \lg d), \quad (2.26)$$

а назовні рівень звуку обчислюється як

$$L(d) = L(d_{i-1}) + \frac{L(d_i) - L(d_{i-1})}{\lg d_i - \lg d_{i-1}} * (\lg d - \lg d_{i-1}) \quad (2.27)$$

Максимальний рівень звуку, який утворюється окремим сегментом траєкторії польоту  $L_{max,seg}$ , у загальному вигляді може бути описаний наступною формулою [16, 224]:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P,d) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta,\ell). \quad (2.28)$$

А частка звуку  $L_E$  від одного сегменту траєкторії польоту описується як

$$L_{E,seg} = L_{E\infty}(P,d) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta,\ell) + \Delta_F. \quad (2.29)$$

У рівнянні (2.28)  $L_{max}(P,d)$  – максимальне значення від окремого сегменту траєкторії польоту, яке визначається на основі інтерполяції табличних даних NPD для дійсних значень тяги або потужності двигуна  $P$  та відстані  $d$ .

Складові у формулі (2.28) являють собою коригувальні члени, які враховують наступні ефекти:

$\Delta_I(\varphi)$  – ефект компоновки (місця встановлення) двигунів, описує зміну бічної спрямованості випромінювання шуму за рахунок його екранування, заломлення і відбиття, викликане поверхнями планера ПС, самих двигунів і оточуючими потоками повітря з різними швидкостями;

$\Lambda(\beta,\ell)$  – бічне затухання, має суттєве значення при поширенні звуку в умовах малих кутів спостереження відносно поверхні землі, яке враховує взаємодію між прямим і відбитим звуковими променями (так званий ефект впливу земної поверхні), а також враховує вплив ефектів атмосферних нерівномірностей (в першу чергу, викликаних поверхнею землі), які заломлюють звукові промені в міру їх проходження до місця розташування спостерігача в бічному напрямку від траєкторії польоту.

У рівнянні (2.29) враховуються наступні ефекти:

$\Delta_V$  – корекція тривалості: дані NPD пов'язані з вихідною швидкістю польоту. Цей метод коригує рівні впливу звуку відповідно до значень швидкості, відмінними від вихідної. (Поправка не застосовується до  $L_{max,seg}$ ).

$\Delta_F$  – корекція на кінцеву довжину сегмента: враховує кінцеву довжину сегмента, який очевидно виробляє менше шуму, ніж нескінченний сегмент. Вона застосовується тільки до значення рівня експозиції шуму.

Максимальний рівень звуку  $L_{max}$  визначається як найбільше із значень сегмента  $L_{max,seg}$ :  $L_{max} = \max(L_{max,seg})$ , де кожне значення сегмента вибирається із даних NPD повітряного судна для потужності  $P$  та відстані  $d$ .

Рівень експозиції розраховується як сума внесків від кожного значимого по шуму сегмента  $L_{E,seg}$  його траєкторії польоту  $L_E = 10 \cdot \lg\left(\sum 10^{L_{E,seg}/10}\right)$ . Підсумовування здійснюється крок за кроком через всю множину сегментів траєкторії. Адекватність оцінювання авіаційного шуму навколо аеропорту розглядається з точки зору яким чином підвищити точність розрахунків і визначити невизначеності прогнозування рівнів шуму. Основна проблема полягає у відсутності низки вагомих джерел шуму, які на даний час не враховуються у методології ICAO DOC 9911. До таких джерел належать: наземний шум (руління, випробування двигунів тощо), вертолітний шум. Крім того, при оцінці шуму не враховуються імпеданс землі для покриття поверхні, бічні ефекти направленості, зворотній шум, низькочастотний шум ПС, моделювання зміни конфігурації польоту та швидкості ПС, визначення реальних умов атмосфери для даних про ПС. Тому питання оцінки авіаційного шуму потребує удосконалення.

2.1.9. Порівняльний аналіз профілів польоту повітряного судна при виконанні реальних операцій та розрахованих за методологією ICAO DOC 9911

З метою визначення наскільки точно здійснюється розрахунок траєкторії руху ПС та рівнів шуму шляхом моделювання необхідно порівняти ключові параметри профілю польоту (висота, тяга та швидкість за відстанню), які були отримані з використанням системи моніторингу шуму, та їх аналогічні значення, але отримані в результаті моделювання збалансованої системи руху ПС.

Оскільки в Україні у міжнародних аеропортах відсутня постійно діюча система моніторингу шуму через її велику вартість, за допомогою якої можна було б отримати результати вимірювання у реальних експлуатаційних умовах, тому за основу були прийняті дані, отримані за допомогою норвезької системи моніторингу шуму і стеження NTSM (Norwegian Air Traffic and System Airport Management) в аеропорту Осло [225], таблиці 2.3 – 2.5.

Виміри проводилися за плановим повітряним рухом на 5 стандартних позиціях вимірювань, близьких до зони аеропорту.

Позиції вимірювань пронумеровані 1 – 5. Позиція 1 розташована всередині зони аеропорту, прямо під траєкторією польоту і 400 м від кінця ЗПС. Позиція 2 також знаходиться у відповідності з ЗПС, недалеко від зони аеропорту на відстані 1150 м від кінця ЗПС. Позиції 2 – 5 розташовані по прямій лінії, злегка нахиленої до перпендикуляру до виходу ЗПС. Відстань від положення 2 становить 400 м, 800 м і 1250 м для позицій 3, 4 і 5 відповідно. Цей мікрофон був прикріплений до пристрою світлового бар'єру на злітно-посадковій смузі, приблизно на 6,5 м над землею.

Шумоміри були попередньо встановлені для вимірювання  $L_{eq}$  і  $L_{max}$  (FAST) з 0,25-секундними інтервалами у смугах частот 1/3 октави 25 – 10000 Гц і як зважених за шкалою «А», так і зважених за шкалою «С». Дані зберігалися в електронному вигляді в кожній позиції, і в кінці кожного сеансу дані були передані на комп'ютер.

Дані про повітряні судна були синхронізовані з акустичними вимірюваннями шляхом надання доступу до даних бортового реєстратора від авіакомпанії SAS для контрольованих польотів. Кількість обраних рейсів в цьому дослідженні становить 155, включаючи злітно-посадочні операції.

У таблицях 2.3-2.5 відображено тип повітряного судна, тип операції (відправлення/прибуття), критерій  $L_{Amax}$  (максимальний рівень звуку), відповідно відхилення для  $L_{Amax}$  для кожного типу ПС, критерій SEL (А-зважений рівень звукової експозиції), відповідно відхилення для SEL, кількість подій.  $SEL=10 \cdot \log(\sum 0,5 \cdot 10^{L_{eq}/10})$ .

Позитивна різниця рівнів шуму вказує на те, що високі рівні шуму були виміряні на обладнанні системи моніторингу шуму. Різниця рівнів для  $L_{Amax}$  та SEL, яка спостерігається, є від'ємною для  $L_{Amax}$  та позитивною для SEL.

Таблиця 2.3

Відмінності у вимірюваних рівнях шуму у позиції 1 / NMT-4, злет

Тип ПС	Операція	$L_{Amax}$	$\Delta_{Amax}$	SEL	$\Delta_{SEL}$	Кількість подій
B736	Відправлення	-0,2	0,3	-0,8	0,4	15
B737	Відправлення	-0,2	0,3	-0,6	1,0	19
B738	Відправлення					0
MD81	Відправлення	-0,5	0,5	0,4	0,2	17
MD82	Відправлення	-0,5	0,4	0,5	0,4	32
MD83	Відправлення	0,2	0,0	1,1	0,0	1
MD87	Відправлення	-0,4	0,4	0,5	0,3	6
MD90	Відправлення	-0,3	0,4	0,1	0,1	2
Всього:		-0,4	0,4	0,1	0,8	92

Таблиця 2.4

Відмінності у вимірюваних рівнях шуму у позиції 1 / NMT-4, приземлення

Тип ПС	Операція	$L_{Amax}$	$\Delta_{Amax}$	SEL	$\Delta_{SEL}$	Кількість подій
B736	Приземлення	-1,3	1,0	0,4	1,2	13
B737	Приземлення	-1,1	0,7	0,4	0,5	14
B738	Приземлення	-1,2	0,3	0,3	0,2	2
MD81	Приземлення	-0,9	0,4	0,4	0,2	7
MD82	Приземлення	-0,8	0,6	0,3	0,5	16
MD83	Приземлення					0
MD87	Приземлення	-1,0	0,4	0,5	0,4	5
MD90	Приземлення	-1,3	0,0	-0,5	0,0	1
Всього:		-1,0	0,7	0,1	0,7	58

Таблиця 2.5

Відмінності у вимірюваних рівнях шуму у позиції 1 / NMT-4, усі операції

Тип ПС	Операція	$L_{Amax}$	$\Delta_{Amax}$	SEL	$\Delta_{SEL}$	Кількість подій
B736	Відпр+Призем	-0,7	0,9	-0,2	1,0	28
B737	Відпр+Призем	-0,6	0,7	-0,1	0,9	33
B738	Відпр+Призем	-1,2	0,3	0,3	0,2	2
MD81	Відпр+Призем	-0,7	0,5	0,4	0,2	24
MD82	Відпр+Призем	-0,6	0,5	0,4	0,5	48
MD83	Відпр+Призем	0,2	0,0	1,1	0,0	1
MD87	Відпр+Призем	-0,7	0,5	0,5	0,4	11
MD90	Відпр+Призем	-0,6	0,7	-0,1	0,3	3
Всього:		-0,6	0,6	0,2	0,8	150

Конфігураційні профілі польоту реальних експлуатаційних операцій суттєво відрізняються від отриманих прогнозних значень, отриманих в результаті моделювання для збалансованого руху. Така різниця спостерігається не тільки для висоти польоту, але й для швидкостей польоту та налаштувань тяги. А саме ці параметри суттєво впливають і на розрахунок прогнозованих рівнів шуму. Це відображено на рис. 2.22 [226] для операції відправлення. Синя лінія на рис.2.22 відображає реальні значення висоти (рис. 2.22 – а), тяги (рис. 2.22 – б), швидкості (рис. 2.22 – с). Червона лінія показує розраховані прогнозні значення висоти, тяги, швидкості при моделюванні системи збалансованого руху. Якщо проаналізувати швидкість польоту (рис. 2.22 – с), то слід зазначити, що робочі швидкості (синього кольору) змінюються на етапі зльоту/набору висоти. Зазвичай вони мають менш збалансовані значення (червоний колір). Відповідні експлуатаційні тяги є набагато меншими (рис. 2.22 – б), однак обидва значення швидкості і тяги знаходяться в безпечному діапазоні. Ці дані є результатами експлуатаційної кваліфікації пілота і можуть бути визначені для кожного аеропорту / авіакомпанії / авіалінії за допомогою статистичного аналізу.

Аналогічна ситуація має місце і для операцій прибуття (зниження перед посадкою і пробігом по ЗПС) літака на аеродром, особливо це стосується налаштування тяги двигунів, значення якої може бути значно вище, ніж при

розрахунках системи збалансованого руху. На рис. 2.23 відображені дані для операції прибуття літака Боїнг 737-500 та MD-83. На верхньому графіку рис. 2.23 відображено залежність швидкості від відстані, на нижньому – тяги від відстані. Синя лінія графіків – це виміряні значення, червона лінія – це розраховані значення згідно системи збалансованого руху літака протягом зниження перед посадкою.

Аналіз графіка швидкості показує, що розбіжності значень швидкості між виміряними і збалансованими (прогнозованими) є дуже малими (в рамках допустимої похибки), в межах дистанції 0... 6000 м до торця ЗПС, тобто протягом зниження літака уздовж глісади, де параметри польоту прискіпливо контролюються пілотом. Поза глісадою, тобто на дистанціях понад 8000...9000 м виміряні значення швидкості є набагато більшими, ніж збалансовані значення. А значення тяги і швидкості є ключовими параметрами, що суттєво впливають на розрахунок рівнів шуму. Це означає, що результати рішення системи рівнянь збалансованого руху польоту не відповідають відповідним значенням параметрів реальної траєкторії і прийнятим спрощенням до інтегрованої моделі обчислення авіаційного шуму. Тому така система рівнянь збалансованого руху потребує удосконалення і внесення поправки.

Також при обчисленні рівнів звуку не враховується рефракція. Однак рефракція є завжди, тому що є температурний градієнт, завжди присутній вітер. Таким чином, не враховувати ці фактори означає допустити помилку при моделюванні розповсюдження звукових хвиль.

#### 2.1.9.1. Аналіз параметрів профілю рейсу зльоту/набору висоти

На рис. 2.22 [226] наведені дані для профілю зльоту/набору висоти. Якщо проаналізувати швидкість польоту (рис. 2.22 с), то слід зазначити, що робочі швидкості (синього кольору) змінюються на етапі зльоту/набору висоти. Зазвичай вони мають менш збалансовані значення (червоний колір). Відповідні експлуатаційні тяги є набагато меншими (рис. 2.2. б), однак обидва значення



швидкості і тяги знаходяться в безпечному діапазоні. Ці дані є результатами експлуатаційної кваліфікації пілота і можуть бути визначені для кожного аеропорту / авіакомпанії / авіалінії за допомогою статистичного аналізу.

#### 2.1.9.2. Аналіз параметрів профілю зниження/посадки

На рис. 2.23 [226] наведені дані профілю зниження/посадки літаків Боїнг 737-500 та MD-83. Якщо проаналізувати швидкість польоту літака MD-83 (рис. 2.23), слід зазначити, що виміряні швидкості (синій колір) змінюються вздовж гліссади, а іноді їх значення можуть бути нижче вимог безпеки (в даному випадку збалансоване значення червоного кольору відповідає значенню безпечної швидкості – нижче якої заборонено виконувати політ протягом даного етапу). У цих випадках пілот повинен працювати з тягою двигунів, підвищуючи налаштування режиму роботи двигуна, щоб повернути швидкість до безпечних значень (на рис. 2.23 такі випадки синхронізовані синіми стрілками між графіком швидкості та графіком тяги двигуна – всі збільшення тяги відповідають моментам втрати швидкості польоту, тобто зниження її значення нижче від безпечної швидкості для цього етапу польоту літака). Було виявлено, що значення тяги протягом таких процедур налаштування можуть бути в два рази вище, ніж збалансовані прогнознi значення для них. Для деяких типів повітряних суден збалансовані прогнознi значення тяги були виявлені значно меншими, ніж спостерігаються тяги в реальних умовах [226], до яких можна отримати доступ як помилку при вхідних значеннях коефіцієнтів (аеродинамічних або тягових) у використовуваних базах даних. У цьому випадку відповідні обчислення контурів шуму для цих типів літаків і етапів польоту будуть значно меншими від очікуваних від вимірювань в експлуатації

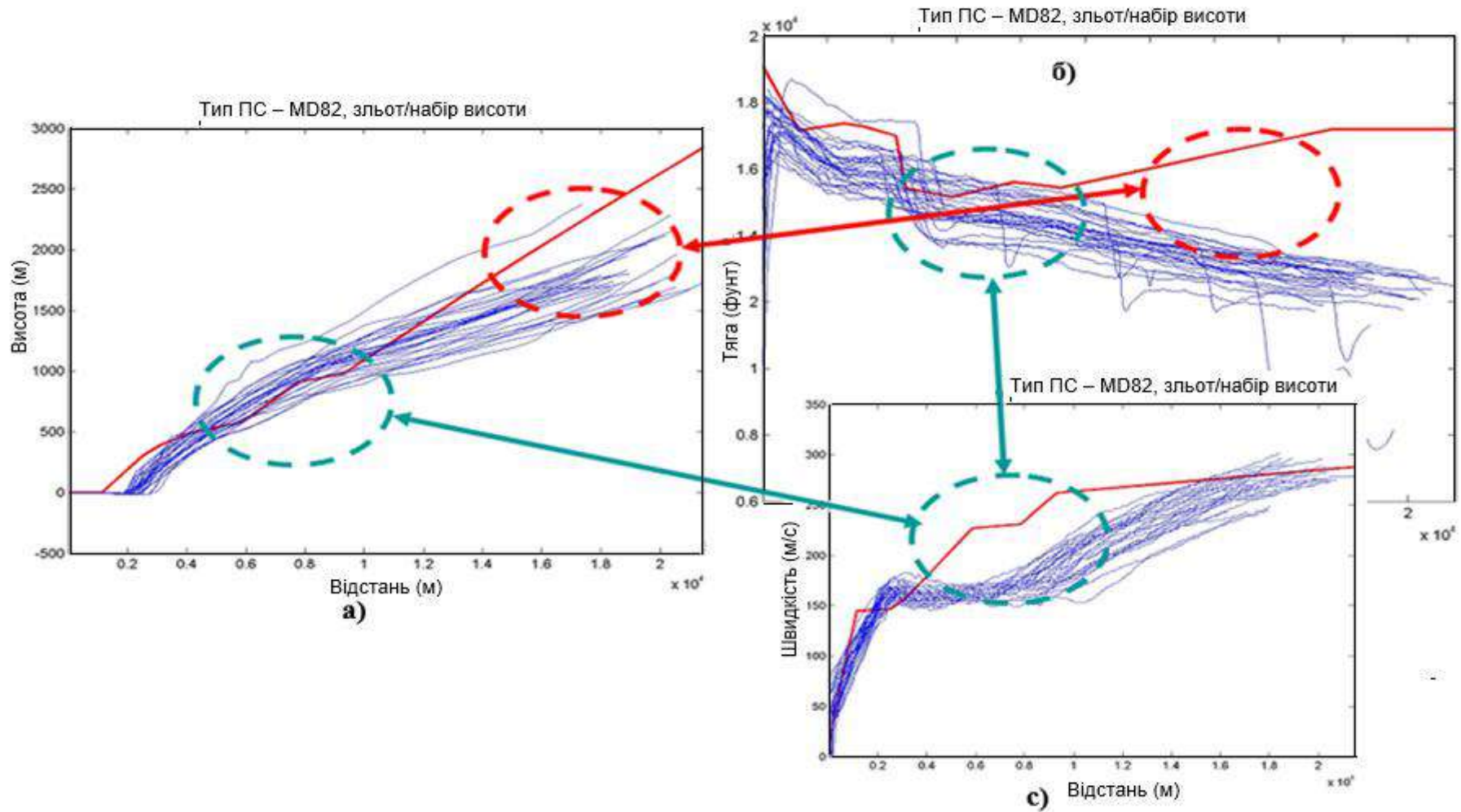


Рис. 2.22. Параметри профілю зльоту/набору висоти (а – висота за відстанню, б – тяга за відстанню, с – швидкість за відстанню), які спостерігаються в роботі (синя лінія) у порівнянні з балансованим прогнозуванням (червона лінія) під час вильоту

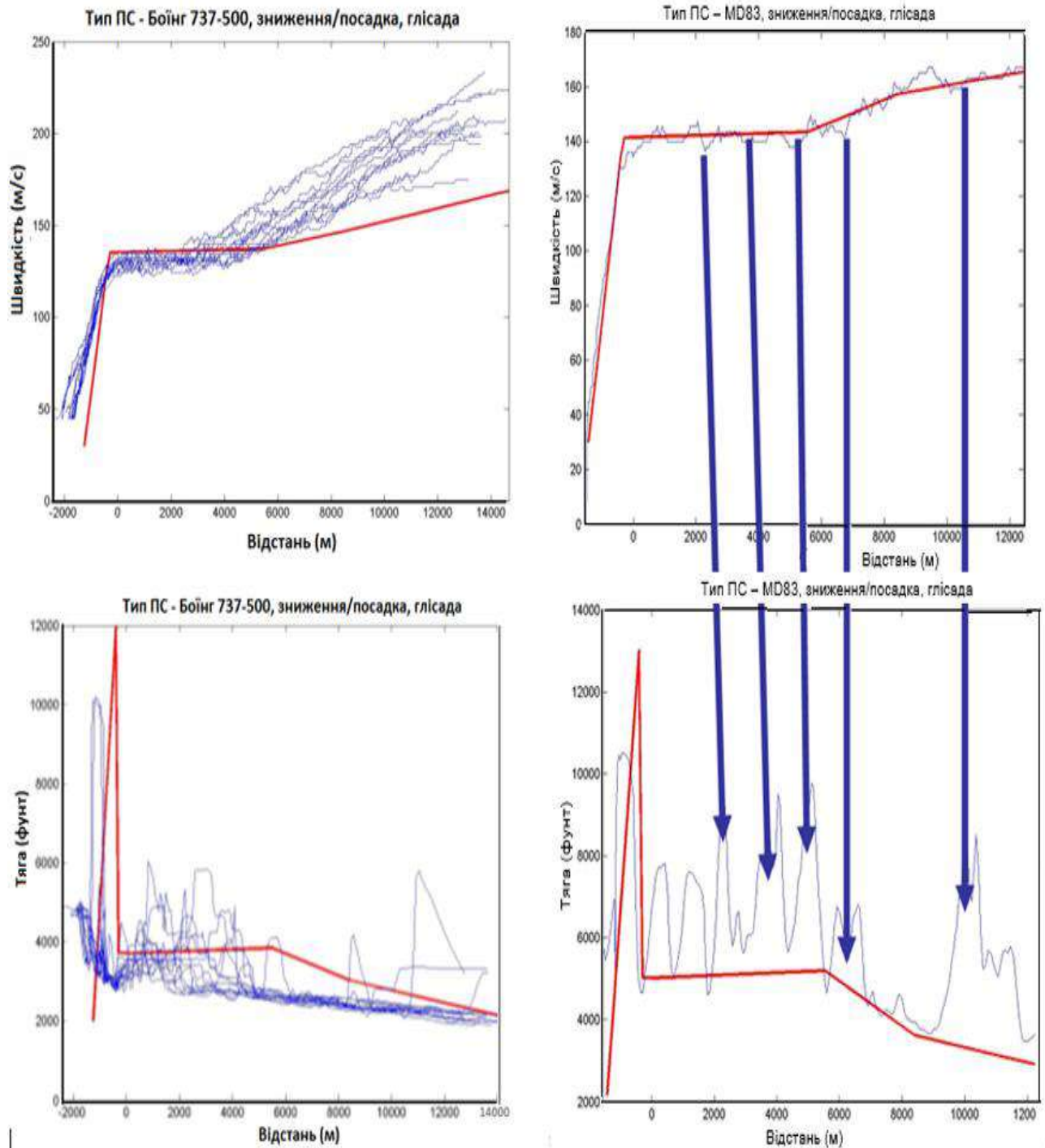


Рис. 2.23. Порівняння для зниження/посадки між швидкостями та тягами, що спостерігаються в роботі, та прогнозованими балансованими значеннями (червона). Для лівих фігур (менш збалансованих) швидкості пов'язані з перебалансованими тягами (управління від пілота, щоб повернути швидкість у безпечний діапазон)

### 2.1.10 Недоліки при моделюванні контурів шуму за методологією ICAO DOC 9911

Незважаючи на те, методологія розрахунку контурів шуму ICAO DOC 9911 забезпечує розрахунок задачі обчислення еквівалентного рівня звуку  $L_{Aeq}$  та добового еквівалентного рівня звуку з поділом доби на періоди: «день  $L_{AeqD}$  – ніч  $L_{AeqN}$ » і «день – вечір – ніч»  $L_{Aден}$  з відмінністю на 1 дБ і ця точність розрахунку є прийнятною, між тим рекомендована методологія має низку недоліків:

1. Траєкторія руху ПС розглядається як система збалансованого руху ПС, що від самого початку є спрощеним підходом. Саме розгляд збалансованої системи є джерелом помилок, оскільки для кожного типу ПС траєкторія руху є умовно наближеною до реальних умов експлуатації ПС у аеропорту і відрізняється від рішення системи рівнянь збалансованого руху. Це пов'язано з неточностями при визначенні згладжування траєкторії, а саме, для розрахунку еквівалентного рівня звуку  $L_{Aeq}$  траєкторія згладжується, а для розрахунку максимального рівня звуку  $L_{Amax}$  висота польоту перебільшена. Тому необхідно запропонувати методичний підхід до розрахунку  $L_{Amax}$  для удосконалення методології розрахунку рівнів шуму з метою отримання достатньої точності розрахунків.

2. Одним з головних припущень, яке привносить свою похибку у розрахунок рівнів звуку, є встановлення залежностей NPD виробниками ПС. При проведенні сертифікаційних вимірювань на висоті 1,2 м використання мікрофону приймача створює ефект інтерференції, тобто має місце додаткове затухання ефекту взаємодії прямих та відбитих від земної поверхні звукових променів (тобто *ефект земної поверхні або бічний ефект* спостерігається і для випадків розміщення звукових променів у поздовжній площині) під час одиночного прольоту, що дає різницю у 2–3 дБА між вільним полем та обмеженим з однієї сторони (земною поверхнею). Таким чином, NPD–залежності визначаються і подаються в таблиці бази даних ANP з похибкою, якою нехтувати не можна. Між тим це питання не досліджується і вважається, що ця похибка є несуттєвою.

3. Траєкторія руху ПС задається в БД ANP як кількість сполучених відрізків і проводиться розрахунок рівнів звуку. Однак траєкторія розглядається у вертикальній площині (це вісі Z та X), а у випадку, коли польотна конфігурація передбачає розворот ПС, який необхідно виконати на висоті Y, то слід розглядати траєкторію і у просторі для обчислення значення Y як кута повороту. Це треба зробити у межах ділянки БД ANP або на стику ділянок, але може бути варіант, коли ділянки перекриваються.

4. Модель ICAO DOC 9911 не враховує ефекту рефракції звукових хвиль в атмосферному повітрі, однак вона є завжди, оскільки є температурний градієнт, який змінюється або з набором висоти ПС, або зі зниженням з урахуванням пори року, частини доби, розташуванням повітряних мас. Ефект від рефракції може бути достатньо великим.

5. Ефект бічного затухання враховується в залежностях NPD, що обумовлено сферичним поширенням хвилі та атмосферним поглинанням, однак за методикою DOC 9911 при малих кутах візування ця поправка ще раз обчислюється, тобто поправка на бічне затухання враховується двічі.

6. Поправка на випромінювання назад використовується в моделях для етапів розбігу та пробігу, яка є універсальною для усіх типів літаків. Хоча є типи літаків з однаковими двигунами, однак існує відмінність у випромінюванні на різних компоновках двигунів на літаках.

7. Усі контури шуму визначають точки зльоту та посадки без урахування ефекту руління. Однак шум, який виникає при операціях руління, може викликати суттєвий вплив на оточуюче середовище. Особливо така ситуація має місце у випадку, коли аеропорт знаходиться у межах мегаполіса, наприклад, аеропорт Київ–Жуляни, і руліжні доріжки розташовані значно ближче до житла, ніж злітно-посадкова смуга.

8. При моделюванні шуму ПС вважається, що випромінювання шуму є циліндричним та симетричним з центральною лінією вісі руху ПС як вісі симетрії. Однак в реальних умовах експлуатації ПС може мати місце несиметричне випромінювання, модель шуму такий факт не враховує і в

результаті такого спрощення помилка обчислення може досягати  $\pm 12$  дБ. Особливо для сценаріїв обчислення шуму від гелікоптерів. Адекватність та точність оцінки шуму повітряних суден навколо аеропортів розглядається з точки зору того, наскільки необхідно покращити існуючі підходи та методи для підвищення точності прогнозування рівня авіаційного шуму [250]. Основна проблема неадекватності розглядається у відсутності ряду достатніх значних за шумом джерел, які в даний час виключені з методів [16]:

1. Шум від гелікоптерів;
2. Шум літака під час руху або обслуговування на земній поверхні (руління та ін.);
3. Зліт з тягою двигунів, що не відповідають вимогам Керівництва з виконання польотів для даного типу літака (зниження до номінальної тяги замість максимальної під час зльоту літака);
4. Шум літака під час крейсерського польоту;
5. Імпеданс земної поверхні, і т.д.;

або включені в поточну методологію спрощеним чином:

6. Бічні ефекти та ефекти спрямованості випромінювання шуму;
7. Шум від реверсу тяги під час пробігу по ЗПС;
8. Низькочастотний авіаційний шум;
9. Моделювання змінної конфігурації та швидкості літака;
10. Удосконалення моделювання літаків з гвинтовим двигуном;
11. Визначення реальних умов атмосфери для даних джерела та поширення звуку;
12. Блокування лінії візування (прямого променя) шуму рельєфом поверхні;
13. Методологія ідентифікації домінуючих літаків для підвищення точності / ефективності моделювання.

За результатами проведеного аналізу в табл. 2.6 наведені припущення, виключення та спрощення чинної методології обчислення рівнів звуку авіаційного шуму, їх відмінність від реальних умов експлуатації ПС, оцінки

похибки, що привноситься в результати обчислень, зокрема для максимальних рівнів звуку.

Таблиця 2.6

Відмінність реальних умов експлуатації ПС від припущень чинної методології ICAO Doc 9911 і їх вплив на похибку обчислення рівнів звуку  $L_{Amax}$ , і  $L_{AE}$ , дБА

№	Припущення, виключення та спрощення чинної методології ICAO Doc 9911	Відмінність реальних умов експлуатації ПС від припущень чинної методології ICAO Doc 9911	Оцінка похибки обчислення $L_{Amax}$ , і $L_{AE}$ , дБА
1	Обчислення параметрів траєкторії руху літака за результатами рішення системи рівнянь збалансованого руху ПС	<p>Параметри реальних траєкторій руху відрізняються від збалансованих значень (в залежності від відстані до торця ЗПС і в межах нормативних значень <math>L_{Amax}</math>, і <math>L_{AE}</math> для границь ЗОЗ):</p> <p><i>на етапі зльоту/набору висоти</i> (рис. 2.22)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- висота профілю польоту <math>\pm 15\%</math>;</li> <li>- швидкість польоту <math>\pm 30\%</math>;</li> <li>- тяга двигунів <math>\pm 25\%</math>;</li> </ul> <p><i>на етапі зниження перед посадкою</i> (рис. 2.23)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- висота профілю польоту <math>\pm 10\%</math>;</li> <li>- швидкість польоту <math>\pm 15\%</math>;</li> <li>- тяга двигунів <math>\pm 100\%</math></li> </ul>	<p><math>\leq 10</math></p> <p><math>\leq 7</math></p>
2	Умови однорідної атмосфери для обчислення ефектів розповсюдження звукових хвиль – прямолінійні звукові промені	<p>Приземний шар атмосфери характеризується наявністю градієнта температури та швидкості вітру з висотою над поверхнею землі, які спричиняють градієнт швидкості звуку та відповідні умови рефракції звукових хвиль – криволінійні звукові промені:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в умовах негативної рефракції можуть утворюватись «звукові тіні»;</li> <li>- в умовах позитивної рефракції можуть утворюватись кілька відбитих променів, що досягають точки приймача водночас;</li> </ul> <p>в умовах атмосферної інверсії можуть утворюватись «звукові канали»</p>	$\pm 10$
3	Інтерференція прямолінійних прямих та відбитих променів - ефект впливу земної поверхні не залежить від типу ПС	Інтерференція криволінійних прямих та відбитих променів (ефект впливу земної поверхні) залежить від типу ПС (джерела шуму), умов атмосфери,	

	(авіадвигуна), умов атмосфери, виду земної поверхні (імпеданс земної поверхні)	<p>виду земної поверхні:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- в умовах позитивної рефракції можуть утворюватись кілька відбитих променів, що досягають точки приймача водночас;</li> <li>- в умовах негативної рефракції кут відбиття збільшується;</li> <li>- в умовах позитивної рефракції кут відбиття зменшується;</li> <li>- ефект впливу земної поверхні є різним для двигунів типу ТРД (переважає шум струменя), ТРДД (переважає шум вентилятора), ГД і ТГД (переважає шум гвинта);</li> <li>- ефект впливу земної поверхні є різним для різних типів земної поверхні: <ul style="list-style-type: none"> <li>- жорстка акустична поверхня характерна для асфальто-бетону або для водної поверхні</li> <li>- м'яка акустична поверхня характерна для трав'яного чи снігового покриву</li> </ul> </li> </ul>	<p>± 3-5</p> <p>± 1-3</p> <p>± 3-7</p> <p>≤ 6</p> <p>≥ -3-5</p>
4	Ефекти спрямованості випромінювання шуму є узагальненими для всіх типів ПС	Ефекти спрямованості випромінювання шуму є специфічними для всіх типів ПС (типова характеристика, так само як і спектр випромінювання є типовими характеристикою)	≤ 12
5	Шум від реверсу тяги під час пробігу по ЗПС враховується тільки як результат підвищення тяги двигуна	Шум від реверсу тяги під час пробігу по ЗПС має типові спектри і характеристики спрямованості випромінювання	≤ 5-7
6	Шум літака під час руху або обслуговування на земній поверхні (руління та ін.) – кругова діаграма спрямованості для процедур гонки двигунів, руління не враховується	Шум літака під час руху або обслуговування на земній поверхні – типова пелюсткова діаграма спрямованості для процедур гонки та запуску двигунів, протягом руління літаків	± 12
7	Моделювання авіаційного шуму в аеропортах з рівною місцевістю	Багато аеропортів оточені нерівномірним рельєфом, що може призвести до блокування звукових променів (або екранування звуку) у деяких точках спостереження шуму. блокування звукових променів (звукових завад) може бути враховане через розрахунок блокування лінії прямої видимості (line-of-sight blockage calculation)	<p>≤ 2-5 («+»</p> <p>- в основному для випадку з відбиттям від поверхні, «-»- тільки для екранування)</p>



8	Встановлення табличних значень NPD виробниками ПС при проведенні сертифікаційних вимірювань з використанням мікрофону приймача на висоті 1,2 м, що створює ефект інтерференції, тобто має місце додаткове затухання завдяки ефекту взаємодії прямих та відбитих від земної поверхні звукових променів (тобто <i>ефект земної поверхні</i> або <i>бічний ефект</i> спостерігається і для випадків розміщення звукових променів у поздовжній площині)	Встановлення табличних значень NPD виробниками ПС має бути наведено для умов вільного акустичного поля, щоб попередити подвійне врахування при обчисленні <i>ефекту земної поверхні</i>	$\leq 2-5$
---	---	---	------------

## 2.2. Методи і методики контролю кількісних значень та моделювання просторових поширень електромагнітних полів

Моделювання просторових поширень електромагнітних полів базується на наявності математичних функцій закономірностей зміни амплітуд електричної і магнітної складових електромагнітного поля. Ці функції різняться як для розосереджених і локальних джерел, і залежать від особливостей кожного з них – конструктивних рішень повітряних і кабельних ліній, генерації поля компонентами локального джерела. Крім того, необхідною є наявність результатів натурних вимірювань рівнів електромагнітних полів. Це обумовлене двома міркуваннями – отримання вихідних даних для проведення моделювання (особливо це стосується локальних джерел) та перевірки адекватності отриманих моделей у реальних умовах експлуатації електротехнічного обладнання [227].

У випадках різномірності джерел, наприклад, на територіях та окремих приміщеннях підприємств цивільної авіації, електрогенеруючих підприємств тощо враховуються різні закономірності просторових змін рівнів електромагнітних полів за одночасного функціонування усіх радіотехнічних та електротехнічних об'єктів [227, 228].

Розглядаючи розрахункові методи, які є базовими для моделювання поширення електромагнітних полів, слід враховувати, що електромагнітні поля

промислової частоти є квазістаціонарними, тобто для їх розрахунків можна використовувати еліптичні рівняння, які описують стаціонарні процеси.

Розглянемо еліптичне рівняння Лапласа:

$$\Delta\varphi=0,$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа,

$\Delta=\nabla^2$ , де  $\nabla$  – оператор Гамільтона.

Цей оператор може бути використаний як для скалярних, так і для векторних функцій. У ортогональній системі координат рівняння Лапласа має вигляд:

$$\Delta^2\varphi=\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}=0,$$

де  $\varphi(x, y, z)$  – скалярна функція (скалярний потенціал магнітного поля).

Якщо вважати, що електричний пристрій має форму, наближену до циліндричної, то у циліндричній системі координат попереднє рівняння має вигляд:

$$\Delta^2\varphi=\frac{1}{R}\frac{\partial^2\varphi}{\partial R}\left(R\frac{\partial\varphi}{\partial R}+\frac{1}{R}\frac{\partial^2\varphi}{\partial\alpha^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right)=0,$$

де  $R$  – відстань від центру пристрою до точки визначення потенціалу;

$\alpha$  с кут між напрямком  $R$  віссю  $x$  або  $y$ .

Для визначення вектору–потенціалу магнітного поля доцільне використання рівняння Пуассона. Для ізотропного середовища зі сталою магнітною проникністю ( $\mu_x = \mu_y = \mu_z = const$ ) воно має вигляд:

$$\nabla^2\mathbf{A}=-\mu_a\mathbf{J},$$

де  $\mathbf{A}$  – векторний магнітний потенціал;

$\mathbf{J}$  – вектор густини електроструму;

$\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність середовища ( $\mu_a = \mu\mu_0$ ,  $\mu$  – відносна магнітна проникність,  $\mu_0$  – магнітна стала).

Для отримання скалярних значень вектору–потенціалу використовується співвідношення:

$$\nabla^2 A_x = -\mu_a J_x, \quad \nabla^2 A_y = -\mu_a J_y, \quad \nabla^2 A_z = -\mu_a J_z$$

Необхідні компоненти отримуються інтегруванням, виходячи із загального співвідношення:

$$A = \frac{\mu_a}{4\pi} \int_V \frac{J dV}{R}$$

Визначення фактичної індукції магнітного поля здійснюється з фундаментального співвідношення:  $\mathbf{B} = \text{rot} A$

Враховуючи, що  $\mathbf{B} = \mu\mu_0 \mathbf{H}$ , напруженості магнітного поля у циліндричних координатах розраховуються наступним чином

$$\text{rot}_r H = \frac{1}{R} \frac{\partial H_z}{\partial \alpha} - \frac{\partial H_\alpha}{\partial z},$$

$$\text{rot}_\alpha H = \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial R},$$

$$\text{rot}_z H = \frac{1}{R} \left[ \frac{\partial (RH_\alpha)}{\partial R} - \frac{\partial H_r}{\partial \alpha} \right].$$

Для отримання однозначного розв'язку рівнянь Лапласа і Пуассона необхідно надати граничні умови.

На межі, якою є поверхня електротехнічного пристрою, у загальному випадку можуть бути задані наступні граничні умови:

1. Граничні умови першого роду – на границі надається значення функції, яка визначається, тобто  $\varphi = f_1(x, y, z)$  де точки з координатами  $(x, y, z)$  належать границі. Умова  $\varphi = 0$  є однорідною.

2. Граничні умови другого роду – для них надається зміна функції, яка визначається, за нормаллю  $\vec{n}$  до границі, тобто  $\frac{d\varphi}{dn} = f_2(x, y, z)$ , де точка з координатами  $(x, y, z)$  належить границі. Умова  $\frac{d\varphi}{dn} = 0$  є однорідною.

3. Граничні умови третього роду –  $\frac{d\varphi}{dn} + f_3(\varphi) = f_4(x, y, z)$ , де точка з координатами  $(x, y, z)$  належить границі технічного пристрою.

На границі моделі можуть бути задані змішані граничні умови, тобто комбінація умов першого, другого та третього роду.

Слід зауважити, що для більшості задач, пов'язаних з розрахунками електромагнітних полів для оцінювання їх рівнів з точки зору електромагнітної безпеки, застосування граничних умов не обов'язкове. Це пояснюється достатнім віддаленням працюючих від обладнання. Винятком є електротехнічні пристрої великих розмірів [229].

Порівняння результатів розрахунків рівнів магнітних полів за запропонованими методами з розрахунками за методиками, у яких враховувалася фактична їх нестационарність [230], довели, що прийняті припущення стаціонарності (квазістаціонарності) цілком прийнятні для розв'язання задач, пов'язаних з електромагнітною безпекою.

Однак, при планування та здійсненні розрахунків слід враховувати, що надана методика не завжди дає прийнятні результати. Як наведено у роботі [231], якщо електротехнічне обладнання є джерелом магнітного поля дипольного, квадрупольного та октупольного типів, то для коректних розрахунків рівнів магнітних полів необхідно враховувати відповідні гармоніки магнітного поля промислової частоти.

Розрахунки напруженостей електричних полів  $E$  базуються на фундаментальному співвідношенні:

$$E = - \text{grad } \varphi,$$

де  $\varphi$  – потенціал електричного поля;

$\text{grad } \varphi = \nabla \varphi$  – диференціальний оператор Гамільтона.

$$\nabla \varphi = \mathbf{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

Для відстаней, які значно більші за розміри джерела поля, доцільно використовувати визначення параметрів поля у сферичних координатах:

$$\nabla\varphi = \mathbf{R}_0 \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial R} + \boldsymbol{\theta}_0 \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial\theta} + \boldsymbol{\alpha}_0 \cdot \frac{1}{R\sin\theta} \cdot \frac{\partial\varphi}{\partial\alpha}$$

Більшість широко використовуваного обладнання (відеомонітори, системні блоки, джерела безперебійного живлення, друкуючі пристрої тощо) мають просторові структури електричних та магнітних полів, притаманні електричним та магнітним диполям (теоретично та експериментально показано у [232]). Так, наприклад, усі рідкокристалічні монітори мають електричні поля дипольного типу, джерела безперебійного живлення – магнітні поля дипольного типу.

Розрахунок електричного поля базується на визначенні  $\varphi$  - скалярного потенціалу електричного поля, розрахунок магнітного поля базується на визначенні  $\mathbf{A}$  - векторного потенціалу магнітного поля.

Розглянемо електричний диполь з зарядом  $\pm q$  та відстанню  $l$ , тобто з електричним дипольним моментом  $\mathbf{P} = q \cdot l$  (рис. 2.24).

Скалярний потенціал електричного поля у точці спостереження  $\mathbf{a}$  має

$$\text{вигляд: } \varphi_a = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{q}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \frac{R_2 - R_1}{R_2 \cdot R_1},$$

де  $\varepsilon$  – відносна електрична проникність середовища (для повітря  $\varepsilon \approx 1$ ),  
 $\varepsilon_0$  – діелектрична стала ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м).

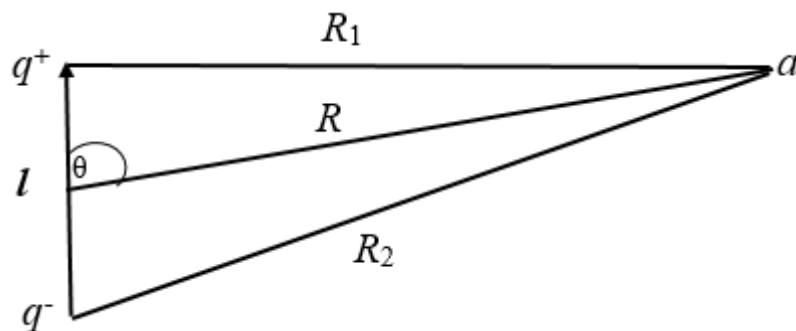


Рис. 2.24. Схема до розрахунку напруженості електричного поля електричного диполя

У реальних умовах  $R \gg l$ , тобто скалярний потенціал електричного поля дорівнює:

$$\varphi \approx \frac{P \cdot \cos \theta}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^2}.$$

У полярних координатах напруженість електричного поля на площині дорівнює:

$$E_R = -\frac{\partial \varphi}{\partial R} = \frac{P \cdot \cos \theta}{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3}; \quad \text{радіальна складова,}$$

$$E_\theta = -\frac{\partial \varphi}{R \cdot \partial \theta} = \frac{P \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3}; \quad \text{кутова складова,}$$

$E_L = 0$ ; кутова складова для координати  $Z$ .

Тобто є можливість розглядати просторові зміни електричного поля у одній потрібній площині:

$$E = \sqrt{E_R^2 + E_\theta^2} = \frac{P}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R^3} \cdot \sqrt{1 + 3 \cdot \cos^2 \theta}$$

Наведене надає змогу раціоналізувати або навіть оптимізувати з точки зору електромагнітної безпеки розміщення багатьох джерел електричного поля дипольного типу.

Розрахунки напруженостей магнітних полів є аналогічними (електричний дипольний момент  $P$  замінюється на магнітний момент  $m$ ), відповідно  $\varepsilon \cdot \varepsilon_0$  замінюється на  $\mu \cdot \mu_0$ .  $m = i \cdot S$ ,

де  $i$  – струм у контурі;

$S$  – площа контуру;

$\mu$  – відносна магнітна проникність середовища (для повітря  $\mu = 1$ );

$\mu_0$  – магнітна стала ( $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м).

$$H_R = \frac{m \cdot \cos \theta}{2\pi \cdot R^3}; \quad H_\theta = \frac{m \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot R^3}.$$

Зазвичай, нормується індукція магнітного поля  $B$ :  $B = \mu \mu_0 H$ .

У багатьох випадках необхідно розрахувати магнітне поле некомпенсованого електричного струму. Для сегменту провідника зі струмом

воно визначається як :

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2),$$

де  $\mu$  – відносна магнітна проникність середовища;

$\mu_0$  – магнітна стала;

$I$  – ефективне значення електроструму;

$r$  – відстань від провідника до точки визначення поля;

$\varphi_1, \varphi_2$  – кути між сегментом лінії і напрямком до точки визначення поля (відраховуються в один бік).

А за протікання електроструму периметром прямокутного приміщення

значенні магнітного у його центрі

$$B = \frac{2\mu\mu_0 I \sqrt{x^2 + y^2}}{\pi xy}$$

де  $x, y$  – лінійні розміри приміщення.

Наведені підходи до розрахункового визначення кількісних значень електричних і магнітних полів надають змогу оцінювати стан електромагнітної безпеки за наявності різного кількісного й якісного складу електричного та електронного технологічного обладнання як на стадіях проектування виробництва, так і під час модернізації парку обладнання.

Для моделювання просторових розподілів електромагнітних полів потужного електротехнічного обладнання (електропривод, турбогенератори, індукційні металургійні печі) доцільно використовувати рівняння Гауса для скалярного магнітного потенціалу у сферичній системі координат  $U(r, \theta, \varphi)$ , що обумовлене необхідністю врахування просторових сферичних гармонік, які мають різні просторові залежності.

У загальному випадку напруженість магнітного поля окремого джерела

визначаються як

$$\vec{H} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n a_{nm}^M \vec{H}_{nm},$$

де у сферичних координатах  $\vec{H} = H_{nm} \vec{e}_r + H_{\nu nm} \vec{e}_\nu + H_{\varphi nm} \vec{e}_\varphi$

$\vec{H}_{nm}$  – векторна сферична гармоніка напруженості магнітного поля окремого джерела;

$H_{nm}$ ,  $H_{\nu nm}$ ,  $H_{\varphi nm}$  – проекції векторної сферичної гармоніки на осі системи координат;

$\vec{e}_r$ ,  $\vec{e}_\nu$ ,  $\vec{e}_\varphi$  – одиничні вектори сферичної системи координат;

$a_{nm}^M$  - ваговий коефіцієнт векторної сферичної гармоніки.

Складові вектора  $\vec{H}$  джерела отримуються додаванням за усіма цілими  $n$  і  $m$  та є співвідношеннями для узагальненої математичної моделі магнітного поля:

$$H_r(r, \nu, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n a_{nm}^M (n+1) r^{-n-2} P_n^m(\cos \nu) e^{im\varphi}$$

$$H_\nu(r, \nu, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n -a_{nm}^M r^{-n-2} \frac{d}{d\nu} P_n^m(\cos \nu) e^{im\varphi}$$

$$H_\varphi(r, \nu, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n a_{nm}^M r^{-n-2} i \frac{m}{\sin \nu} P_n^m(\cos \nu) e^{im\varphi}$$

Значення вагових коефіцієнтів визначаються експериментально на базовій поверхні. Такою поверхнею для окремих джерел є поверхня пристрою, тобто для визначення параметрів магнітного поля на будь-якій відстані від джерела  $R$  визначаються параметри поля біля джерела, що відповідає відстані  $R_0$ . Цей підхід було використано для моделювання поширення та просторових змін магнітних полів потужних локальних джерел. Моделювання поширення електричних і магнітних полів окремих джерел здійснюється з використанням стандартних пакетів програм, а визначення інтегральних значень магнітних полів – з використанням розробленого програмного забезпечення, що буде показано у розділі 4.

Сумарне електромагнітне навантаження на працюючих визначається порівнянням фактичних значень напруженостей поля з гранично допустимими



за методикою, наведеною у [233]. Згідно з вимогами цього нормативу в обраній точці необхідний показник визначається як модуль вектора напруженості електричного поля окремого джерела  $E$  і розраховується зі співвідношення

$$E = \sqrt{(E_x)^2 + (E_y)^2 + (E_z)^2},$$

модуль вектора напруженості магнітного поля  $H$

$$H = \sqrt{(H_x)^2 + (H_y)^2 + (H_z)^2}.$$

Значення магнітної індукції  $B$  розраховується зі співвідношення

$$B = \mu_0 H,$$

де  $\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м – магнітна стала.

Для частот, нижчих за 300 МГц, проводяться вимірювання напруженості поля для кожного джерела окремо при відключенні інших. Сумарна напруженість поля у кожній точці вимірювання у разі наявності джерел, які працюють у частотних діапазонах, що мають однакові ГДР, розраховуються за

формулами: 
$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}, \quad H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}.$$

У разі наявності джерел, які генерують електромагнітні поля частотних діапазонів, для яких встановлені різні ГДР, витримувалась вимога:

$$\frac{E_1^2}{ГДР_1^2} + \frac{E_2^2}{ГДР_2^2} + \dots + \frac{E_n^2}{ГДР_n^2} + \frac{H_1^2}{ГДР_1^2} + \frac{H_2^2}{ГДР_2^2} + \dots + \frac{H_n^2}{ГДР_n^2} \leq 1$$

де  $E$  і  $H$  – вимірні значення напруженості електричного і магнітного поля; ГДР – гранично допустимі рівні відповідних частотних діапазонів.

Слід зазначити, що наведене порівняння фактичних рівнів поля з гранично допустимими є відмінним від підходу, наведеного у іншому чинному нормативі з електромагнітної безпеки. Однак таке співвідношення фігурує у останньому нормативі, який набув чинності в Україні [233].

Для отримання вихідних даних щодо проведення моделювання поширення електромагнітних полів та перевірки адекватності отриманих моделей виконувались натурні вимірювання рівнів електричних і магнітних полів.

Вимірювання напруженостей електричних і магнітних складових електромагнітних полів промислової частоти здійснювалося серійним повіреним приладом ПЗ-50 згідно інструкції з експлуатації [234].

Чутливості приладу:

- за електричною складовою – 10 В/м;
- за магнітною складовою – 0,1 А/м.

Похибка вимірювань не перевищувала 20%. Для коректності отриманих результатів кількість вимірювань у кожній точці була не менша за 20. Вимірювання виконувалися за різних просторових орієнтацій антен-перетворювачів ЕЗ-50 (для електричного поля), НЗ-50 (для магнітного поля), хоча для останньої це не обов'язково. В протокол випробувань заносилися максимальні покази приладу.

У багатьох випадках для коректності отримання експериментальних даних на окремих територіях в умовах змінних електричних навантажень на силові мережі потрібен неперервний моніторинг електромагнітної обстановки. Це реалізовувалося з використанням спеціально розробленого обладнання, яке додатково надає змогу контролювати значення параметрів електромагнітних полів у неперервному режимі [235].

## Висновки до розділу 2

1. Створення системи моніторингу авіаційного шуму здійснюється згідно методичного підходу щодо оцінювання шумового навантаження у зоні аеропорту шляхом моделювання з урахуванням санітарно-гігієнічних нормативів впливу шуму відповідно до національних та міжнародних законодавчих актів.

2. Фахівці з моделювання авіаційного шуму самостійно повинні створювати національні комп'ютерні програми з розрахунку рівнів авіаційного шуму, враховуючи логічну схему методології, наведеної документі ICAO DOC 9911 [16], міжнародної бази даних ANP акустичних і льотно-технічних

характеристик турбореактивних, важких гвинтових та турбопропелерних повітряних суден, особливостей конкретного аеропорту, точності розрахунків.

3. Модель руху повітряного судна повинна містити опис етапів: а) розбіг, б) зльот і початковий набір висоти на 450 м, в) підйом з 450 м початкової крейсерської висоти до обраної швидкості польоту і обраної висоти за маршрутом, г) політ на обраній висоті, д) зниження з обраної висоти до висоти 10,7 м, е) підготовка до посадки, ж) посадка.

4. Для побудови контурів шуму застосовується метод сегментації на різних ділянках траєкторії польоту, який спирається на БД ANP, що містить інформацію про криві залежності шум-потужність-відстань (NPD – noise-power-distance). Через БД ANP визначаються базові рівні звуку одиночного впливу і коригуються з урахуванням різниці між тими, що моделюються, і вихідними атмосферними умовами, швидкістю літака і різницею між рівнями звуку, що випромінює вниз і у бічному напрямку (обумовлено бічною направленістю або ефектом місця встановлення двигуна та бічним затуханням).

5. Рівень звуку при одиничному впливі розраховується шляхом інтерполяції значень в базі даних ANP у випадку, якщо табличні значення потужності  $P$  та відстані  $d$  не будуть точними. Між табличними значеннями потужності використовується лінійна інтерполяція, а для табличних значень відстані застосовується логарифмічна.

6. При виконанні досліджень обов'язковим є проведення вимірювань за стандартними (нормативними) вимогами і аналогічне оброблення результатів вимірювань, що виключає різночитання і суперечності результатів випробувань стандартного електричного та електронного обладнання.

7. Використання розрахункових методів визначення електричних і магнітних складових електромагнітних полів надає змогу не тільки оцінити внесок окремих джерел у загальний електромагнітний фон, а й раціоналізувати або оптимізувати загальні схеми розміщення обладнання з точки зору електромагнітної безпеки. Такі методи важливі при проведенні проектних робіт

або на стадіях оновлення та модернізації електричного та електронного технологічного обладнання.

8. Моделювання просторових розподілів електричних і магнітних полів здійснюється з урахуванням геометричних характеристик джерела поля (локалізоване або розосереджене), фізичної природи поля. При їх моделюванні враховуються залежності зміни напруженості поля. Магнітне поле промислової частоти можна вважати квазістаціонарним з прийнятною похибкою розрахунків, що дозволяє використовувати в розрахунках закон Біо-Савара. При моделюванні магнітного поля електричних машин доцільно використовувати сферичну систему координат, поверхня машини середнього радіуса є базовою сферою. При цьому враховуючи, що усе сучасне електротехнічне обладнання має магнітні поля наступних типів: дипольне, дипольно-квадрупольне та дипольно-октупольне, тому для мінімізації похибок моделювання є обов'язковим врахування сферичних гармонік магнітного поля.

### РОЗДІЛ 3

## ОЦІНЮВАННЯ ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ПОВІТРЯНИХ СУДЕН В РАЙОНІ АЕРОПОРТУ

Соціально-економічна та екологічна значущість проблеми негативного впливу авіаційного шуму як на людей, так і на навколишнє середовище обумовлена збільшенням інтенсивністю польотів та чисельністю людей, що працюють та проживають в умовах впливу акустичного фактору [236]. Крім того, реконструкція та експлуатація будь-якого аеропорту негативно впливає як на навколишнє середовище, так і на населення, яке проживає поряд із зоною аеропорту. Дослідження щодо мінімізації негативного впливу як на людей, так і на довкілля щодо діяльності авіаційного транспорту у зоні аеропорту розглянуто у роботі [237, 238].

3.1. Зменшення негативного впливу шуму від діяльності авіаційного транспорту у зоні аеропорту

Комплекс заходів зі зниження та прогнозування шумового навантаження на населення з боку авіаційного транспорту запропоновано у роботі [239], а саме:

- заміна старих літаків більш новими моделями, які сертифіковані відповідно до нових стандартів і мають набагато нижчий рівень шуму;
- обмеження експлуатації ПС в нічний час з 22<sup>00</sup> до 6<sup>00</sup> на зльоти і посадки для всіх видів повітряного сполучення;
- створення умов, за яких дія шуму від ПС суттєво знижується (вибір маршрутів ПС, режимів зльоту та посадки, обмеження інтенсивності польотів в межах певного періоду, регламентація числа зльотів і посадок транспортних літаків протягом доби, обмеження технічного обслуговування ПС при наземній гонці двигунів у нічні та ранкові години);

- запровадження грошових зборів пропорційно до шуму, що генерується ПС;
- узгодження генерального плану розвитку аеропорту, затвердженого органом міської ради і розрахованого на 10 – 20 років, з планом житлової забудови території, де розташований аеропорт;
  - обов'язкове забезпечення захисних споруд та звукоізоляції при введенні в експлуатацію житлових приміщень на певній відстані від аеропорту;
  - застосування інструментальної системи контролю рівнів авіаційного шуму з використанням шумомірів.

Крім того, як зазначалося у п.1.4 реалізація технічних рішень, що стосуються методів зниження шуму реактивного газотурбінного двигуна, потребує від виробників повітряних суден багато часу і значних фінансових, людських ресурсів. Саме тому, розроблення системи моделювання поширення авіаційного шуму з урахуванням особливостей конкретного аеропорту дозволить оцінити вплив шуму на населення, запропонувати обґрунтовану низку заходів щодо його зменшення в умовах поточної експлуатації аеропорту, спрогнозувати вплив шуму щодо майбутньої модернізації аеропорту, визначити зони для житлової забудови з виконанням нормативів шуму, планувати встановлення захисних споруд, якщо нормативи порушуються.

### 3.2. Удосконалення методу розрахунку рівнів шуму для оцінки одиночної події

З метою підвищення точності обчислення максимального рівня звуку для одиночної події запропоновано модель, яка враховує не тільки шум від двигунів, як це прийнято в моделі ІСАО, а й шум від потоків обтікання крила, засобів його механізації, випущених шасі, тощо, який є домінантним на етапах зниження перед посадкою сучасних літаків з ТРДД з надвисоким ступенем двоконтурності  $m_{ov}=8...12$ , поправку на бокове затухання з урахуванням спектрального класу літака на етапах зльоту і посадки для акустично жорсткої (асфальтобетону)

поверхні, поправку на спрямованість випромінювання у задню напівсферу для вагових категорій (груп) літаків. Напрацювання щодо створення системи моделювання авіаційного шуму в районі аеропорту опубліковано у низці робіт [237, 240–250].

### 3.2.1. Моделювання ефектів бічного затухання звуку для всіх спектральних класів літаків

Траєкторія руху літака поділяється на сегменти, принцип сегментації базується на специфічній зміні параметрів польоту по відрізку. Максимальний рівень звуку  $L_{max,seg}$ , який утворюється окремим сегментом траєкторії польоту за умови відсутності перешкод на шляху прямого звукового променя у загальному вигляді може бути описаний наступною формулою [16, 224]:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, d) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, l) + \Delta_{SOR} \quad (3.1),$$

а внесок до рівня експозиції звуку  $L_E$  від одного сегмента траєкторії польоту обчислюється як  $L_{E,seg} = L_{E\infty}(P, d) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, l) + \Delta_F + \Delta_{SOR}$ ,

де  $L_{max}(P, d)$  і  $L_{E\infty}(P, d)$  – поточні значення рівнів звуку від окремого сегменту траєкторії польоту, які визначається на основі інтерполяції табличних даних залежностей шум-потужність-відстань для дійсних значень тяги або потужності двигуна  $P$  та відстані  $d$ . Табличні дані (NPD\_data) залежностей «шум-потужність-відстань» використовуються з для досліджуваних типів ПС відповідно до його ID-коду у міжнародній БД «Aircraft and Noise Performances Databases» (ANP) [208], обраного критерію оцінювання шуму, типу виконуваної операції (відправлення/прибуття) визначено потужність та в залежності від відстані (61, ..., 762 м) визначено значення шуму.

Складові у формулі (3.1) є коригувальними членами, які враховують наступні ефекти:

$\Delta_I(\varphi)$  – поправка на ефект компоновки (місця встановлення) двигунів в дБ, в залежності від кута нахилу  $\varphi$  (кут між площиною крила та траєкторією

поширення звуку до точки контролю); описує зміну бічної спрямованості випромінювання шуму за рахунок його екранування, заломлення і відбиття, викликане поверхнями планера літака, самих двигунів і оточуючими потоками повітря з різними швидкостями;

$\Delta(\beta, l)$  – поправка на бічне затухання звуку ( $\beta$  – кут візирування,  $l$  – відстань від точки спостереження до лінії шляху); має суттєве значення при поширенні звуку в умовах малих кутів спостереження відносно поверхні землі, бічне затухання враховує взаємодію між прямим і відбитим звуковими променями (ефект інтерференції прямого і відбитого звукових променів або так званий ефект «впливу земної поверхні»), а також враховує вплив ефектів атмосферних нерівномірностей (в першу чергу, викликаних поверхнею землі), які заломлюють звукові промені в міру їх проходження до місця розташування спостерігача в бічному напрямку від траєкторії польоту.

$\Delta_{SOR}$  – поправка на спрямованість випромінювання шуму у задню напівсферу від літака, що більшою мірою визначається шумом, випромінюваним струменем вихлопних газів.

$\Delta_V$  – поправка на тривалість звучання: табличні дані «шум-потужність-відстань» з таблиці NPD\_data приведені до швидкості польоту 160 вузлів (87,1 м/с). Поправка використовується для обчислення рівнів експозиції для неосновних швидкостей і не застосовується до обчислення  $L_{max, seg}$ .

$\Delta_F$  – поправка на кінцеву довжину сегмента (шумова частка), яка враховує кінцеву довжину сегмента і явно сприяє зменшенню експозиції шуму, ніж від нескінченного сегмента. Вона застосовується тільки до значень експозиції  $L_E$ .

Поправка на ефект компоновки двигунів  $\Delta_I(\varphi)$  в дБ обчислюється за

формулою [252]:

$$\Delta_I(\varphi) = 10 * \log \left[ \frac{(a * \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)^b}{(c * \sin^2 \varphi + \cos^2 2\varphi)} \right],$$

де  $\varphi$  – кут нахилу;  $a=0,00384$ ,  $b=0,0621$ ,  $c=0,8786$  для двигунів, встановлених під крилами,  $a=0,1225$ ,  $b=0,3290$ ,  $c=1$  для двигунів, встановлених на фюзеляжі. Для гвинтових літаків  $\Delta_I(\varphi)=0$ .



Для підвищення точності обчислення рівнів звуку за критерієм  $L_{Amax}$  в першу чергу необхідно з високою точністю обчислювати поправку на ефект впливу земної поверхні  $A(\beta, l)$  та використовувати NPD-залежності з бази даних ANP для визначення поточного значення рівня звуку окремого сегменту траєкторії польоту. Однак базові значення NPD-залежності (для відстаней 100-700 м від траєкторії польоту літака) отримують під час сертифікаційних вимірювань у трьох точках як для зльоту, так і посадки мікрофоном на висоті 1,2 м над земною поверхнею. В таких умовах утворюється як прямий, так і відбитий промінь від поверхні землі, інтерференція між якими створює ефект впливу земної поверхні у виміряний рівень звуку навіть при повздовжніх променях (в точках під траєкторією польоту), а не тільки для бічних (в точках збоку від траєкторії польоту). Тобто поправка на «бічне затухання авіаційного шуму» є методологічно не вірним визначенням. Однак цей факт на сьогодні не враховується методологією ICAO DOC 9911 та стандартом SAE AIR 5662 M. Так для профілю зльоту в точках встановлення мікрофону під траєкторією зльоту ефект інтерференції виявлений величиною до 6 дБА (рис. 3.1. а), а для профілю посадки 4 дБА (рис. 3.1. б), що також вносить похибку у розрахунок максимального рівня звуку за умов нехтування ефектом впливу земної поверхні при сертифікаційних вимірюваннях шуму. Чинна методологія ICAO не враховує наявність ефекту інтерференції звуку при вимірюванні NPD-залежностей, тобто цей ефект враховується двічі включенням поправки  $A(\beta, l)$ . В роботі запропоновано скористатися моделлю інтерференції прямих і відбитих променів Chien-Soroka, яка була підтверджена на результатах експериментальних досліджень Паркіна і Скоулза для стаціонарно встановленого двигуна на аеродромі Радлет (Північний Лондон, Великобританія) та сертифікаційних досліджень шуму для літака Аеробус-321 (Тулуза, Франція).

У дисертаційній роботі змодельовано ефекти впливу земної поверхні для спектральних класів з турбореактивними (ТJ), турбовентиляторними (TF) (рис. 3.2. а) та гвинтовими і/або турбогвинтовими (TP) двигунами для етапів зльоту і посадки літаків (рис. 3.2. б).

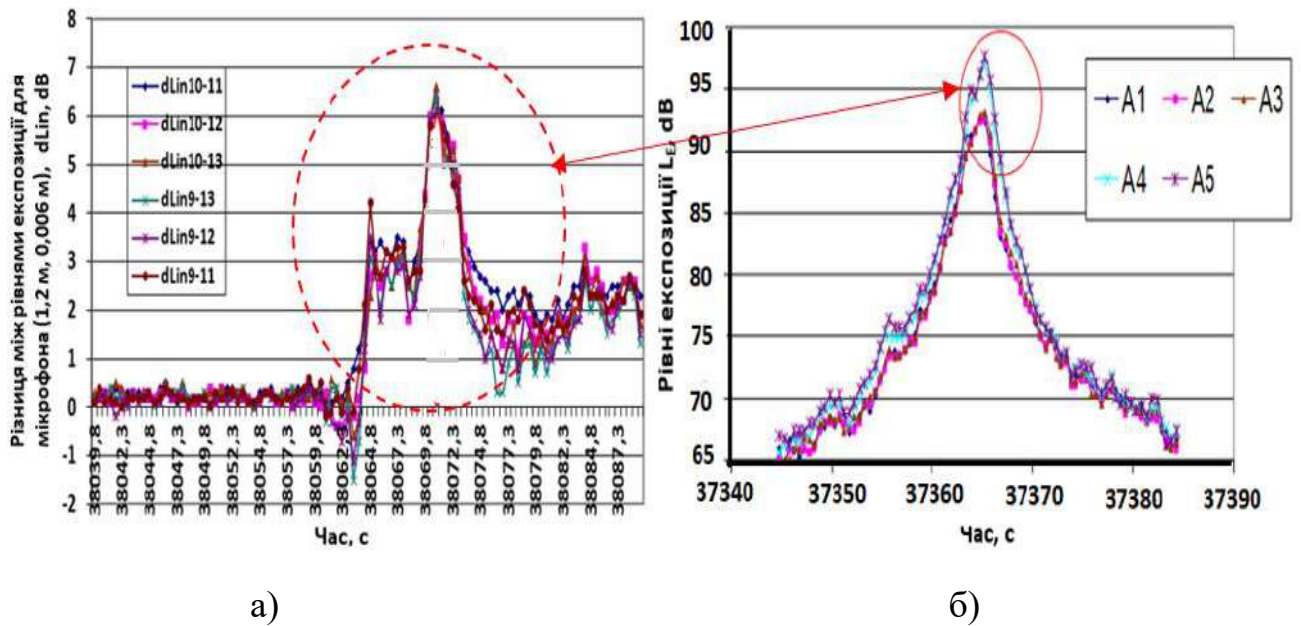


Рис. 3.1 Ефект інтерференції, виміряний під: а) траєкторією зльоту /набору висоти літака; б) траєкторією зниження літака перед посадкою

Також запропоновано виконати удосконалення у два етапи:

- 1) вилучити внесок ефекту інтерференції з NPD-залежностей;
- 2) обчислити поправку на ефект впливу земної поверхні для етапів зльоту і посадки для трав'яного покриття (акустично м'яка поверхня відбиття звуку (рис. 3.3. а) та для асфальтобетону (акустично жорсткої поверхні (рис. 3.3. б).

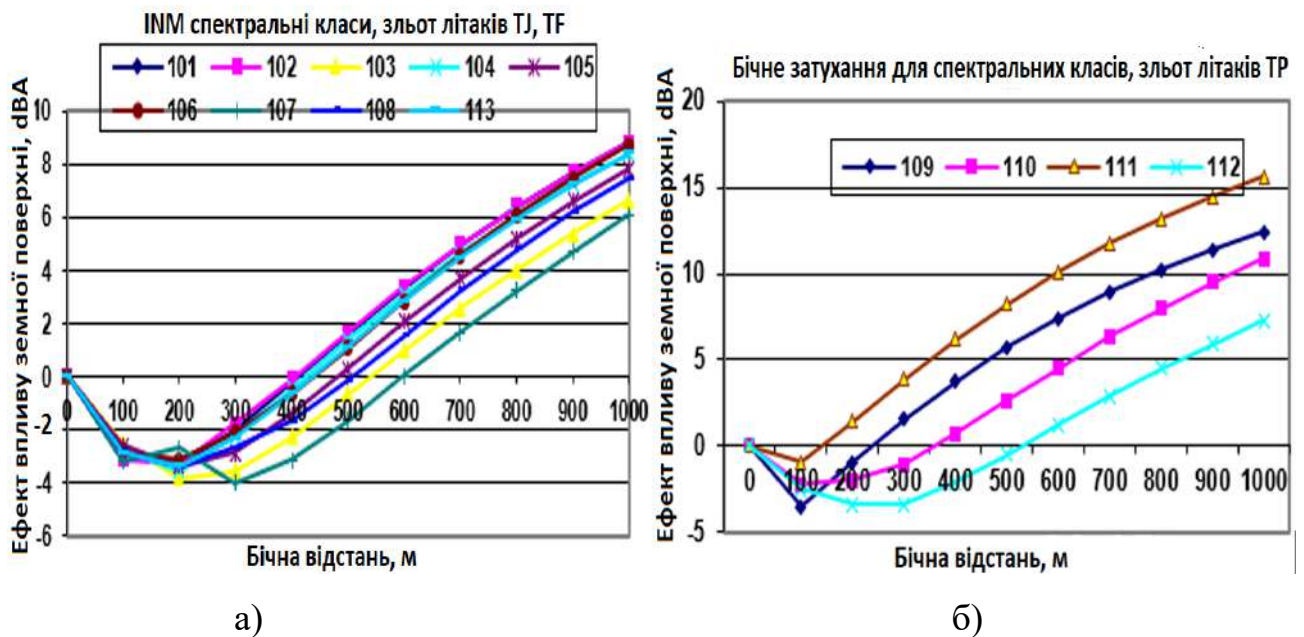


Рис. 3.2 Бічне затухання профілю зльоту для спектральних класів:

- а) літаків з двигунами TJ та TF;                      б) літаків з двигунами TP

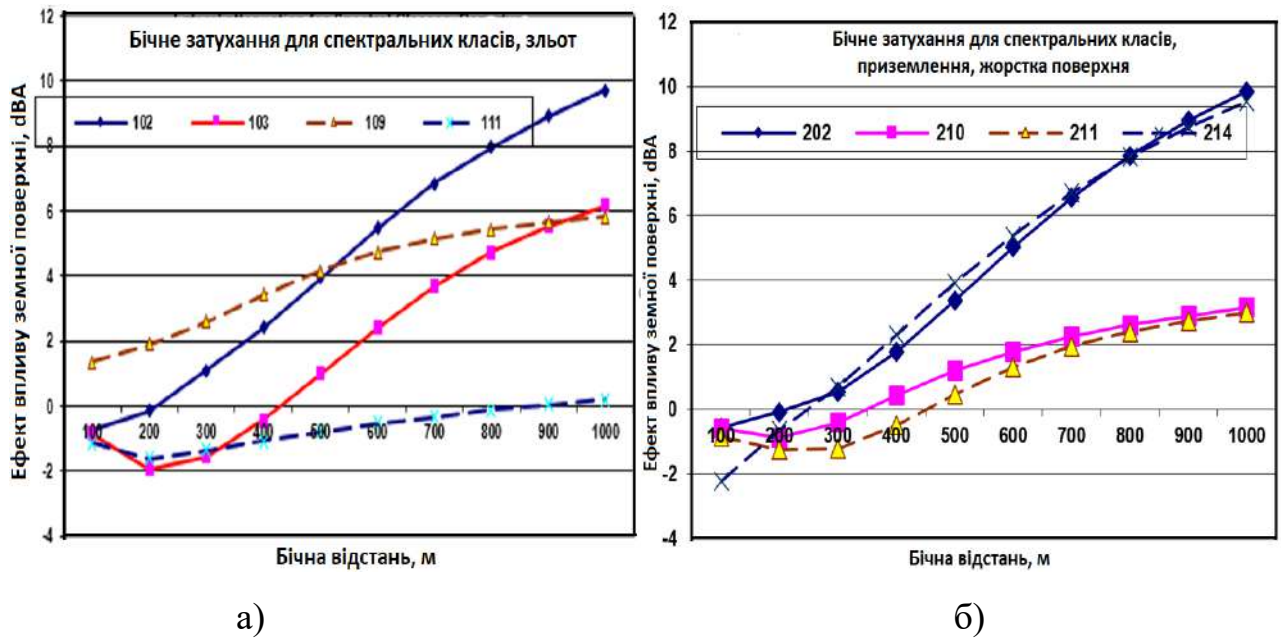


Рис. 3.3 Бічне затушення профілю

а) зльоту для трав'яного покрову      б) посадки для жорсткої поверхні

При цьому було виявлено суттєві відмінності від результатів стандарту SAE 1751, залежності якого побудовані для вимірних значень ефекту «бічного затушення звуку» для типів літаків, що вже вилучені з експлуатації та без врахування ефектів рефракції звукових хвиль в умовах реальної атмосфери. Ці результати підтверджують наявність типової залежності ефекту впливу земної поверхні: розбіжність в значеннях ефекту для різних спектральних класів досягає 5 дБА і більше, навіть в межах однієї групи літаків.

### 3.2.2. Моделювання рефракції при поширенні звуку на відкритому повітрі

Акустичні ефекти поблизу від поверхні землі за рахунок наявності вертикального градієнту швидкості звуку, які мають місце за певних умов, а саме, наявності градієнту температури або градієнту швидкості вітру, чинять певний внесок, тому у моделях поширення звуку ними не можна нехтувати. Між тим у сучасній методології розрахунку контурів шуму [252] акустичні ефекти поблизу від поверхні землі не враховуються. З метою удосконалення загальної моделі розрахунку рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту необхідно у моделі

поширення шуму від ПС враховувати вплив ефекту рефракції при поширенні звукових хвиль з однією та декількома точками відбиття [261, 262].

Сучасні дослідження в області акустики на відкритому просторі від поверхні землі значною мірою полягають у виявленні чутливості рівнів звуку до параметрів навколишнього середовища, властивостей ґрунтової поверхні, що відбивають звукові промені. [263]. Погодні умови впливають на рівень звуку, який збільшується зі зростанням температури. Необхідно також враховувати добові та сезонні коливання погодних умов. Звукові хвилі рухаються з постійною швидкістю з урахуванням напрямку і швидкості вітру, тому вітер і температура є важливими вхідними параметрами при поширенні акустичних хвиль у відкритому просторі при моделюванні рефракції [264, 265]. У відкритому просторі поширення звуку залежить від багатьох чинників, а саме:

- а) геометрії джерела і типу джерела випромінювання (точкове, лінійне, когерентне, некогерентне);
- б) метеорологічних умов (вітер і температурні коливання, турбулентність атмосфери);
- г) атмосферного поглинання звуку;
- д) типу місцевості (поглинання і відбиття звуку земною поверхнею);
- е) перешкоди на шляху розповсюдження звуку (будівлі, огорожі, рослинність і т.д.).

Для більшості погодних умов обидва параметри температура і швидкість і напрямок вітру можуть змінюватися в залежності від висоти над рівнем землі, тому і швидкість звуку також змінюється з висотою. Це призводить до того, що звукові хвилі будуть заломлюватися і в реальних умовах вони поширюються уздовж криволінійних траєкторій. Без урахування ефектів акустичної рефракції можливість застосування моделі поширення звуку є обмеженою. За останні 10-15 років спостерігається значний прогрес у прогнозуванні поширення звуку у відкритому просторі. Для обчислення звукового поля у складному зовнішньому середовищі були розроблені чисельні моделі, такі як програма швидкого обчислення акустичного поля FastField (FFP), метод параболічного рівняння (PE метод) та їх

модифікації [266, 267]. Однак ці чисельні методи не можна застосовувати у контексті дослідження фахівцями з проблем шуму, оскільки прямі і відбиті звукові хвилі не розділені у явному вигляді, а чисельні методи вимагають значних обчислювальних ресурсів.

Набагато зручніше використовувати підхід трасування звукових променів [268]. Підхід трасування променів був включений в евристичну модифікацію формули Вейля-Ван дер Поля [269-271]. У цих роботах показано, що отриманий підхід ґрунтується на першому члені асимптотичного рішення повного хвильового рівняння. Також чисельно було доведено, що рішення трасування променів узгоджується досить добре з іншими чисельними схемами як на коротких [269], так і довгих відстанях [268] до тих пір, поки приймач знаходиться в «освітленій» зоні (не в зоні тіні, яка може бути отримана в умовах такого градієнта швидкості звуку, коли спостерігається заломлення звукового променя вверх від земної поверхні).

У разі заломлення зверху вниз або на великих відстанях зазвичай існує багато відбитих звукових променів і у цьому випадку немає спільного рішення трасування променів. У випадку заломлення вверх на великих відстанях приймач може бути поза межами тіні і згідно теорії випромінювання звук відсутній. У цій ситуації має бути використана евристична модифікація [269].

Евристична модифікація передбачає, що профілі багатьох реальних швидкостей звуку можуть бути наближені до лінійного профілю швидкості звуку. Траєкторії прямих і відбитих променів для ідеалізованого випадку вертикального лінійного профілю швидкості звуку являє собою дуги кіл з радіусом

$$R = \frac{c_0}{\frac{dc}{dz} * \cos \theta},$$

де  $c_0$  – початкова швидкість звуку у земної поверхні;

$dc/dz$  – градієнт вертикального профілю швидкості звуку, в (м/сек)/м;

$\theta$  – кут звукового променя досліджуваного акустичного джерела з горизонтальною площиною.

В умовах негативного вертикального температурного градієнта або поширення променя звуку проти вітру звукові промені є вигнутими вверх від земної поверхні, на великих відстанях до точки приймача навіть можливе утворення акустичної тіньової зони навколо нього. Якщо профіль швидкості звуку не є лінійним, формується каустика або область фокусування звуку. Метод трасування звукових променів є високочастотним наближенням моделі поширення хвиль у заломлюючому середовищі. Умовами для реального трасування променів у необмеженому середовищі є:

$$\lambda_0 n' \ll n^2 \approx 1, \quad \lambda_0 \frac{A'}{A} \ll 1,$$

де  $n$  – показник заломлення,  $n'$  – просторова похідна від показника заломлення,

$\lambda_0$  – довжина хвилі,  $A$  – амплітуда хвилі.

Іншими словами, швидкість звуку і амплітуда хвилі не можуть істотно змінюватися в діапазоні довжини хвилі. Для профілів швидкості звуку у вище зазначених випадках  $\lambda_0 n' \approx 10$  для 10 Гц і  $10^{-3}$  для 100 Гц, тобто критерій є задовільним для 100 Гц, але може бути несуттєвим для 10 Гц.

Для однорідного випадку повне звукове поле формується за рахунок прямих і відбитих променів відповідно до рівняння [159]:

$$\varphi = \frac{\exp(ikl_1)}{4\pi l_1} + \{R(\theta) + (1 - R(\theta))F(p_e)\} \frac{\exp(ikl_2)}{4\pi l_2},$$

де  $\frac{\exp(ikl_1)}{4\pi l_1}$  – акустичне поле прямих променів,

$\{R(\theta) + (1 - R(\theta))F(p_e)\} \frac{\exp(ikl_2)}{4\pi l_2}$  – акустичне поле відбитих променів,

де  $R(\theta)$  – коефіцієнт відбиття сферичної хвилі від поверхні,

$l_1$  – довжина прямого променя,  $l_2$  – довжина відбитого променя,

$F(p_e)$  – комплексна функція, що враховує взаємодію сферичної хвилі з поверхнею, яка має кінцевий імпеданс,

$k$  – хвильове число, яке дорівнює  $2\pi f/c$  ( $f$  – частота звуку,  $c$  – швидкість звуку),

$\theta$  – кут падіння променя.

Коефіцієнт відбиття сферичної хвилі від поверхні обчислюється за формулою:

$$R(\theta) = R_p + (1 - R_p) * F(p_e),$$

де  $R_p$  – коефіцієнт відбиття від поверхні землі для плоскої звукової хвилі,

$$R_p = \frac{\beta - \cos \theta}{\beta + \cos \theta}, \quad \beta - \text{адмітанс поверхні.}$$

Комплексна функція, яка враховує взаємодію сферичної хвилі з поверхнею та має кінцевий імпеданс,  $F(p_e)$  обчислюється наступним чином [158]:

$$F(p_e) = 1 + i\sqrt{p_e} * \exp(-p_e) * \exp(-ip_e);$$

$$p_e = \sqrt{ikr/2} * [\beta + \cos \theta], \quad \beta = 2\pi * \sqrt{1 + (\Delta f / 2f)^2},$$

де  $\Delta f$  – ширина частотної смуги,  $f$  – центральна частота смуги.

Ефект інтерференції для прямих та відбитих променів є результатом різниці їх фаз:  $k(l_1 - l_2)$ . Оскільки хвильове число не є постійним уздовж променів для неоднорідного середовища через швидкість звуку, яка змінюється в залежності від висоти, у цьому випадку різниця у часі розповсюдження хвилі ( $\tau - \tau'$ ) розглядається у евристичній модифікації як один з найважливіших ефектів, що впливає на результуюче звукове поле (рівень звуку) в точці розміщення приймача звуку.

Наступне припущення щодо використання евристичного підходу полягає у тому, що існує багато звукових променів у заломлюючій атмосфері поблизу імпедансної поверхні землі, які можуть відбиватися від поверхні і складатися у точці приймача. Навіть для коротких відстаней кут падіння відбитого променя і довжини як прямого, так і відбитого променів змінюється у порівнянні з однорідним випадком. Кожен промінь може чинити свій внесок у рівень шуму у точці приймача, включаючи вплив кожного відбиття від земної поверхні уздовж конкретного променя.

За допомогою наступних формул можна обчислити наближено кількість променів  $N$ , які досягають приймача [272]:

$$N = \left( \left[ \frac{d - l_1}{2l} \right] + \left[ \frac{d - l_2}{2l} \right] \right) + 2,$$

$$l_1 = \sqrt{(h_r + a^{-1})^2 - (h_s + a^{-1})^2}, \quad l = \sqrt{h_r^2 + 2h_r/a}, \quad l_2 = 2l - l_1,$$

де  $[x]$  це ціла частина  $x$ ,  $d$  – відстань поширення,  $h_s$  - висота джерела звуку,  $h_r$ , – висота приймача звуку,  $a$  – градієнт швидкості звуку за умови лінійного профілю швидкості звуку атмосфери,

$l_1$  – довжина шляху прямого променя,  $l_2$  – довжина шляху відбитого променя.

Промені для лінійного профілю швидкості звуку у навколишньому середовищі можуть бути поділені у різні послідовності, де всі промені, що належать одній і тій же послідовності, мають однакову кількість наземних відбиттів. Для всіх, крім першої послідовності, у кожній послідовності буде чотири променя. Послідовність, якій належить промінь, може бути обчислена за її номером, використовуючи наступну формулу:

$$n = \left[ \frac{N-1}{4} \right] + 1. \quad (3.2)$$

Для кожної послідовності променів є два променя з такою максимальною кількістю точок, як кількість наземних відбиттів. Для того, щоб позбутися від нескінченості і зменшити необхідний час обчислень, ще простіша модель може бути отримана з використанням наступних рівнянь:

$$N_t = \frac{2d - l_1 - l_2}{l},$$

$$N = N_t \text{ якщо } N_t \geq 2; \quad N = 2 \text{ якщо } N_t < 2.$$

Параметри відбитих променів визначаються за алгоритмом, наведеним у [273]. Особливість алгоритму полягає у наступному. Ширина каустичної зони після  $N$  відбиттів визначається за формулою:

$$\delta = \sqrt[3]{4N} * \frac{H}{\Psi_G},$$

де  $H$  – товщина шару розповсюдження звукової хвилі,

$\Psi_G$  – кут ковзання при відбитті (протилежний куту падіння  $\theta$  звукового променя).



Товщина шару розповсюдження звукової хвилі є параметром дифракції звуку для випадку повного аналізу розповсюдження хвилі вгору і вниз, тобто для рефракції звуку в умовах лінійного градієнта швидкості звуку і обчислюється:

$$H = \sqrt[3]{2ak_0^2},$$

де  $k$  – хвильове число,  $a$  – градієнт швидкості звуку, який обчислюється:

$$a = \frac{1}{c(0)} \frac{dc}{dz} = \frac{1}{R_C},$$

де  $R_C$  – радіус кривизни променя.

Відстань між відбиттями і максимальною висотою для променя, запущеного під кутом ковзання  $\Psi_G$  можна обчислити геометрично, оскільки траєкторії променів для лінійних градієнтів температури або швидкості вітру є дуги кіл (рис. 3.4).

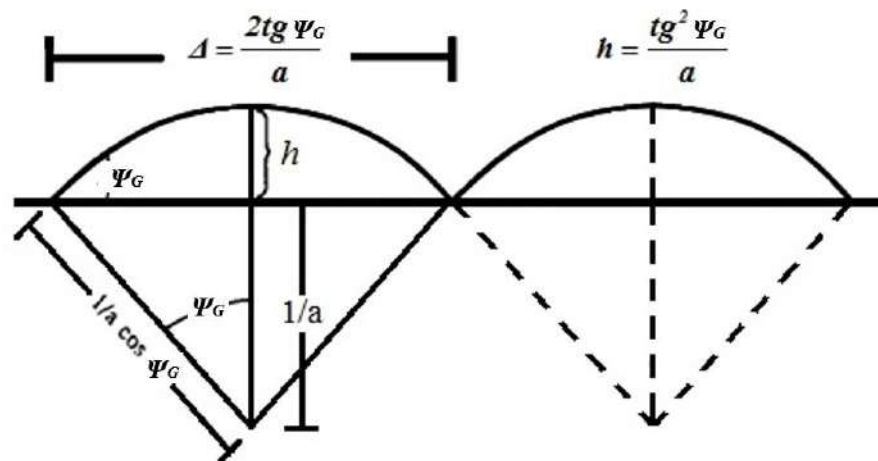


Рисунок 3.4 – Геометрія розповсюдження акустичних променів в атмосфері з лінійним градієнтом швидкості звуку

Дистанція між відбиттями променя від обмежуючої поверхні обчислюється:

$$\Delta = \frac{2tg\psi_G}{a} \quad (3.3).$$

Хідака [274] також визначив, що для лінійних градієнтів швидкості звуку акустичні промені є дугами кола, радіус якого  $R_C$  може бути визначений за

формулою:

$$R_C = \frac{1}{a \cos \psi_G},$$

де  $\Psi_G$  – кут ковзання, який обчислюється як  $\psi_G = \arctg \left[ \frac{aD}{2} + \frac{z_R(2+az_R)}{2D} \right]$ ,

де  $z_R$  – висота променя,  $D$  – довжина променя упродовж земної поверхні.

Центр дуги розташований в горизонтальній площині на висоті (чи за протилежних умов – на глибині)  $z_C = -1/a$ . Таким чином, для джерела, яке розташовано на землі, якщо приймач знаходиться перед вершиною дуги променя (рис. 3.5), довжина вигнутого променя  $r(z_R)$  і час поширення звуку уздовж такого променя  $\tau(z_R)$  можуть бути обчислені з таких виразів:

$$r(z_R) = \frac{1}{a \cos \psi_G} \left[ \arcsin \left\{ (1 + az_R) \cos \psi_G \right\} - \frac{\pi}{2} + \psi_G \right] \quad (3.4),$$

$$\tau(z_R) = \frac{1}{2ac_G} \log \left[ \frac{f(0)}{f(z_R)} \right], \quad (3.5),$$

де  $c_G$  – швидкість звуку у джерелі (тут дорівнює  $c_0$ ), а  $f(z)$  обчислюється як:

$$f(z) = \frac{1 + \sqrt{1 - (1 + az)^2 \cos^2 \psi_G}}{1 - \sqrt{1 - (1 + az)^2 \cos^2 \psi_G}} \quad (3.6)$$

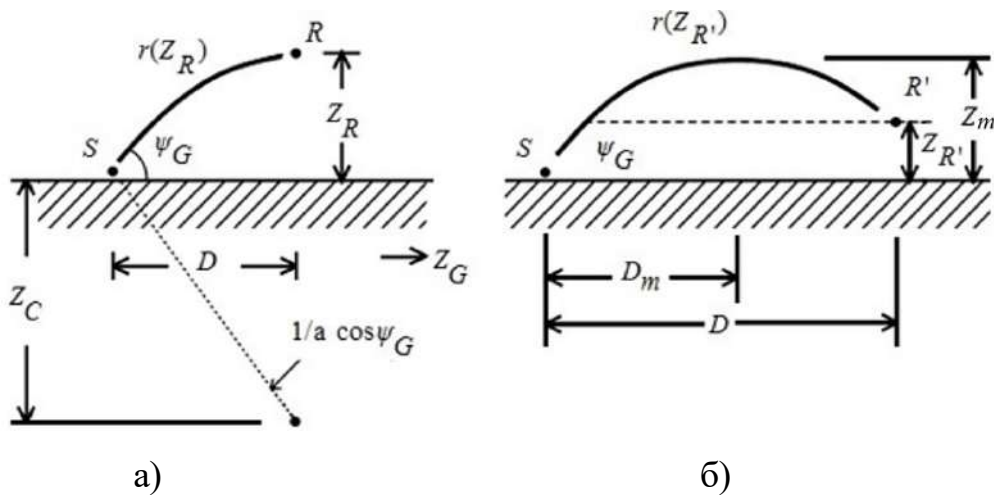


Рис 3.5. Кривизна звукового променя для позитивного градієнта швидкості звуку;

а) приймач перед вершиною викривленого променя,

б) приймач за вершиною викривленого променя

Коли звуковий промінь досягає своєї вершини максимуму (кривизни), дві точки ( $z_R$  та  $z_{R'}$ ) можуть розташовуватися на тій же висоті. Однак рівняння (3.3) і

(3.6) не можуть бути безпосередньо використані для отримання параметрів дуги кола, пов'язаного з  $z_R$ . Відповідно повинні застосовуватися такі формули [275]:

$$r(z'_R) = 2r(z_m) - r(z_R) \quad (3.7)$$

$$\tau(z'_R) = 2\tau(z_m) - \tau(z_R)$$

До цього часу ми виходили з припущення, що джерело розташовано на землі і що висота приймача  $z_R$  була більшою, ніж висота джерела  $z_S$ . У зворотному випадку, коли приймач розташований на землі, необхідно  $z_S$  змінити на  $z_R$  в попередніх рівняннях. У більш загальному випадку, коли ні джерело, ні приймач не розташовані на землі, загальна відстань і час поширення відбитого променя можуть бути отримані шляхом застосування до базової площини зсуву, яка дорівнює мінімальній висоті  $z_R$  або  $z_S$ .

Коли градієнт швидкості (незалежно від температури або від вітру) є великим або коли приймач знаходиться далеко від джерела, спостерігається більше одного відбиття звукового променя від земної поверхні (рис. 3.6).

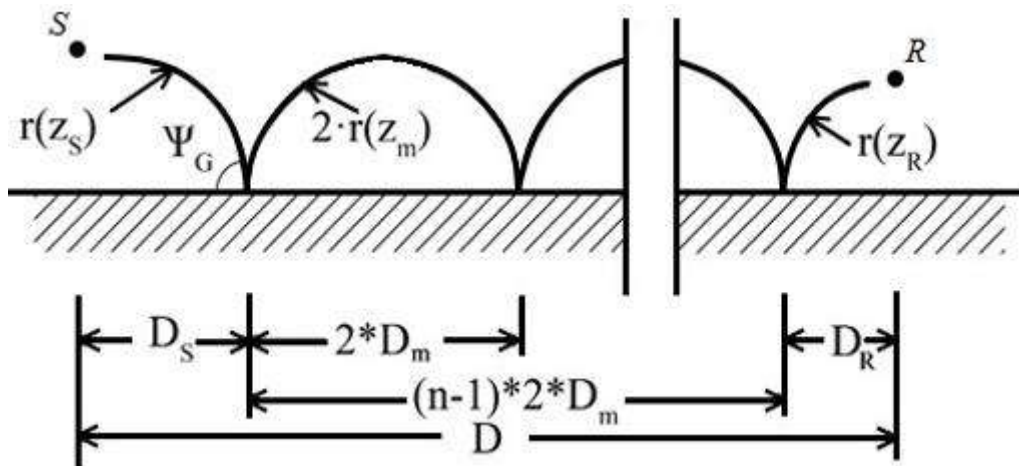


Рис. 3.6. Багаторазові відбиття звукового променя від земної поверхні

Координата першого відбиття  $x$  визначається на основі розв'язання наступного поліноміальною рівняння четвертого порядку [276]:

$$n(n+1)x^4 - (2n+1)Dx^3 + [b_R^2 + (2n^2-1)b_S^2 + D^2]x^2 - (2n-1)b_S^2Dx + n(n-1)b_S^4 = 0,$$

де  $b_i^2 = z_i(2 + az_i)/a$ ,  $i=R$  або  $S$ ,  $D = D_S + D_R + 2(n-1)D_m$ ,

$n$  – порядок відбиття, як в (3.2).

Для кожного додаткового відбиття геометричні і часові параметри можуть бути отримані у такий спосіб:

$$r_i = 2(n-1)r(z_m) + r(z_R) + r(z_S), \quad \tau_i = 2(n-1)\tau(z_m) + \tau(z_R) + \tau(z_S).$$

Значення  $r_i$  і  $\tau_i$  обчислюється за формулами (3.4) та (3.5) для променів, що поширюються тільки вгору, а за формулами (3.7) – для променів у протилежному випадку. У випадку коли приймач переміщується ближче до землі і чим далі від джерела, або коли збільшується градієнт швидкості звуку, це означає, що повинні бути розглянуті додаткові відбиті промені. Для  $n=2$  можуть з'явитися два додаткових відбитих промені, для  $n>2$  - може з'явитися при кожному  $n$  чотири додаткових відбитих промені. На рис. 3.7 наведено промені з однією точкою відбиття для висоти джерела  $h_s=1,0$  м, висоти приймача  $h_r=1,0$  м та відстані  $R_0=160,00$  м [272]. На рис. 3.8 наведено промені з двома точками відбиття для висоти джерела  $h_s=1,0$  м, висоти приймача  $h_r=1,0$  м та відстані  $R_0=190,00$  м [272].

У таблиці 3.1 наведено характерні відстані і кути падіння для заломлених променів.

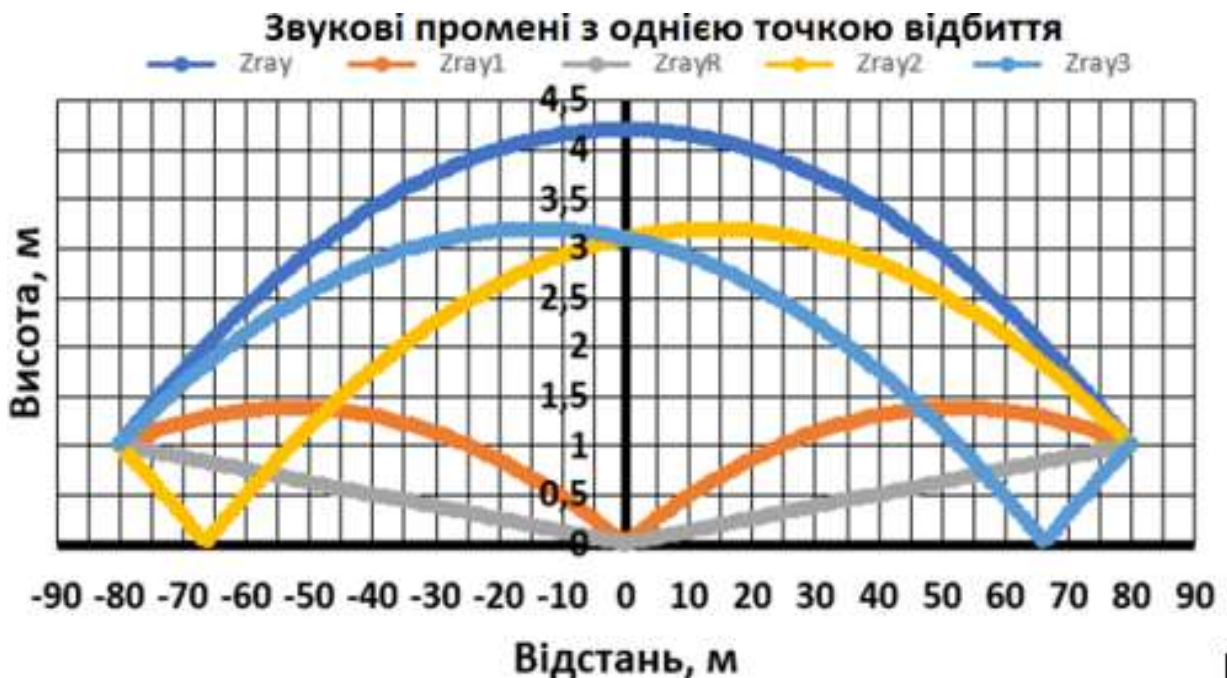


Рис. 3.7. Звукові промені з однією точкою відбивання:  $Z_{rayR}$  – відбитий промінь для однорідного випадку;  $Z_{ray}$  - прямий промінь для умов рефракції,  $Z_{ray1}$ ,  $Z_{ray2}$ ,  $Z_{ray3}$  - відбиті промені для випадку рефракції ( $a=0,001 \text{ м}^{-1}$ )

Характерні відстані і кути ковзання для вигнутих променів

Номер променя	Точка відбиття, м	$R_1$ , м	$R_2$ , м	Кут ковзання, град.
1	95,0	190,28	190,08	86,7
2	11,2	190,28	190,28	84,6
3	178,8	190,28	190,28	84,6
4	50,0	190,28	190,06	87,4
5	13,5	190,28	190,26	85,3
6	63,5	190,28	190,07	87,3

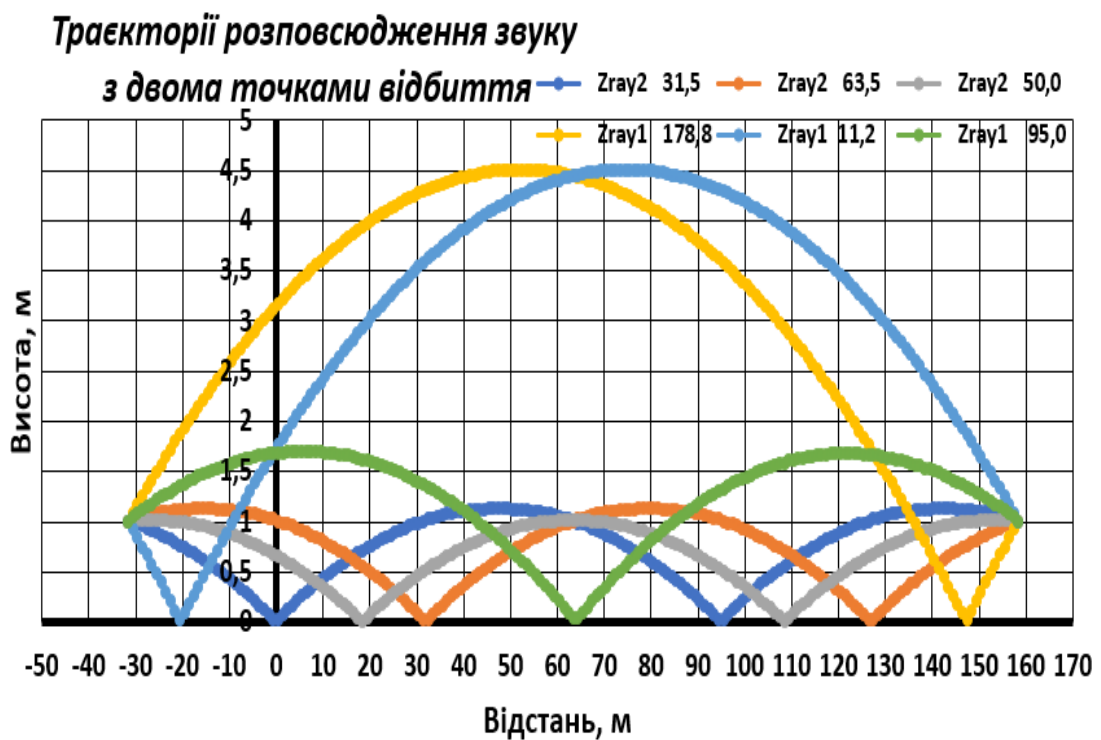


Рис. 3.8. Траєкторії розповсюдження звуку з двома точками відбиття:  
 $Z_{rayR}$  – відбитий промінь для однорідного випадку;  $Z_{ray1}$  – відбиті промені з двома точками відбиття;  $Z_{ray2}$  – відбиті промені з двома точками відбиття,  
 x-координата точки визначаються в метрах від джерела  
 (градієнт швидкості звуку  $a = 0,001 \text{ м}^{-1}$ )

На рис. 3.9 наведено додаткове загасання при поширенні звуку з рефракцією, номер променя відповідає номеру променя у табл. 3.1.

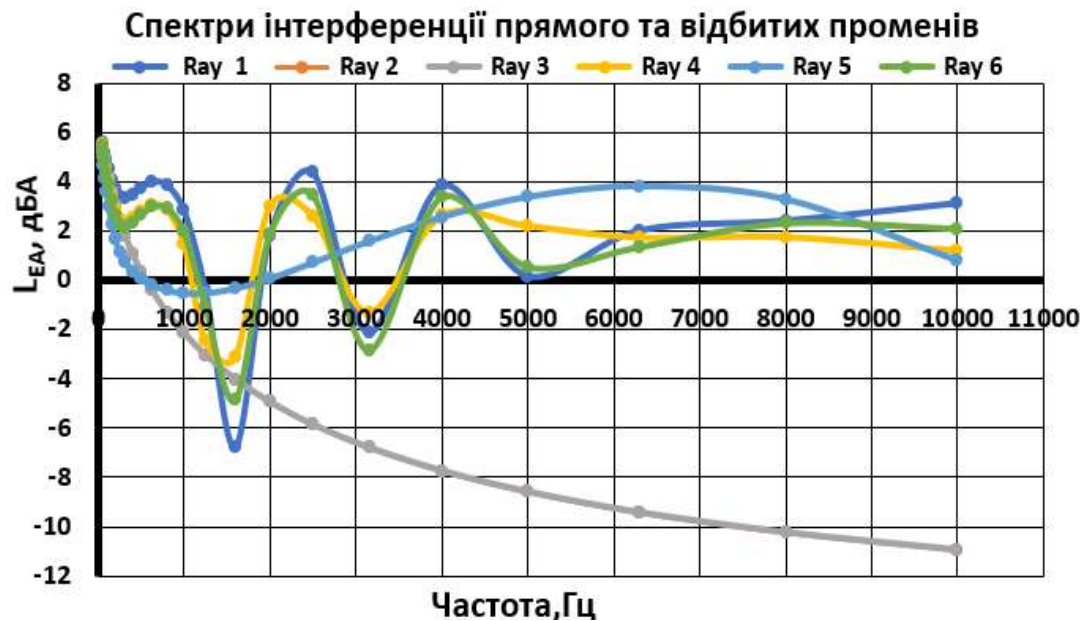


Рис. 3.9. Спектри інтерференції прямого та відбитих променів при поширенні в атмосфері з рефракцією в результаті інтерференції прямого і відбитих променів

Вплив рефракції звукових променів на ефект впливу земної поверхні досліджений для зміни градієнта швидкості звуку  $a$  в діапазоні  $0 \dots 0,005 \text{ м}^{-1}$ , на рис. 3.10 можна побачити, що при позитивному його значенні ефект впливу землі зменшується із зростанням градієнта: в межах впливу градієнта температури ( $a=0,00001 \dots 0,0005 \text{ м}^{-1}$ ) на 1-2 дБА, при наявності вітру ( $a = 0,001 \dots 0,005 \text{ м}^{-1}$ ) вбік поширення звуку ефект може бути на рівні його нехтування.

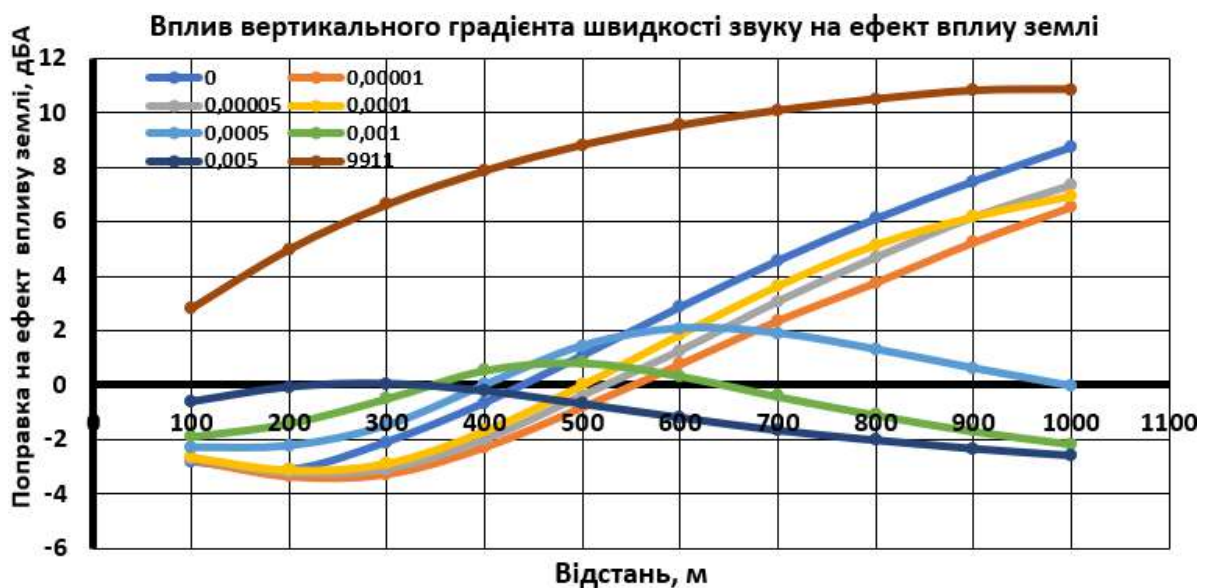


Рис. 3.10. Вплив вертикального градієнта швидкості звуку на ефект впливу земної поверхні (м'яка акустична поверхня – трав'яний покрив)

Дослідження впливу стану атмосфери виконано для оцінки NPD-залежності від температури, тиску, вологості повітря, які відрізняються від значень стандартної атмосфери на рівні поверхні моря, які покладені у визначені значення бази даних ANP і використовуються в інтегрованих моделях. В умовах однорідної атмосфери при зміні температури і вологості повітря (вони найбільше впливають на величину атмосферного поглинання звуку) в межах  $-30^{\circ}\text{C} < t < +30^{\circ}\text{C}$ ,  $1\% < h < 85\%$  значення рівнів експозиції звуку від табличних можуть відрізнитися від -10 дБА до +15 дБА (більші відхилення спостерігаються для дуже сухого повітря) для різних спектральних класів на режимах зниження перед посадкою та злету/набору висоти літаків. В умовах неоднорідної атмосфери досліджений вплив різних профілів зміни температури, тиску, вологості повітря з висотою на значення NPD-залежності для різних спектральних класів з бази даних ANP: для умов стандартної атмосфери (ГОСТ 4401-81) з вертикальним градієнтом температури  $-6,5^{\circ}\text{C}/\text{км}$  і залежності атмосферного поглинання звуку відповідно ГОСТ 31295.2-2005 (ISO 9613/2) обчислені значення від табличних відрізняються у середньому до  $\pm 2$  дБА (рис. 3.11), їх відмінність від інших можливих вертикальних градієнтів температури в атмосфері незначна. Вплив змін вертикального профілю вологості (в діапазоні 30-85% на поверхні землі і до 1% на висоті максимальної відстані з бази даних ANP) від значень ГОСТ 31295.2-2005 при постійному значенні температури уздовж висоти – в межах  $\pm 1$  дБА.

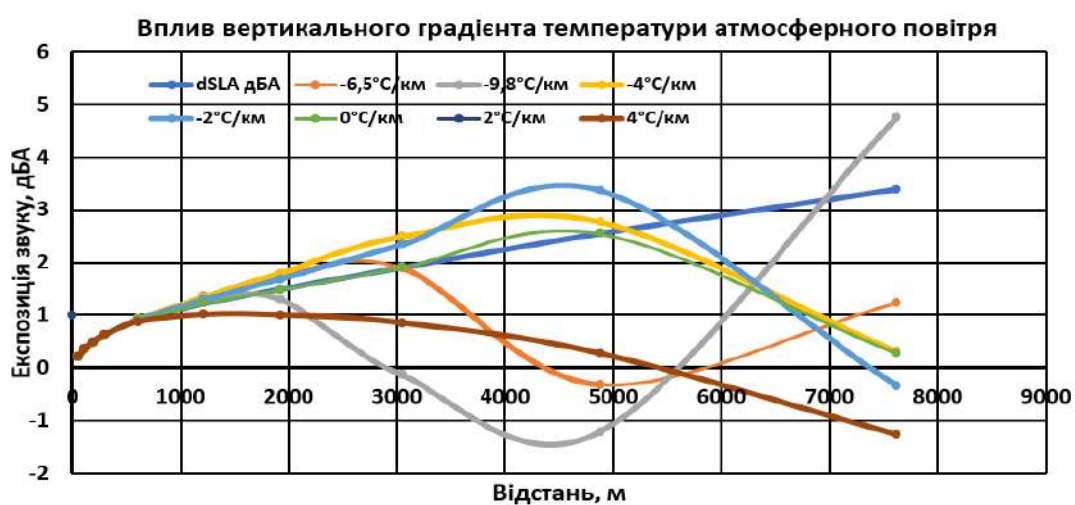


Рис. 3.11. Вплив вертикального градієнта температури атмосферного повітря на відмінність обчислених даних рівнів експозиції звуку від табличних значень NPD-залежності

### 3.2.3. Удосконалення складової оцінювання авіаційного шуму для випадку його випромінювання у задню напівсферу від літака

Слід зазначити, що документ ІСАО ДОС 9911 [16] передбачає моделювання рівнів так званого «повітряного шуму», тобто шуму, який утворюється у повітрі на різних відрізках траєкторії руху літаків і застосовується тільки для розрахунку довготривалого усередненого (за рік) рівня впливу шуму. Такий шум генерується літаками під час експлуатаційних операцій відправлення або прибуття [247]. Між тим, так званий «наземний шум», тобто шум, який утворюється від наземних ділянок руху літака (при виконанні операцій руління, випробування двигунів, використання допоміжних силових установок), вважався таким, що їм можна знехтувати, оскільки суттєвого внеску у «повітряний шум» не чинить, тобто реально не впливає на параметри контурів шуму за межами аеропорту. Однак від наземних ділянок руху літака уздовж ЗПС під час зльоту та посадки рівні повітряного шуму суттєво знижені за рахунок зменшення потужності джерел шуму літака, а внесок «наземного шуму» стає суттєвим. Тому наземний шум повинен оцінюватися незалежно від повітряного шуму.

Бічне затухання звуку для літаків з гвинтовими та реактивними двигунами, встановленими на фюзеляжі і під крилами, обчислюється відповідно до документу AIR-5662М [251]:  $\Lambda(\beta, l) = \Gamma(l) * \Lambda(\beta)$ ,

де  $\Gamma(l)$  – коефіцієнт відстані, який обчислюється за формулою

$$\Gamma(l) = 1,089 * [1 - \exp(-0,00274 l)] \quad \text{для } 0 \leq l \leq 914 \text{ м}; \quad \Gamma(l) = 1 \quad \text{для } l > 914 \text{ м.}$$

$\Lambda(\beta)$  – бічне затухання звуку на шляху «повітря – земля», у дальній зоні обчислюється наступним чином:

$$\Lambda(\beta) = 1,137 - 0,0229\beta + 9,72 * \exp(-0,142\beta) \quad \text{для } 0^\circ \leq \beta \leq 50^\circ,$$

$$\Lambda(\beta) = 0 \quad \text{для } 50^\circ \leq \beta \leq 90^\circ.$$

Шум реактивних літаків характеризується пелюстковою діаграмою спрямованості випромінювання у задню напівсферу, що більшою мірою



визначається шумом, випромінюваним струменем вихлопних газів. Даний ефект враховується поправкою на спрямованість випромінювання  $\Delta_{SOR}$ . Діаграма спрямованості є значно вираженою, коли швидкість витікання реактивного струменя є вищою (тобто режим роботи і тяга двигуна є вищими), а швидкість літака є нижчою. Поправка на спрямованість випромінювання  $\Delta_{SOR}$  в стандарті SAE AIR 5662M [251] не є відповідною чинним типам повітряних суден [16, 17]. Вона була запропонована для парку повітряних суден, які на даний час вважаються вже застарілими і в більшості випадків не експлуатуються. Геометричні параметри залежності поправки на спрямованість випромінювання звуку  $\Delta_{SOR}$  від початку розбігу наведені на рис. 3.12.

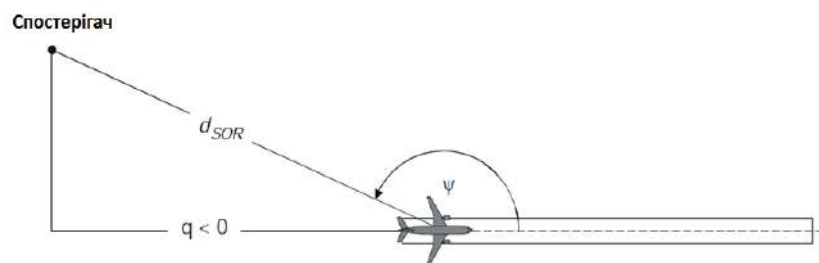


Рис. 3.12. Геометричні параметри "літак - спостерігач" для оцінки коригування функції спрямованості випромінювання звуку

Поправка на спрямованість випромінювання  $\Delta_{SOR}$  застосовується в точках спостереження, що знаходяться позаду точки початку розбігу (тобто при  $90^\circ < \Psi \leq 180^\circ$ ), де  $\Psi$  – азимутальний кут між поздовжньою віссю руху літака і вектором до спостерігача. Для поточної траєкторії руху літака азимутальний кут  $\Psi$  обчислюється за формулою:

$$\psi = \arccos\left(\frac{q}{d_{SOR}}\right),$$

де  $q$  – відстань від проекції точки розміщення спостерігача на вісь траєкторії руху,

$d_{SOR}$  – відстань від спостерігача до найближчої точки ділянки траєкторії руху.

Поправка на спрямованість випромінювання  $\Delta_{SOR}$ , дБ, обчислюється за формулою [16]:

$\Delta_{\text{SOR}}=51,47-1,553*\Psi+0,015147*\Psi^2-0,000047173*\Psi^2$ , для кутів  $90^\circ\leq\Psi<148,4^\circ$ ;

$\Delta_{\text{SOR}}=339,18-2,5802*\Psi+0,0045545*\Psi^2-0,000044193*\Psi^2$ , для кутів  $148,4^\circ\leq\Psi<180^\circ$ ;

$\Delta_{\text{SOR}}=0,0$  для кутів  $0\leq\Psi\leq90^\circ$ .

Ця поправка на спрямованість випромінювання є симетричною по обидві сторони від вісі літака (рис. 3.13). У сучасних інтегрованих моделях авіаційного шуму поправка на спрямованість випромінювання  $\Delta_{\text{SOR}}$  застосовується до обчислення рівнів шуму, пов'язаних з першим сегментом ділянки розбігу при зльоті повітряного судна відповідно до азимутального кута  $\Psi$  (рис. 3.1). Крім того, алгоритм згладжування застосовується до рівнів шуму для спостерігачів на відстанях понад 762 м позаду початку розбігу. Діаграма спрямованості, яка наведена на рис. 3.2, не застосовується для визначення рівня звукового тиску на близьких відстанях. Вона має особливе значення для розташування спостерігачів у задній на півсфері від літака не тільки на початку розбігу перед зльотом, але також на початку пробігу на злітно-посадковій смузі під час посадки, де обидві умови виконані.

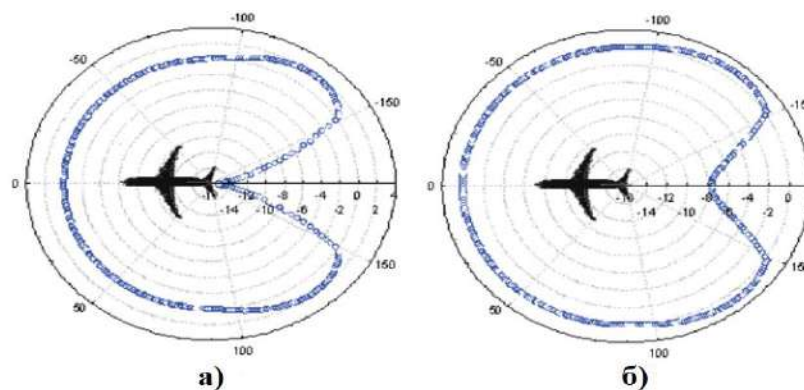


Рис. 3.13. Приклад діаграми спрямованості  $\Delta_{\text{SOR}}$  визначеної для різних відстаней від літака: а) 762 м; б) 1524 м

Крім того, ефект спрямованості також є значним при обчисленні рівнів шуму літаків на доріжках руління (достатньо подібний до шуму від випробування – «гонка двигуна», тому що при рулінні повітряного судна мають місце дуже малі швидкості руху), не кажучи вже, що цей шум, як правило (залежно від розміщення доріжок руління відносно житлової забудови) чинить невеликий внесок у загальний шум всередині і навколо аеропорту. Руління - це

рух при експлуатації повітряного судна на землі перед зльотом від місця стоянки до злітно-посадкової смуги або після посадки, тобто від злітно-посадкової смуги до місця стоянки. На рис. 3.3 наведені діаграми спрямованості для найбільш характерних груп двигунів повітряних суден: турбовентиляторних або турбореактивних двоконтурних (ТРДД), турбореактивних (ТРД), турбогвинтових (ТГД) [224].

Як видно з рис. 3.14 діаграми спрямованості генерації шуму можуть бути специфічними для кожного типу двигуна та їх компоновки в силовій установці літака. Відмінності між цими конкретними діаграмами спрямованості для різних типів літаків (двигунів) та діаграмою спрямованості, запропонованою ІСАО або ЕСАС [16, 224], можуть бути понад 10 дБА у певних напрямках. Графічна ілюстрація функції спрямованості, яка наведена на рис. 3.14, не застосовується для визначення рівня звукового тиску на близьких відстанях. У загальному випадку поправка на спрямованість випромінювання  $\Delta SOR$  – це індекс спрямованості  $DI$ , який є стандартним в акустиці, він визначається наступним чином:  $DI = L_i - L$ , де  $L_i$  – рівень шуму у напрямку спостерігача,

$L$  - енергетичне середнє значення рівня звуку в усіх напрямках (тобто для умов сферичного випромінювання звуку від джерела – класичного монопольного акустичного джерела).

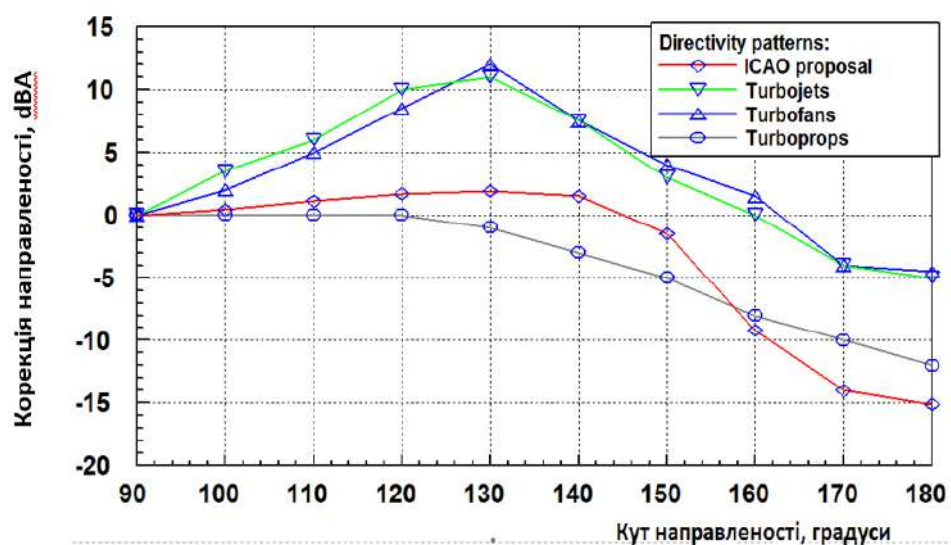


Рис. 3.14. Узагальнені коригування поправки на спрямованість випромінювання для характерних груп двигунів: *червона* – узагальнена діаграма ІСАО (Док 9911); *зелена* – ТРД; *синя* – ТРДД; *сіра* – ГД (ТГД)

Індекс спрямованості  $DI$  дійсно має типову конфігурацію, тобто є специфічним для кожного типу літака (гелікоптера, але для гелікоптера діаграма спрямованості не є симетричною). Це можна побачити на рис. 3.15, де індекси спрямованості  $DI$  представлені від наземних вимірювань шуму під час експлуатації літаків для режимів роботи двигунів з максимальною тягою і холостого ходу. Очевидно також для турбогвинтових двигунів (рис. 3.16), не кажучи вже про випромінювання шуму від гвинтових двигунів, індекс спрямованості не так сильно залежить від робочого режиму двигуна, як це характерно для турбовентиляторних двигунів (рис. 3.15), оскільки має місце домінування монопольного джерела випромінювання у випадку шуму гвинта. Для турбореактивних літаків (див рис. 3.17 для бойових літаків, для яких струмені є переважаючими акустичними джерелами у загальному шумі двигуна) діаграми спрямованості ефекту шуму сильно залежать від типу повітряного судна.

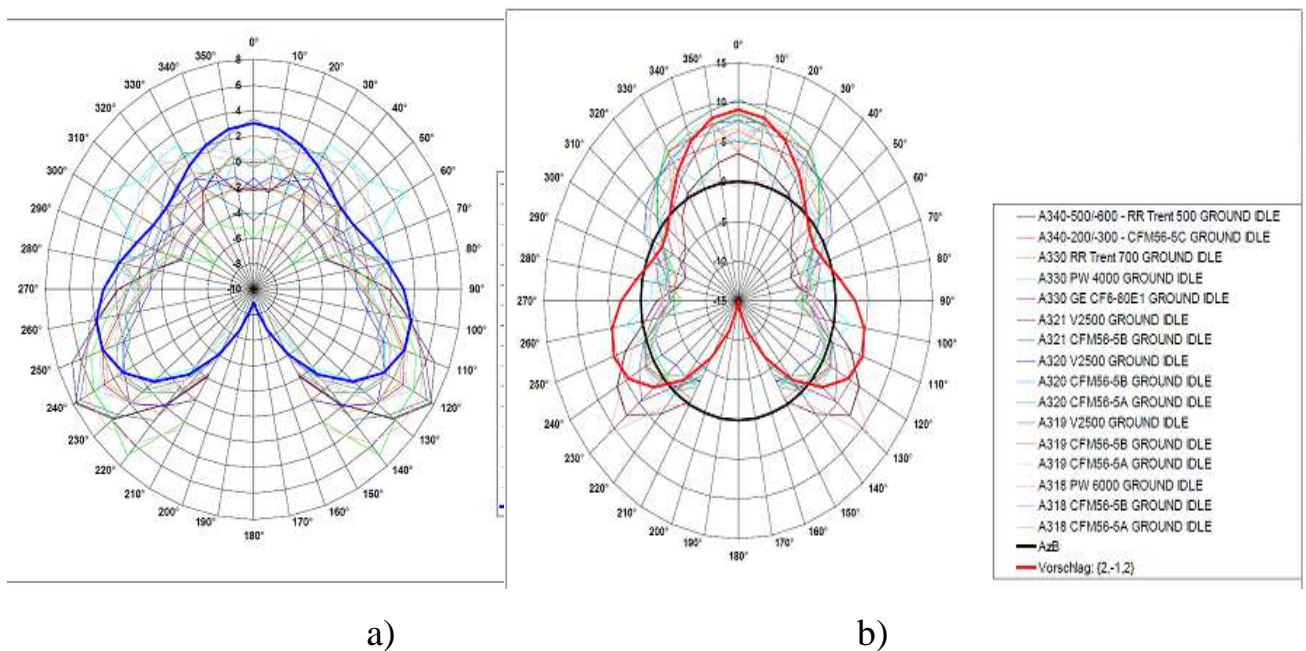


Рис. 3.14. Діаграми спрямованості випромінювання шуму сімейства літаків Airbus: а) при максимальній потужності роботи двигунів на землі; б) під час роботи двигунів на режимі холостого ходу

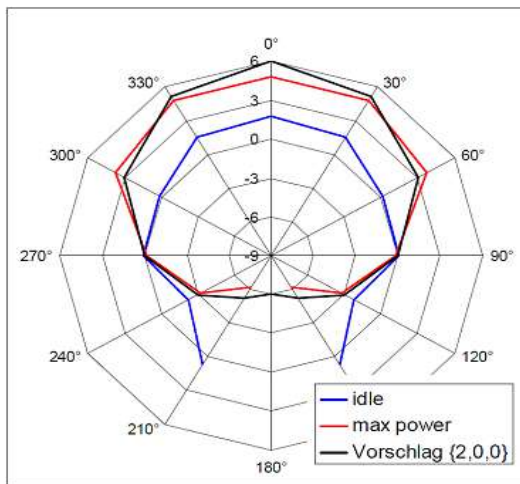


Рис. 3.16. Діаграми спрямованості випромінювання шуму турбогвинтового літака С–130 (для різних рівнів навантажень двигуна)

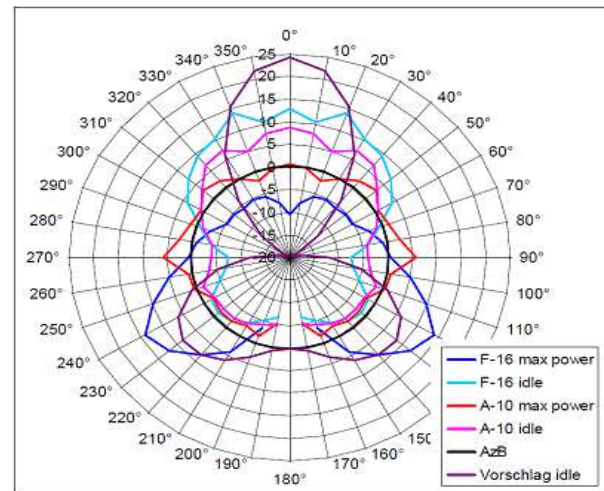


Рис. 3.17. Діаграми спрямованості випромінювання шуму для військових реактивних літаків (для різних рівнів навантажень двигуна)

З метою підвищення точності розрахунків шуму в аеропорту пропонується в базовій моделі даних передбачити декілька типів діаграм спрямованості для обчислення авіаційного шуму, коли літак маневрує на землі, а саме [247, 248]:

- в залежності від типу двигуна в силовій установці літака (реактивний, турбовентиляторний, турбогвинтовий);
- в залежності від групи повітряних суден - цивільні (авіація загального призначення та / або комерційна) і / або військові;
- в залежності від класу ваги літака: суперважкий літак (Jumbo Air Carrier), важкий (Heavy Air Carrier), великий (Large Air Carrier), регіональний реактивний (Regional Jet,), турбогвинтовий (Propeller Aircraft);
- в залежності від спектрального класу літака, який є ознакою в базі даних ANP для сценаріїв відправлення та прибуття літаків.

Можна було б очікувати, що, як рівень шуму від операцій польоту зменшується з плином часу, то і вплив шуму від наземних операцій буде зменшуватися пропорційно [252–254]. Це може стосуватися шуму під час руління літака, повертаючи уздовж злітно-посадочних смуг і т.д. Зазвичай під час зльоту шум від літака набагато вищий, ніж від будь-якої операції на стендах,

пероні і руліжних доріжках, але сьогодні точність для оцінки рівнів шуму від будь-якої наземної операції повітряного судна має найвищий пріоритет. Шум від літаків на руліжних доріжках чинить відносно невеликий внесок в загальний шум аеропорту, але дві обставини можуть забезпечити нове бачення його значимості. По-перше, зниження шуму від літаків в польоті забезпечується в результаті запровадження нових технологій двигунів, однак це не обов'язково відбивається на шумі силових установок з малою тягою (потужністю) двигунів, які є типовими для операцій руління. Крім того, оскільки інтенсивність польотів зростає і аеропорти наближаються до власної граничної пропускної спроможності, в результаті така завантаженість означає, що літаки будуть витрачати більше часу на землі, очікуючи чергу на виліт. Повітряні судна, які відлітають і вважаються важкими, будуть виробляти більше шуму, оскільки вони прискорюють швидкість руління з режиму утримання на коротких дистанціях. Загальний результат полягає у тому, що наземні операції можуть, по суті, здійснювати більший внесок у шум аеропорту, тому виникає потреба у включенні їх у майбутні оцінки шуму аеропорту, які необхідні у дослідженнях з проектування аеропортів, генеральних планів, оцінки стану навколишнього середовища і звітності щодо впливу на навколишнє середовище [255, 256].

По-друге, схема аеропорту (аеродрому) може встановити пріоритет шуму від літаків на руліжних доріжках у порівнянні з літаками в польоті, включаючи шум від літаків на злітно-посадковій смугі, тобто під час їх зльоту і посадки (рис. 3.18) [257–259]. Враховуючи вище викладене, замість універсальної поправки на випромінювання назад (для кутів  $90^0 - 180^0$ )  $\Delta_{SOR}$ , запропонованої в документі ICAO DOC 9911 та SAE AIR-1845, пропонується експериментально отримати типові поправки для основних п'яти вагових класів літаків Jumbo, Heavy, Large, Regional Jet, Propeller [260]. Тим самим буде збільшена точність моделювання для розрахунку рівнів авіаційного шуму з врахуванням типової залежності. Для цього розроблено програмне забезпечення, яке обчислює рівні шуму для ПС: Jumbo, Heavy, Large, Regional Jet, Propeller, коли вони маневрують.

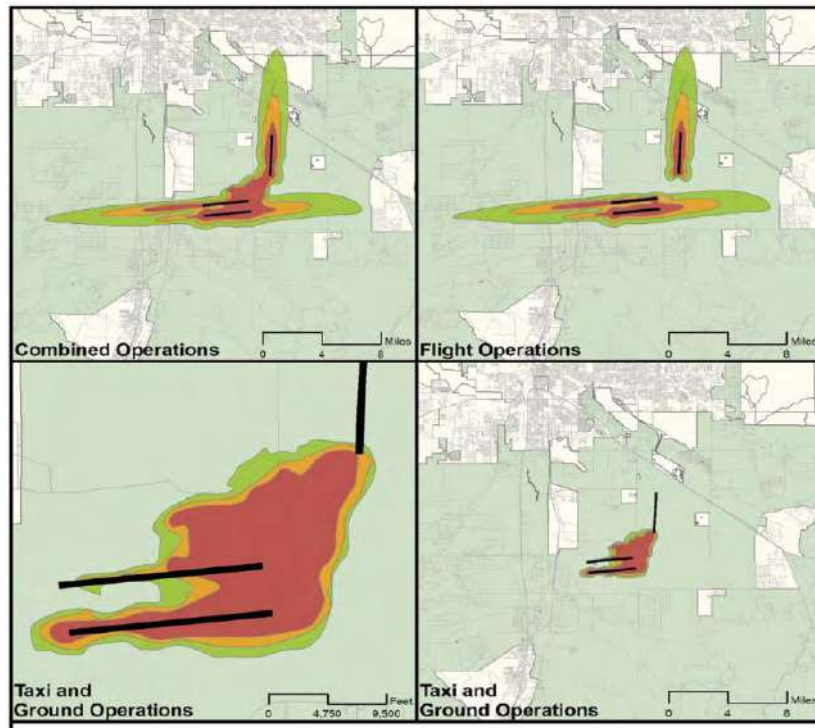


Рис. 3.18. Порівняння контурів шуму від наземних і льотних операцій  
(зелений – 55  $L_{dn}$ , помаранчевий – 60  $L_{dn}$ , червоний – 65  $L_{dn}$ )

Вихідними даними для обчислення рівнів шуму для кожного з п'яти вагових класів ПС (Jumbo, Heavy, Large, Regional Jet, Propeller) є наступні:

- масив кутів (Angles (19)): 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°, 100°, 110°, 120°, 130°, 140°, 150°, 160°, 170°, 180°;
- третино октавні частоти (Freq(33)): 12,5 Гц, 16,0 Гц, 20,0 Гц, 25 Гц, 31,5 Гц, 40 Гц, 50 Гц, 63 Гц, 80 Гц, 100 Гц, 125 Гц, 160 Гц, 200 Гц, 250 Гц, 250 Гц, 315 Гц, 400 Гц, 500 Гц, 630 Гц, 800 Гц, 1000 Гц, 1250 Гц, 1600 Гц, 2000 Гц, 2500 Гц, 4000 Гц, 5000 Гц, 6300 Гц, 8000 Гц, 10000 Гц, 12500 Гц, 16000 Гц, 20000 Гц;
- матриця частот для кожного з п'яти вагових класів літаків –  $L_f(19,24)$ ;
- стандарт корекції щодо сприйняття звуку людським вухом (поправка А-фільтр).  $DLA(8)$ : -26,2; -16,1; -8,6; -3,2; 0,0; 1,2; 1,0; -1,1.

Для кожного класу ПС (Jumbo, Heavy, Large, Regional Jet, Propeller) значення рівнів звукового тиску обчислюється для частот від 50 Гц до 10000 Гц (індекс  $i$ ) для кожного кута від 0° до 180° (індекс  $j$ ):

$$\text{для } j=1,19 \quad LDA(j) = \sum_{j=1}^{19} 10 \cdot \lg \left( \sum_{i=7}^{30} 10^{0,1 \cdot Lf(j,i)} \right).$$

З урахуванням стандарту корекції А-фільтру значення рівнів звукового тиску обчислюються:

$$SLAD(j) = 10 \cdot \lg \left( \sum_{j=1}^{19} 10^{0,1 \cdot (Lf(j,i) + DLA(i))} \right)$$

Різниця звукового тиску для  $j$ -го кута та значенням звукового тиску для кута  $90^\circ$  обчислюється за формулою:

$$DSL A(j) = LDA(j) - LDA(10), \text{ де } LDA(10) - \text{рівень шуму кута } 90^\circ.$$

Екранні форми для кожного з п'яти вагових класів ПС (Jumbo, Heavy, Large, Regional Jet, Propeller) наведені нижче (рис.3.19 – рис. 3.23):

Angles	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
0	71,3	74	78,4	67,3	64	66,6	65,5	63,4	63,5	66,2	69,9	73,6	74,5	75,5	79,7	79,7	81,3	76,1	76,2	78	80,1	70,7	64	55,9
10	71,3	74	78,4	67,3	64	66,6	65,5	63,4	63,5	66,2	69,9	73,6	74,5	75,5	79,7	79,7	81,3	76,1	76,2	78	80,1	70,7	64	55,9
20	71,3	74	78,4	67,3	64	66,6	65,5	63,4	63,5	66,2	69,9	73,6	74,5	75,5	79,7	79,7	81,3	76,1	76,2	78	80,1	70,7	64	55,9
30	71,3	74	78,4	67,3	64	66,6	65,5	63,4	63,5	66,2	69,9	73,6	74,5	75,5	79,7	79,7	81,3	76,1	76,2	78	80,1	70,7	64	55,9
40	71,3	74	78,4	67,3	64	66,6	65,5	63,4	63,5	66,2	69,9	73,6	74,5	75,5	79,7	79,7	81,3	76,1	76,2	78	80,1	70,7	64	55,9
50	71,8	74,2	78,9	67,7	64,5	67	66,1	64,1	64,4	67,1	70,7	74	74,5	75,3	79,5	79,6	81	76,4	76,1	78	80,1	71,1	64,8	57,1
60	72,7	74,7	79,8	68,3	65,5	67,6	67,2	65,4	66,2	68,9	72,3	74,7	74,4	74,8	79,1	79,3	80,3	76,9	75,9	78,1	79,9	71,9	66,4	59,4
70	73,7	75,1	80,8	69	66,4	68,2	68,3	66,7	67,9	70,6	73,8	75,4	74,4	74,2	78,7	79	79,6	77,4	75,6	78,1	79,8	72,7	67,9	61,6
80	74,6	75,5	81,7	69,7	67,4	68,9	69,4	68	69,7	72,4	75,4	76,1	74,3	73,7	78,2	78,7	78,9	77,9	75,4	78,1	79,7	73,4	69,5	63,9
90	75,5	75,9	82,5	70,3	68,3	69,5	70,5	69,3	71,4	74,1	76,9	76,8	74,2	73,2	77,8	78,4	78,2	78,4	75,1	78,1	79,5	74,2	71	66,2
100	76,4	77,4	82,1	70,5	69,1	69,9	70,9	70,2	71,2	73,8	76,3	76	73,5	72,8	76,6	77,4	76,4	76,8	73,8	75,6	77,1	72,3	69	63,8
110	77,3	78,9	81,6	70,6	70	70,2	71,4	71	71	73,5	75,8	75,2	72,8	72,3	75,4	76,4	74,6	75,2	72,5	75,1	74,7	70,3	67	61,5
120	78,2	80,3	71	70,7	70,8	70,6	71,8	71,9	70,8	73,1	75,2	74,4	72,2	71,8	74,2	75,4	72,8	73,6	71,2	73,6	72,3	68,4	65	59,1
130	79,1	81,8	80,5	70,9	71,6	71	72,2	72,7	70,6	72,8	74,6	73,5	71,5	71,4	72,9	74,3	70,9	72	69,9	72,1	69,8	66,4	63	56,7
140	79,5	82,5	80,2	70,9	72	71,1	72,4	73,1	70,5	72,6	74,3	73,1	71,1	71,1	72,3	73,8	70	71,2	69,2	71,3	68,6	65,4	62	55,5
150	79,5	82,5	80,2	70,9	72	71,1	72,4	73,1	70,5	72,6	74,3	73,1	71,1	71,1	72,3	73,8	70	71,2	69,2	71,3	68,6	65,4	62	55,5
160	79,5	82,5	80,2	70,9	72	71,1	72,4	73,1	70,5	72,6	74,3	73,1	71,1	71,1	72,3	73,8	70	71,2	69,2	71,3	68,6	65,4	62	55,5
170	79,5	82,5	80,2	70,9	72	71,1	72,4	73,1	70,5	72,6	74,3	73,1	71,1	71,1	72,3	73,8	70	71,2	69,2	71,3	68,6	65,4	62	55,5
180	79,5	82,5	80,2	70,9	72	71,1	72,4	73,1	70,5	72,6	74,3	73,1	71,1	71,1	72,3	73,8	70	71,2	69,2	71,3	68,6	65,4	62	55,5

Рис. 3.19. Обчислення рівнів шуму для літаків категорії Jumbo



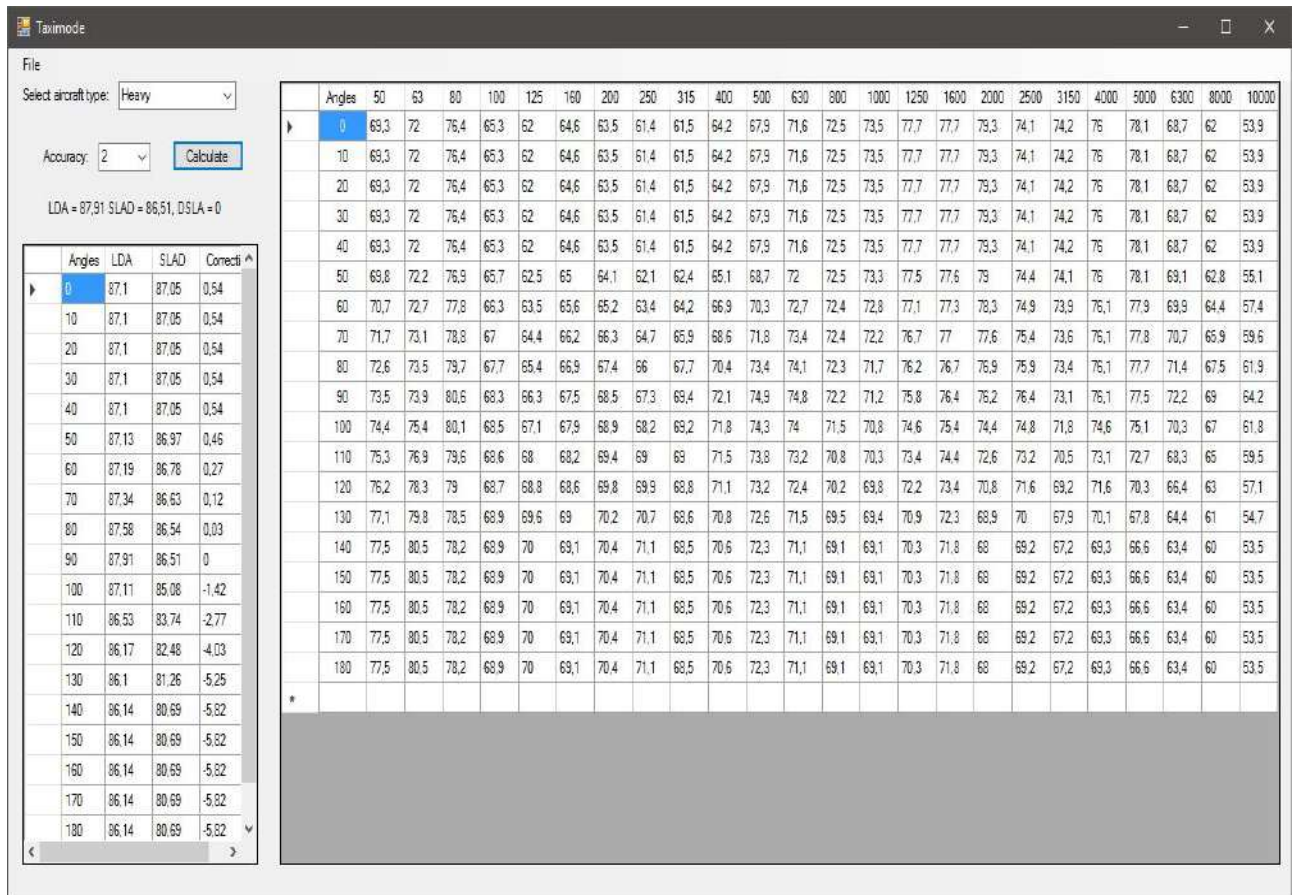


Рис. 3.20. Обчислення рівнів шуму для літаків категорії Heavy

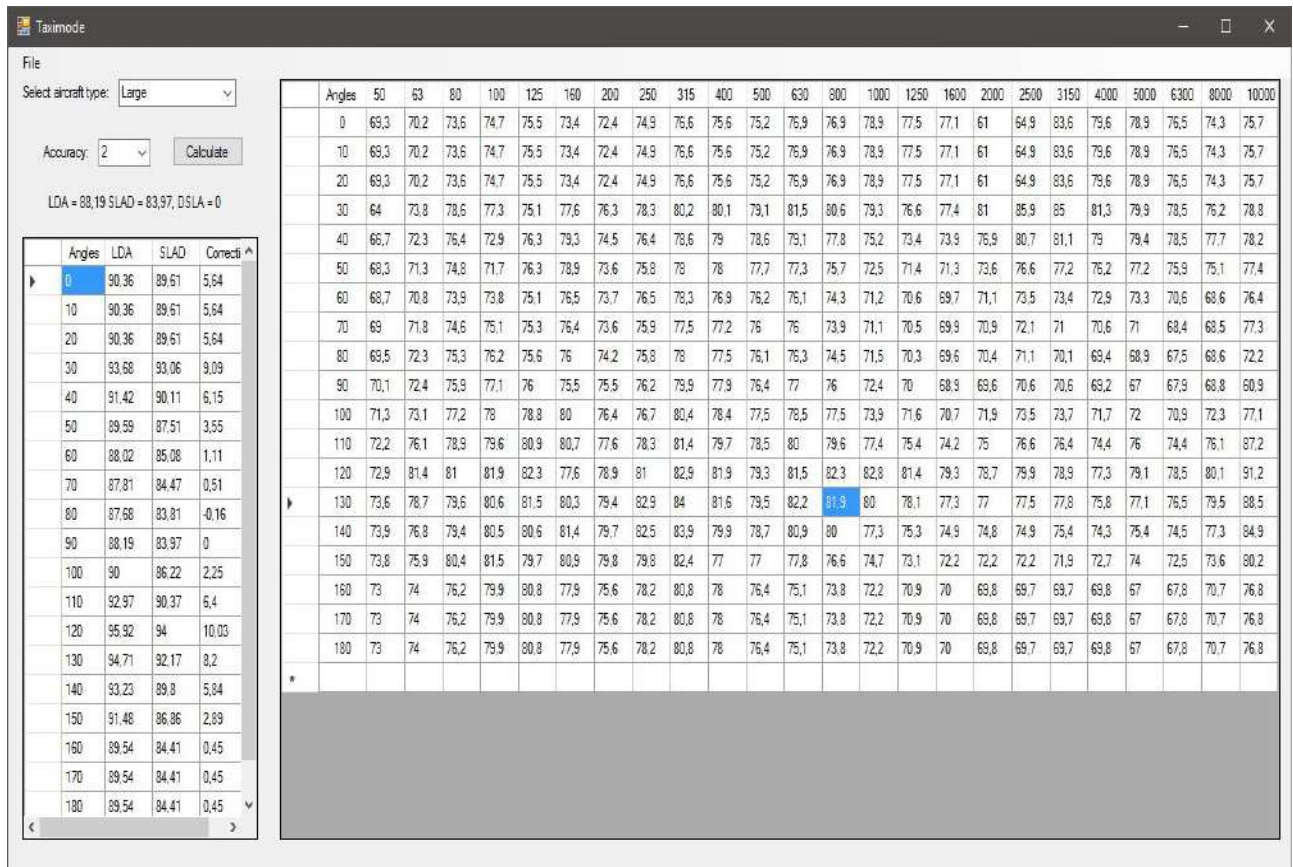


Рис. 3.21. Обчислення рівнів шуму для літаків категорії Large

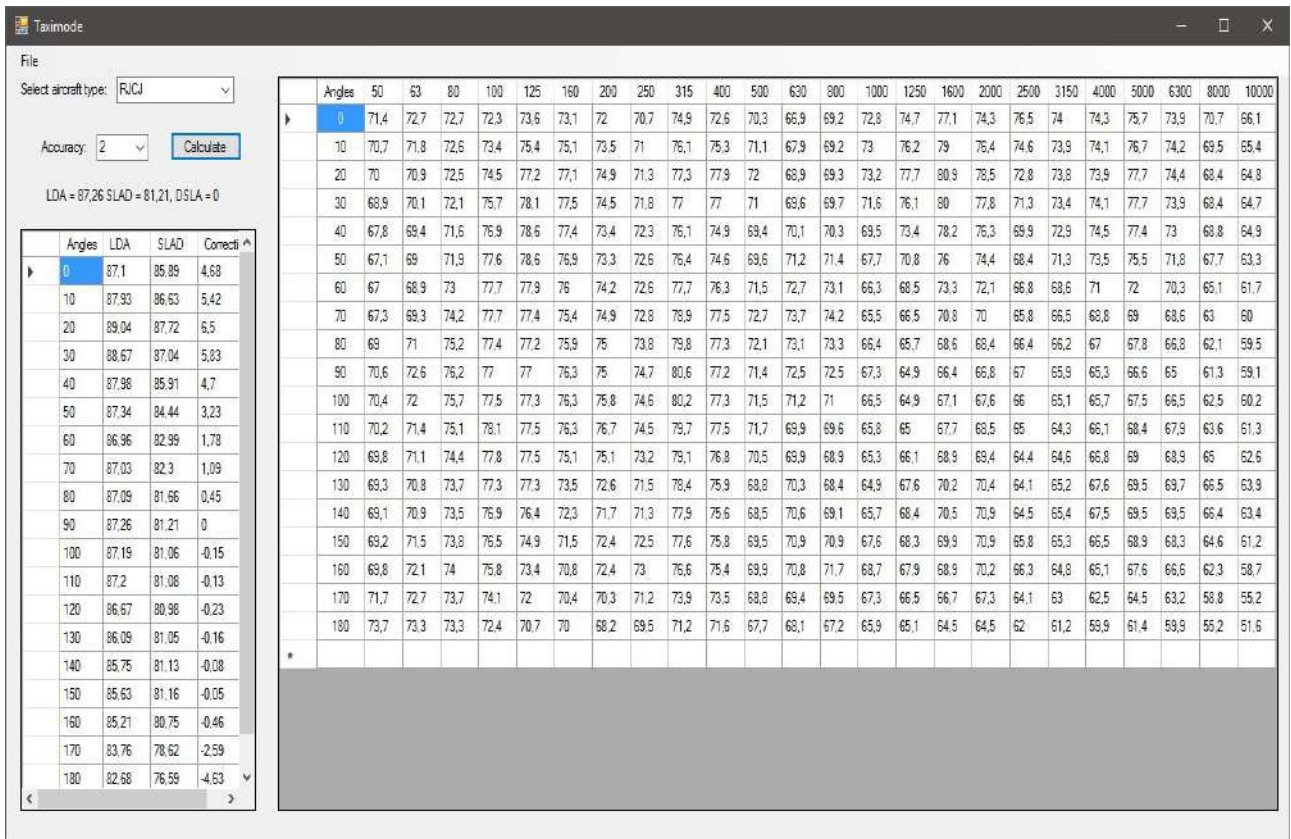


Рис. 3.22. Обчислення рівнів шуму для літаків категорії RJCJ

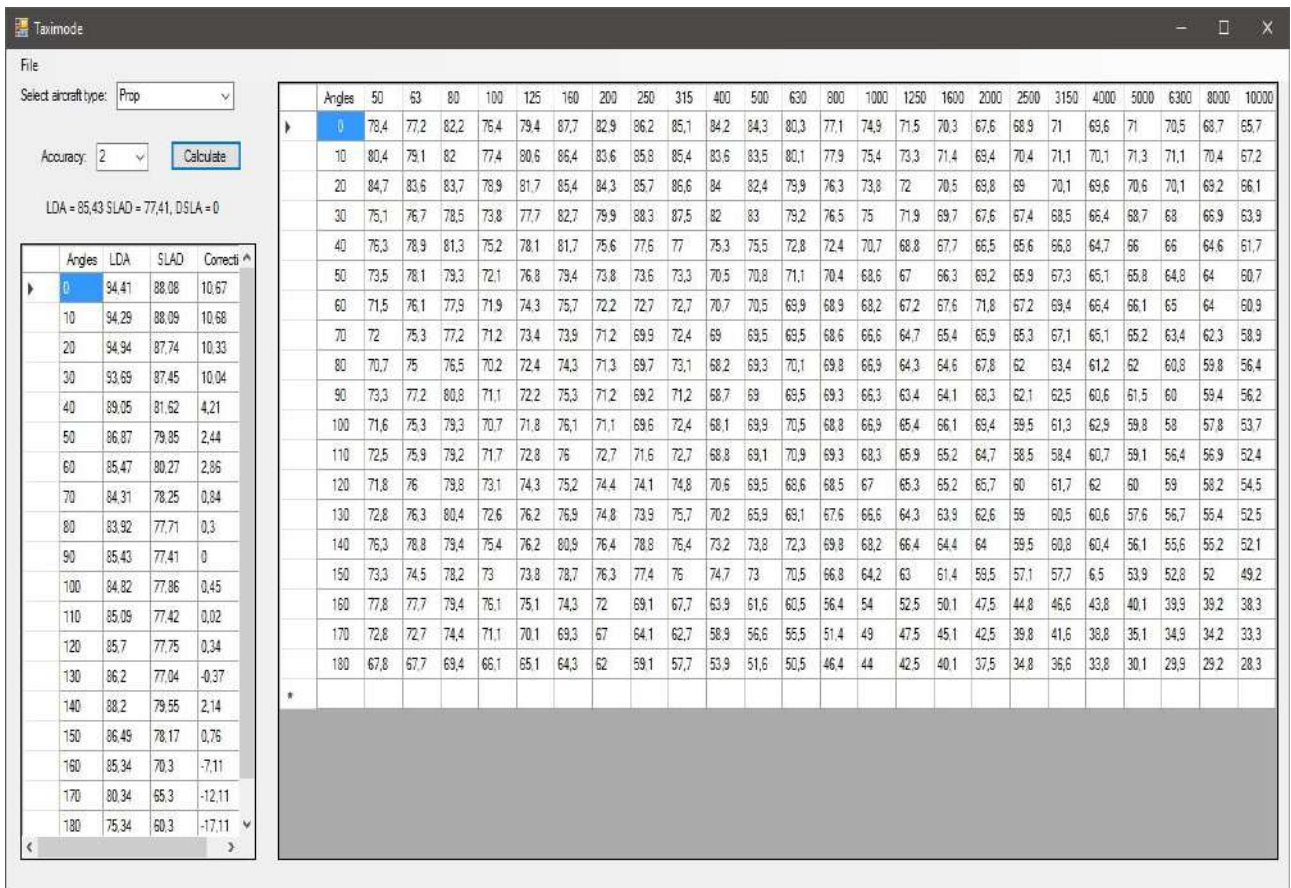


Рис. 3.23. Обчислення рівнів шуму для літаків категорії Propeller

На підставі отриманих даних апроксимовано функції спрямованості назад для категорій літаків Jumbo, Heavy, Large, Regional Jet, Propeller і отримано залежності четвертого порядку, які є більш точними на відміну від полінома другого порядку, запропонованого в документі ICAO DOC 9911 (рис. 3.24 – 3.27).

**Поправка рівнів звуку спрямованості на  
випромінювання у задню напівсферу групи літаків  
Jumbo (кути  $90^0$  -  $180^0$ )**

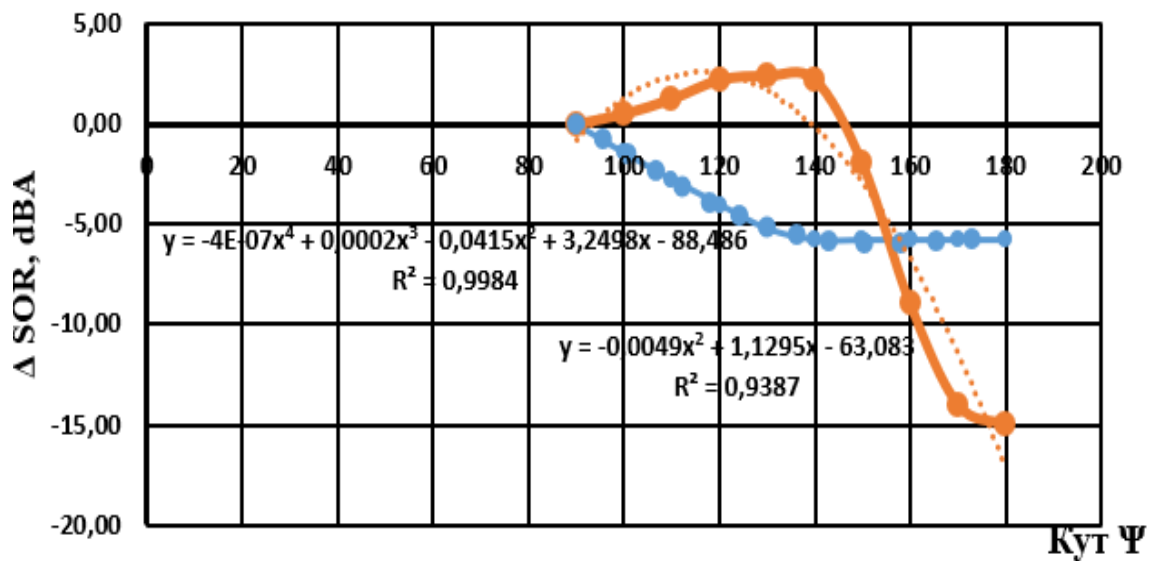


Рис. 3.24. Поправка  $\Delta SOR$  для групи літаків Jumbo та Heavy

**Поправка рівнів звуку спрямованості на випромінювання у задню  
напівсферу групи літаків Large (кути  $90^0$  -  $180^0$ )**

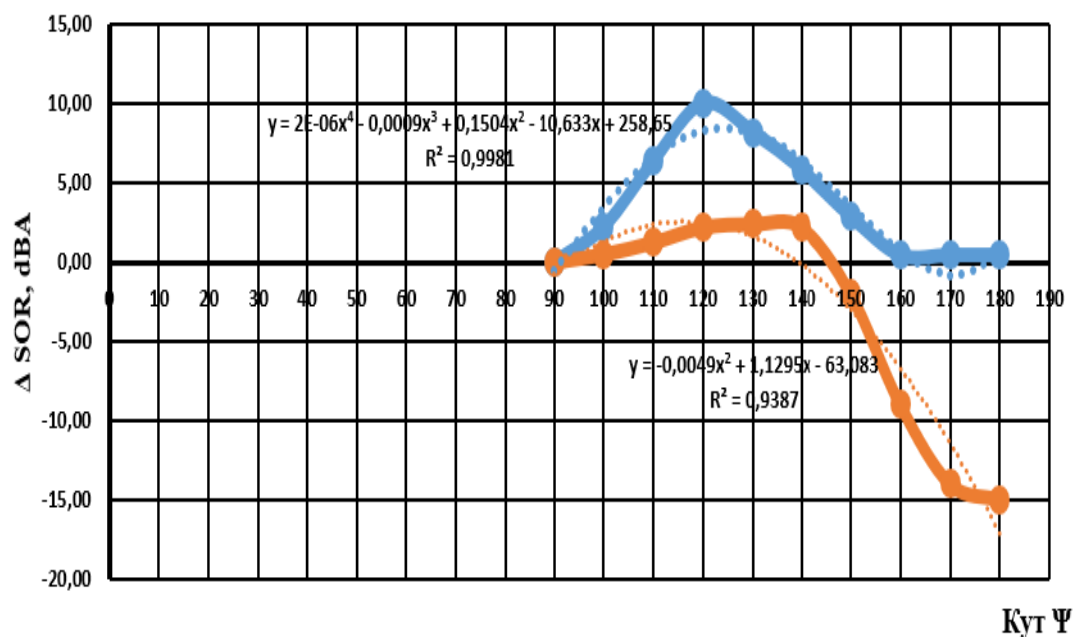


Рис. 3.25. Поправка  $\Delta SOR$  для групи літаків Large

**Поправка рівнів звуку спрямованості на  
випромінювання у задню напівсферу групи літаків  
RJСJ (кути 90<sup>0</sup> - 180<sup>0</sup>)**

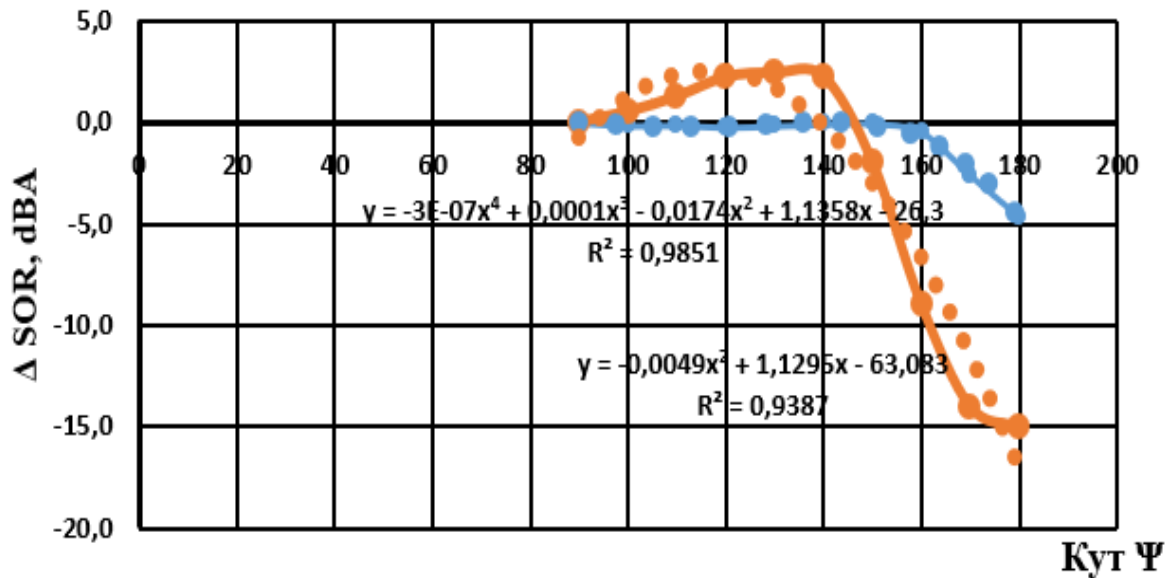


Рис. 3.26. Поправка  $\Delta \text{SOR}$  для групи літаків RJСJ

**Поправка рівнів звуку спрямованості на випромінювання у  
задню напівсферу групи літаків Propeller (кути 90<sup>0</sup> - 180<sup>0</sup>)**

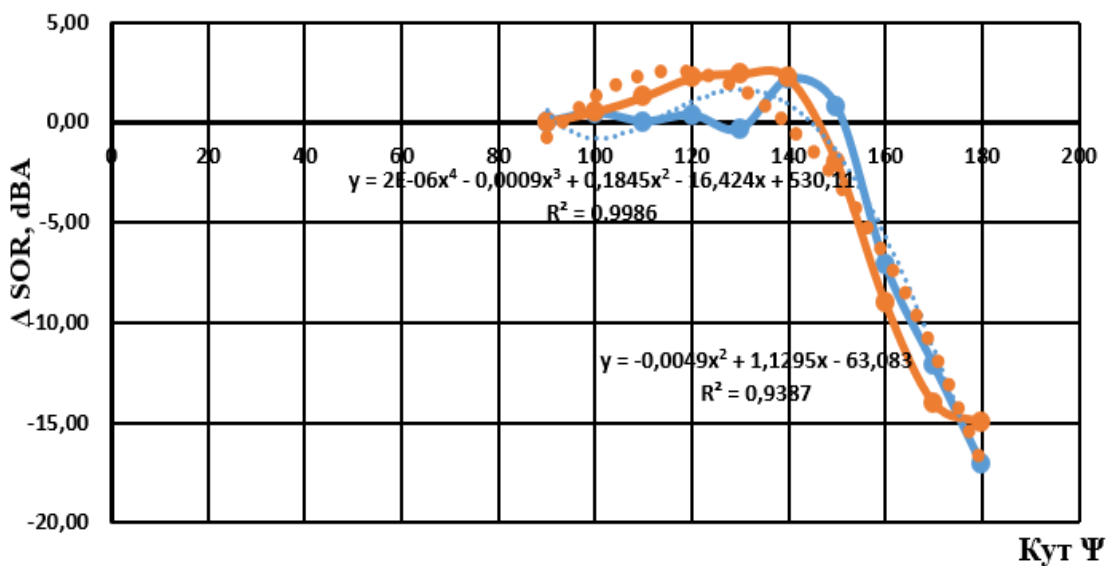


Рис. 3.27. Поправка  $\Delta \text{SOR}$  для групи літаків Propeller

Таким чином, отримано залежності четвертого порядку функції спрямованості назад для наступних категорій літаків:

$$\text{Jumbo} - \Delta_{\text{SOR}} = -4\text{E-}07 * \Psi^4 + 0,0002 * \Psi^3 - 0,0415 * \Psi^2 + 3,2498 * \Psi + 0,0238$$

$$\text{Heavy} - \Delta_{\text{SOR}} = -4\text{E-}07 * \Psi^4 + 0,0002 * \Psi^3 - 0,0415 * \Psi^2 + 3,2498 * \Psi - 1,9762$$

$$\text{Large} - \Delta_{\text{SOR}} = 2\text{E-}06 * \Psi^4 - 0,0009 * \Psi^3 + 0,1504 * \Psi^2 - 10,635 * \Psi + 342,66$$

$$\text{Regional Jet} - \Delta_{\text{SOR}} = -3\text{E-}07 * \Psi^4 + 0,0001 * \Psi^3 - 0,0216 * \Psi^2 + 1,5028 * \Psi + 43,282$$

$$\text{Propeller} - \Delta_{\text{SOR}} = 2\text{E-}06 * \Psi^4 - 0,0009 * \Psi^3 + 0,1842 * \Psi^2 - 16,434 * \Psi + 609,11$$

Таким чином, виконаний аналіз порівняння обчислених: максимального рівня звуку  $L_{Amax}$ , рівня експозиції  $SEL/L_{AE}$ , ключових параметрів профілю польоту (швидкості, тяги, висоти) з реальними умовами експлуатації літака дозволили запропонувати удосконалення методу розрахунку максимального рівня звуку  $L_{Amax}$ , рівня експозиції  $L_{AE}$  для оцінки одиночної події при виконанні наземних операцій шляхом використання поправки спрямованості випромінювання у задню напівсферу ( $\Delta_{\text{SOR}}$ ) вагових категорій літаків та поправки впливу земної поверхні. Удосконалення оцінки рівня експозиції звуку також підвищує достовірність розрахунку еквівалентного рівня  $L_{Aeq}$  та добових індексів шуму  $L_{\text{DEN}}$ ,  $L_{\text{DN}}$ .

### 3.2.4. Удосконалення інтегрованої моделі обчислення шуму з використанням аеродинамічної конфігурації

Залежності «шум-режим роботи двигуна-відстань» або NDP-залежності є визначальними при обчисленні рівнів звуку, як для шуму одиночних подій випромінювання, так і для сценаріїв польоту в аеропорту. В чинній базі даних ANP їх табличні значення подаються для типу двигуна в силовій установці літака, хоча для сучасного літака внесок шуму аеродинамічних потоків обтікання елементів планера також суттєвий, особливо на етапах зниження літака перед посадкою, де режим роботи двигуна близький до режимів малого газу, а елементи механізації крила та шасі знаходяться у випущеному положенні. Для літаків з ТРДД с надвисоким ступенем двоконтурності ( $m_{\text{дв}} > 10$ ) внесок механізації крила є відчутним навіть при наборі висоти. Тому нехтування внеском аеродинамічного шуму обтікання елементів планера сьогодні також

суттєво впливає на точність обчислення рівнів звуку в точках контролю шуму та на параметри контурів шуму при зльоті та посадці. Для літаків типу А-320 та Boeing-737 різних модифікацій при зниженні на посадку рівень експозиції шуму від двигунів понад 10 дБА нижчий від рівня експозиції аеродинамічного шуму, тому дослідження шуму від літаків, особливо на етапах посадки, дану залежність слід використовувати як «шум-аеродинамічна конфігурація літака-режим роботи двигуна-відстань» або NADP-залежності.

Відповідно до удосконаленої інтегрованої моделі обчислення шуму від літака рівень звуку, який утворюється окремим сегментом траєкторії польоту  $L_{max,seg}$ , за умови відсутності перешкод на шляху прямого звукового променя у загальному вигляді пропонується описати формулою:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, A, d) + \Delta_I(\varphi) - \Lambda_S(\beta, l) + \Delta_{SOR_{itp}} \dots \dots \dots (3.8),$$

а внесок до рівня експозиції звуку  $L_{AE}$  від кожного сегмента траєкторії польоту обчислюється як

$$L_{E,seg} = L_{E\infty}(P, A, d) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, l) + \Delta_F + \Delta_{SOR} \quad (3.9),$$

де  $L_{max}(P, A, d)$  і  $L_{E\infty}(P, A, d)$  – поточні значення рівнів звуку від окремого сегменту траєкторії польоту, яке визначається на основі інтерполяції табличних даних NADP-залежностей для дійсних значень тяги або потужності двигуна  $P$ , аеродинамічної конфігурації  $A$  та відстані  $d$ . Складові у (3.8, 3.9) є коригувальними членами, які враховують наступні ефекти:  $\Delta_I(\varphi)$  – поправка на ефект компоновки (місця встановлення) двигунів;  $\Lambda_S(\beta, l)$  – поправка на ефект впливу земної поверхні в залежності від типу поверхні:  $S$  – акустично м'якого (трав'яний покрив) або жорсткого (асфальтобетон) покриття поверхні ( $\beta$  – кут візування,  $l$  – відстань від точки спостереження до лінії шляху);  $\Delta_{SOR, itp}$  – поправка на спрямованість випромінювання шуму у задню напівсферу від літака окремої групи  $i_{tp}$  (групи Jumbo, Heavy, Large, Regional Jet, Propeller замість однієї загальної в ICAO DOC 9911);  $\Delta_V$  – поправка на тривалість звучання шуму, що враховує вплив зміни швидкості літака на рівень експозиції  $L_{AE}$ ;  $\Delta_F$  – поправка на вплив кінцевої довжини сегмента на рівень експозиції  $L_{AE}$ .

### 3.3. Підхід до побудови інформаційної системи екологічного моніторингу авіаційного шуму в районі аеропорту

Оскільки авіаційний шум вважається найбільш агресивним техногенним чинником аеропорту, негативний вплив якого на людину визначається сукупністю наступних факторів:

1) інтенсивністю та частотним складом АШ, які залежать від типу, потужності та кількості двигунів, що встановлені на літакові, режиму їх роботи, направленості випромінювання шуму, віддаленості та швидкості руху літака, значень метеорологічних величин;

2) тривалістю та частотою повторюваності впливу АШ, на які впливають швидкість та висота польоту літака, інтенсивність експлуатації парку літаків;

3) індивідуальними особливостями людей;

4) часом доби тощо. Тому питання оцінювання впливу авіаційного шуму в межах житлової та адміністративної забудови населених пунктів на приаеродромній території аеропортів з метою контролю дотримання нормативних показників авіаційного шуму потребує постійного моніторингу. Особливо це стосується наступних звукових подій: зльоту, набору висоти, вихід літака з району аеропорту, зниження та захід на посадку, випробування авіаційних двигунів. З метою контролю та регулювання несприятливого впливу авіаційного шуму в районі аеропорту необхідно запровадити: інструментальний та інформаційний моніторинг авіаційного шуму; систему оцінювання впливу шуму; нормування показників авіаційного шуму повітряних суден; сертифікацію повітряних суден щодо відповідності нормативним вимогам; впровадження організаційних, експлуатаційних, будівельно-планувальних заходів зниження впливу шуму; зонування території поблизу аеропорту з урахуванням умов впливу шуму; встановлення плати за акустичне забруднення в районі аеропорту та визначення компенсації збитків від акустичного забруднення. Інструментальний моніторинг АШ проводять шляхом натурних вимірювань рівнів АШ з використанням шумоміра. Особливо це необхідно робити в періоди

максимальної інтенсивності наземної та льотної експлуатації повітряних суден. Інформаційний моніторинг АШ дозволяє здійснювати моделювання та прогноз акустичного навантаження при експлуатації повітряних суден. Для проведення інформаційного моніторингу авіаційного шуму необхідно розробити інформаційну систему моніторингу акустичної обстановки в районі аеропорту, яка забезпечує збір, зберігання, пошук, розрахунок рівнів шуму, аналіз отриманих результатів. Така інформаційна система повинна базуватися на системному підході, яка здійснює моделювання та прогнозування акустичного навантаження при експлуатації повітряних суден. Результати моделювання та прогнозування акустичної обстановки повинні відображатися на мапі аеропорту з використанням геоінформаційної системи, а також можуть бути враховані для планування використання земельних ділянок навколо аеропортів цивільної авіації з урахуванням умов шумового забруднення, що є одним із основних і найбільш значимих елементів збалансованого підходу ІКАО до проблеми регулювання шуму, який рекомендовано для впровадження на практиці [14]. Сумісне планування та управління землекористуванням є важливим інструментом в забезпеченні того, щоб досягнення, отримані завдяки поліпшенню акустичних характеристик сучасних типів ПС та іншими методами, не компенсувалися подальшим розвитком та розростанням забудови в околиці аеропорту [13]. З урахуванням сучасного стану нормативно-правового забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму [244] концептуальні засади щодо побудови інформаційної системи моніторингу авіаційного шуму [242] повинні враховувати:

- вимоги Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) для розрахунку, оцінювання та побудови рівнів авіаційного шуму [13–18, 21, 24, 25];
- документи Європейської конференції цивільної авіації ЕСАС (European Civil Aviation Conference) [224, 278–280];
- прогнозний документ руху польотів на сім років 2015-2021 Європейської організації з безпеки аеронавігації (EUROCONTROL) [281];
- національні вимоги щодо впливу авіаційного шуму [27-29, 32-34, 38];



- використання міжнародної БД ANP акустичних та льотно-технічних характеристик повітряних суден [208];
- використання набору критеріїв оцінювання шумового навантаження,
- забезпечення графічної візуалізації побудованих контурів авіаційного шуму.

### Висновки до розділу 3

1. З метою підвищення точності обчислення максимального рівня звуку та одночасного обчислення еквівалентного рівня звуку і добових індексів шуму запропоновано удосконалення базового методу розрахунку рівнів звуку для одиночної події випромінювання шуму для етапів злету і посадки літака відповідно до чинної політики ІКАО та національної політики України.

2. Чинна методологія ІКАО не враховує наявність ефекту інтерференції прямих та відбитих променів при вимірюванні NPD-залежностей, тобто цей ефект враховується двічі включенням поправки  $A(\beta, l)$ . Тому змодельовано ефекти впливу земної поверхні для спектральних класів з турбореактивними, турбовентиляторними, гвинтовими і/або турбогвинтовими двигунами для етапів зльоту і посадки літаків, а також запропоновано виконати удосконалення загальної моделі ІКАО розрахунку рівнів звуку у два етапи: шляхом вилучення внеску ефекту інтерференції з NPD-залежностей та обчисленням поправки на ефект впливу земної поверхні для етапів зльоту і посадки для трав'яного покриття (акустично м'якої поверхні відбиття звуку) та для асфальтобетону (акустично жорсткої поверхні).

3. Встановлено, що у методології розрахунку контурів авіаційного шуму не враховуються ефекти розповсюдження акустичних хвиль у приземному шарі атмосфери. Проаналізовано підходи щодо трасування променів в умовах атмосферної рефракції.

4. Проведено моделювання звукових променів з однією та двома точками відбиття. Виявлено, що саме одночасна наявність градієнту швидкості звуку за

рахунок градієнту швидкості вітру і градієнту температури створюють певні умови, які чинять суттєвий внесок у модель поширення звуку, яким не можна нехтувати.

5. В умовах неоднорідної атмосфери досліджено вплив різних профілів зміни температури, тиску, вологості повітря з висотою на значення NPD-залежності для різних спектральних класів з бази даних ANP. Доведено вплив вертикального градієнта температури атмосферного повітря на відмінність обчислених даних рівнів експозиції звуку від табличних значень NPD-залежності.

6. В документі ICAO DOC 9911 для операцій розбігу при відправленні та пробігу при прибутті поправка на спрямованість випромінювання у задню напівсферу від літака розраховується за однаковою залежністю другого порядку для будь-якого категорії ПС (типу двигуна). Однак, кожна категорія ПС має свою особливість і цей факт необхідно враховувати при обчисленні випромінювання у задню напівсферу від літака. Тому запропоновано програмну систему, яка обчислює таку поправку для різних груп повітряних суден, а саме: суперважкий літак (Jumbo Air Carrier), важкий (Heavy Air Carrier), великий (Large Air Carrier), регіональний реактивний (Regional Jet.), турбогвинтовий (Propeller Aircraft). Встановлено залежності четвертого порядку для кожного типу двигунів поправки випромінювання назад для кожної з цих груп, що підвищує точність розрахунків рівнів звуку.

7. Запропоновано удосконалити інтегровану модель обчислення шуму від літака шляхом включення у чинну базу ANP внеску шуму від аеродинамічних потоків обтікання елементів планера, який є вагомим для сучасних літаків. Тобто замість залежності «шум-режим роботи двигуна-дистанція» використовувати в розрахунках рівнів шуму залежність «шум-режим роботи двигуна- аеродинамічна конфігурація літака-дистанція», що суттєво підвищить точність розрахунків рівнів шуму.

8. Запропоновано підхід щодо побудови інформаційної системи екологічного моніторингу акустичного навантаження в районі аеропорту.

## РОЗДІЛ 4

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ РОЗПОДІЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ І ЛОКАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЗАХОДІВ І ЗАСОБІВ ЇХ НОРМАЛІЗАЦІЇ

Для визначення впливу електромагнітних полів на людей і довкілля та формування інтегрального показника електромагнітної обстановки у визначеному місці або території та прогнозування його динаміки необхідно змоделювати поширення та зміни у просторі або часі кількісних значень напруженостей електромагнітних полів найбільш типових джерел, а саме: розосереджених та локалізованих у просторі. До перших належать повітряні та кабельні лінії електропередачі, до других – потужні трансформатори, електричні машини різного призначення тощо. Слід зазначити, що моделі трансформаторів дуже прості і добре розроблені. В той час як просторові розподіли магнітних полів електричних машин досліджено недостатньо. Отримання загальних моделей поширень електромагнітних полів наведених джерел надасть змогу оцінити електромагнітне навантаження на середовище в умовах впливу багатьох джерел електромагнітних полів.

Розглянемо моделі електромагнітних полів різних джерел у наведеній послідовності.

4.1. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі та визначення умов їх зниження до нормативних рівнів

Попередньою умовою для проведення моделювання для поширення електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти є наявність вихідних даних. Це необхідне з двох міркувань: визначення доцільності такого моделювання через перевищення рівнів електромагнітних

полів у зонах впливу на населення та визначення неоднозначності рівнів та поширень таких полів за різних електричних навантажень на лінії, їх геометричних характеристик тощо [293].

Як зазначалося вище, на сьогоднішній день нормування впливу ліній електропередачі на населення та працюючих здійснюється за електричною складовою електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц, яке є складовою нормативу планування та забудови населених пунктів [294]. Згідно цих документів санітарні зони лінії електропередачі напругою 330 кВ у населених пунктах мають розмір 20 м від проекції на землю крайнього фазного дроту. Для ліній напругою 220, 110 та 35 кВ санітарні зони не передбачаються.

Гранично допустимі рівні електричного поля всередині житлових будинків – 0,5 кВ/м, на території житлової забудови – 1,0 кВ/м. Таке нормування доцільне з точки зору постійного значення напруженостей електричного поля, які обумовлені виключно робочими напругами у повітряних лініях. В той же час рівні магнітних полів, генерованих цими об'єктами, мають значні зміни, оскільки напруженості магнітного поля залежать від електрострумів у дротах.

Робочі струми у повітряних лініях обумовлюються навантаженням на них в залежності від пори року, дня тижня, часу доби тощо. Так, наприклад, номінальний електрострум лінії напругою 330 кВ складає 2 кА. Але реальні струми у вихідні дні та літній період не перевищують 150...200 А.

Ця неоднозначність викликає сумніви щодо коректності підходу до нормування електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі виключно за електричною складовою. Тому важливо дослідити фактичні рівні електричних та магнітних полів повітряних ліній електропередачі для визначення сучасних підходів до їх нормування.

Повітряні лінії електропередачі, починаючи з напруги 330 кВ та вище, мають санітарно-захисні зони. У населених пунктах лінії 330 кВ дуже поширені і потребують санітарно-захисної зони 20 м. саме тому така лінія обрана для досліджень. Лінії більш високих напруг пролягають селітебними територіями.

Обстежувана лінія електропередачі напругою 330 кВ з розташуванням фазних дротів у одній площині прокладена у Святошинському районі м. Києва. Розміри санітарно-захисної зони усією трасою відповідають нормативу. Вимірювання виконувались повіреним спеціалізованим приладом ПЗ-50 на висоті 1,8 м від поверхні землі. Результати вимірювань наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Напруженість електричного та індукція магнітного поля повітряної лінії електропередачі напругою 330 кВ за межами санітарно-захисної зони

<i>L</i> , м	<i>E</i> , В/м	<i>B</i> , мкТл
20	540...620	0,72...0,74
30	420...430	0,65...0,69
40	350...370	0,58...0,61
50	290...310	0,52...0,53

Отримані результати свідчать, що вимоги щодо гранично допустимих рівнів електричних полів витримуються (ГДР – 1 кВ/м). Втім, нормування магнітних полів у цих санітарних нормах відсутні, хоча у інших національних нормах гранично допустимий рівень складає 0,25 мкТл, а рівень у 0,5 мкТл закладений як тимчасовий норматив з розрахунку параметрів ліній електропередачі.

Розрахунки показали, що на момент вимірювань електрострум у дротах не перевищував 200 А, тобто за номінального навантаження у 2 кА рівні магнітних полів зростуть, принаймні, у кілька разів. Таким чином, як на територіях житлової забудови, так і у житлових і виробничих приміщеннях далеко за межами санітарно-захисної зони будуть спостерігатися значні перевищення рівнів магнітних полів промислової частоти.

Було проведено дослідження фактичних рівнів електромагнітних полів повітряних ліній, для яких СЗЗ не передбачені (відлік відстані від проекції крайнього фазного дроту на землю). Результати вимірювань наведені у таблицях

4.2 – 4.4. Необхідні параметри визначалися перпендикулярно лінії посередині прогону.

Таблиця 4.2

Напруженість електричного та індукція магнітного поля повітряної лінії електропередачі напругою 220 кВ

$L, \text{ м}$	$E, \text{ В/м}$	$B, \text{ мкТл}$
5	4800...4900	13,8...14,2
10	2400...2600	9,0...12,0
15	680...720	4,2...5,0
20	450...470	2,5...3,7
50	100..120.	0,3...0,5

Таблиця 4.3

Напруженість електричного та індукція магнітного поля повітряної лінії електропередачі напругою 110 кВ

$L, \text{ м}$	$E, \text{ В/м}$	$B, \text{ мкТл}$
5	420...460	5,6...5,8
10	240...250	5,2...5,4
15	230...240	3,4...3,6
20	190...220	2,8...3,0
50	130...140	1,4...1,6

Таблиця 4.4

Напруженість електричного та індукція магнітного поля повітряної лінії електропередачі напругою 35 кВ

$L, \text{ м}$	$E, \text{ В/м}$	$B, \text{ мкТл}$
5	380...400	3,1...3,4
10	410...420	3,2...3,5
15	360...380	2,9...3,0
20	110...130	2,4...2,5
50	80...95	0,2...0,3

Аналізуючи отримані результати, можна дійти висновку про перевищення гранично допустимих рівнів електричних та магнітних полів та непередбачуваність магнітної складової електромагнітного поля внаслідок зміни сили струму у лінії через її різні навантаження з боку споживачів.

Це обумовлює необхідність проведення моделювання просторових розподілів цих полів для отримання необхідних даних за різних конструктивних особливостей повітряних ліній та електронавантаження на них [295].

Для моделювання розподілів напруженостей електричних і магнітних полів у світі розроблено достатньо велика кількість як комерційних, так і безкоштовних пакетів програм.

Найбільш вживаними безкоштовними пакетами програм вважаються:

- EMAP – сімейство тривимірних програм електромагнітного моделювання, засноване на скалярній версії методу кінцевих елементів;
- Emgine Environment – середовище повнохвильового тривимірного електромагнітного моделювання шляхом рішення рівнянь Максвелла в тимчасовій області;
- EMM (Finite Element Method Magnetics) реалізує метод кінцевих елементів і призначений для розрахунку планарних / осесиметричних структур магнітостатики і низькочастотного магнетизму;
- IBM Electromagnetic Field Solver Suite of Tools – програми для повнохвильового двомірного і тривимірного моделювання, а також квазістатичного двомірного і тривимірного моделювання.

До найбільш поширених комерційних пакетів програм належать:

- ANSYS Emag – пакет електромагнітного аналізу, який має великий функціонал і дозволяє моделювати електромагнітні поля, електростатику, ланцюги, низько- і високо-частотні струми, механічні процеси, процеси в рідких і газоподібних середовищах, електромагнітну взаємодію різних приладів;
- COMSOL Multiphysics – дозволяє проводити моделювання фізичних процесів, які відбуваються у відповідних об'єктах в області електротехніки,

теплофізики, гідродинаміки, акустики і т.ін.. У тому числі цей пакет використовують спеціалісти при проектуванні або модернізації повітряних / кабельних ліній для проведення чисельного моделювання на основі метода кінцевих елементів, розрахунку напруженості (індукції) магнітного поля або коефіцієнтів послаблення магнітного поля;

- МЕЕР (MIT Electromagnetic Equation Propagation) – програмний пакет для кінцево-різницевого моделювання в тимчасовій області (FDTD) електромагнітних систем, дозволяє проводити моделювання одновимірних (1D), двовимірних (2D), тривимірних (3D) систем, а також систем в циліндричних координатах.

Таким чином, зазначені вище пакети програм для моделювання розподілів напруженостей електричних і магнітних полів потребують глибоких спеціальних знань і є професійними. Для фахівців в області екологічної безпеки, а саме: екологів, гігієністів такі програми є надскладними у використанні.

У даному випадку метою є створення програмного забезпечення для моделювання електромагнітного навантаження на довкілля та людину з боку повітряних ліній електропередачі для оцінювання такого впливу фахівцями у сфері екологічної безпеки, охорони праці та гігієни. Такий комплекс програм повинен мати достатньо простий і зрозумілий інтерфейс, результати моделювання фіксуватися та відображатися у вигляді графіків.

Для реалізації поставленої мети дослідження, а саме – розроблення пакету програм для оцінювання електромагнітної обстановки від впливу повітряних ліній, орієнтованого на фахівців з екологічної безпеки, охорони праці та гігієни, громадських активістів, які опікуються довкіллям, необхідно виконати наступні задачі:

- розрахувати напруженість електричного поля повітряної лінії;
- розрахувати індукцію магнітного поля повітряної лінії;
- результати розподілів напруженості електричного поля та розподілу індукції магнітного поля записувати у базу даних, відображати у вигляді графіків, зберігати їх у зручних форматах;



– оцінити електромагнітне навантаження на довкілля з боку повітряних ліній.

Реалізація вказаних вище задач проводилася відповідно до базової методики розрахунку електричних і магнітних полів ліній електропередачі промислової частоти 50 Гц.

Моделювання напруженості електричного поля й індукції магнітного поля виконано з розрахунками у комплексній формі. Також враховувався той факт, що на території України побудовані магістральні електричні мережі з використанням напруг 220 – 330 – 400(500) – 750 кВ, при цьому потужність сучасної повітряної лінії електропередачі напругою 220 кВ становить 200 МВт, 330 кВ – 400 МВт, 500 кВ – 1000 МВт, 750 кВ – 2000 МВт.

Програмним середовищем обрано Microsoft Visual Studio, інтерфейс реалізований мовою програмування C#, алгоритм реалізований мовою програмування MATLAB.

Вихідними є дані, які характеризують повітряну лінію електропередачі, а саме:

- напруга повітряної лінії передавання;
- висота підвішування проводу на стояку;
- габарит повітряної лінії;
- висота від поверхні землі всередині прогону;
- відстань між осями фаз;
- кількість проводів у фазі;
- радіус проводу;
- крок розщеплення;
- максимальна потужність, що передається по повітряній лінії.

Схема розташування проводів повітряної лінії наведена на рис. 4.1:

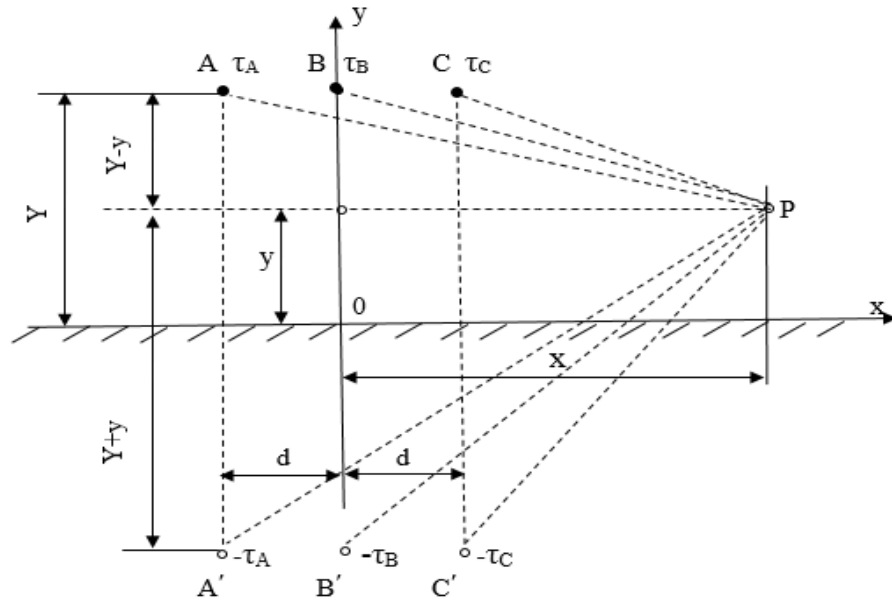


Рис. 4.1. Схема розташування проводів повітряної лінії

Комплексну діючу напруженість електричного поля повітряних ліній у точці на площині перетину обчислюють як суму комплексних діючих напруженостей електричного поля, утвореним кожним із  $k$  заряджених проводів  $\bullet_{\text{пр}}$   $E_k$  та їх дзеркальними зображеннями  $\bullet_{\text{дз}}$   $E_k$  у цій точці (рис. 4.1), за формулою:

$$\bullet E = \sum_k \bullet_{\text{пр}} E_k + \sum_k \bullet_{\text{дз}} E_k$$

Комплексні діючі напруженості електричного поля кожного з  $k$  проводів повітряної лінії  $\bullet_{\text{пр}} E_k$  у точці з координатами  $x$  та  $y$  на площині перетину обчислюють за формулою:

$$\bullet_{\text{пр}} E_k(x, y) = \frac{C \bullet U_k}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \sqrt{(x - X_k^{\text{пр}})^2 + (y - Y_k^{\text{пр}})^2}} \cdot \exp(j \cdot \varphi_k),$$

де  $C$  – електрична ємність  $k$ -го проводу, Ф;

$\bullet U_k$  – комплексна діюча фазна напруга  $k$ -го проводу, В;

$X_k^{\text{пр}}$ ,  $Y_k^{\text{пр}}$  – координати сліду геометричної осі  $k$ -го проводу на площині перетину відповідно до рис. 4.1, м;

$\varepsilon_0 = 8,854 * 10^{-12}$  – електрична стала, Ф/м;

$\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища, в.о.;

$\varphi_k = \arg \left[ \left( x - X_k^{np} \right) + j * \left( y - Y_k^{np} \right) \right]$  – кут, радіан.

Комплексні діючі фазної напруги обчислюються за наступними формулами:

$$\dot{U}_A = \frac{U}{\sqrt{3}} * e^{j * 0} \text{ кВ}; \quad \dot{U}_B = \frac{U}{\sqrt{3}} * e^{-j * \frac{2 * \pi}{3}} \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_C = \frac{U}{\sqrt{3}} * e^{j * \frac{2 * \pi}{3}} \text{ кВ}.$$

Дані формули були приведені до спрощеного вигляду:

$$\dot{U}_A = \frac{U}{\sqrt{3}} \text{ кВ}; \quad \dot{U}_B = \frac{U}{\sqrt{3}} * \left( -\sqrt[3]{-1} \right) \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_C = \frac{U}{\sqrt{3}} * \left( -1 \right)^{\frac{2}{3}} \text{ кВ};$$

Комплексні діючі напруженості електричного поля дзеркальних зображень кожного з  $k$  проводів  $\dot{E}_k^{дз}$  у точці з координатами  $x$  та  $y$  на площині перетину обчислюють за формулою:

$$\dot{E}_k^{дз}(x, y) = \frac{-C * \dot{U}_k}{2 * \pi * \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \sqrt{\left( x - X_k^{дз} \right)^2 + \left( y - Y_k^{дз} \right)^2}} * \exp(j * \theta_k),$$

де  $X_k^{дз}$ ,  $Y_k^{дз}$  – координати сліду геометричної осі дзеркального зображення  $k$ -го проводу на площині перетину відповідно до рис. 4.1, м;

$\theta_k = \arg \left[ \left( x - X_k^{дз} \right) + j * \left( y - Y_k^{дз} \right) \right]$  – кут, радіан.

Ємність проводу повітряної лінії з горизонтальним розташуванням проводів відносно землі обчислюють за формулою:

$$C = \frac{2 * \pi * \epsilon_0 * \epsilon_r}{\ln \left[ \frac{2 * \pi * H_c * d}{r * \sqrt[3]{(4 * H_c^2 + d^2)} * \sqrt{(H_c^2 + d^2)}} \right]}, \quad (4.1)$$

де  $d$  – відстань між проводами повітряної лінії, м;

$H_c = H_{\text{пр}} - \frac{2}{3} * F$  – середня висота підвісу над землею, м;

$H_{\text{пр}}$  – висота підвішування проводу на стояку, м;

$F = H_{\text{пр}} - H_0$  – стріла провисання проводу у прогоні, м;

$H_0$  – габарити лінії (мінімальна відстань від проводу до землі), м;

$r$  – радіус проводу, м.

У разі виконання умови  $H_c \gg d$  ємність проводу повітряної лінії відносно землі дозволено обчислювати за формулою:

$$C = \frac{2 * \pi * \epsilon_0 * \epsilon_r}{\ln \left( \frac{d * \sqrt[3]{2}}{r} \right)} \quad (4.2)$$

У випадку, коли відстані між проводами сусідніх фаз (А і В, В і С, С і А) є неоднаковими і малими у порівнянні з  $H_c$ , дозволено ємність проводу обчислювати за формулою:

$$C = \frac{2 * \pi * \epsilon_0 * \epsilon_r}{\ln \left( \frac{d_c}{r} \right)} \quad (4.3)$$

де  $d_c = \sqrt[3]{d_{\text{AB}} * d_{\text{BC}} * d_{\text{CA}}}$  – середньо геометрична відстань між проводами повітряної лінії, м;

$d_{\text{AB}}, d_{\text{BC}}, d_{\text{CA}}$  – відстань між проводами фаз А, В і С, м.

При розрахунку напруженості електричного поля повітряних ліній з розщепленими проводами у рівняннях (4.1) – (4.3) використовують еквівалентний радіус  $r_e$ , який обчислюють за формулою:

$$r_e = p \cdot \sqrt[n]{r \cdot a^{n-1}},$$

де  $a$  – крок розщеплення (відстань між проводами фаз), м;

$n$  – кількість проводів у фазі;

$p$  – коригувальний коефіцієнт.

Якщо  $n=2$  та  $n=3$ , коригувальний коефіцієнт  $p=1$ , якщо  $n > 3$ , коригувальний коефіцієнт  $p=1,09$ .

Комплексну діючу магнітну індукцію електромагнітного поля повітряної лінії у точці на площині перетину обчислюють як суму комплексних діючих магнітних індукцій, утворених кожним із  $k$  струмів проводів повітряної лінії  $B_k^{np}$  у цій точці (рис. 4.2) за формулою:

$$\vec{B} = \sum_k \vec{B}_k^{np}$$

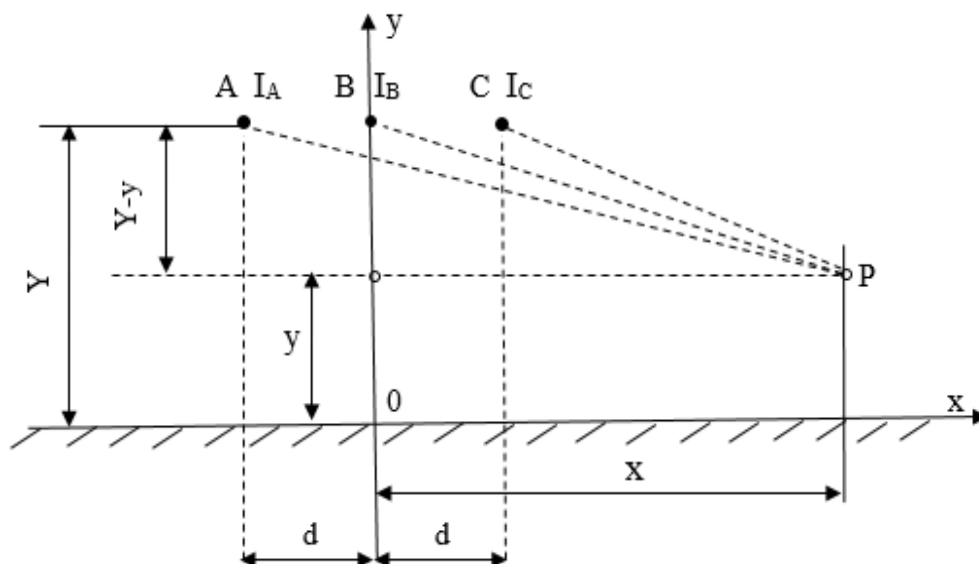


Рис. 4.2. Схема розташування проводів ПЛ

Обчислюють діюче значення струму фази повітряної лінії при максимальній потужності:

$$I_{\phi} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3} * U},$$

де  $S_{\max}$  – максимальна потужність, що передається по повітряній лінії.

Обчислюють діюче значення струму у проводі фази повітряної лінії:

$$I_n = \frac{I_{\phi}}{n},$$

де  $n$  – кількість проводів.

Визначають струми у проводах фаз повітряних ліній:

$$\dot{I}_A = I_n * e^{j*0}, \text{ A}; \quad \dot{I}_B = I_n * e^{-j*\frac{2*\pi}{3}}, \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = I_n * e^{j*\frac{2*\pi}{3}}, \text{ A}.$$

Дані формули були приведені до простішого вигляду:

$$\dot{I}_A = I_n, \text{ A}; \quad \dot{I}_B = I_n * \left(-\sqrt[3]{-1}\right), \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = I_n * (-1)^{\frac{2}{3}}, \text{ A}.$$

Комплексну діючу магнітну індукцію електромагнітного поля кожного з  $k$  проводів повітряної лінії  $\dot{B}_k^{np}$  у точці з координатами  $x$  та  $y$  на площині перетину обчислюють за формулою:

$$\dot{B}_k^{np}(x-y) = \frac{\mu_0 * \mu_r}{2 * \pi} * \frac{\dot{I}_k}{\sqrt{\left(x - X_k^{np}\right)^2 + \left(y - Y_k^{np}\right)^2}} * \exp\left[j * \left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right)\right],$$

де  $\dot{I}_k$  – комплексний діючий лінійний струм  $k$ -го проводу, А;

$X_k^{np}$ ,  $Y_k^{np}$  – координати сліду геометричної осі  $k$ -го проводу на площині

перетину відповідно до рис. 4.2, м;

$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$  – магнітна стала, Гн/м;

$\mu_r$  – відносна магнітна проникненість середовища, в.о.;

$$\varphi_k = \arg \left[ \left( x - X_k^{pp} \right) + j * \left( y - Y_k^{pp} \right) \right] - \text{кут, радіан.}$$

Результати розрахунків напруженості електричного поля повітряних ліній напругою 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ наведені нижче (рис. 4.3 – 4. 8):

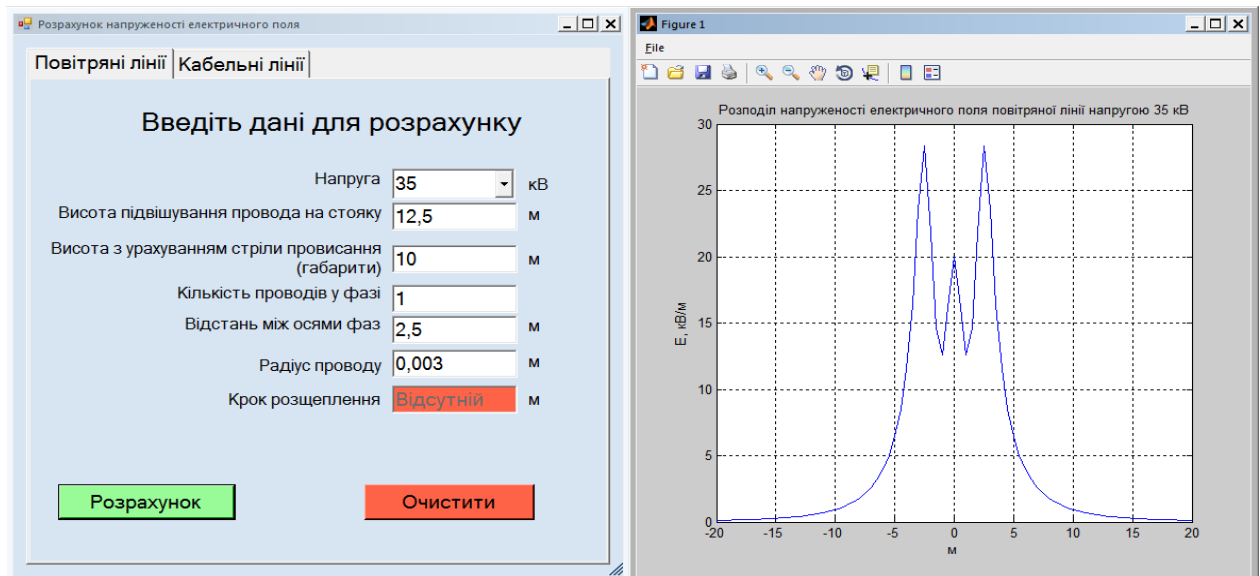


Рис. 4.3. Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 35 кВ

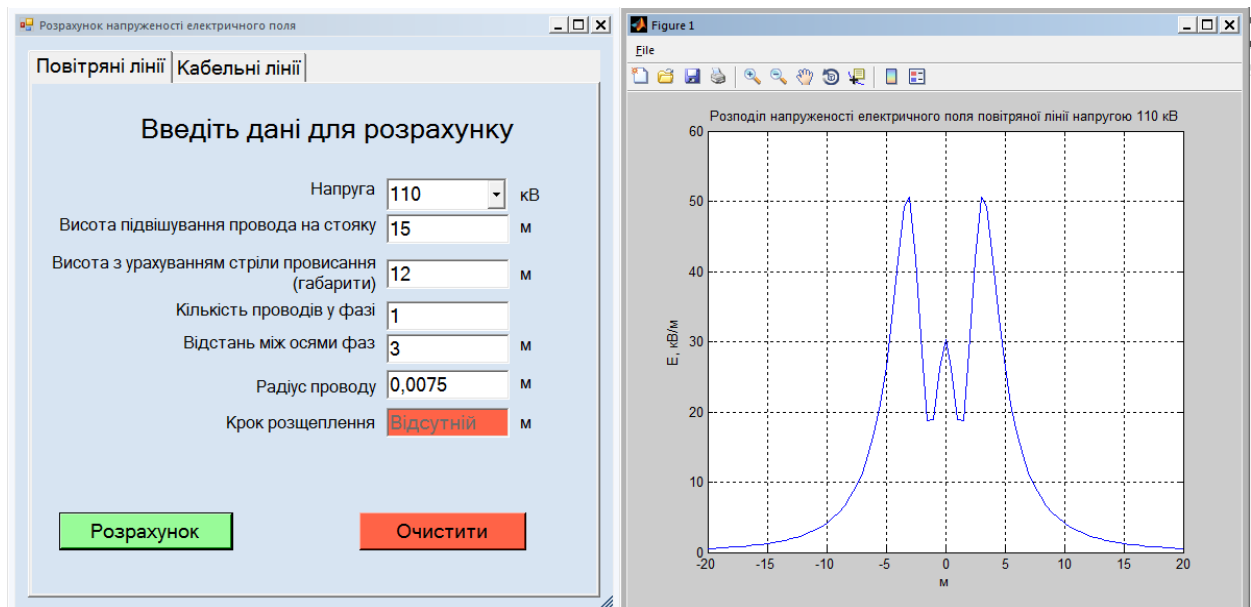


Рис. 4.4. Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 110 кВ

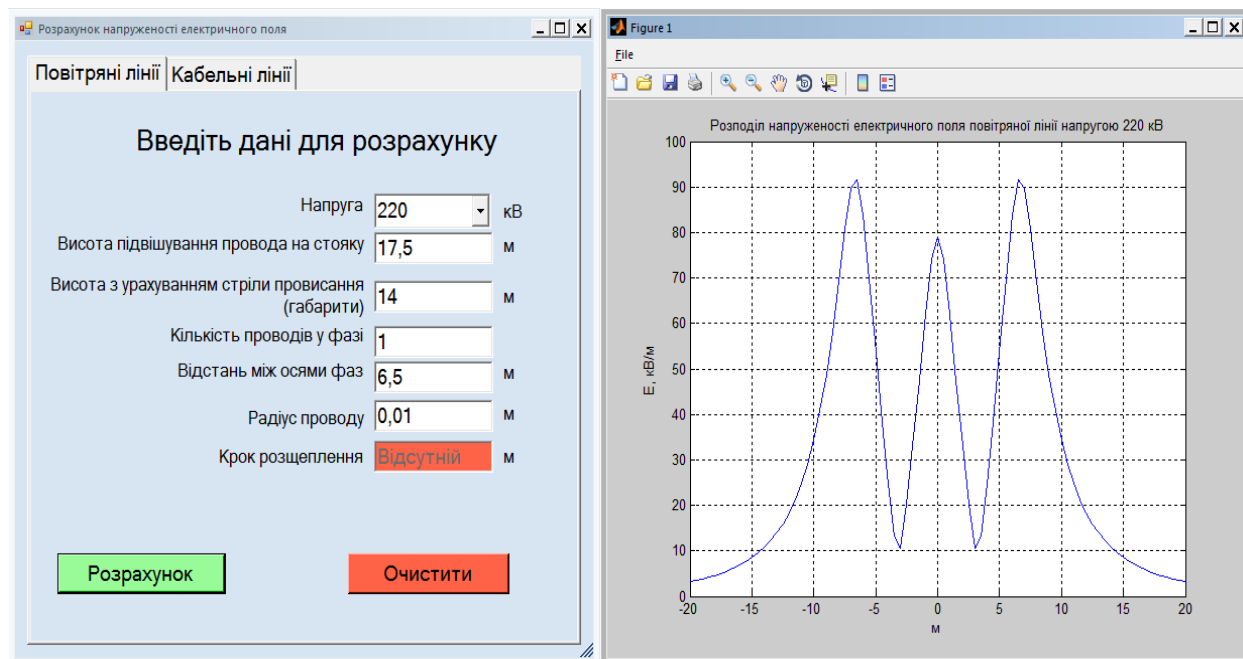


Рис. 4.5. Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 220 кВ

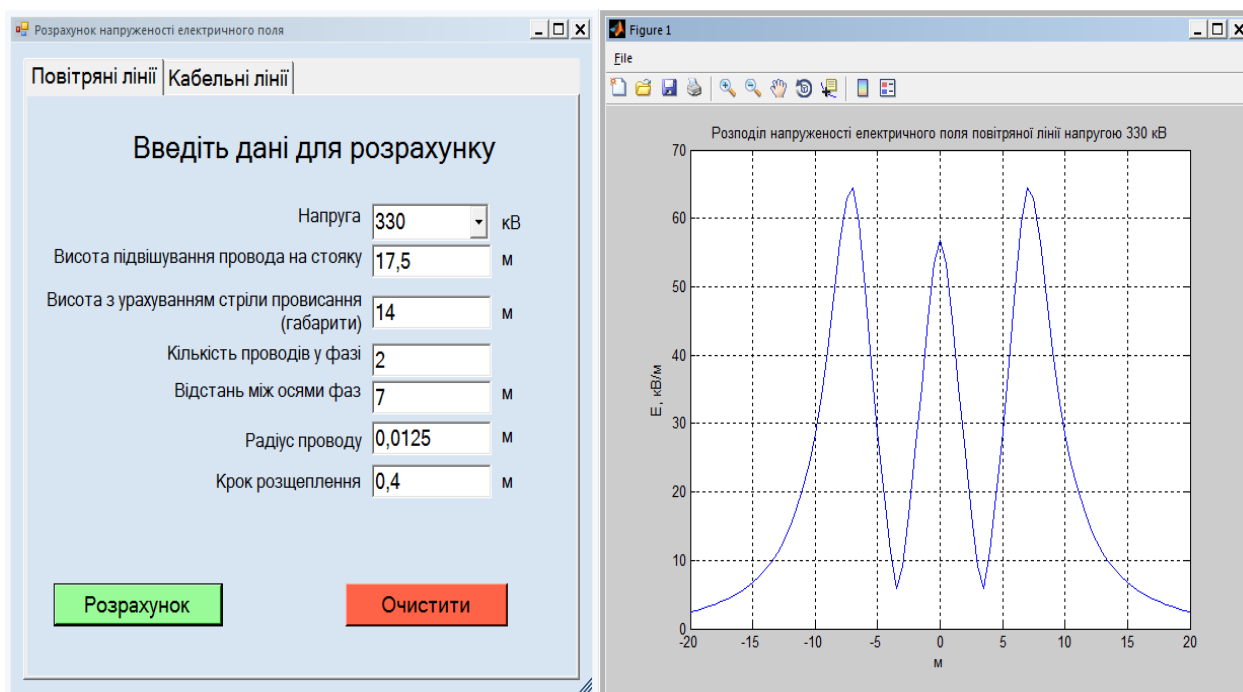


Рис. 4.6. Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 330 кВ



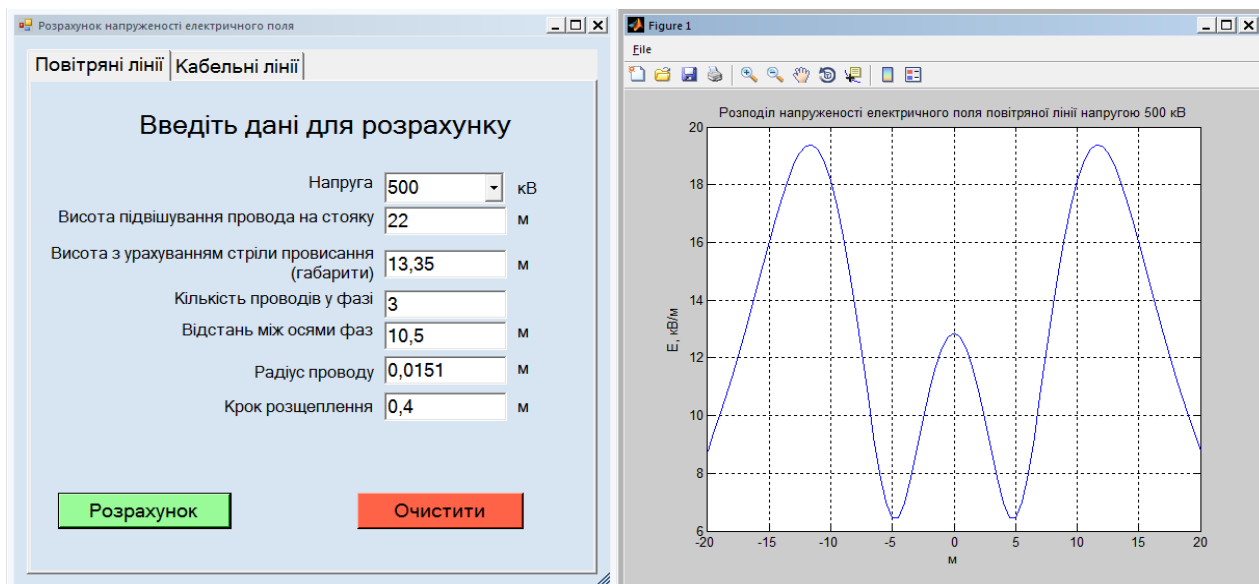


Рис. 4.7. Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 500 кВ

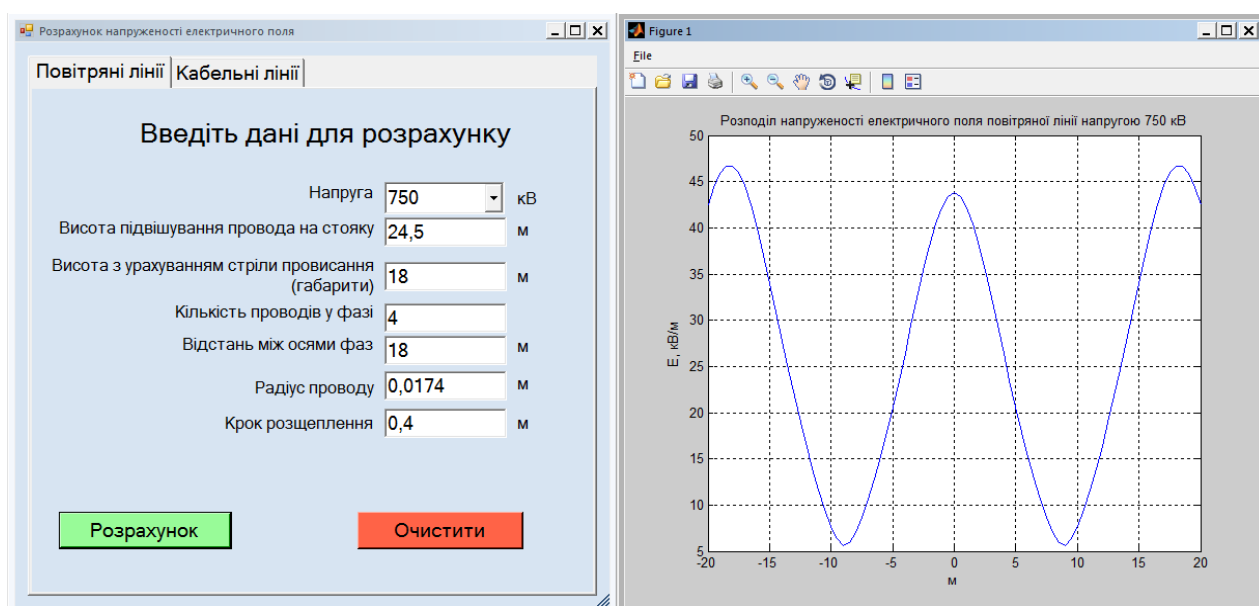


Рис. 4.8. Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 750 кВ

Результати розрахунків індукції магнітного поля повітряних ліній напругою 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ наведені нижче (рис. 4.9 – 4.14):

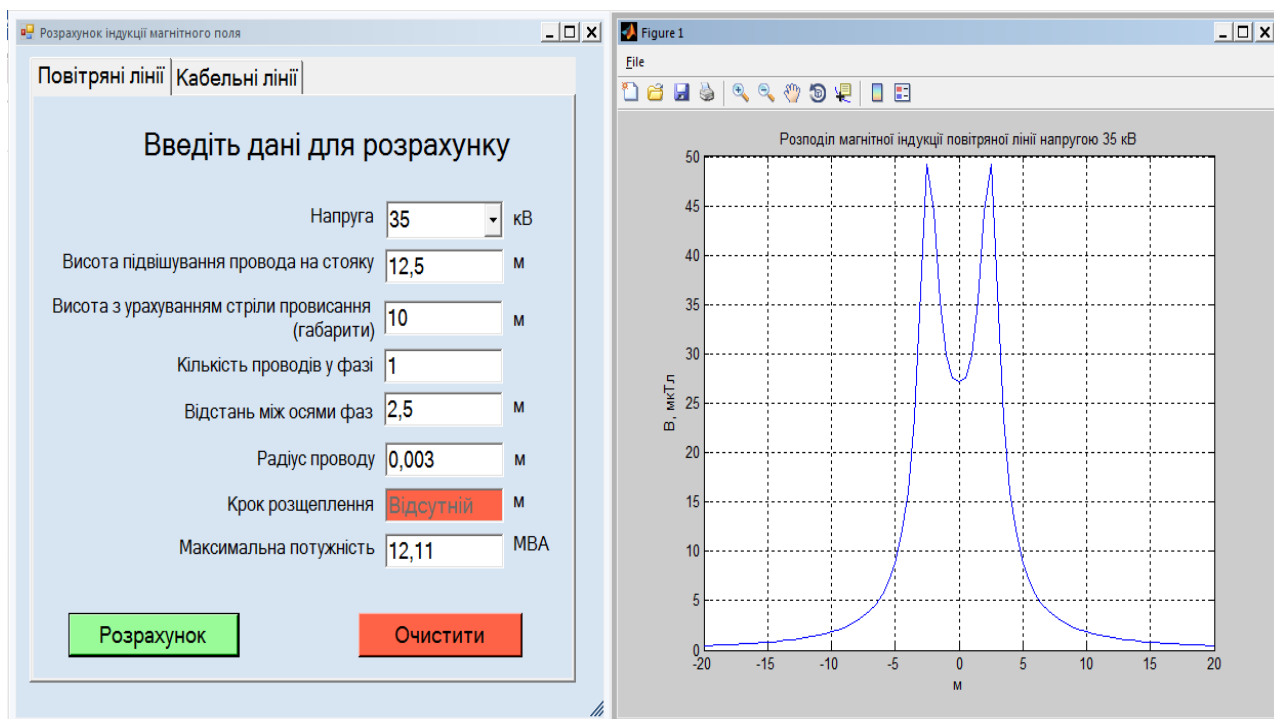


Рис. 4.9. Розрахунок магнітної індукції повітряної лінії напругою 35 кВ

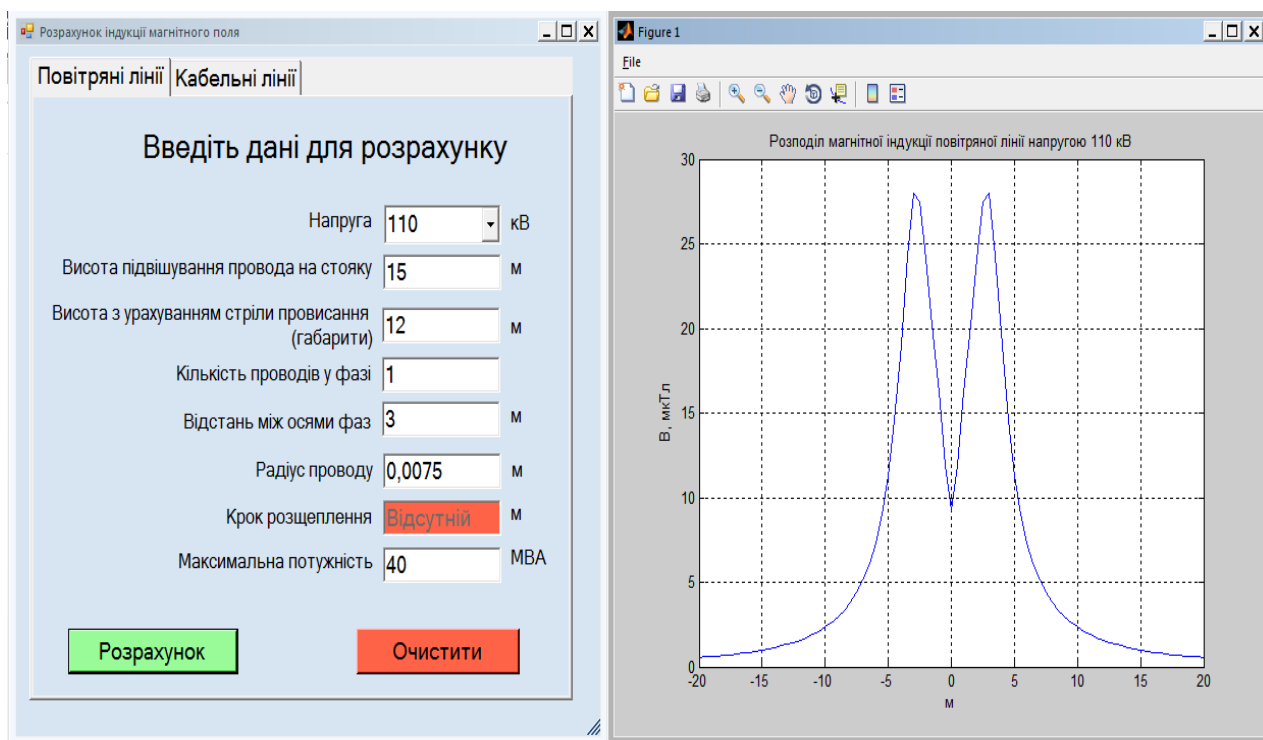


Рис. 4.10. Розрахунок магнітної індукції повітряної лінії напругою 110 кВ

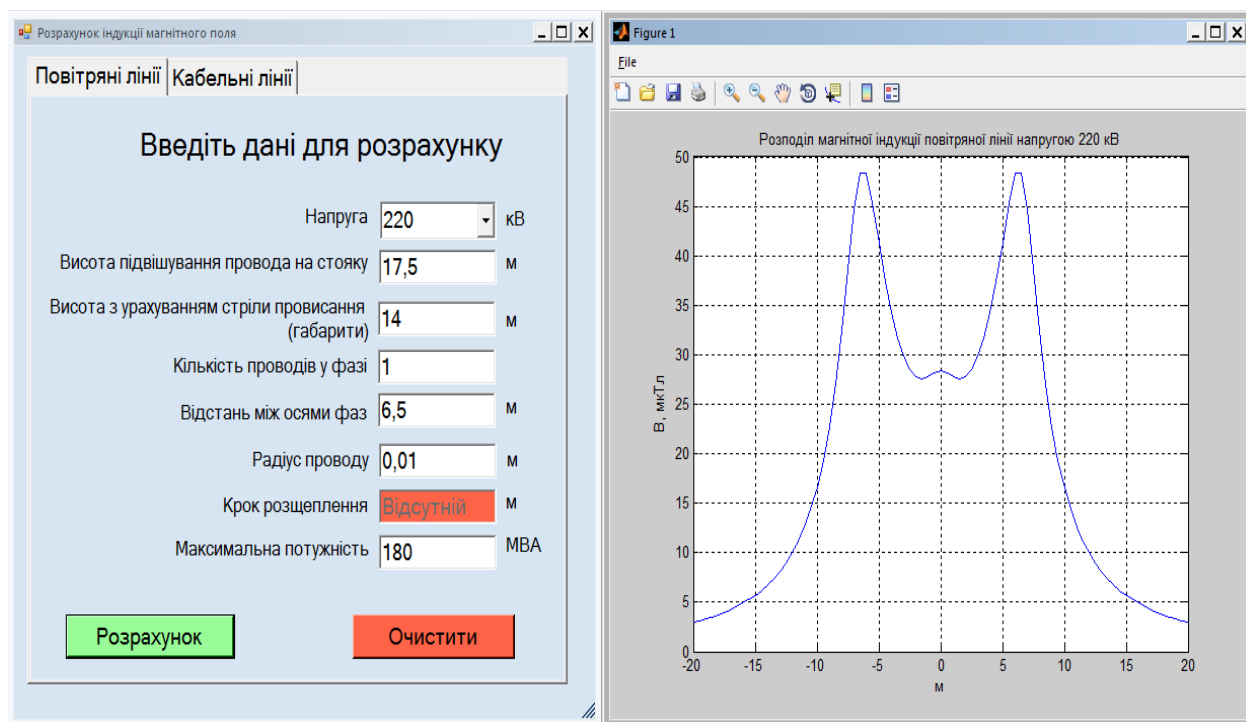


Рис. 4.11. Розрахунок магнітної індукції повітряної лінії напругою 220 кВ

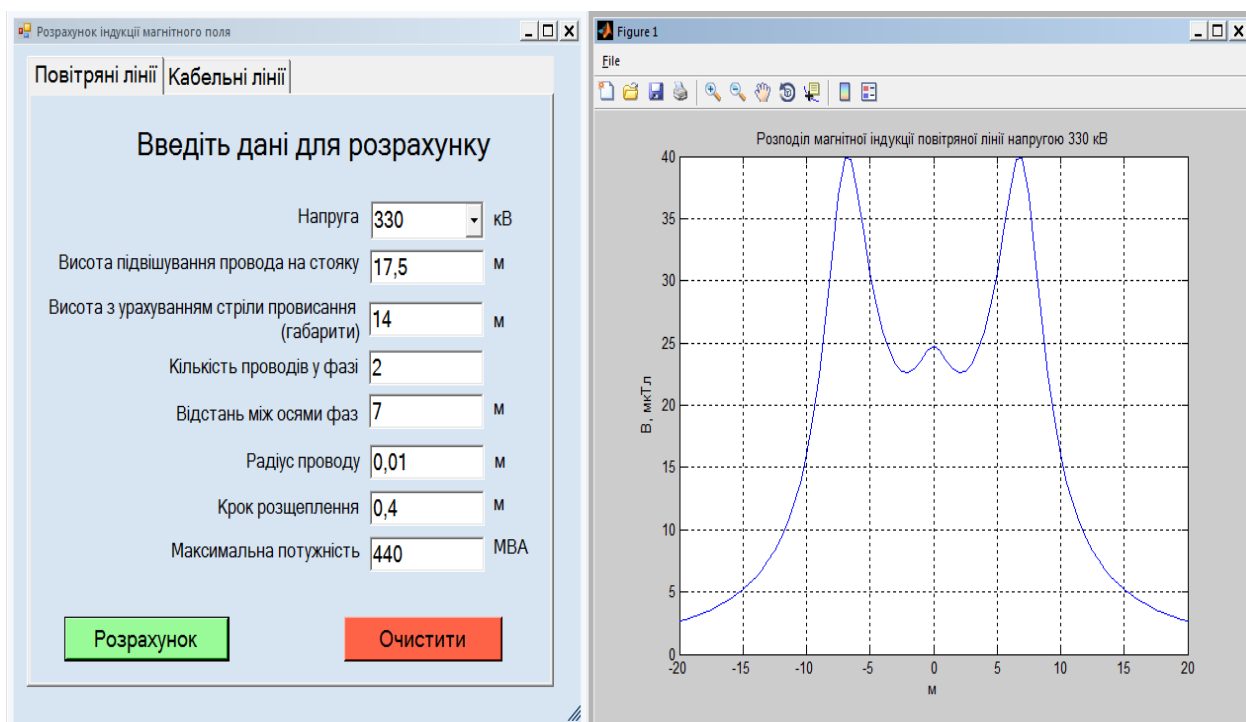


Рис. 4.12. Розрахунок магнітної індукції повітряної лінії напругою 330 кВ

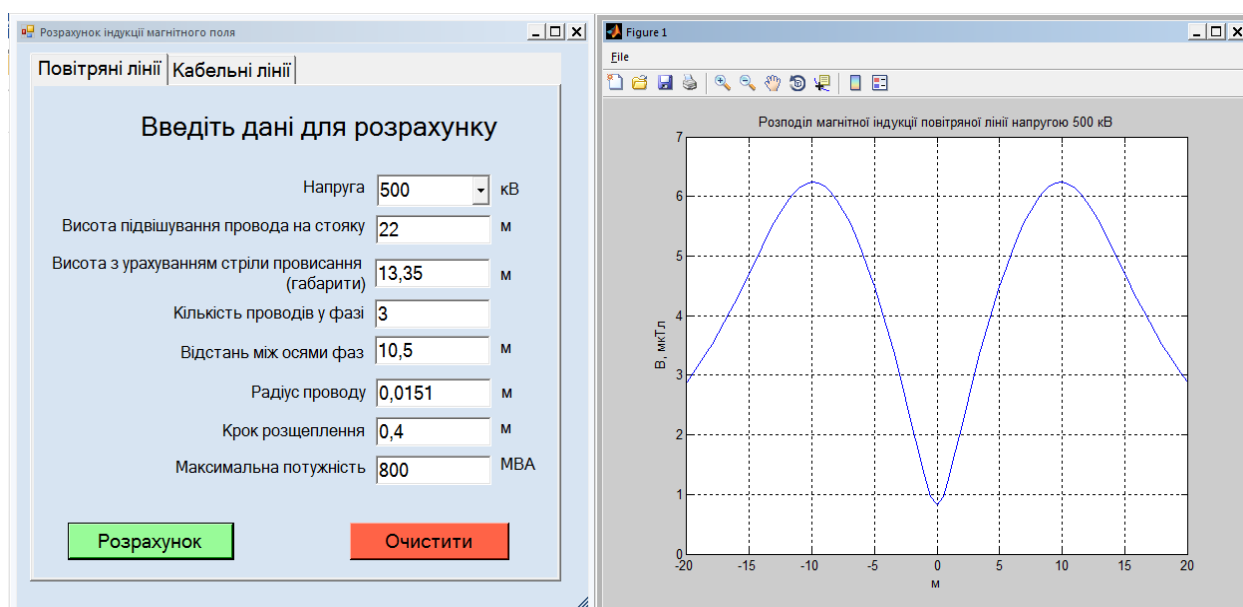


Рисунок 4.13 – Розрахунок магнітної індукції повітряної лінії напругою 500 кВ

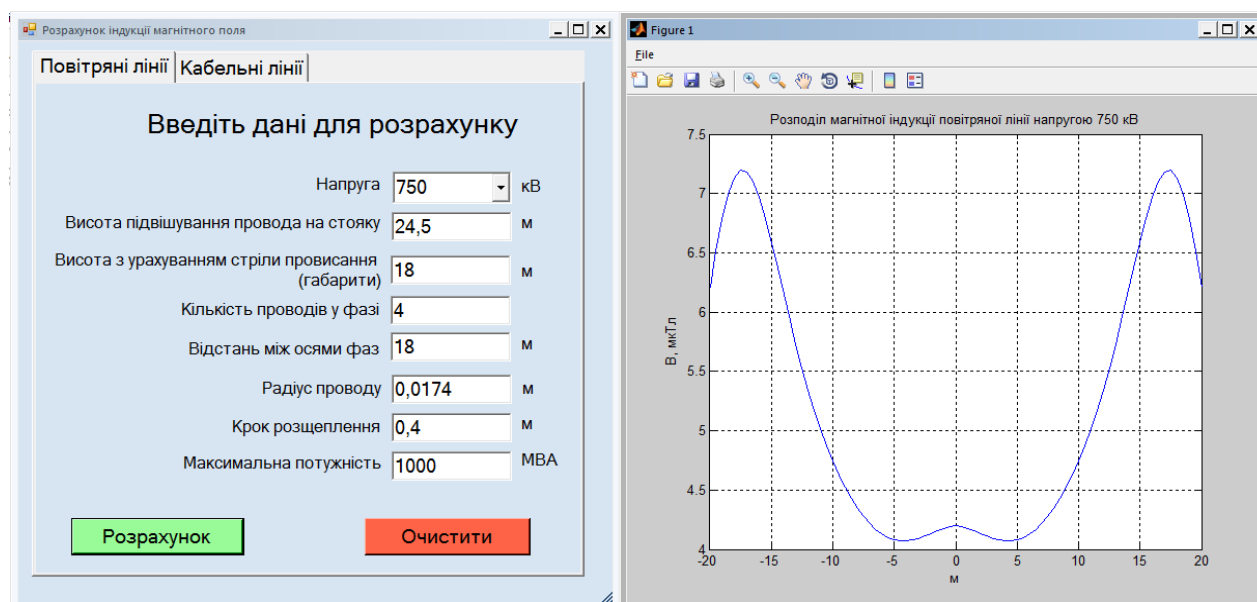
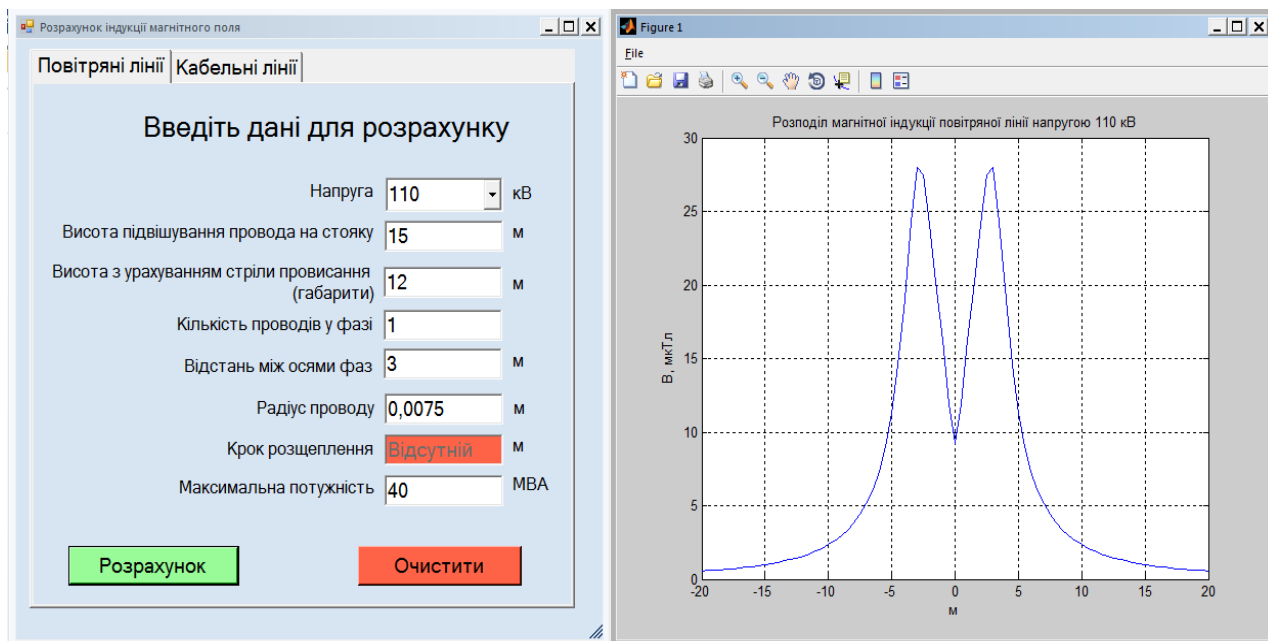


Рисунок 4.14 – Розрахунок магнітної індукції повітряної лінії напругою 750 кВ

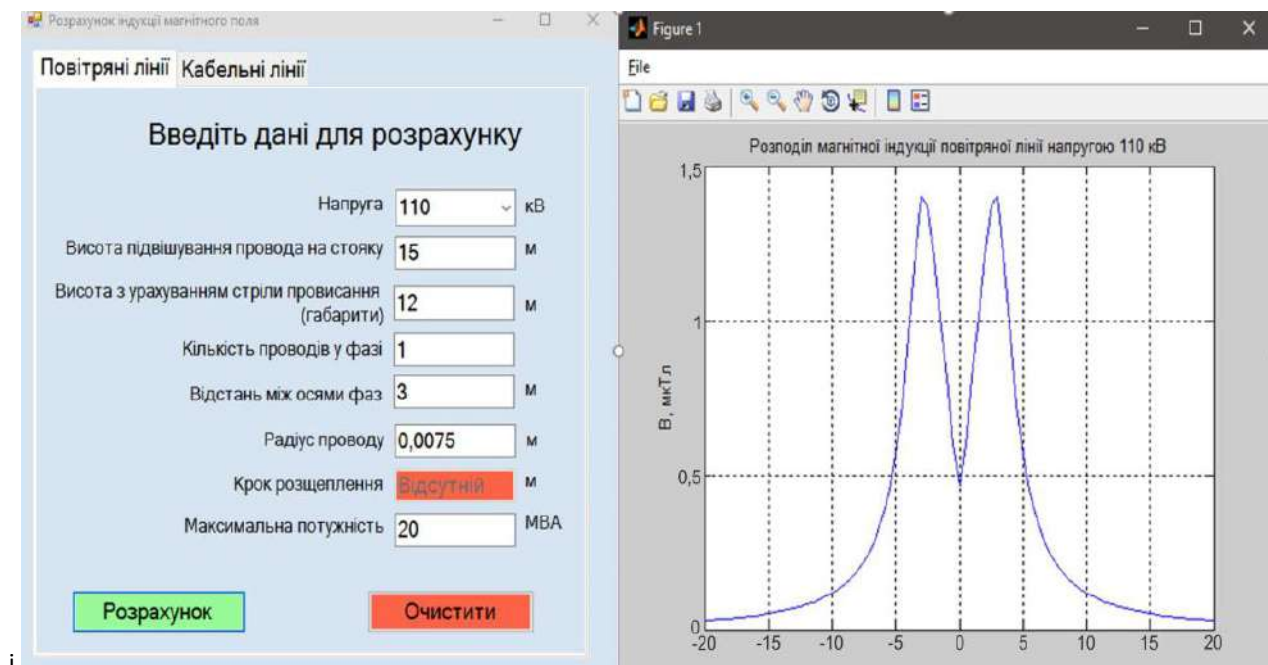
Таким чином, за рахунок проведення моделювання є можливість на стадіях проектування або модернізації повітряних ліній обрати її технічні характеристики (конфігурацію підвісу, діаметр дротів, розщеплення фаз, стрілу провисання), які забезпечують прийнятні рівні електромагнітних полів з прив'язкою до конкретної місцевості, населеного пункту тощо.

Для повітряних ліній, що перебувають у експлуатації можливо розрахувати рівні магнітного поля, які вони генерують, для зниження до безпечних рівнів магнітного поля [296].

Так, прорахувавши максимальний електричний струм у повітряній лінії, який генерує магнітне поле, яке не складає небезпеки для людей згідно чинних нормативів, можна обмежити цей струм за рахунок диспетчеризації потоків електроенергії (Рис. 4.15).



А)



Б)

Рис. 4.15. Розрахунок магнітного поля повітряної лінії напругою 110 кВ за номінальним (А) і меншим електрострумом (Б)

Отриманий результат свідчить, що знизивши значення електричного струму у лінії електропередачі, можна нормалізувати рівні магнітного поля за межами санітарно-захисної зони. Але такий спосіб не завжди є прийнятним. Це стосується випадків недостатньої розгалуженості силової електричної мережі та контактної мережі електричного транспорту, у якій знизити робочий електрострум неможливо.

У цьому випадку зниження впливу магнітного поля реалізується у два етапи. На першому етапі моделюється поширення магнітного поля принаймні за середніх струмових навантажень (вони відомі) і визначаються критичні зони впливу, де потрібне зниження напруженості (індукції) поля. За результатами моделювання визначається розташування джерела зустрічного магнітного поля, яке компенсує поле первинного джерела.

Такий підхід ґрунтується на фундаментальних фізичних співвідношеннях і полягає у монтажі додаткового контуру, паралельного лінії зі струмом, у якому циркулює індукований електричний струм протилежного напрямку. Відповідно спрямоване і його магнітне поле. У цьому випадку розв'язується зворотна задача – за необхідності зниження рівня магнітного поля, розраховується значення компенсуючого поля та електричний струм, який його генерує. А значення цього струму однозначно визначається струмом у первинному джерелі та відстанями між джерелами.

Таким чином, на основі моделювання поширення магнітних полів можна точно визначити не тільки реальну електромагнітну обстановку, а й розрахувати ефективність засобів її нормалізації з їх однозначним позиціюванням.

Окремого розгляду потребують повітряні лінії живлення міського електричного транспорту – контактна мережа.

В останні роки в Україні і за кордоном виконано низку ґрунтовних досліджень щодо визначення фактичних рівнів та розроблення заходів і засобів захисту населення від впливу електромагнітних полів, генерованих системами електроживлення та рухомим складом міського електричного транспорту. Аналіз цих та інших робіт свідчить про значні розбіжності кількісних даних

щодо напруженостей магнітних та електричних полів однотипних транспортних засобів, які не можна пояснити різними режимами їх роботи на момент проведення вимірювань. При цьому чинні нормативи щодо електричного транспорту та загальні нормативи з електромагнітної безпеки ніяких орієнтирів щодо допустимих рівнів електромагнітних полів з боку мереж електричного транспорту не дають.

Наведене дозволяє дійти висновку, що потребує визначення методологія ідентифікації джерел електромагнітних полів електричного транспорту та оцінювання їх рівнів.

Відомо, що увесь міський електричний транспорт живиться від мереж постійного струму високих напруг. При цьому для трамваїв та потягів метрополітену одним з контактних дроти є заземлені рейки, а троллейбусні лінії мають два контактних дроти. Це обумовлює різні просторові поширення електромагнітних полів навколо контактних мереж та у рухомому складі. Досвід досліджень показав, що оцінювання електромагнітного навантаження на середовища доцільно здійснювати за магнітною складовою. Електрична складова має менший вплив на людей і легко екранується. В той же час захист від магнітного поля є складною інженерною задачею.

Найбільш поширеним підходом до визначення електромагнітної обстановки є вимірювання рівнів магнітних полів різними приладами, призначеними для різних частот та частотних діапазонів. Магнітні поля промислової частоти вимірюються спеціалізованими приладами класу ПЗ-50, щільності потоків енергії – ПЗ-31. Рівні постійних магнітних полів – МТМ-01 (наведені найбільш поширені в Україні прилади). За результатами вимірювань визначаються джерела полів та їх критичність щодо формування електромагнітної обстановки. Але такі вимірювання не завжди дають коректні результати.

Особливо це стосується постійної складової магнітного поля. Це обумовлене двома факторами. По-перше, постійне магнітне поле техногенного походження завжди накладається на постійне геомагнітне поле. По-друге,

стаціонарність магнітного поля, принаймні електричного транспорту, дуже відносна.

Тобто завжди постають дві задачі. Перша – порівняння отриманих даних з рівнями геомагнітного поля, яке у багатьох випадках спотворюється феромагнітними конструкціями на поверхні землі та підземними інженерними мережами. Друга – реєстрація коливань (над низькочастотних) магнітного поля технічних засобів, які обумовлені зміною миттєвих значень навантажень на електропривод постійного струму та самого електроструму у контактних мережах. Такі коливання створюють у оточуючому середовищі своєрідний магнітний фон, для надійної реєстрації якого існуючі прилади не пристосовані.

Результати попередніх досліджень показали, що найбільш прийнятний спосіб визначення частотно-амплітудного складу магнітного поля – отримання його спектра за допомогою спеціального датчика магнітного поля та оброблення даних з використанням програми аналізу частотного спектра, наприклад, Spectrogram.

Отримані дані візуалізуються на екрані комп'ютера.

Рівні сигналу на кожній частоті надаються у дБ, тому для отримання напруженостей поля необхідний перерахунок даних, виходячи з калібровочних характеристик датчика та опорної напруги, з якою порівнюються напруги, отримані з датчика. Цей процес досить просто автоматизується. У спрощеному вигляді це можна зробити, вимірявши приладом напруженості магнітного поля на фіксованій частоті, наприклад 50 Гц, порівняти його з рівнем, визначеним у дБ, і перерахувати дані для решти частот.

Спектр магнітного поля поблизу прямолінійної ділянки лінії швидкісного трамваю у м. Києві наведено на рис.4.16.



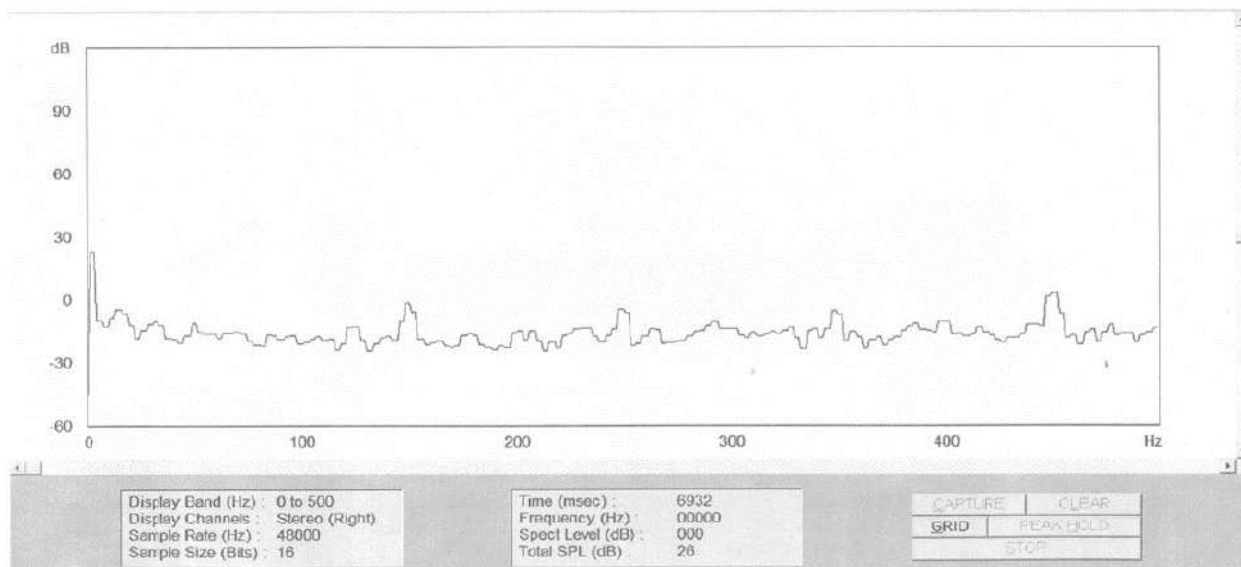


Рис. 4.16. Спектр магнітного поля біля трамвайної лінії (відстань 30 м) за відсутності інших джерел поля

З наведених на рис. 4.16 видно, що існує складова магнітного поля практично нульової частоти. Крім того існує цілий спектр коливань непередбачуваних амплітуд. Аналогічні вимірювання були зроблені на перетині трамвайної лінії з електрифікованою залізничною лінією та повітряною лінією електропередачі. Результати наведено на рис.4.17. Отримані дані свідчать про накладання на магнітне поле трамвайної лінії магнітного поля промислової частоти та її вищих гармонік, фактичні рівні яких можна визначити.

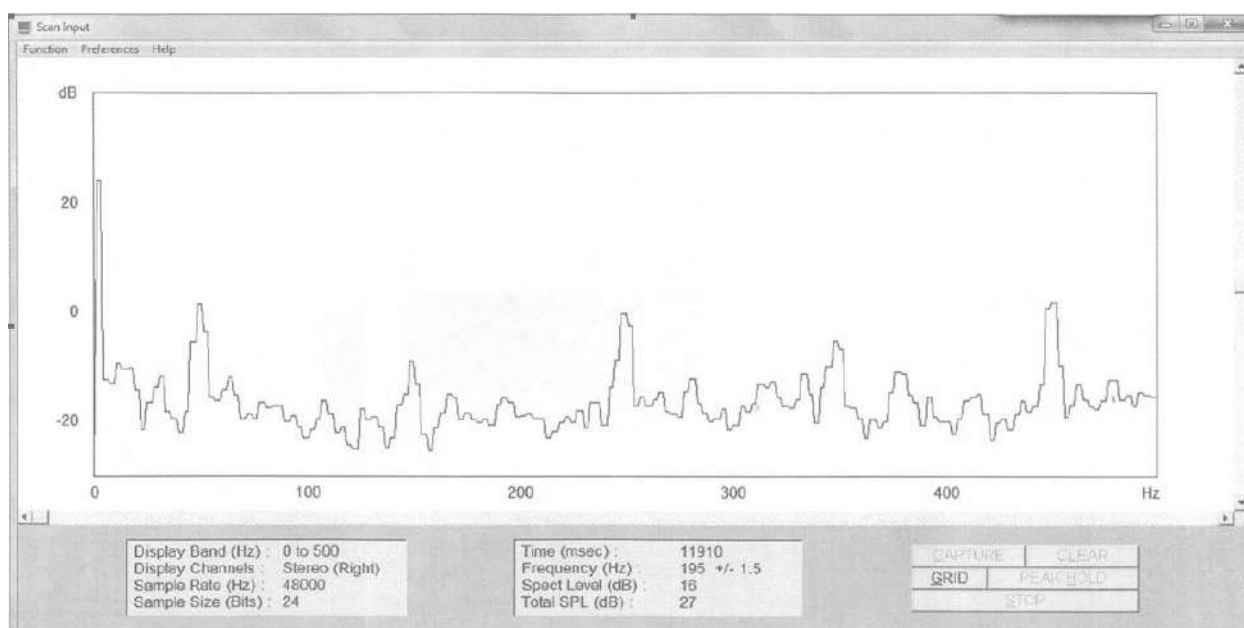


Рис. 4.17. Спектр магнітного поля біля трамвайної лінії за наявності джерел змінного магнітного поля

Перерахунок складової магнітного поля, близької для постійної (рис. 4.16), у наведений вище спосіб (математичний апарат та калібровочний графік докладно викладений у [297]) показали, що вона складає близько 50 мкТл, а індукція геомагнітного поля без техногенних спотворень на широті Києва – 49,6 мкТл. Тобто виміряне – фактично магнітне поле Землі, а постійний електрострум трамвайної лінії практично не впливає на рівень поля на обраній відстані. Але він є джерелом електромагнітних збурень, які можна вважати своєрідним магнітним (електромагнітним) «шумом». Саме він складає вплив на довкілля. За використання наведеного методу можна з прийнятною точністю визначити загальне електромагнітне навантаження на середовище з урахуванням усіх низькочастотних джерел поля в умовах їх складної суперпозиції.

З наведених спектрів видно, що провести моделювання електромагнітних полів контактної мережі міського електричного транспорту через випадковість їх формування практично неможливо. Але враховуючи їх суттєві рівні та майже імпульсний характер, доцільно розробити способи захисту від нього, принаймні за межами лінії. Для цього нами було розроблено пристрій екранування магнітного поля лінійного струмонесучого джерела [298].

Пристрій складається зі змонтованого на будь-яких ізольованих від землі опорах дроту, паралельного струмонесучій лінії, який має необхідну довжину і заземлений з двох кінців. Він функціонує наступним чином. Генероване у робочій струмонесучій лінії змінне магнітне поле викликає у екрануючій лінії індукований електрострум, магнітне поле якого завжди спрямоване протилежно полю, яке його викликало, що є фундаментальним фізичним законом. Це поле викликано електричним струмом, який циркулює у колі «провід – заземлювачі – земля». При цьому як струм, так і магнітне поле, яке компенсує первинне поле, змінюються синхронно з первинним полем.

Позиціонування екрануючого дроту визначається необхідним ступенем компенсації і легко розраховується, виходячи зі співвідношень електротехніки. Дріт розташовується з того боку струмонесучої лінії, з якого необхідно знизити рівень магнітного поля (або з обох боків).

Довжина сегмента екрануючої системи визначається у кожному окремому випадку, виходячи з електропровідності ґрунту у цьому місці.

Випробування розробленого пристрою довели його ефективність, гнучкість у використанні та екологічну доцільність впровадження.

Викладене свідчить, що крім розроблення заходів і засобів зниження електромагнітних полів повітряних ліній будь-якого призначення, необхідно вдосконалення нормування їх впливу на населення і довкілля.

#### 4.2. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів кабельних ліній електропередачі та визначення умов їх мінімізації

Для моделювання просторових розподілів електромагнітних полів кабельних ліній електропередачі також було обрано офіційну методику розрахунку електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Програмним середовищем обрано Microsoft Visual Studio, інтерфейс реалізований мовою програмування C#, алгоритм реалізований мовою програмування MATLAB.

Напруженість електричного поля кабельної лінії (КЛ) обчислюють для одножильних кабелів з неекранованими відносно землі ділянками струмопровідних жил.

Діючі значення напруженості електричного поля КЛ обчислюють для площин, проведених нормально до напрямку траси КЛ через точки з неекранованими відносно землі ділянками струмопровідних жил кабелю (рис. 4.18) за таких умов:

– неекрановані ділянки кабелю – металеві кулі з еквівалентним радіусом  $r_e$ , що дорівнює подвоєному радіусу струмопровідної жили кабелю, віддалені від поверхні землі на відстань, визначену проектними рішеннями, але не меншу унормованої в главі 2.3 ПУЕ-2010 [299];

– інженерні комунікації, будівлі і споруди, транспортні засоби, люди не впливають на розподіл електричного поля КЛ у просторі;

– відносна діелектрична проникність ґрунту  $\varepsilon_r$  дорівнює шести.

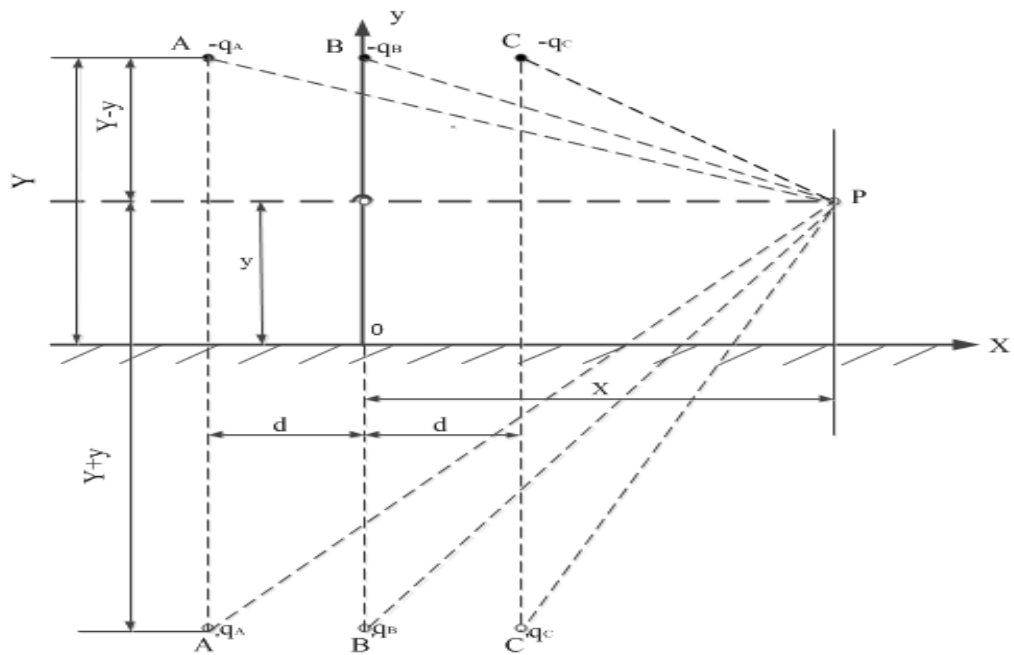


Рис. 4.18. Схема розташування кабелів для розрахунку електричного поля КЛ

Комплексну діючу напруженість електричного поля кабельних ліній у точці на площині перетину обчислюють як суму комплексних діючих напруженостей електричного поля, утвореним кожним із  $k$  неекраниваних ділянок кабелю  $\overset{\bullet}{E}_k$  та їх дзеркальними зображеннями  $\overset{\bullet}{E}_k^{\text{н.д.}}$  у цій точці (рис. 4.18), за формулою:

$$\overset{\bullet}{E} = \sum_k \overset{\bullet}{E}_k + \sum_k \overset{\bullet}{E}_k^{\text{н.д.}}$$

Комплексні діючі напруженості електричного поля кожної з  $k$  неекраниваних ділянок кабелю  $\overset{\bullet}{E}_k$  у точці з координатами  $x$  та  $y$  на площині перетину обчислюють за формулою:

$$\overset{\bullet}{E}_k(x, y) = \frac{C \cdot \overset{\bullet}{U}_k}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \sqrt{(x - X_k^{\text{н.}})^2 + (y - Y_k^{\text{н.}})^2}} \cdot \exp(j \cdot \psi_k),$$

де  $C$  – електрична ємність  $k$ -ї неекраниваної ділянки кабелю, Ф;

$\overset{\bullet}{U}_k$  – комплексне діюче значення фазної напруги  $k$ -го кабелю, В;

$X_k^H, Y_k^H$  – координати  $k$ -ї неекранованої ділянки кабелю на площині перетину відповідно до рис. 4.18, м;

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ – електрична стала, Ф/м;}$$

$\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність середовища, в.о.;

$$\psi_k = \arg \left[ \left( x - X_k^H \right) + j \cdot \left( y - Y_k^H \right) \right] \text{ – кут, радіан.}$$

Комплексні діючі фазної напруги обчислюються за наступними формулами:

$$\dot{U}_A = \frac{U}{\sqrt{3}} * e^{j \cdot 0} \text{ кВ; } \dot{U}_B = \frac{U}{\sqrt{3}} * e^{-j * \frac{2 * \pi}{3}} ; \dot{U}_C = \frac{U}{\sqrt{3}} * e^{j * \frac{2 * \pi}{3}} \text{ кВ.}$$

Дані формули були приведені до спрощеного вигляду:

$$\dot{U}_A = \frac{U}{\sqrt{3}} \text{ кВ; } \dot{U}_B = \frac{U}{\sqrt{3}} * \left( -\sqrt[3]{-1} \right) \text{ кВ; } \dot{U}_C = \frac{U}{\sqrt{3}} * \left( -1 \right)^{\frac{2}{3}} \text{ кВ;}$$

Комплексні діючі напруженості електричного поля дзеркальних зображень кожної з  $k$  неекранованих ділянок кабелю  $\dot{E}_k^{H.D.}$  у точці з координатами  $x$  та  $y$  на площині перетину обчислюють за

$$\text{формулою: } \dot{E}_k^{H.D.}(x, y) = \frac{-C * \dot{U}_k}{2 * \pi * \varepsilon_0 * \varepsilon_r * \sqrt{\left( x - X_k^{H.D.} \right)^2 + \left( y - Y_k^{H.D.} \right)^2}} * \exp \left( j * \varphi_k \right),$$

де  $X_k^{H.D.}, Y_k^{H.D.}$  – координати дзеркального зображення  $k$ -ї неекранованої ділянки кабелю на площині перетину відповідно до рис. 4.18, м;

$$\varphi_k = \arg \left[ \left( x - X_k^{H.D.} \right) + j * \left( y - Y_k^{H.D.} \right) \right] \text{ – кут, радіан.}$$

Ємність неекранованої відносно землі ділянки кабелю обчислюється за формулою:

$$C = 8 * \pi * \varepsilon_0 * \varepsilon_r * r,$$

де  $r$  – радіус струмопровідної жили кабелю, м.

Обчислення діючих значень магнітної індукції КЛ виконують для площини, проведеної нормально до напрямку траси КЛ через точку найменшого заглиблення кабелів за таких умов:

– кабелі КЛ – система нескінченно довгих паралельних проводів нескінченно малого діаметра зі струмами, які віддалені від поверхні землі на глибину, визначену проектними рішеннями, але не меншу унормованої в главі 2.3 ПУЕ-2010;

– інженерні мережі, будівлі і споруди, транспортні засоби, люди не впливають на розподіл магнітного поля КЛ у просторі;

– відносна магнітна проникність ґрунту  $\mu_r$  дорівнює одиниці.

Комплексні діючі магнітні індукції електромагнітного поля КЛ у точці на площині перетину обчислюють як суму комплексних діючих магнітних індукцій

$B_{\kappa}^{np}$ , утвореним із  $\kappa$ -струмів КЛ у цій точці (рис. 4.19) за формулою:

$$\vec{B} = \sum_k \vec{B}_k$$

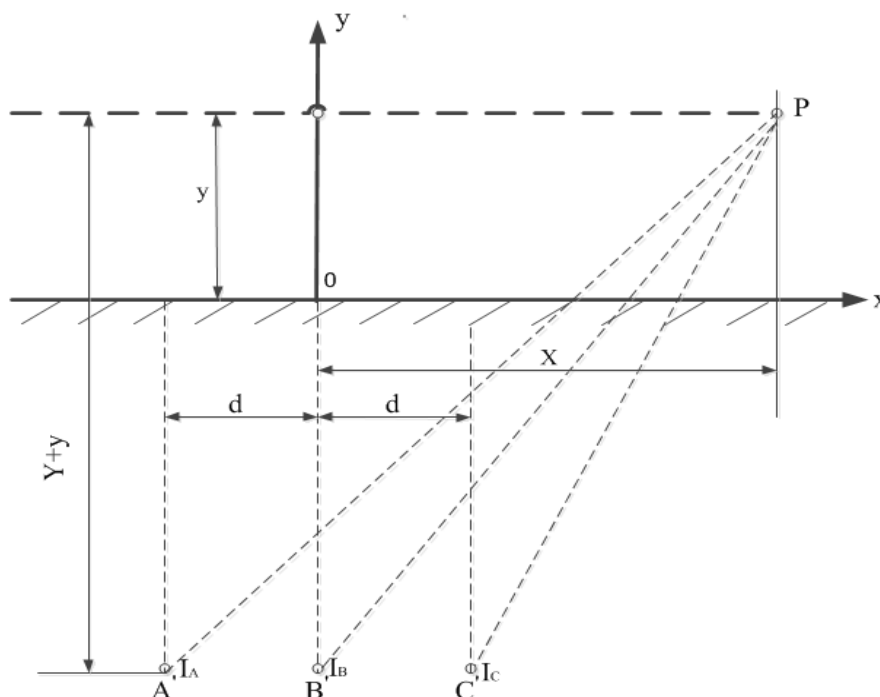


Рис. 4.19. Схема розташування кабелів для розрахунку магнітної індукції

ЕМП КЛ

За відсутності струмів у екранах одножильних кабелів комплексні діючі магнітні індукції електромагнітного поля кожного з  $k$ -струмів КЛ  $\dot{B}_k$  у точці з координатами  $x$  і  $y$  на площині перетину обчислюють за формулою:

$$\dot{B}_k(x, y) = \frac{\mu_0 * \mu_r}{\pi} * \frac{\dot{I}_k}{\sqrt{(x - X_k)^2 + (y - Y_k)^2}} * \exp\left[j * \left(\psi_k - \frac{\pi}{2}\right)\right],$$

де  $\dot{I}_k$  – комплексний діючий струм  $k$ -го кабелю, А;

$X_k, Y_k$  – координати сліду геометричної осі  $k$ -го кабелю на площині перетину відповідно до рис. 4.19, м;

$$\psi_k = \arg[(x - X_k) + j(y - Y_k)] - \text{кут, радіан.}$$

У разі використання одножильних кабелів, в екранах яких протікають струми (екрани заземлено з обох боків), комплексні діючі магнітні індукції електромагнітного поля кожного з  $k$ -струмів кабельної лінії  $\dot{B}_k$  у точці з координатами  $x$  та  $y$  на площині перетину обчислюють за формулою:

$$\dot{B}_k(x, y) = \frac{\mu_0 * \mu_r}{\pi} * \frac{\dot{I}_k * m}{\sqrt{(x - X_k)^2 + (y - Y_k)^2}} * \exp\left[j * \left(\varphi_k - \frac{\pi}{2}\right)\right],$$

де коригувальний коефіцієнт  $m$  вибирають за таблицею 4.5.

Таблиця 4.5

Значення коригувального коефіцієнта  $m$ 

Середньгеометрична відстань між кабелями, м	Переріз екрана, мм <sup>2</sup>	$m$
0,1	25	0,9
	50	0,75
	100	0,5

	150	0,4
	200	0,3
Середньогометрична відстань між кабелями, м	Переріз екрана, мм <sup>2</sup>	м
0,2	25	0,8
	50	0,7
	100	0,4
	150	0,3
	200	0,2
0,5	25	0,75
	50	0,55
	100	0,3
	150	0,25
	200	0,1

Вихідними є дані, які характеризують кабельну лінію електропередачі, а саме:

- напруга кабельної лінії передавання;
- відстань між осями кабелів;
- радіус жили кабелю;
- глибина прокладання кабелю;
- найбільше діюче значення сили струму.

Вимірювання проводяться на висоті 0,5 м.

Результати розрахунків напруженості електричного поля кабельних ліній напругою 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, 330 кВ наведені нижче (рис. 4.20 – 4.23):



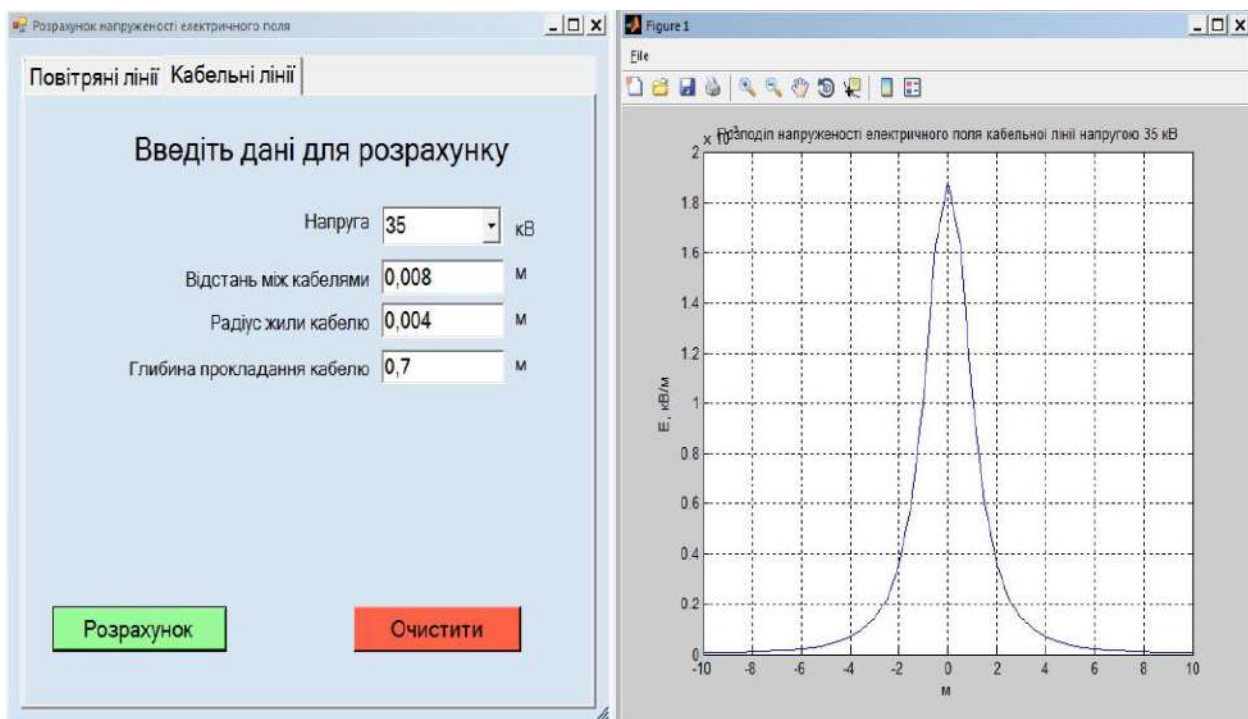


Рис. 4.20. Розрахунок напруженості електричного поля кабельної лінії напругою 35 кВ

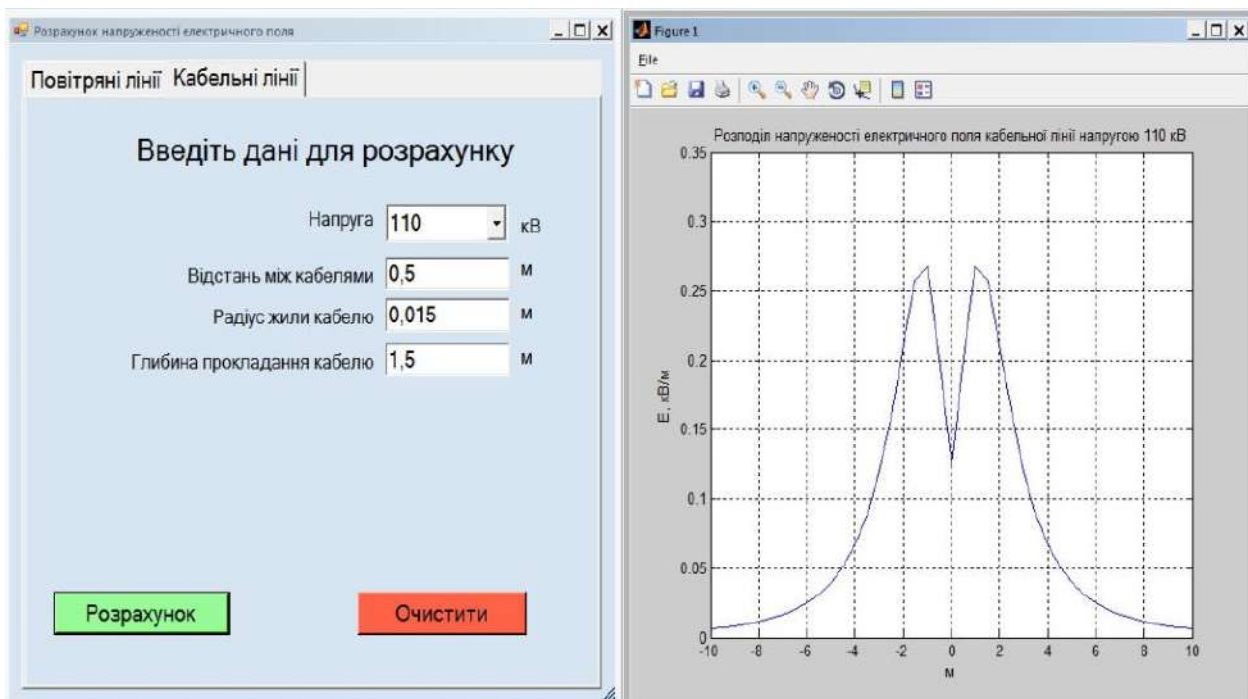


Рис. 4.21. Розрахунок напруженості електричного поля кабельної лінії напругою 110 кВ

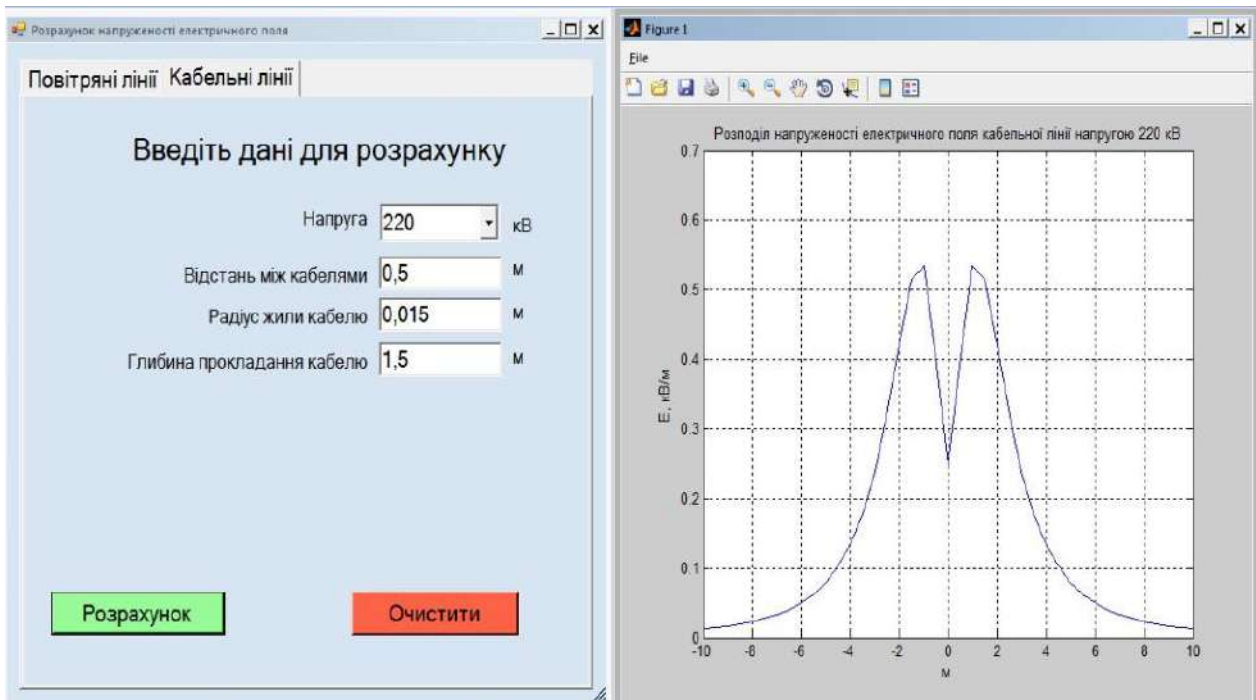


Рис. 4.22. Розрахунок напруженості електричного поля кабельної лінії напругою 220 кВ

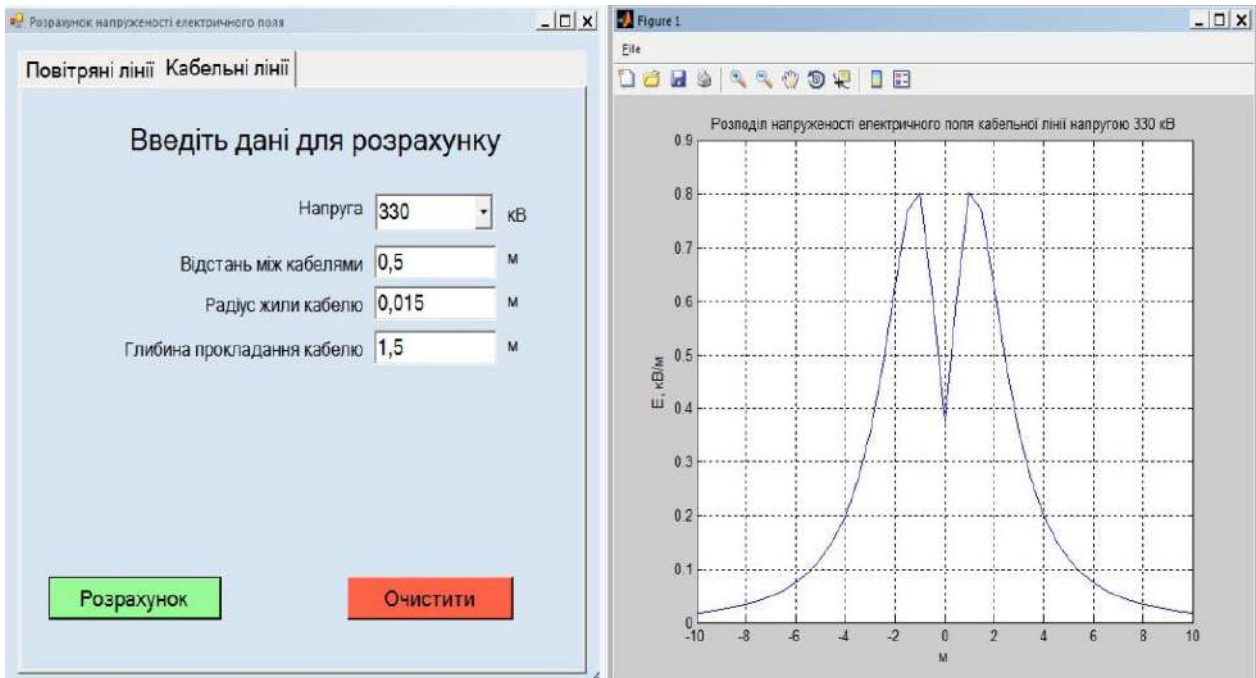


Рис. 4.23. Розрахунок напруженості електричного поля кабельної лінії напругою 330 кВ

Результати розрахунків індукції магнітного поля кабельних ліній напругою 35 кВ, 110 кВ, 220 кВ, 330 кВ наведені нижче (рис. 4.24 – 4.27):

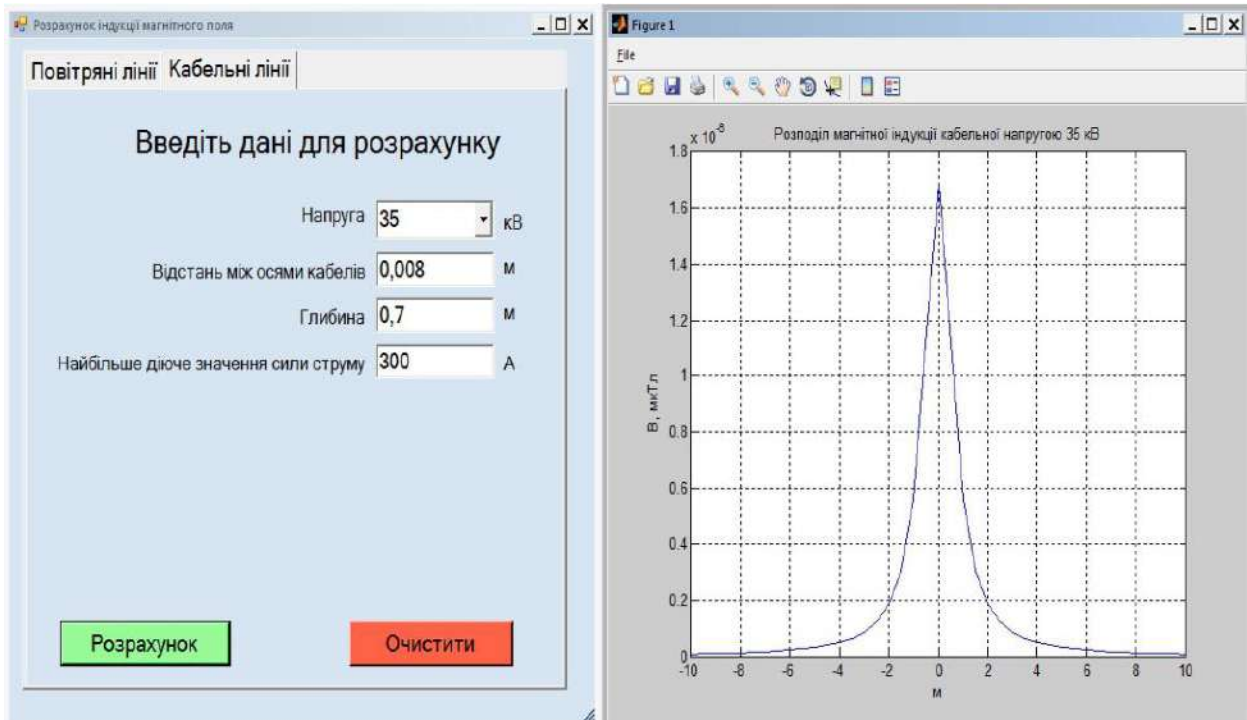


Рис. 4.24. Розрахунок магнітної індукції кабельної лінії напругою 35 кВ

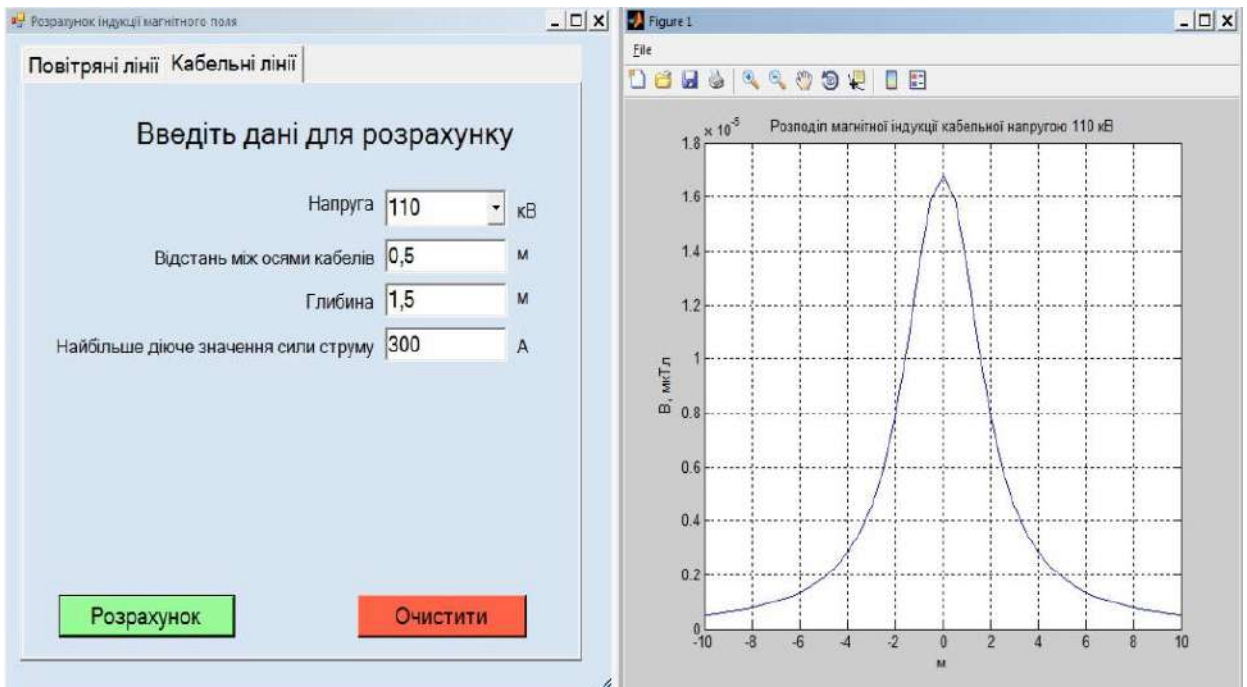


Рис. 4.25. Розрахунок магнітної індукції кабельної лінії напругою 110 кВ

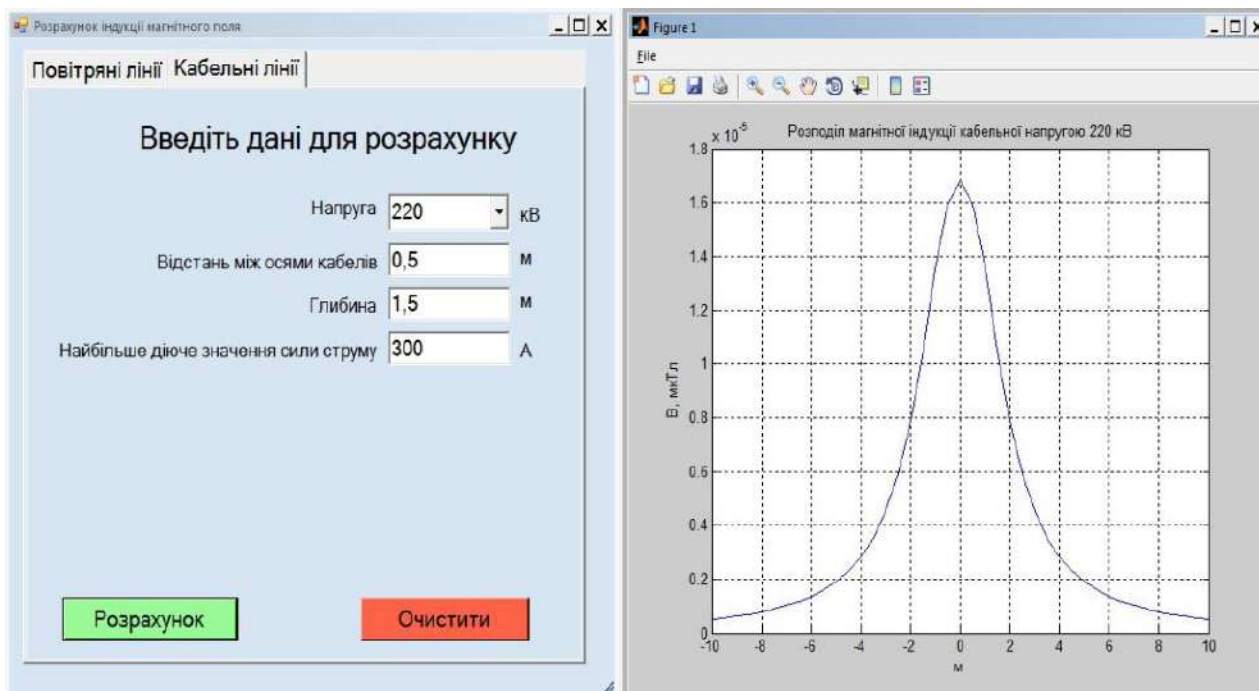


Рис. 4.26. Розрахунок магнітної індукції кабельної лінії напругою 220 кВ

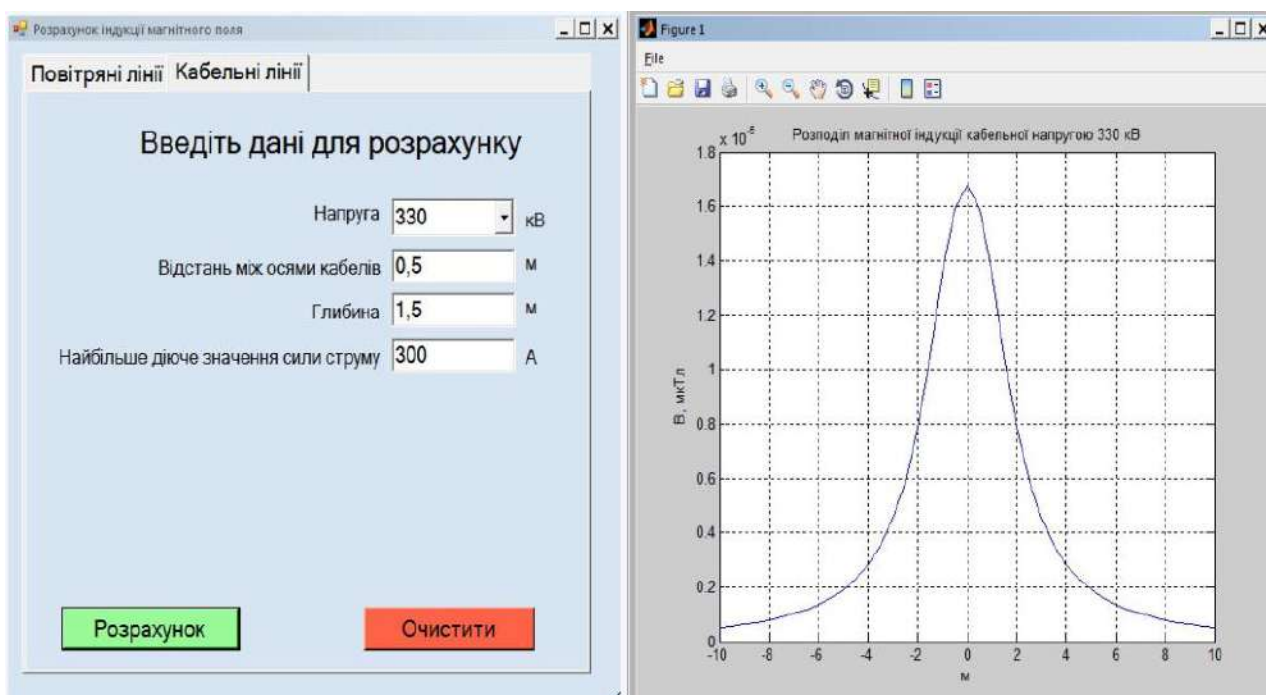


Рис. 4.27. Розрахунок магнітної індукції кабельної лінії напругою 330 кВ

З метою встановлення наскільки точно розраховані рівні електричного та магнітного полів навколо лінії електропередачі шляхом моделювання та доведення доцільності використання результатів моделювання на стадіях

проектування нових ліній електропередачі, а також оцінювання їх впливу на навколишнє середовище необхідно порівняти значення реальних змін рівнів полів навколо лінії електропередачі, яка перебуває в експлуатації, з розрахованими, отриманими у результаті моделювання.

Для перевірки було обрано повітряну лінію електропередачі напругою 330 кВ з рядним розташуванням фазних дротів, тому що це лінія з мінімальною напругою, для якої вже передбачено санітарно-захисну зону. Вимірювання виконувалися повіреним вимірювачем низькочастотного електромагнітного поля ПЗ-50. Розподіл поля оцінювався за електричною складовою електромагнітного поля, яка не залежить від миттєвого електронавантаження (рис. 4.28).

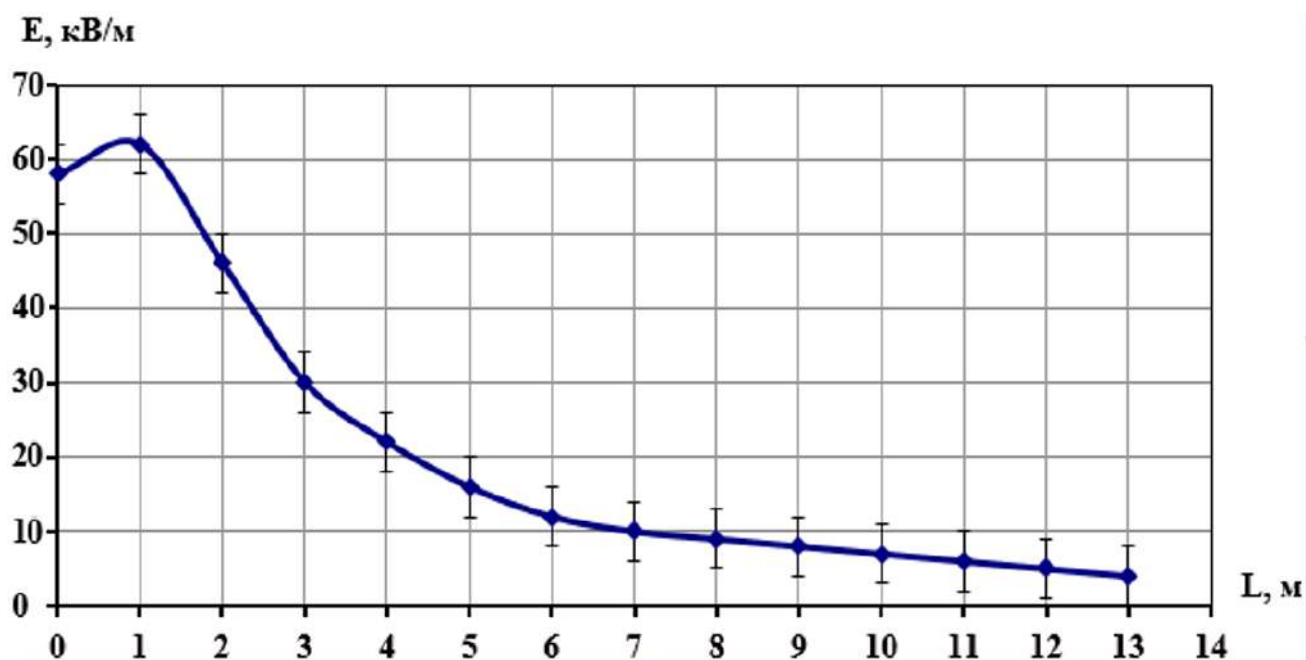


Рис. 4.28. Зміна напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 330 кВ (відлік від проекції крайнього фазного дроту на землю)

Порівняльний аналіз значень напруженості, отриманих шляхом натурних вимірювань повіреним вимірювачем ПЗ-50, та розрахованих значень шляхом моделювання, свідчить про задовільну збіжність виміряних та розрахованих значень. При цьому джерелом розбіжності можуть бути дещо різні висоти підвісу та стріли провисання. Враховуючи можливість зниження магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти (обмеженням навантаження на лінію, раціоналізацією структури підвісу) та електричної

складової (зниженням робочої напруги при проектуванні, зміною структур підвісу), також необхідно враховувати інші сторонні джерела впливу на електромагнітну обстановку у зоні проектування лінії або її експлуатації. Як показали натурні вимірювання, такі впливи можуть бути двох типів: електромагнітні низькочастотні поля зовнішніх джерел та побічні поля з боку самої лінії (поля електрострумів зв'язку, коронних розрядів тощо). За допомогою каліброваного приладу SpectranNF-5030 було проведено вимірювання спектрального складу електричного поля повітряної лінії електропередачі напругою 220 кВ біля аеропорту «Херсон». В області наднизьких частот виявлено вищі гармоніки промислової частоти (рис. 4.29).

Третя і п'ята гармоніки мають значні амплітуди, що потребує врахування їх у загальну електромагнітну обстановку. Але це явище пов'язане з незадовільною якістю електроенергії (несинусоїдальністю), що потребує корекції генерації енергії. Значний внесок у електромагнітну обстановку дає електричне поле частотою 130 кГц (рис. 4.30). Враховуючи, що ГДР для поля цієї частоти складає 25 В/м, це поле значно впливає на загальний електромагнітний фон. Визначення гармонічного складу електричного поля низької частоти показало його складність (рис. 4.31).

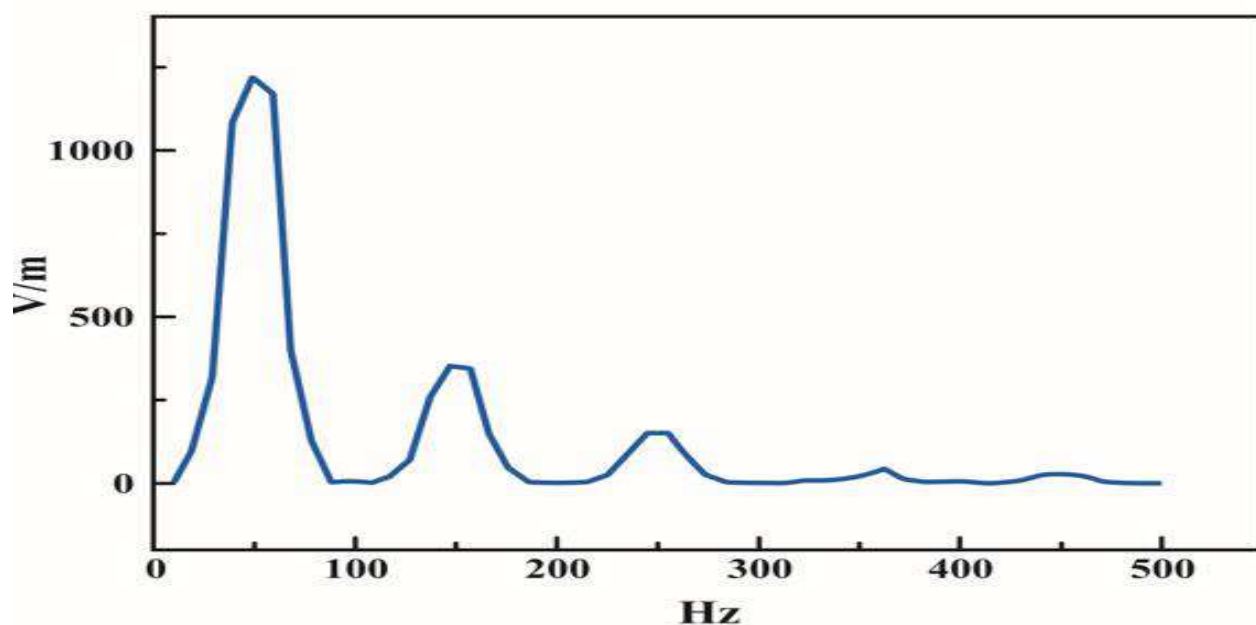


Рис. 4.29. Спектральний склад електричного поля повітряної лінії електропередачі напругою 220 кВ

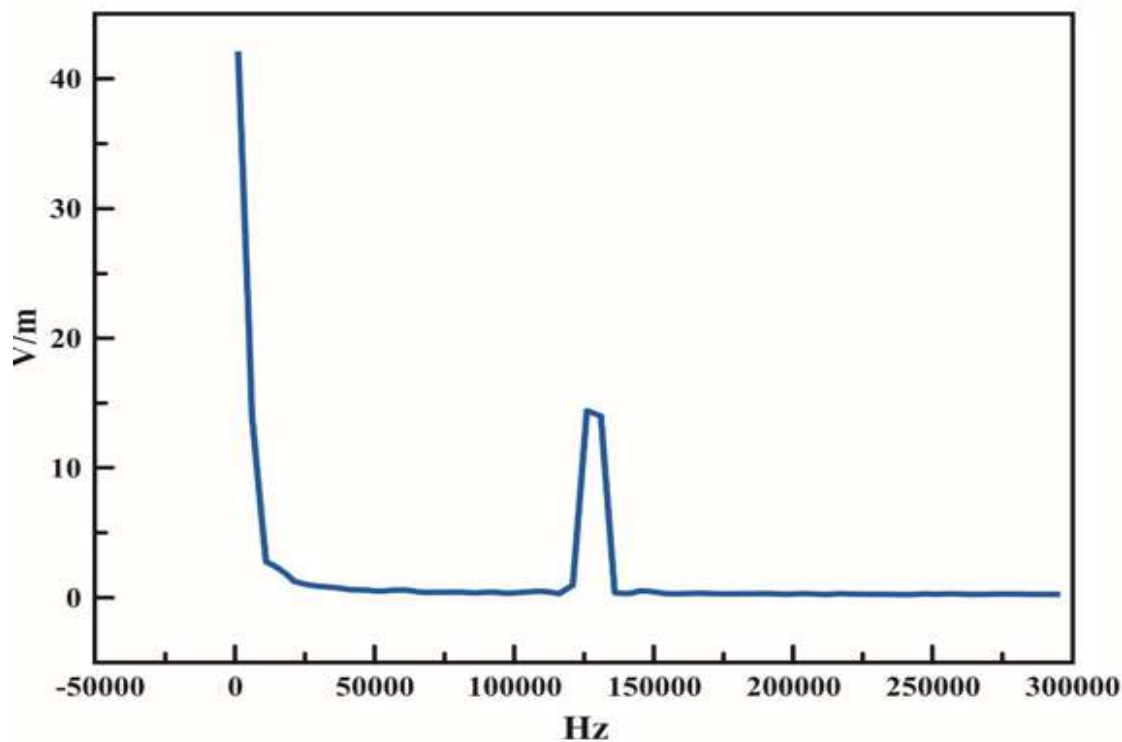
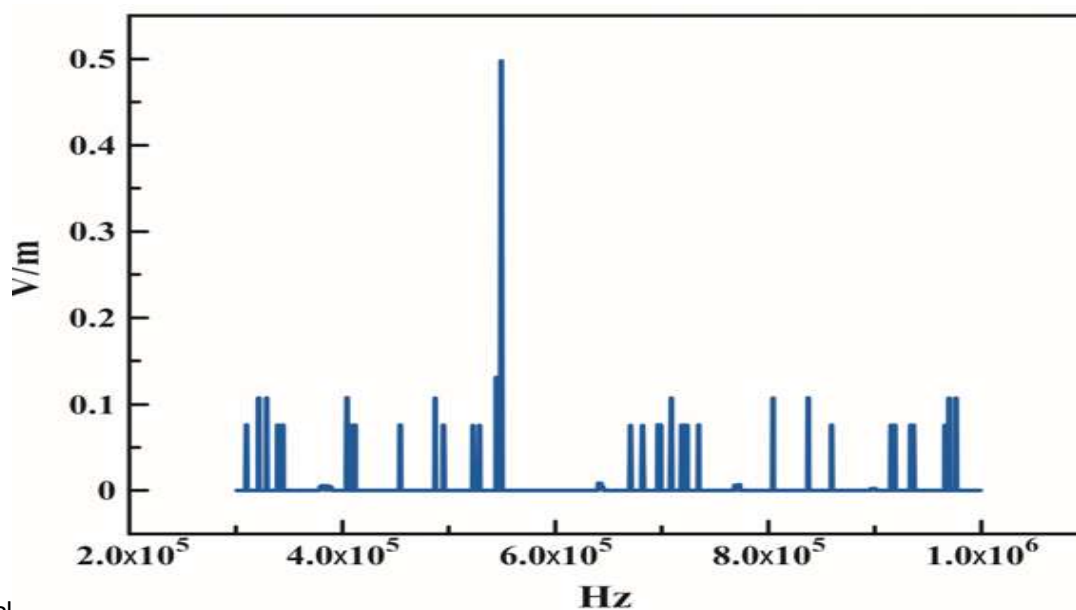


Рис. 4.30. Амплітуда електричного поля частотою 130 кГц



ы

Рис. 4.31. Спектральний склад електричного поля низької частоти поблизу аеродрому та повітряної лінії електропередачі

Аналіз спектра показує, що не дивлячись на незначні амплітуди, він дає суттєвий внесок у електромагнітну обстановку. При цьому електричне поле

частотою 525 кГц обумовлено випромінювачем дальнього приводу аеродрому «Херсон» (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

## Склад радіоелектронних засобів аеродрому «Херсон»

AIP of Ukraine

UKOH AD 2-1  
02 FEB 2017

## UKOH AD 2 KHERSON / ХЕРСОН

## UKOH AD 2.19 Radio navigation and landing aids / Радіонавігаційні засоби і засоби посадки

Type of aid and VAR (For VOR/ILS/MLS, give station declination)	ID	Frequency	Hours of operation	Site of transmitting antenna coordinates	Elevation of DME transmitting antenna	Remarks
1	2	3	4	5	6	7
LM 03	E	525.00 KHZ	06:00-15:00 (05:00-14:00)	463933.0N 0322925.0E		
LO 03	HE	1065.00 KHZ	06:00-15:00 (05:00-14:00)	463815.0N 0322814.0E		
LOC 03 ILS CAT I	IHE	110.10 MHZ	06:00 - 15:00 (05:00 - 14:00)	464128.0N 0323114.0E		
GP 03 ILS CAT I		334.40 MHZ	06:00 - 15:00 (05:00 - 14:00)	464011.0N 0322952.0E		3°, RDH 16.8m
MM		75.00 MHZ	06:00 - 15:00 (05:00 - 14:00)	463933.0N 0322925.0E		
OM		75.00 MHZ	06:00 - 15:00 (05:00 - 14:00)	463815.0N 0322814.0E		

Таким чином, у процесі проектування повітряної лінії електропередачі обов'язковим є врахування додаткового електромагнітного навантаження на довкілля з боку інших джерел.

Крім наведених факторів впливу на електромагнітну обстановку слід враховувати можливість внеску ліній електропередачі у акустичну обстановку. Розрахунок рівня звуку на відстані 100 м від крайньої фази в залежності від напруги поля на проводах здійснюється за емпіричною формулою:

$$L = 20 + 0,0111 * E_{\max} + 900 * r + 15 * \lg n - 20 * \lg B,$$

де  $L$  – рівень звуку, дБА,  $r$  – радіус дроту,  $n$  – число дротів у фазі,

$E_{\max}$  – діюче значення максимальної напруженості на поверхні дроту, кВ/м,

$B$  – відстань від крайньої фази, ( $B=100$  м).

Максимальна напруженість на поверхні дроту визначається за формулою:



$$E_{\max} = \frac{C * U}{2 * \sqrt{3} * \pi * \epsilon_0 * r}.$$

4.3. Моделювання просторових розподілів магнітних полів локальних джерел, визначення та прогнозування зон їх мінімальних значень

Розрахунки щодо кількісних характеристик та просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання доцільно здійснювати за визначенням магнітної складової змінного електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц. Це обумовлене тим, що відповідні електричні поля повністю екрануються металевими корпусами електричних машин.

Найбільш поширеними агрегатами, які мають велике значення для функціонування промислового комплексу країни, є електричні машини турбогенераторів електростанцій. Усі вони є чотиріполюсними машинами, тобто дипольно-квадрупольними джерелами магнітного поля. Структури магнітного поля інших електричних машин принципово не відрізняються. Точне визначення змін рівня магнітного поля з відстанню доцільне з використанням рівняння Гауса для скалярного магнітного потенціалу. У сферичних координатах  $R, \theta, \varphi$  функція розподілу магнітного поля джерела має вигляд:

$$U_M = R_0 \times \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{n+1} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\varphi + b_{nm} \sin m\varphi) \times P_n^m \times \cos \varphi,$$

де  $R_0$  – радіус сфери визначення потенціалу,  $a_{nm}, b_{nm}$  – сталі коефіцієнти,  $P_n^m \cos \varphi$  – поліном Лежандра.

При цьому  $R \geq R_0$  координати  $a, b$  є амплітудами сферичних гармонік напруженості магнітного поля на сфері  $R_0$ .

Напруженість (індукція) магнітного поля визначаються з наведеного рівняння, виходячи з фундаментальних співвідношень:

$$\mathbf{H} = -\text{grad} U_M, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

$$H_r = \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \times \left( \frac{R_0}{R} \right)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \times \cos m\varphi + b_{nm} \times \sin m\varphi) \times P_n^m \times \cos \theta;$$

$$H_{\varphi} = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{mn} \times \sin m\varphi - b_{mn} \times \cos m\varphi) \times \frac{P_n^m \times \cos \varphi}{\sin \varphi};$$

$$H_{\theta} = \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \times \cos m\varphi + b_{nm} \times \sin m\varphi) \times$$

$$\frac{1}{\sin \varphi} \left[ (n-m+1) \times P_{n+1}^m \cos \varphi - (n+1) \times P_n^m \times \cos^2 \theta \right]$$

Наведені співвідношення свідчать, що напруженість магнітного поля знижується з відстанню, причому це зниження пропорційне збільшенню показника гармоніки  $n$ .

Таким чином, виходячи з поставлених задач, доцільно розглянути перші сферичні гармоніки, яким відповідає найменше зниження рівня магнітного поля з відстанню. Це дипольна гармоніка ( $n = 1$ ) та квадрупольна гармоніка ( $n = 2$ ).

Радіальна компонента магнітного поля визначається з наведених співвідношень стандартною процедурою з використанням поліномів Лежандра у звичайній формі [301].

$$\text{Для } n = 1: \quad H_r^{(n=1)} = 2 \times \left( \frac{R_0}{R} \right)^3 \times (a_{10} \cos \theta + a_{11} \cos \phi \sin \theta + b_{11} \sin \phi \sin \theta).$$

Для  $n = 2$ :

$$H_r^{(n=2)} = \frac{3}{4\pi} \left( \frac{R_0}{R} \right)^4 \times \left[ \frac{a_{20}}{2} (3 \cos^2 \theta - 1) + 3(a_{21} \cos \varphi + b_{21} \sin \varphi) \sin 2\theta + \right.$$

$$\left. 12(a_{22} \cos 2\varphi + b_{22} \sin 2\varphi) \sin^2 \theta \right].$$

Ці радіальні гармоніки знижуються з відстанню від джерела поля пропорційно третьому та четвертому ступеню радіусу.

Чотириполюсна електрична машина, у даному випадку – турбогенератор, є джерелом магнітного поля дипольно-квадрупольного типу [302], тобто джерело, яке має дипольну та квадрупольну сферичні гармоніки поля. Магнітне поле навколо такого джерела характеризується сумою гармонік  $H_r^{(n=1)}$  та  $H_r^{(n=2)}$ .

У загальному вигляді:

$$H = \left(\frac{R_0}{R}\right)^3 \times a_{11} \times \cos \varphi \times \sin \varphi + \left(\frac{R_0}{R}\right)^4 \times a_{22} \cos 2\varphi \times \sin^2 \theta.$$

Таким чином, залежність напруженості поля від відстані для різних кутів сферичних координат буде суттєво відрізнятися.

Наприклад, для  $\theta = \frac{\pi}{2}$  ( $\sin \theta = 1, \sin^2 \theta = 1$ ) у напрямку  $\varphi = 0$  дипольна та квадрупольна гармоніки додаються, а у напрямку  $\varphi = \pi$  – віднімаються.

Отриманий результат уявляється важливим з точки зору забезпечення електромагнітної безпеки персоналу, що перебуває поблизу електрогенераторів. Це пояснюється тим, що за умови  $\varphi = \pi$  існує точка, де  $H = 0$ , тобто у межах цього кута сумарні рівні полів незначні. Уточнену модель просторового розподілу магнітного поля навколо чотиріпольної електричної машини наведено на рис. 4.32 [303].

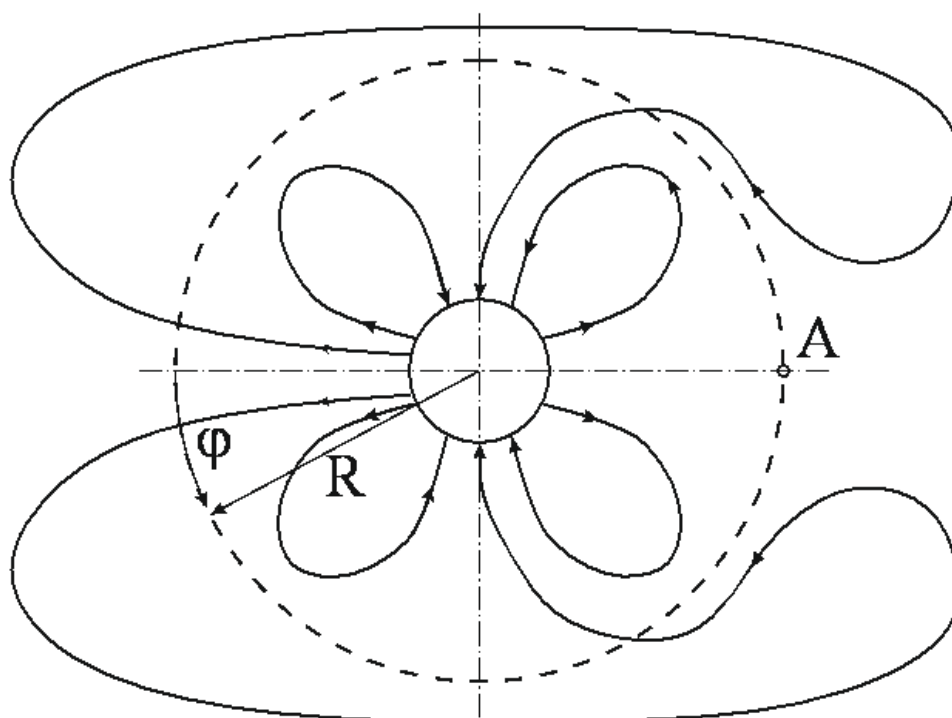


Рис. 4.32. Просторовий розподіл магнітного поля чотиріпольної електричної машини: А – точка нульового поля

Просторовий розподіл магнітного поля біля точки, де поле дорівнює нулю, наведено на рис. 4.33.

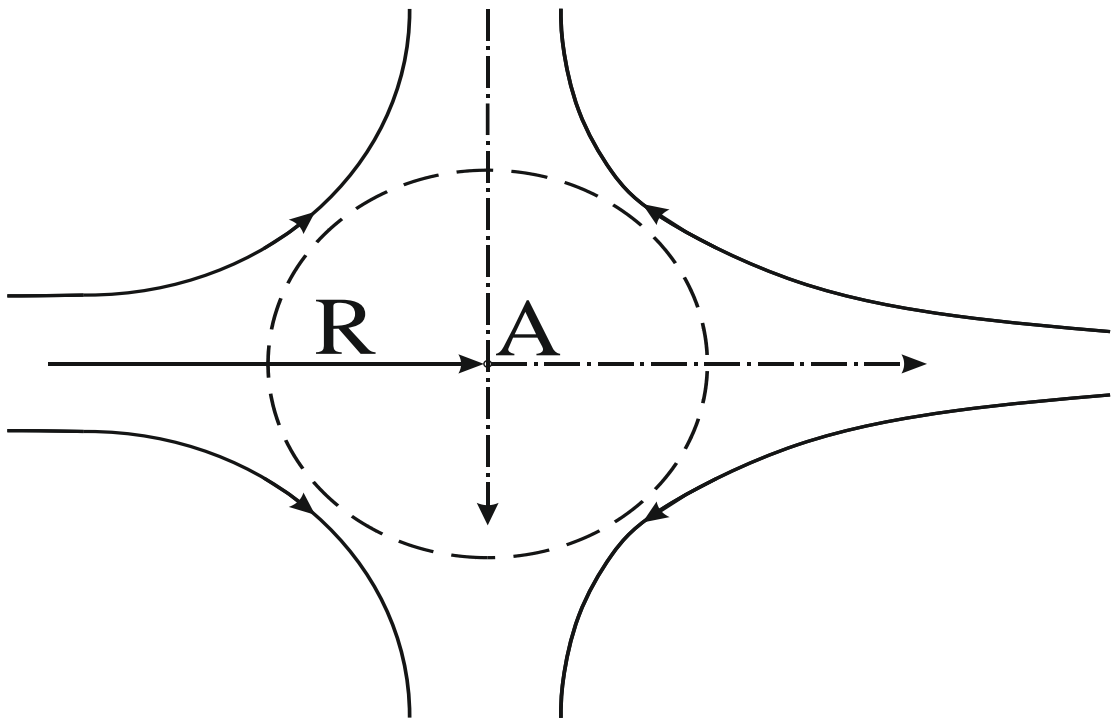
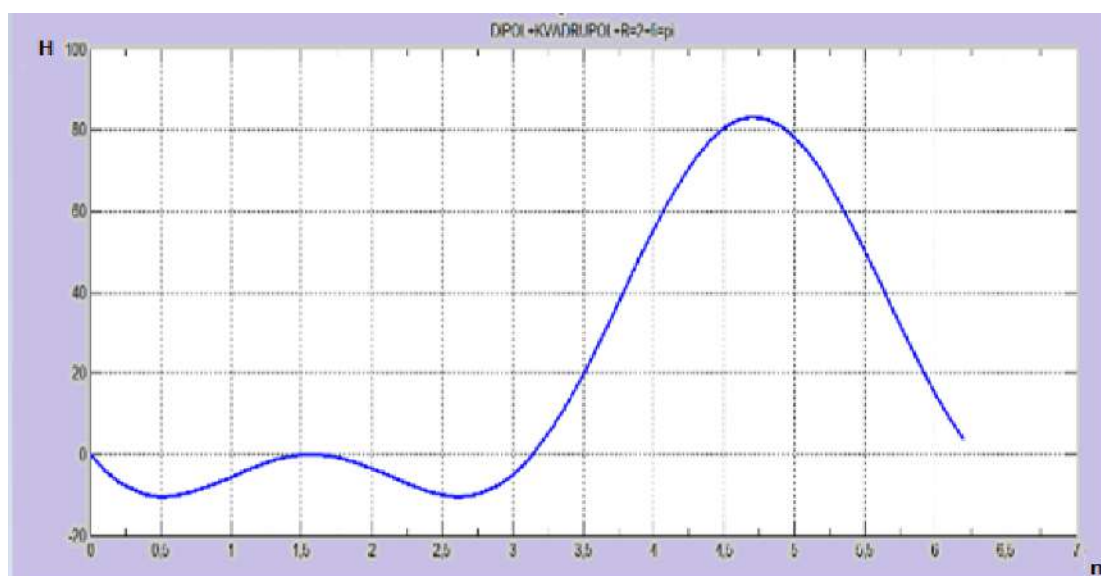


Рис. 4.33. Просторовий розподіл магнітного поля біля точки А  
( $R = 2, \varphi = \pi$ )

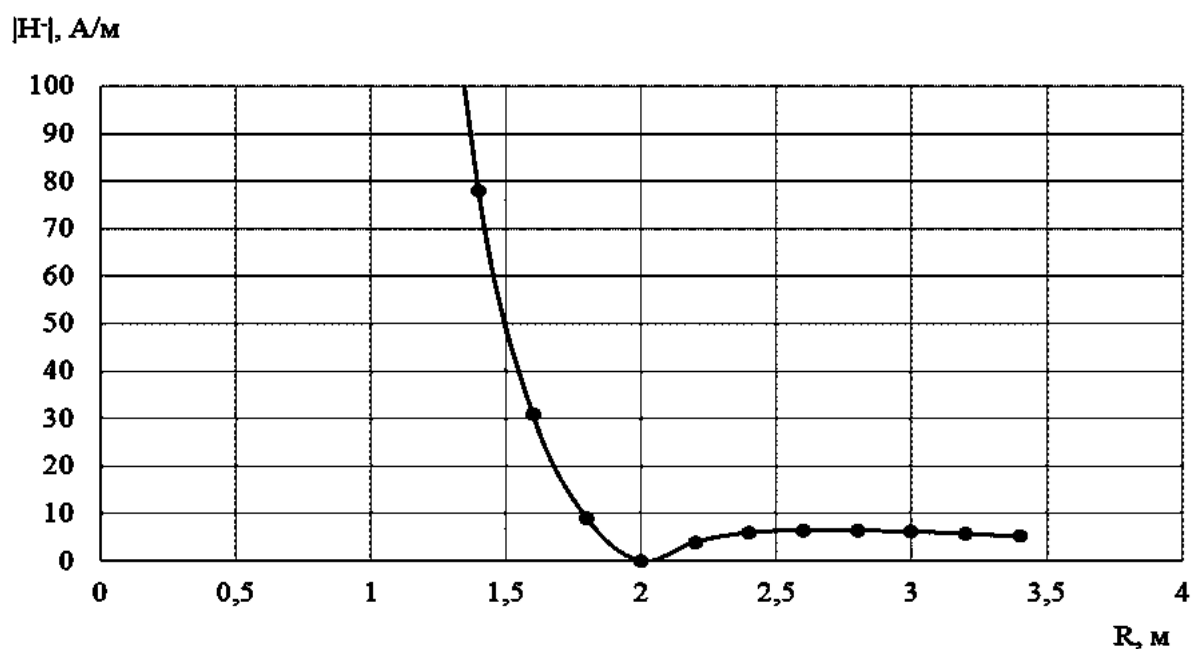
Розглядаючи зміну напруженості поля за  $\varphi=0$  та  $\varphi=\pi$ , приймаючи  $R_0=1$ , отримуємо співвідношення:

$$H_1 = \frac{a_{22}}{R^4} + \frac{a_{11}}{R^3}, \quad H_2 = \frac{a_{22}}{R^4} - \frac{a_{11}}{R^3}.$$

Отриманий результат свідчить, що за умови  $\varphi=\pi$  результатом різної швидкості зниження напруженості дипольної та квадрупольної складових магнітного поля з відстанню існує точка, де  $H=0$ . Моделювання просторового розподілу магнітного поля чотириполюсної електричної машини з використанням пакету Matlab за  $\varphi=\pi$ ,  $R=2$  наведено на рис.4.34 а) [303]. Експериментальна перевірка зміни магнітного поля чотириполюсної електричної машини з відстанню наведена на рис. 4.34. б) [304].



а)



б)

Рис. 4.34. Зміна напруженості магнітного поля поблизу чотирьополісної електричної машини: а) моделювання значення напруженості магнітного поля у площині навколо електричної машини (3,14 відповідає  $\pi$ ; 6,28 відповідно  $2\pi$ ); б) виміряна зміна напруженості магнітного поля з відстанню від електричної машини

За наявності такої точки слід очікувати, що існує сектор або тілесний кут, у межах якого рівень магнітного поля будуть прийнятними, або нижчими за

гранично допустимі рівні. Отримані дані надають змогу однозначно визначити місце встановлення електромагнітного екрана для мінімізації розповсюдження магнітного поля [305].

4.4 Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів багатьох джерел та його застосування для прогнозування електромагнітної обстановки

В умовах ущільнення розміщення електротехнічних об'єктів на територіях, підвищення енергонасиченості будівель і споруд на формування електромагнітної обстановки впливають кілька джерел електромагнітних полів.

Для визначення фактичних рівнів таких впливів зазвичай використовуються натурні вимірювання, на основі яких розробляються і впроваджуються організаційно-технічні заходи зі зниження впливу цього фізичного фактору на людей і довкілля.

Але під час модернізації електричного обладнання або на стадії проектування енергетичних та інших об'єктів найбільш раціональним засобом прогнозування електромагнітної обстановки є моделювання поширення електромагнітних полів багатьох джерел, визначення можливого інтегрального показника електромагнітного забруднення території або будівлі та прийняття на його основі проектних рішень щодо потужності та взаємного розташування потенційно небезпечних джерел.

Таке моделювання потребує відповідного технічного та методичного забезпечення. Технічне забезпечення полягає у апаратному визначенні фактичних рівнів електромагнітних полів та їх структур, тобто закономірностей просторових поширень, що було реалізовано за допомогою спеціального вимірювального обладнання [306]. Щодо методичного забезпечення, то виникають певні труднощі через розбіжності вимог основних нормативів з визначення сумарного електромагнітного навантаження на довкілля, що показано у [307–308]. Тому при проведенні моделювання доцільно визначати фактичні інтегральні рівні електромагнітних полів та порівнювати їх з гранично-

допустимими рівнями у кожному окремому випадку. Як показано у [309] електромагнітні поля більшості сучасних джерел мають форми, притаманні магнітним та електричним диполям. Тому для отримання необхідних функцій їх поширення використовується відповідний математичний апарат. Ці розрахунки доцільно виконувати у Декартових координатах, що спрощує процес моделювання для отримання повної картини розподілу поля у потрібній площині.

Розглянемо магнітний диполь, розташований у початку координат (Рис. 4.35).

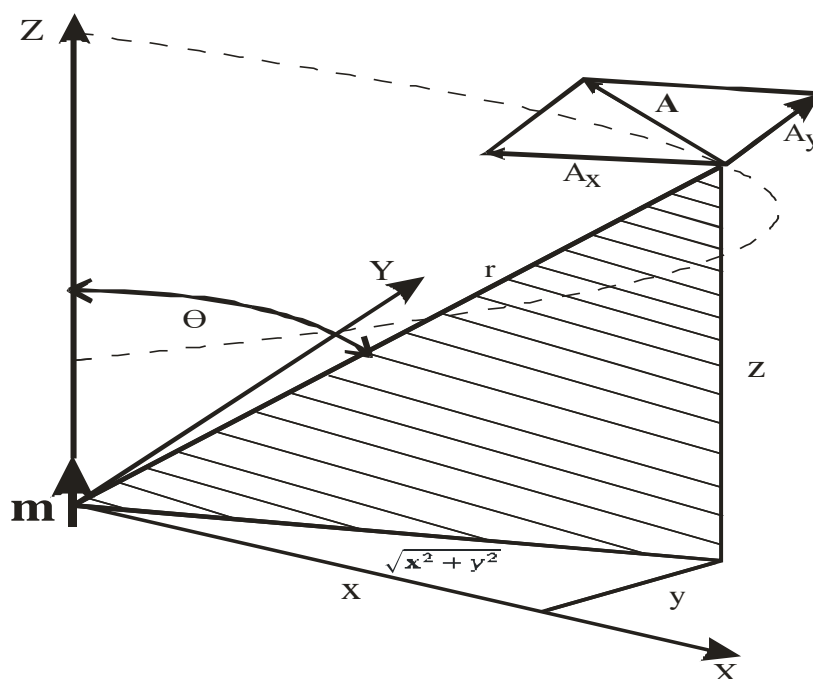


Рис. 4.35. До розрахунку компонентів магнітного поля:

$m$  – магнітний диполь,  $A$  – вектор - потенціал поля диполя

Вектор дипольного моменту  $m$  збігається з додатнім напрямком осі  $z$ . Для визначення вектор - потенціалу у будь-якій точці  $(x, y, z)$  необхідно врахувати,

що  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$ , а  $\sin\theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{r}$ . Для спрощення виразів загальні розрахунки

доцільно виконувати у гаусовій системі, що не впливає на кінцевий результат.

Модуль  $A$  вектор - потенціалу у цій точці дорівнює:

$$A = \frac{m \sin\theta}{r^2} = \frac{m \sqrt{x^2 + y^2}}{r^3}$$

Враховуючи, що вектор  $\mathbf{A}$  збігається з дотичною до горизонтального кола навкруги осі  $Z$ , його компоненти складають:

$$A_x = A\left(\frac{-y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) = -\frac{my}{r^3}$$

$$A_y = A\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) = \frac{my}{r^3}$$

$$A_z = 0$$

Обчислимо компоненти вектору магнітної індукції  $\mathbf{B}$  для точки у площині  $XZ$ , визначаючи  $\text{rot}\mathbf{A}$  та враховуючи, що  $y=0$

$$B_x = (\nabla \times \mathbf{A})_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \cdot \frac{mx}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{3mxz}{r^5}$$

$$B_y = (\nabla \times \mathbf{A})_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \frac{-my}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{3mxz}{r^5}$$

$$B_z = (\nabla \times \mathbf{A})_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} = m \left[ \frac{-2x^2 + y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} + \frac{x^2 - 2y^2 + z^2}{(x^2 + y^2 + z^2)^{5/2}} \right] = \frac{m(3z^2 - r^2)}{r^5}$$

У площині  $XZ$   $y=0$ ,  $\sin\theta = x/r$ ,  $\cos\theta = z/r$ , тому компоненти магнітного поля у будь-якій точці площини дорівнюють

$$B_x = \frac{3m \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{r^3}, \quad B_y = 0, \quad B_z = \frac{m(3\cos^2\theta - 1)}{r^3}$$

На основі відомих функцій можна отримати достовірний розподіл магнітного поля як у окремому приміщенні, так і на території. Це обумовлено залежністю значень поля від відстані до джерела. У загальному випадку потрібні значення магнітних моментів джерел для визначення сумарного магнітного поля. Але ці параметри, як показано у розділі 2, для більшості джерел відомі або досить легко обчислюються з фундаментальних фізичних співвідношень. На цій основі можна визначити сумарне значення електромагнітного поля для різнорідних джерел, наприклад, аеродромів цивільної авіації [310].



Для проведення моделювання було розроблено у середовищу Turbo Delphi прикладне програмне забезпечення, при цьому використовувалося управління базою даних Microsoft SQL Server. Приклад такого моделювання наведено на рис. 4.36

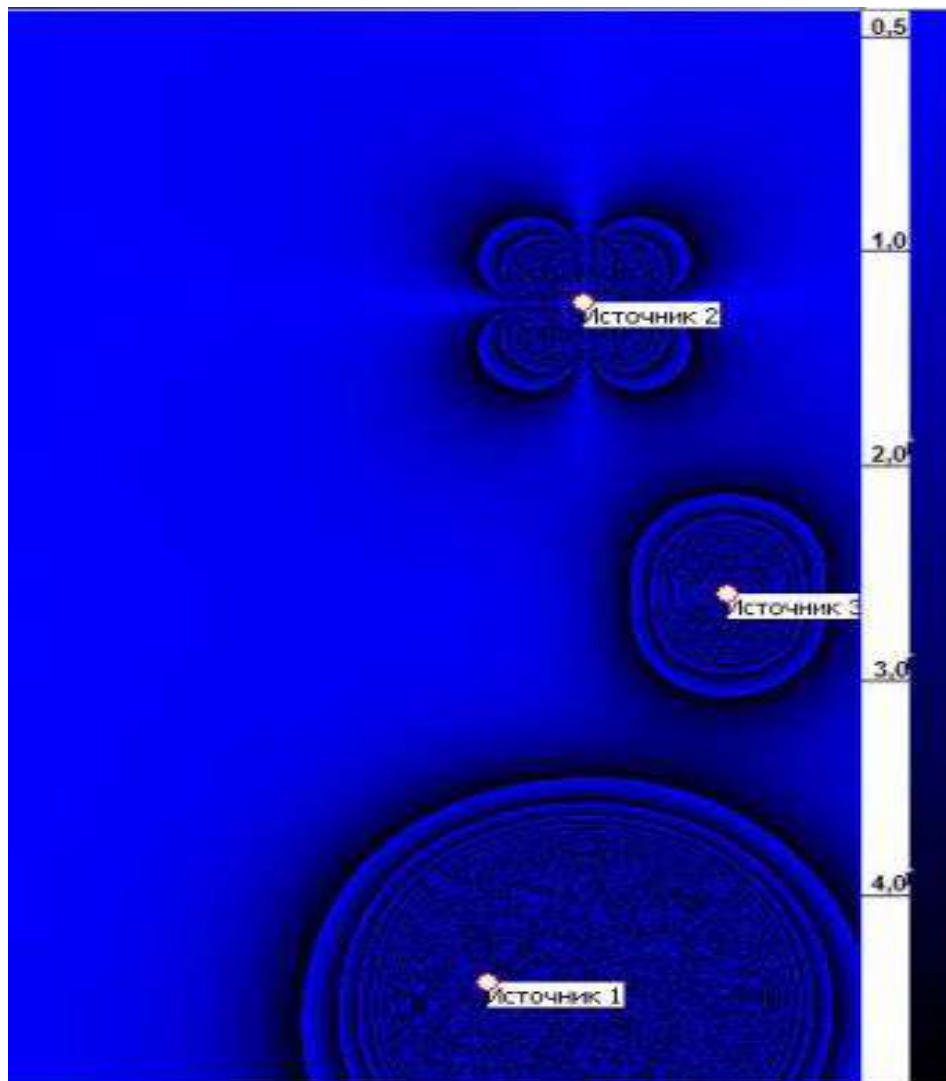


Рис. 4.36. Моделювання просторового розподілу магнітного поля багатьох дипольних джерел різних орієнтацій джерел (праворуч – шкала напруженості магнітного поля, яка позначається кольором в мкТл, ГДР - 3 мкТл)

На рисунку представлено модель дипольно-квадрупольного джерела (Джерело 2), яка за структурою повністю збігається з представленою оціночною формою такого поля, наведеною на рис. 4.32, що підтверджує достовірність проведеного моделювання.

Достатню універсальність обраної методології можна проілюструвати моделюванням суперпозиції наведеного вище поля з полем іншого джерела (рис. 4.37) [311].

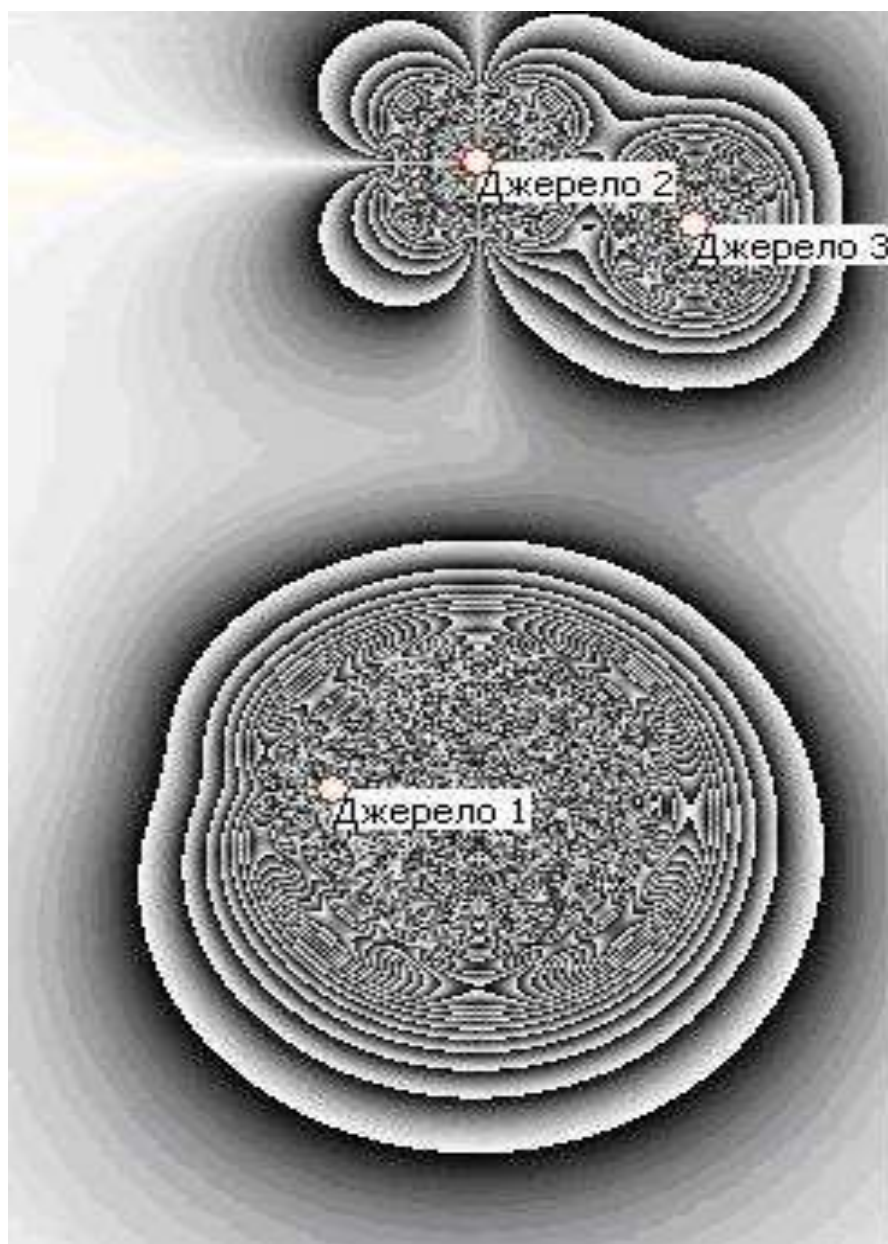


Рис. 4.37. Зміна конфігурації магнітного поля дипольно-квадрупольного типу за появи додаткового джерела поля

Наведені підходи доцільно використовувати для моделювання стаціонарних магнітних полів, зокрема, спотворення геомагнітного поля будівлями і спорудами, що шкідливо для здоров'я людей [312].

## Висновки до розділу 4

4.1 Моделювання просторових змін електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти повітряних ліній електропередачі за обраною методикою та розробленого програмного забезпечення відповідає результатам натурних вимірювань і може бути використана для прогнозування змін електромагнітної обстановки за різних електричних навантажень на лінію.

4.2 При цьому необхідне врахування спектрального та амплітудного складу електромагнітних полів сторонніх джерел. Результати моделювання дозволяють визначити необхідність застосування і раціоналізувати розміщення електромагнітних екранів для екранування електромагнітних полів розосереджених джерел у вигляді компенсаційного дроту та суцільного екрана розрахованих параметрів.

4.3 Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів кабельних ліній електропередачі доцільно здійснювати за магнітною складовою. Виконане моделювання дозволяє раціоналізувати структуру лінії (взаємне розташування фазних дротів), визначити необхідність застосування і розрахувати ефективність магнітного екрана кабельної лінії на принципі розумної достатності з урахуванням гранично допустимої індукції магнітного поля.

4.4 Моделювання поширення магнітного поля локалізованого джерела (генератора, електродвигуна тощо) з урахуванням вищих просторових гармонік поля та різних закономірностей зниження їх полів з відстанню дозволяє розрахувати зони мінімальних напруженостей поля і визначити заходи з екранування магнітного поля у зонах його максимальних рівнів.

4.5 Розроблені прикладний розрахунковий апарат та прикладне програмне забезпечення дозволили здійснити моделювання змін магнітного та електричного полів багатьох довільно обраних джерел у площині перебування людей. Проведене моделювання підтвердило адекватність обраного підходу до

моделювання просторових поширень магнітних полів електричних машин. Отримані результати показали прийнятну збіжність з результатами натурних вимірювань.

4.6 Отримані результати доцільно використовувати на стадіях екологічної оцінки проектів будівництва повітряних і кабельних ліній електропередачі, проектних робіт та модернізації обладнання електроенергетики. Розроблені методологія і програмне забезпечення дозволяють моделювати зміни стаціонарного (геомагнітного) поля в умовах його техногенних спотворень.

## РОЗДІЛ 5

### ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ЗНИЖЕННЯ ВПЛИВУ АВІАЦІЙНОГО ШУМУ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА НАСЕЛЕННЯ ТА ДОВКІЛЛЯ

Відповідно до запропонованого підходу у п. 3.3 розроблено інформаційну систему екологічного моніторингу авіаційного шуму згідно до вимог ІСАО та національних вимог, яка дозволяє здійснювати визначення контурів авіаційного шуму відповідно до сценаріїв польоту повітряних суден в реальному часі та прогнозних сценаріїв, їх візуалізацію на цифровій мапі аеропорту та приаеродромній території з використанням ГІС-платформи.

#### 5.1. Інформаційна система екологічного моніторингу авіаційного шуму

Розробка програмного забезпечення для оцінювання рівнів авіаційного шуму шляхом моделювання з урахуванням особливостей конкретного аеропорту, типів літаків, даних про повітряний рух, метеорологічних даних, маршрутів та методики виконання польотів потребує вирішення наступних задач [240, 241, 246]:

- визначити сучасні програмні засоби щодо побудови системи моделювання рівнів авіаційного шуму;
- розробити структуру бази даних з урахуванням характеристик реактивних або важких гвинтових літаків, злітно-посадкових смуг, кількості польотів, метеорологічних даних;
- розробити графічний інтерфейсу для введення і редагування великої кількості вхідних даних з метою моделювання різних сценаріїв польоту;
- створити програмний комплекс, який являє собою міні-сценарій для моделювання рівнів авіаційного шуму, враховуючи національні санітарно-

гігієнічні нормативи щодо впливу шуму та міжнародні стандарти, рекомендовані практики і процедури при експлуатації міжнародних повітряних ліній;

- розробити взаємозв'язок програмних середовищ - бази даних MySQL та засобів мови програмування C#;

- згенерувати програмні секції для забезпечення програмного інтерфейсу з програмою графічної візуалізація контурів авіаційного шуму NMPLOT;

- забезпечити використання набору критеріїв щодо оцінювання рівнів шуму, а саме: національних  $L_{Aeq}$  (еквівалентний рівень звуку) і  $L_{Amax}$  (максимальний рівень звуку) та додаткових міжнародних критеріїв оцінювання шуму ( $L_{AeqD}$  – еквівалентний рівень шуму вдень,  $L_{AeqN}$  – еквівалентний рівень шуму вночі,  $L_{Aден}$  – добовий еквівалентний рівень звуку, SEL – рівень звукової експозиції, EPNL - ефективний рівень шуму, що сприймається), які використовуються в інших країнах світу і рекомендуються ICAO та іншими міжнародними організаціями в процедурах оцінки впливу шуму довкілля на населення;

- побудувати контури рівнів авіаційного шуму з використанням grid-технології;

- відобразити контури шуму на Google-мапі (мапі зі супутника) конкретного аеропорту з використанням геоінформаційної платформи Quantum GIS з прив'язкою до контрольної точки аеропорту;

- провести тестування системи на наборі тестових сценаріїв.

Огляд програмного забезпечення з моделювання авіаційного шуму розглянуто у роботі [245]. Для розробки програмного комплексу системи оцінювання авіаційного шуму необхідно обрати такі засоби розробки, які б дозволили структурувати великі обсяги вхідних даних, проводити громіздкі обчислення з високою точністю для розрахунку та побудови рівнів шуму, надати користувачу зручний інтерфейсу. Тому було обрано:

- операційну систему Windows 10, базу даних MySQL,
- інтегроване середовище Microsoft Visual Studio 17.0,

- мову програмування C# для розроблення графічного інтерфейсу, створення розрахункового модуля відповідно до методології ICAO, встановлення зв'язку з БД MySQL, автоматизації процесу формування секцій для програми побудови контурів шуму,

- програму NMPLLOT для візуалізації контурів авіаційного шуму,

- геоінформаційну систему Quantum GIS (QGIS) для відображення на карті аеропорту контурів шуму,

- мову програмування Python для передачі контурів шуму з програми NMPLLOT до геоінформаційної системи QGIS з прив'язкою до контрольної точки аеропорту.

Для здійснення моделювання процесів, які відбуваються на території аеропорту та прилеглих територіях, вихідними параметрами є [246]:

- акустичні і типові характеристики парку повітряних суден для відповідних режимів на етапах зльоту та посадки (режими роботи двигуна, аеродинамічні конфігурації, маса літака тощо, база даних характеристик повітряних суден);

- характеристики повітряних суден; характеристики аеропортів;

- характеристики злітно-посадкових смуг;

- характеристики спектральних класів;

- коефіцієнти реактивних та гвинтових двигунів;

- номінальні маршрути прильоту та вильоту повітряних суден з урахуванням процедур пілотування і діючих обмежень (встановлюються інструкцією по проведенню польотів);

- маршрути руху повітряних суден у районі аеропорту;

- профілі польоту окремих літаків (або окремих типів літаків);

- метеорологічні параметри (температура, тиск, вологість повітря, швидкість та напрямок вітру);

- інтенсивність польотів повітряного транспорту конкретних типів, особливо шумних видів літаючих апаратів в денну, вечірню і нічну частину доби;

- рівень точності розрахунків.

З урахуванням вище наведених вимог та поставлених задач розроблено інформаційну систему моніторингу рівнів авіаційного шуму, схема якої наведена на рис. 5.1. Розроблено структуру бази даних засобами MySQL (рис. 5.2), яка містить вищенаведені вихідні дані та необхідну інформацію для функціонування інформаційної системи.

Вихідна інформація щодо характеристик шуму, які створюється на місцевості повітряними суднами при їх льотній і наземній експлуатації за наслідками узагальнення даних по шуму при сертифікації, представлена в міжнародній базі даних Aircraft and Noise Performances Database [208] (ANP - база даних повітряних суден зарубіжного виробництва для методу розрахунку контурів шуму). До складу цієї бази входить низка таблиць, які містять вихідні дані для розрахунку рівнів шуму згідно методології документа ICAO DOC 9911 [16].

Таблиця Aircraft містить інформацію про усі типи повітряних суден, що пройшли сертифікацію по шуму, а саме:

- міжнародний ID-код ПС,
- повну назву,
- тип двигуна (Jet, Turboprop, Piston),
- кількість двигунів, клас ваги (Heavy, Large, Small),
- категорію (Commercial, General Aviation),
- максимальну зльотну вагу у кгс,
- максимальну вагу при приземленні у кгс,
- максимальну посадочну дистанцію у м,
- максимальну статичну тягу над рівнем моря у кгс,
- кількість джерел шуму,
- параметр потужності (Pounds, Percent, Other),
- ідентифікатор спектрального класу при посадці,
- ідентифікатор спектрального класу при злеті.



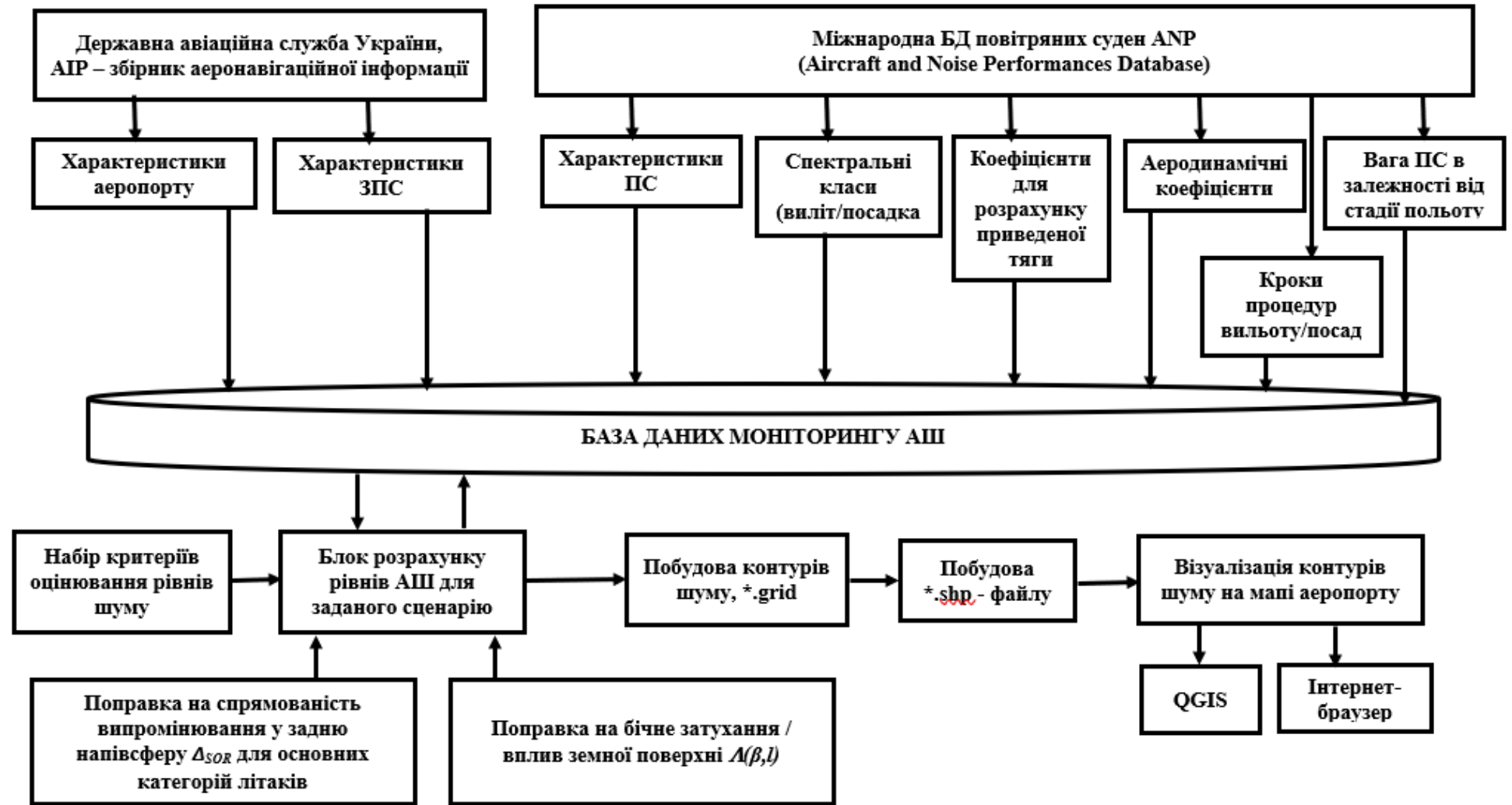


Рис. 5.1. Схема інформаційної системи екологічного моніторингу рівнів авіаційного шуму

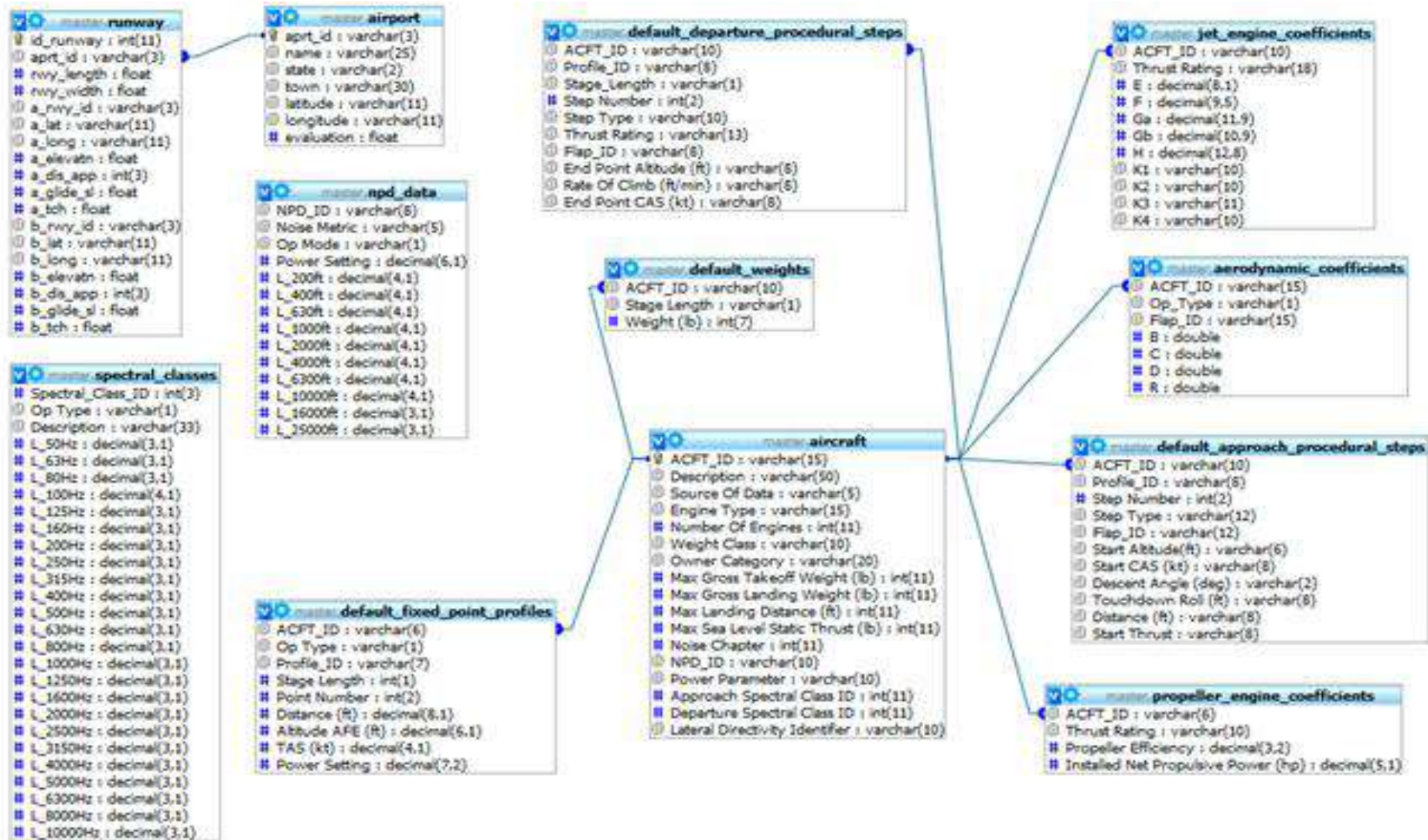


Рис. 5.2. Структура бази даних системи

Таблиця *Airport* містить опис конкретного аеропорту на основі AIP, а саме: міжнародний ID-код аеропорту, назву англійською мовою, назву міста, в якому розташований аеропорт, географічні координати (широту, довжину) контрольної точки аеропорту, перевищення над рівнем моря у метрах. Таблиця *Runway* містить опис злітно-посадкових смуг аеропортів відповідно до AIP кожного аеропорту, а саме: міжнародний ID-код аеропорту, ID-код ЗПС, назви лівого та правого торців ЗПС, довжина та ширина ЗПС у метрах, географічні координати (широта, довгота) лівого та правого торців ЗПС, перевищення лівого та правого торців над рівнем моря. Таблиця *NPD* містить поточні значення залежностей Noise-Power-Distance (NPD) - «Шум-Режим-Відстань» літаків, а саме: для кожного типу повітряного судна відповідно до його ID-коду, обраного критерію оцінювання шуму, типу виконуваної операції (зльоту / посадки) визначено потужність та в залежності від відстані (61 м, 122 м, 192 м, 305 м, 610 м, 1220 м, 1920 м, 3048 м, 4877 м, 7620 м) визначено значення шуму. Таблиця спектральних класів *Spectral\_classes* містить ID-код спектрального класу, тип операції (зльот / посадка), опис двигунів, значення шуму для октавних смуг з середньо геометричними частотами 50 Гц, 63 Гц, 80 Гц, 100 Гц, 125 Гц, 160 Гц, 200 Гц, 250 Гц, 315 Гц, 400 Гц, 500 Гц, 630 Гц, 800 Гц, 1000 Гц, 1250 Гц, 1600 Гц, 2000 Гц, 2500 Гц, 3150 Гц, 4000 Гц, 5000 Гц, 6300 Гц, 8000 Гц, 10000 Гц. Таблиця *Jet\_engine\_coefficients* містить коефіцієнти для розрахунку приведеної наявної тяги для турбореактивного або турбовентиляторного двигунів. Таблиця *Propeler\_engine\_coefficients* містить коефіцієнти для розрахунку приведеної наявної тяги для гвинтових двигунів. Таблиця *Default\_weights* в залежності від стадії польоту містить значення ваги. Таблиця *Defaul\_departure\_procedural\_steps* описує кроки процедури вильоту за замовчуванням. Відповідно таблиця *Defaul\_approach\_procedural\_steps* описує кроки процедури посадки за замовчуванням. Таблиця аеродинамічних коефіцієнтів *Aerodynamic\_coefficients* для кожного типу ПС містить аеродинамічні коефіцієнти  $B_8$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $R$ , які використовуються для розрахунку еквівалентної дистанції розбігу  $S_{TO8}$ , що відповідає різним положенням крилків на етапі прибуття або вильоту, а саме:

ID-код ПС, тип польоту (прибуття – А або виліт – D), код положення закрилків, коефіцієнт  $B_8$  – для визначення відхилення закрилків (м/кгс),  $C$  – швидкість початкового набору висоти,  $D$  – швидкість посадки (км/ч),  $R$  - відношення коефіцієнта лобового опору літака до коефіцієнта підйомної сили для даної установки закрилків. Розрахунковий алгоритм оцінювання шуму здійснюється відповідно до методології ICAO, наведеної у розділі 2 (рис. 5.3).

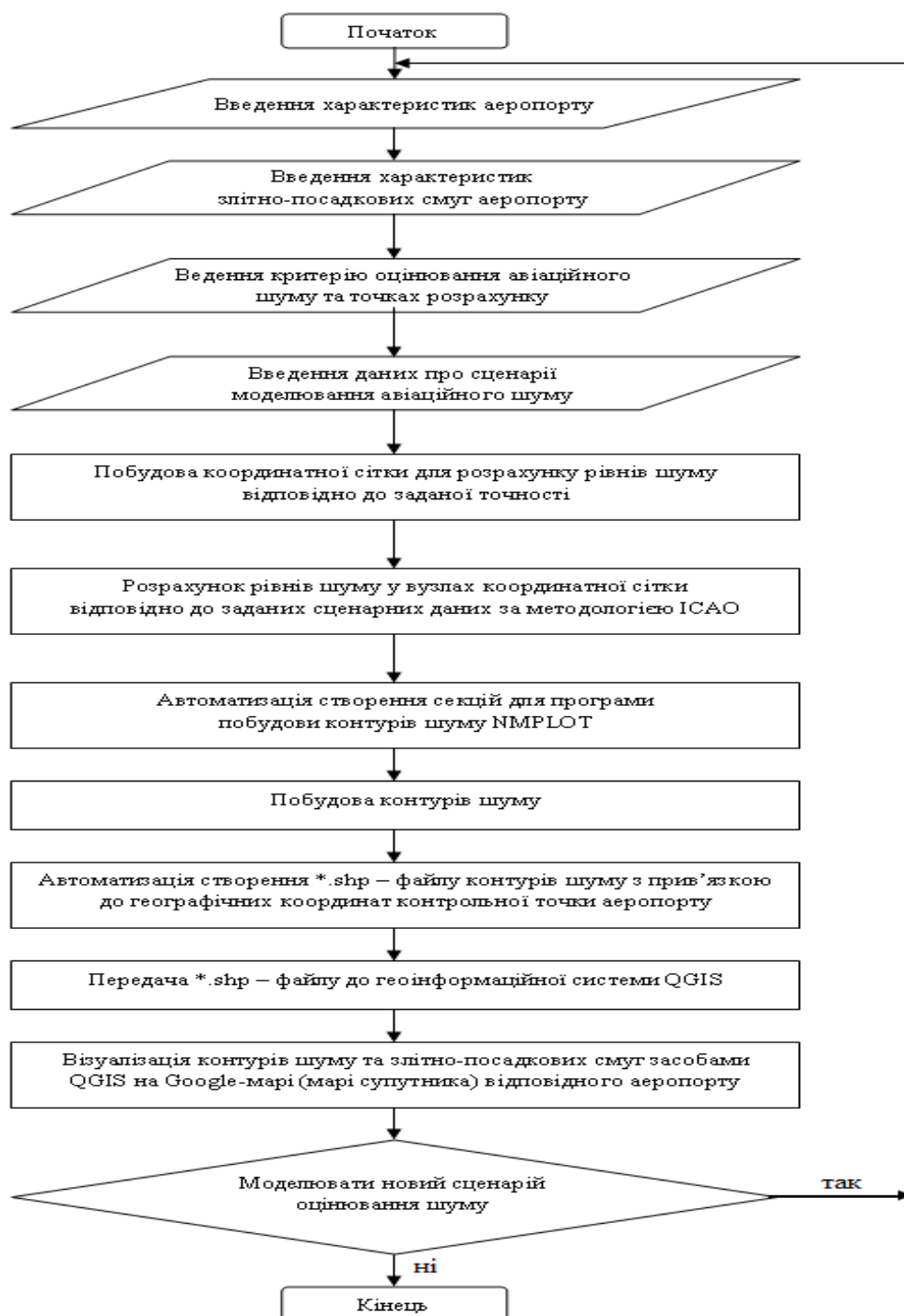


Рис. 5.3. Алгоритм розрахунку рівнів шуму

Схема компонентів програмного забезпечення розрахунку та побудови рівнів шуму на мапі наведено на рисунку 5.4.

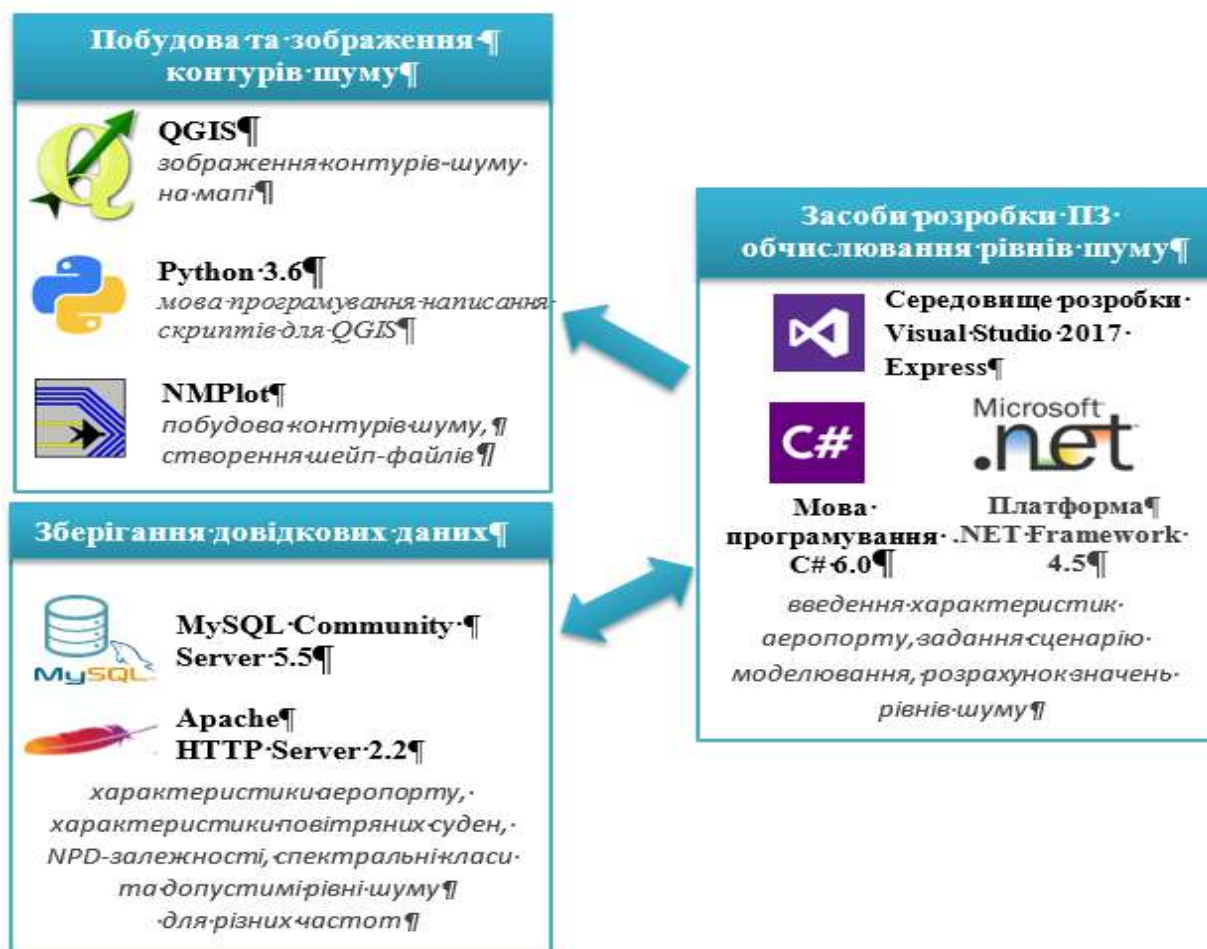


Рис. 5.4. Схема компонентів програмного забезпечення розрахунку та побудови рівнів шуму на мапі

Моделювання шуму здійснюється з використанням методу сегментації як для етапу відправлення, так і для етапу приземлення. Етап відправлення містить дев'ять процедурних кроків, етап приземлення містить сім процедурних кроків. Власне ці процедурні кроки і генерують траєкторію польоту (відправлення/приземлення). Для кожного сегменту рівень шуму обчислюється як частка шуму з табличних даних залежностей «шум-потужність-відстань» кінцевого сегменту, які вибираються з бази даних ANP з урахуванням спектральних даних спрямованості. Усі сегменти є прямими. Горизонтальна

форма траєкторії польоту (тобто його двовимірної проекції на землю) є основою траси для вхідних і вихідних маршрутів.

Вертикальна форма задається точками профілю, і пов'язана з параметрами, як швидкість польоту, кут крену і установка потужності.

Для розрахунку рівнів шуму створюється координатна сітка, яка покриває певну площу в районі аеропорту (рис. 5.5). Для створення координатної сітки використовується контрольна точка аеропорту (КТА), яка вважається центром координат в аеропорту. При цьому враховується нижня ліва координата в аеропорту (рис. 5.5, (координати  $Z1; X1$ )), і в залежності від заданої точності розрахунку (вузли сітки) визначається фіксований крок між вузлами. Крок між вузлами сітки визначаються в залежності від рівня точності, а саме: при рівні точності (Level of Accuracy) 6 крок дорівнює 500 м, 7 – 250 м, 8 – 125 м, 9 – 62,5 м. Зазвичай рівень точності дорівнює 6, тобто крок 500 м.

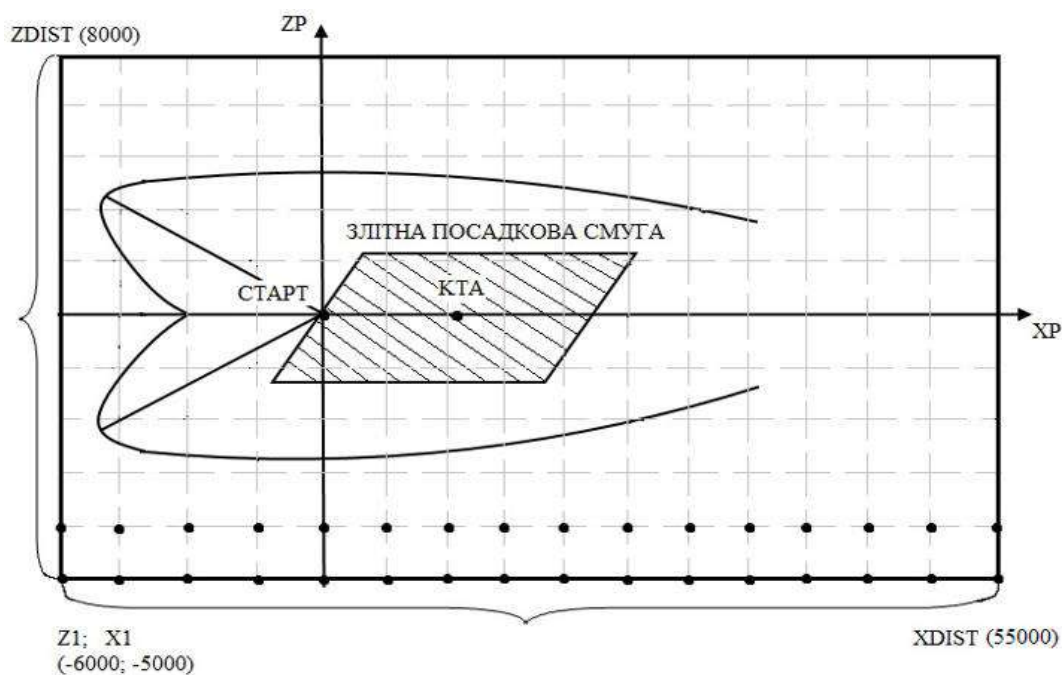


Рис. 5.5. Координатна сітка для розрахунку рівнів шуму

Для побудови сценарію визначається тип/типи повітряних суден, їх вагове навантаження, тип траєкторії польоту зльот/посадка (наприклад, траєкторія АСВАР має три відрізка: 1 – прямий, тоді довжина відрізка становить 500 м,

2–викривлений, це дуга, яка має радіус  $R=2000$  м та кут повороту дуги дорівнює  $45^{\circ}$  вліво або вправо, 3 – прямий довжиною 30 000 м).

Сценарій являє собою набір подій (зльотів/посадок) різних типів ПС протягом дня /ночі, які виконуються з різних ЗПП за добу. Кількість ЗПП визначається пропускнуою здатністю, з однієї злітно-посадкової полоси в цілому може бути здійснено 45-50 зльотів/посадок.

Акустичний розрахунок рівнів шуму літаків на місцевості виконується у вузлах координатної сітки, тобто визначається рівень шуму в окремій точці спостереження при одиничному прольоті літака з урахуванням розрахованої траєкторії польоту літаків. У кожній точці рівні шуму одиничного впливу підсумовуються або осереднюються для отримання «сумарного рівня» або значення індексу шуму.

Методом інтерполяції та екстраполяції визначаються контури шуму за значеннями рівнів шуму у вузлах розрахункової сітки. Рівні шуму у вузлах координатної сітки обчислюються за формулами (2.26) та (2.27) розділу 2 з урахуванням залежності типу «шум-потужність-відстань» і параметрів траєкторії руху ПС.

Для візуалізації контурів шуму на основі розрахованих рівнів шуму у точках координатної сітки використано програмне середовище NMPlot, яке на основі географічної прив'язки до контрольної точки аеропорту та злітно-посадкових смуг будує контури рівнів шуму з кроком у 5 дБ та перетворює у різні формати (\*.shp, \*.bmp, \*.tif, \*.jpg, \*.png). Середовище NMPlot працює з файлами з розширенням \*.grd. Такий файл складається з дев'яти секцій, кожна з яких відповідає за певний розділ інформації:

CART – опис координатної системи в метрах;

SORC – місце розташування проведення сценарію (наприклад, аеропорт);

DESS – назва аеропорту;

LINS – кількість злітно-посадкових смуг, їх характеристики;

LINC – лінія шляху;

DESL – опис відрізків траєкторії;

MTRC – метод оцінки шуму;

DPAL – список пар розташувань;

GRID – значення рівнів шуму в точках розрахункової сітки.

Файл з розширенням \*.grd є достатньо довгим, адже містить понад 25000 рядків. Тому було розроблено додатковий модуль, який безпосередньо автоматизує процес формування \*.grd-файлу без додаткової участі користувача. Модуль формування \*.grd-файлу починає збір усієї необхідної інформації на основі отриманих даних. Частина інформації, така як назва аеропорту, довгота, широта, кількість злітно-посадкових смуг та їх опис, критерій шуму тощо, береться з даних форми. Інша частина – дані з БД та результати розрахунків, зокрема значення рівнів авіаційного шуму в кожній з точок розрахункової сітки.

Після того, як \*.grd-файл сформовано, головний модуль програми засобами мовою C# створює процес, який автоматично запускає програмне середовище NMPLOT з відповідними параметрами, передаючи на вхід отриманий \*.grd-файл.

В Україні у 1987р. було затверджено графо-аналітичний метод оцінювання авіаційного шуму, який використовують й досі. За цим методом траєкторія зльоту / посадки літака описана лише для п'яти характерних груп літаків, що значно знижує точність оцінювання шуму. Слід також зауважити, що графо-аналітичний метод, яким в Україні користуються до цих пір, дозволяє проводити оцінювання авіаційного шуму лише за двома критеріями –  $L_{Amax}$  (максимальне значення шуму) та  $L_{Aeq}$  (еквівалентний рівень шуму).

Розроблений нами метод надає змогу проводити моделювання не лише для цих двох основних критеріїв, а й розглядати інші ( $L_{AeqN}$  – еквівалентний рівень шуму вночі,  $L_{AeqD}$  – еквівалентний рівень шуму вдень,  $L_{A_{den}}$  – добовий еквівалентний рівень звуку, SEL – рівень звукової експозиції або ефективний впливу шуму  $L_{AE}$ , EPNL – ефективний рівень шуму, що сприймається,  $L_{Amax}$  – максимальний рівень шуму). Після того, як Україна увійшла в Європейську спільноту, необхідно враховувати не лише два критерії, закладені в Україні, а й і ті, які використовуються в європейських країнах.



У графо-аналітичному методі розглядались лише стандартний зліт та посадка – STANDARD (для версії БД ANP 1.0) або DEFAULT (для версії БД ANP 2.0). У той же час запропонований метод дозволяє моделювати й інші процедури злету - ICAO\_A та ICAO\_B, у тому числі зі зниженням рівня шуму на місцевості. До того ж удосконалений метод оцінювання авіаційного шуму відповідає санітарним нормам та вимогам ІСАО. Це надає можливість оцінити в конкретному аеропорту які конкретні процедури потрібно використовувати, а які – ні.

## 5.2. Сценарій виконання польоту

Робота користувача із запропонованою системою здійснюється наступним чином [282, 283]. Користувач запускає програмний додаток, завантажується головне вікно програми, яке складається з чотирьох вкладок. Автоматично відкривається перша вкладка. Перші дві вкладки (Airport, Input) надають можливість введення вхідних даних.

Друга вкладка (Input) також надає можливість запустити сценарій польоту для розрахунків та запустити побудову контуру шуму.

Третя вкладка (Output) призначена для виведення результуючої інформації користувачу на екран.

Остання вкладка (Log) призначена для відображення журналу сценаріїв.

На вкладці Airport (рис. 5.6) з випадаючого списку вводяться назва міста та аеропорту, а з бази даних підтягуються географічні координати контрольної точки аеропорт та характеристики злітно-посадкових смуг Runways (назва, географічні координати, координати лівого і правого торців, магнітний курс зльоту від правого та лівого торців для кожної смуги). Також вводяться метеорологічні дані Meteo та маршрут польоту Tracks для вильоту і розбиття його на відрізки, а саме:

- DSTR – прямолінійний відрізок,
- DARR – криволінійний відрізок (кут та радіус повороту),

- DSTR – прямолінійний відрізок (виліт за приладами).

Моделювання проводиться для аеропорту «Бориспіль» (тип подій – відправлення).

Вкладка Input є головним вікном програми. Вона відповідає за введення інформації про повітряні судна, розрахункову сітку та безпосередньо формування сценарію. Вкладка має 23 поля введення даних, 4 випадючих списки, вікно списку, індикатор виконання, таблицю та вісім кнопок, які також згруповані у чотири групи: Events, Grid, Points та Units. Головне вікно програми з вкладкою Input представлено на рис. 5.7.

Група Events відповідає за формування списку подій сценарію.

The screenshot shows the 'Modeling aircraft noise' software interface. The 'Input' tab is active, displaying the following data:

Section	Field	Value
Airport	Town	Kiev
	Name	Boryspil
	Number of runways	2
	Latitude	50.2041
	Longitude	30.5340
	Meteo	Temperature
Meteo	Pressure	101325 Pa
Meteo	Humidity	70 %
Meteo	Wind	0 m/s
Runways	Runway name	18R
	lat	50.217
	lon	30.5253
	XL	0.00
	ZL	0.00
	XR	3500.00
ZR	0.00	
RTL	90.000	
RTR	270.000	
Runways	Runway name	36L
	lat	50.1914
	lon	30.5245
	XL	580.00
	ZL	1330.00
	XR	4080.00
ZR	1330.00	
RTL	90.000	
RTR	270.000	
Tracks	Name of track	FR_26_A_01
	Angle	270.00
	Segment	3
	Name	DSTR
	X	0.00
	Z	8600.00
	Name	DARR
	X	90.00
	Z	2500.00
Name	DSTR	
X	0.00	
Z	5000.00	
Tracks	Name of track	FR_08_D_01
	Angle	90.00
	Segment	3
	Name	DSTR
	X	0.00
	Z	5400.00
	Name	DARR
	X	-90.00
	Z	2500.00
Name	DSTR	
X	0.00	
Z	15000.00	

Рис. 5.6. Введення характеристик аеропорту «Бориспіль»

У даному вікні задається набір сценаріїв моделювання. Кожний сценарій записується окремим рядком у вигляді запису:

737300 D DEFAULT 3 08R TABAB2A 15 d.

Він означає, що ПС з ідентифікатором 737300 (це ID-код з БД ANP ПС Boeing B737-300/CFM56-3B-1) здійснює виліт за процедурою за замовчуванням (DEFAULT) з ваговим коефіцієнтом 3 зі злітно-посадкової смуги 08R за траєкторією TABAV2A вдень і таких подій буде п'ятнадцять.

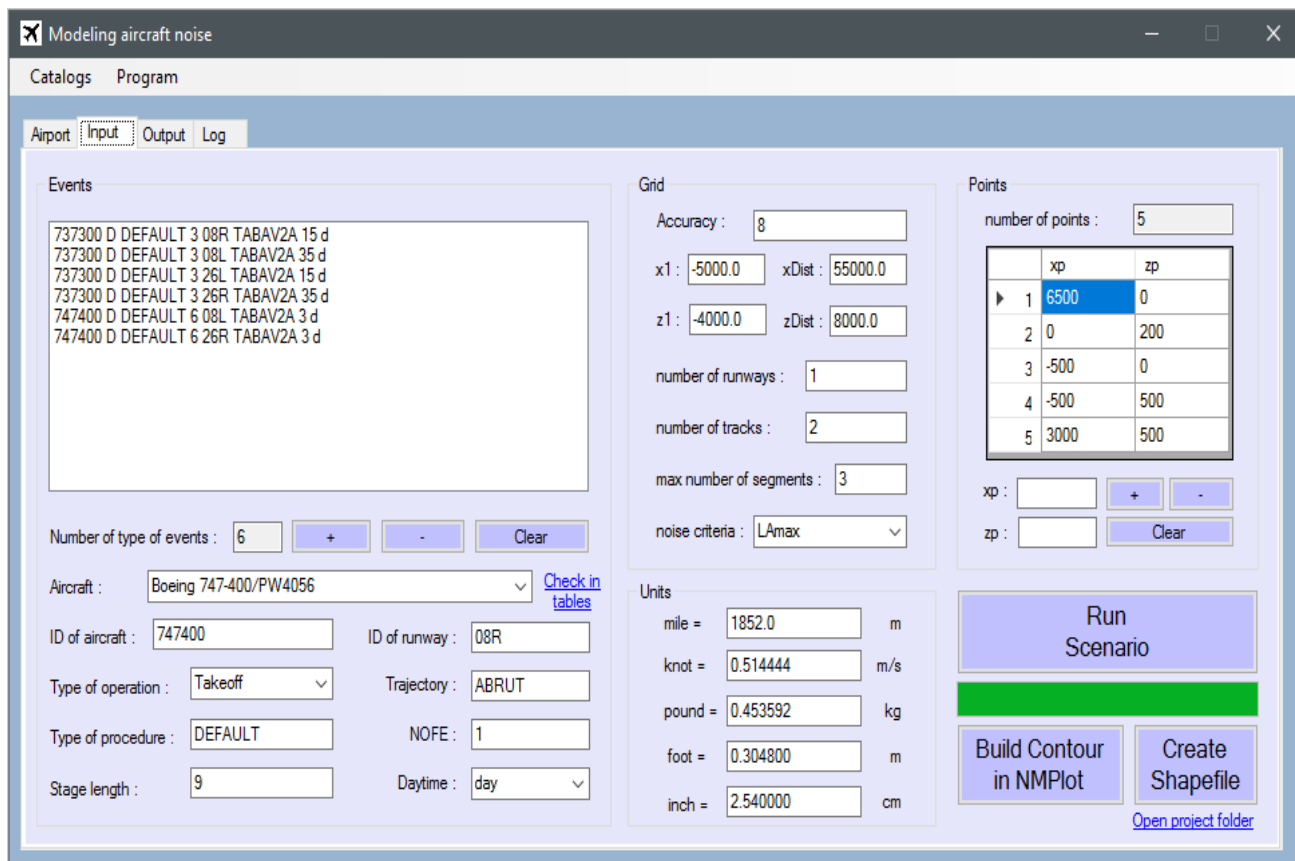


Рис. 5.7. Сценарій моделювання рівнів шуму для аеропорту «Бориспіль»

Детальніше цей запис означає:

- 737300 – ідентифікатор ПС в БД ANP;
- D – тип події (Departure/D – відправлення, Arrival/A – прибуття);
- DEFAULT – тип процедури (DEFAULT/ICAO\_A/ICAO\_B), за замовчуванням використовується стандартний тип процедури DEFAULT);
- 3 – ваговий коефіцієнт з БД ANP;
- 08R – назва злітно-посадкової смуги;
- TABAV2A – траєкторія польоту;

- 15 – кількість таких подій;
- d – час доби (d – день, e – вечір, n - ніч).

Моделювання набору цих сценаріїв і розрахунок рівнів шуму виконується при натисканні кнопки Run Scenario. Для візуалізації розрахованих рівнів шуму у вузлах координатної сітки використовується програма NMPlot [284].

Середовище NMPlot працює з файлом з розширенням \*.grd, який складається з дев'яти секцій, кожна з яких відповідає за певний розділ інформації, а саме:

CART — опис координатної системи в метрах;

SORC — місце розташування проведення сценарію, наприклад, аеропорт;

DESS — назва аеропорту;

LINS — кількість злітно-посадкових смуг, їх характеристики;

LINC — лінія шляху;

DESL — опис відрізків траєкторії;

MTRC — метод оцінки шуму;

DPAL — список пар розташувань;

GRID — значення рівнів шуму в точках розрахункової сітки.

Однак для роботи з середовищем NMPlot необхідно було автоматизувати процес побудови вище наведених секцій для формування \*.grd-файла.

Після того, як \*.grd-файл сформовано, головний модуль програми засобами мовою C# створює процес, який автоматично запускає програмне середовище NMPlot з відповідними параметрами, передаючи на вхід отриманий \*.grd-файл. Програма NMPlot будує контури шуму і надає набір засобів для їх відображення із зазначенням значень рівнів шуму (65 дБ, 70 дБ, 75 дБ, 80 дБ, 85 дБ).

На рис. 5.8 наведено вміст секцій середовища NMPlot для даного сценарію.

Побудовані контури шуму для даного сценарію наведено на рис. 5.9.

Однак побудовані контури треба нанести на географічну мапу конкретного аеропорту з прив'язкою до контрольної точки аеропорту.

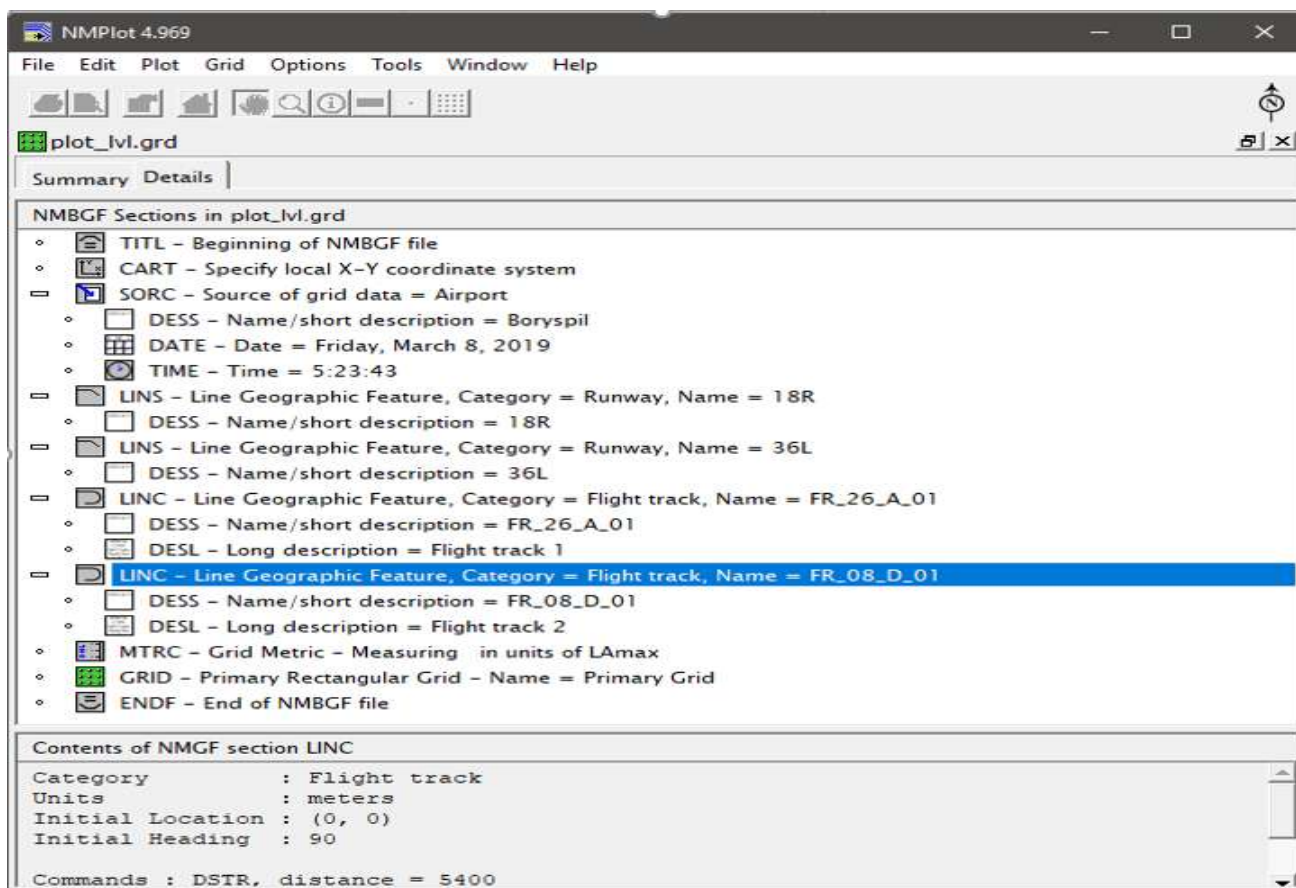


Рис. 5.8 Секції середовища NMplot

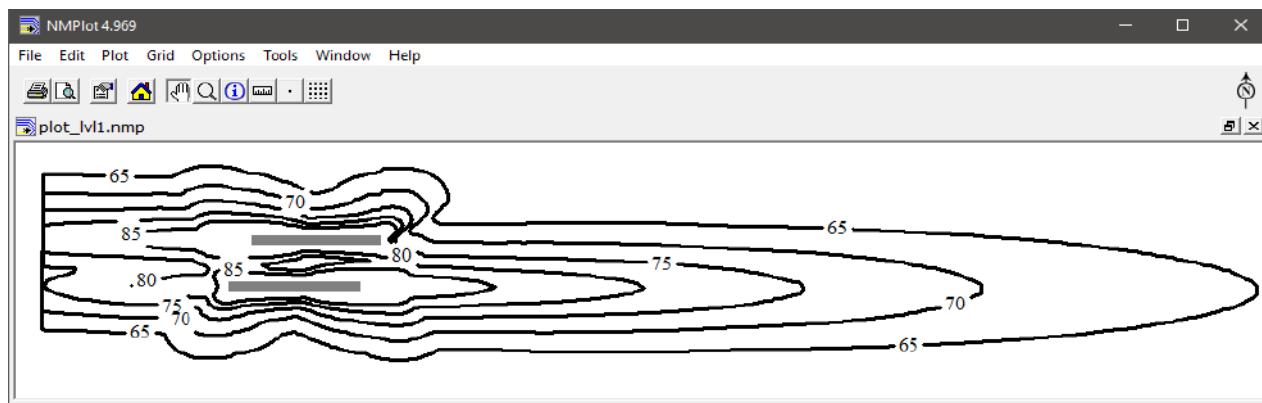


Рис. 5.9. Візуалізація розрахованих контурів шуму сценарію відправлення

Для цього використовується середовище геоінформаційної системи QGIS [3.51, 3.52], яка має набір різних типів мап (Google Maps, Bing Maps тощо) [285-287]. Для передачі побудованих контурів у QGIS необхідно створити файл з розширенням \*.shp, бо саме з таким типом файлу працює геоінформаційна система. Процес побудови \*.shp – файлу автоматизований і при натисканні кнопки Create Shapefile засобами мови Python створюється такий файл [288, 289].

Такий файл містить опис налаштувань координатної системи WGS84 (World Geodetic System 1984). Це всесвітня система геодезичних параметрів Землі 1984 года, в число яких входить система геоцентричних координат. На відміну від локальних систем, є єдиною системою для всієї планети.

Shapefile – файл містить поворот координат на кут для злітно-посадкової смуги з найменшими географічними координатами нижнього торця ЗПС відносно екватора, побудовані контури шуму зі значеннями рівнів шуму, злітно-посадкові смуги та їх географічні координати.

В QGIS треба вибрати карту, на яку треба розташувати розрахункові контури шуму (це карти України – UA map: Qgis simple, яка є найбільш вживаною), та додати підкладку карти (команди Інтернет – Open Layers Plugin вибрати Bing Maps – Bing Road), додається окремий шар з картою. Далі треба додати векторний шар з контуром, вибравши наш shp-файл, вибрати систему координат WGS84 та вибрати стиль відображення контуру та отримуємо картинку, зображені на рис. 5.10 та рис. 5.11.

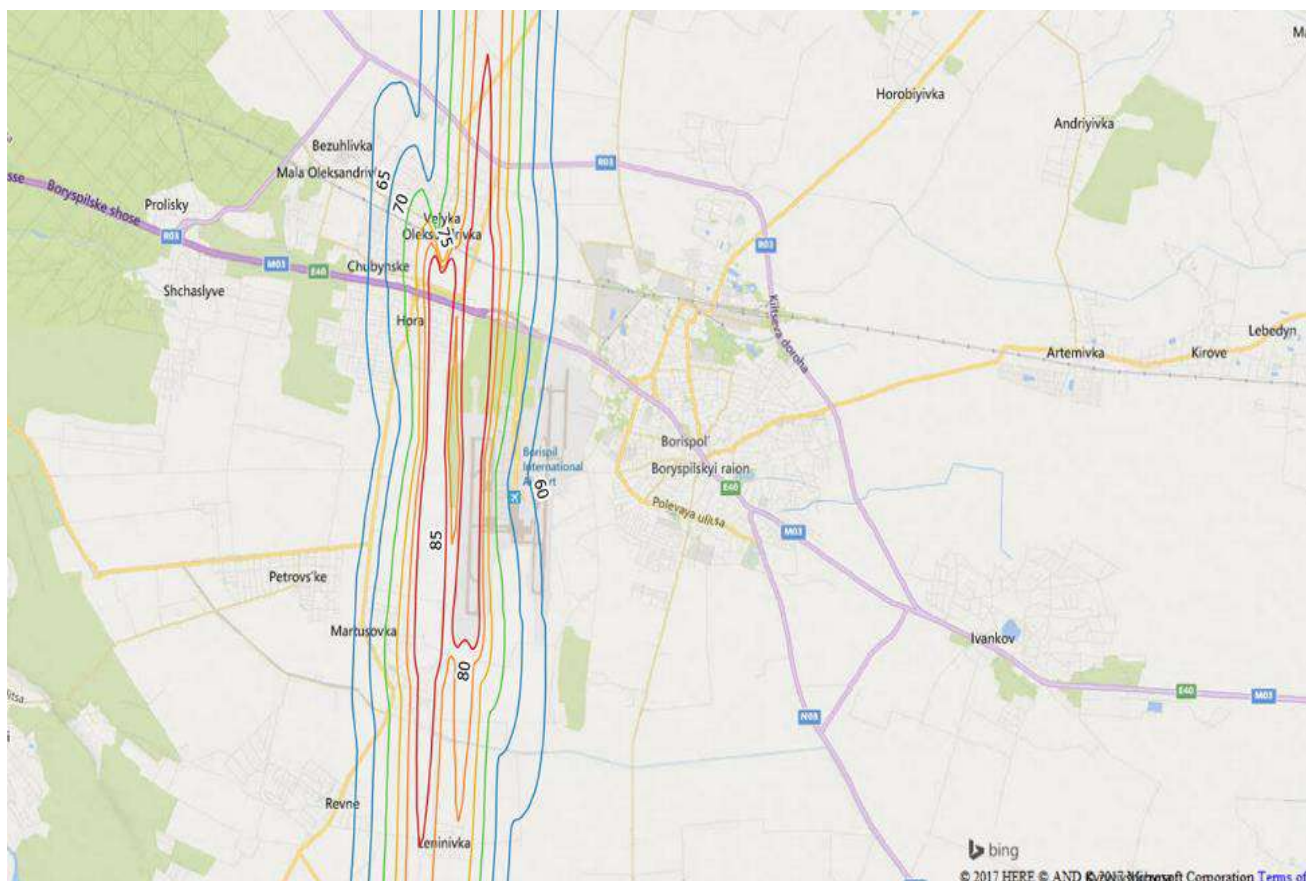


Рис. 5.10. Контури рівнів шуму для аеропорту «Бориспіль»

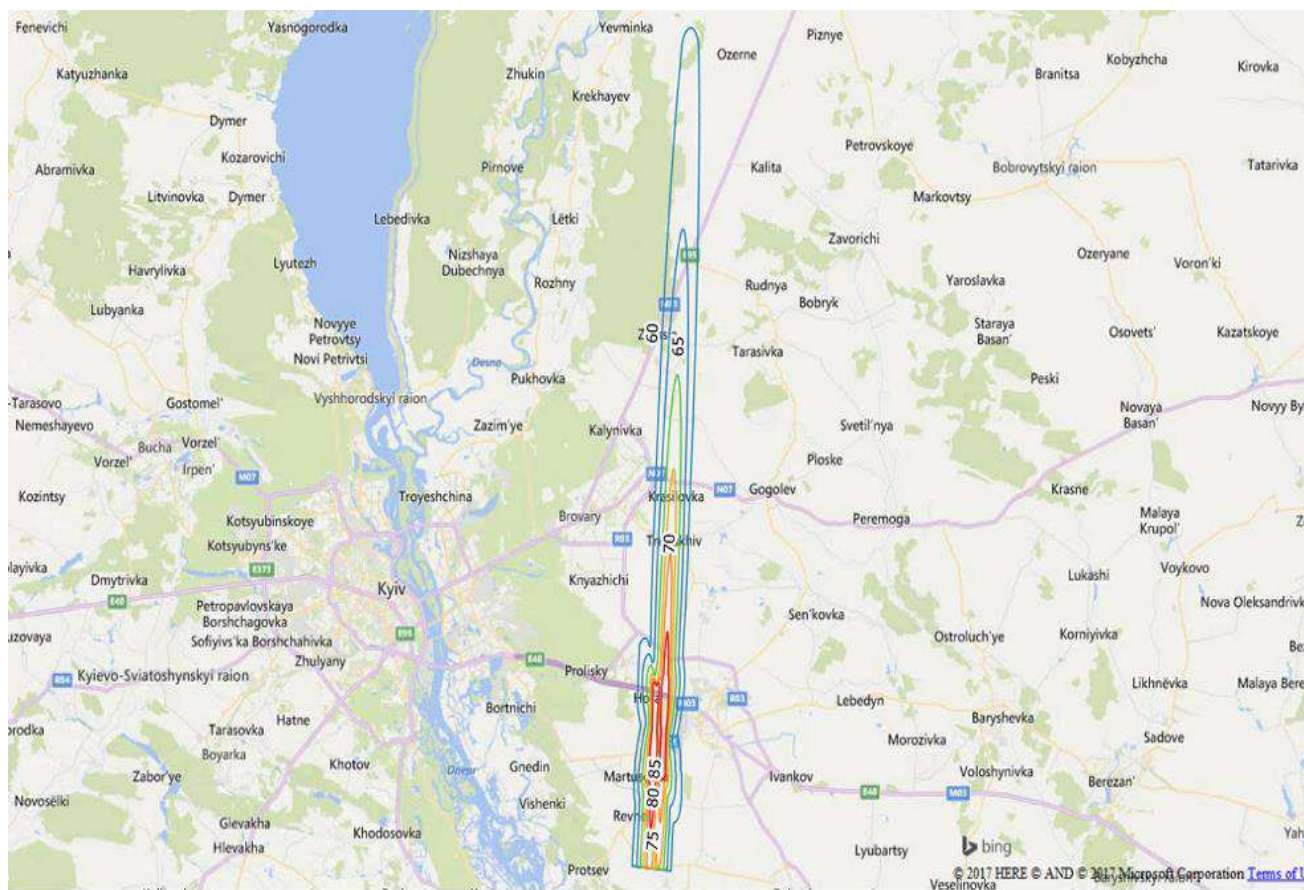


Рис. 5.11. Контури рівнів шуму для аеропорту «Бориспіль» на збільшеній карті  
 Для аеропорту «Херсон» для сценарію відправлення контури шуму мають вигляд, наведені на рис. 5.12 – рис. 5.13.



Рис. 5.12. Контури рівнів шуму для аеропорту «Херсон»

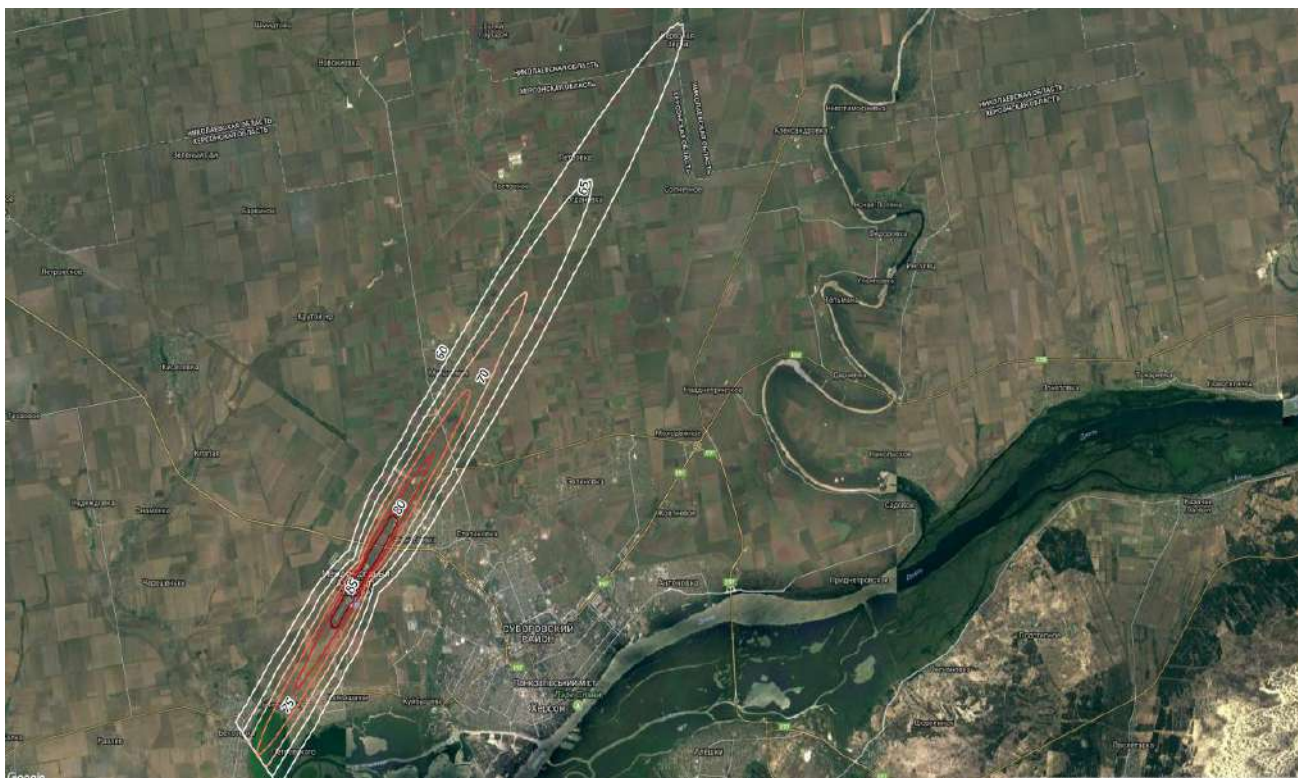


Рис. 5.13. Контури рівнів шуму для аеропорту «Херсон» з мапи супутника

Моделювання контурів шуму для сценарію аеропорту «Київ» імені Ігоря Сікорського (тип подій – прибуття) наведено на рис. 5.14 – 5.17.

**Modeling aircraft noise**

Catalogs Program

Airport Input Output Log

**Airport**

Town: Kiev

Name: Zhulhany

Number of runways: 1

Latitude: 50.2406

Longitude: 30.2658

**Meteo**

Temperature: 15 degrees C

Pressure: 101325 Pa

Humidity: 70 %

Wind: 0 m/s

**Runways**

Runway name: 08

lat= 50.244 lon= 30.2612

XL: 0.00 ZL: 0.00

XR: 3500.00 ZR: 0.00

RTL: 90.000 RTR: 270.000

Runway name: 26

lat= 50.248 lon= 30.2759

XL: 580.00 ZL: 1330.00

XR: 4080.00 ZR: 1330.00

RTL: 90.000 RTR: 270.000

**Tracks**

Name of track: FR\_26\_A\_01

Angle: 270.00 Segment: 3

Name: DSTR X: 0.00 Z: 8600.00

Name: DARR X: 90.00 Z: 2500.00

Name: DSTR X: 0.00 Z: 5000.00

Name of track: FR\_08\_D\_01

Angle: 90.00 Segment: 3

Name: DSTR X: 0.00 Z: 5400.00

Name: DARR X: -90.00 Z: 2500.00

Name: DSTR X: 0.00 Z: 15000.00

Рис. 5.14. Введення характеристик аеропорту «Київ»



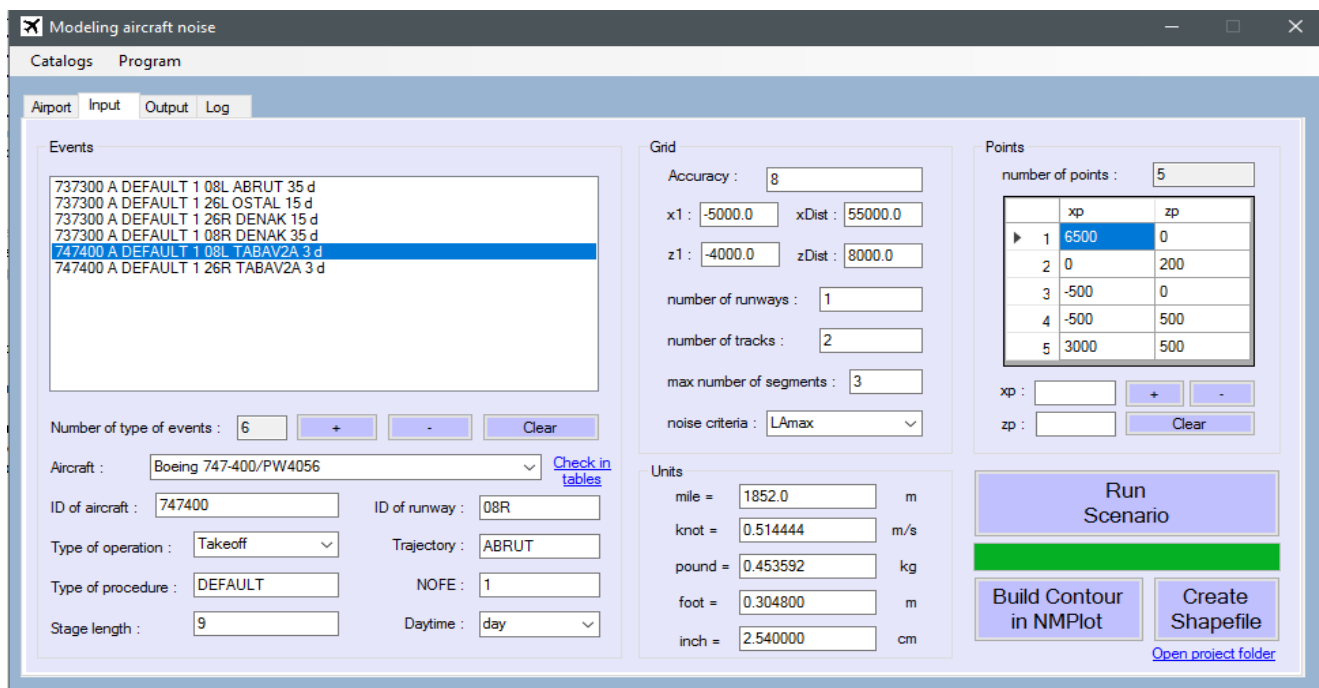


Рис. 5.15. Сценарій моделювання рівнів шуму для аеропорту «Київ»

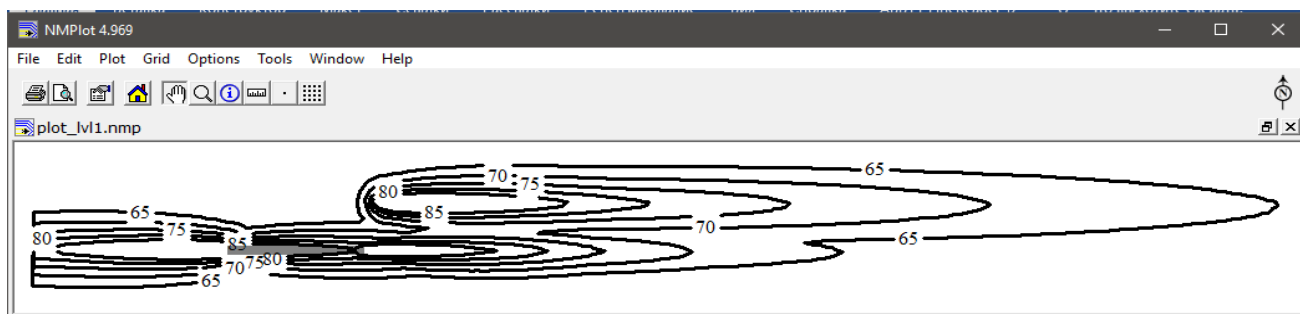


Рис. 5.16. Візуалізація розрахованих контурів шуму сценарію прибуття

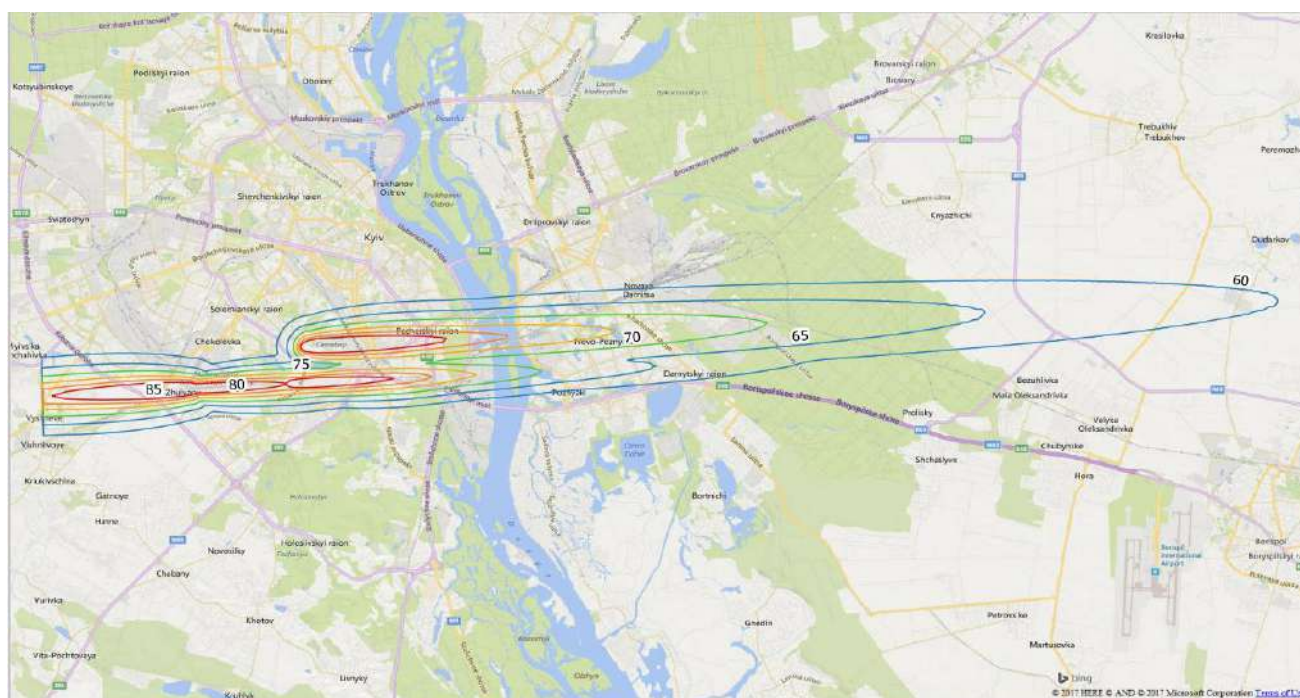


Рис. 5.17. Контури рівнів шуму для аеропорту «Київ»

Моделювання контурів шуму для сценарію аеропорту «Київ» (тип подій – відправлення та прибуття) наведено на рис. 5.18 – 5.20.

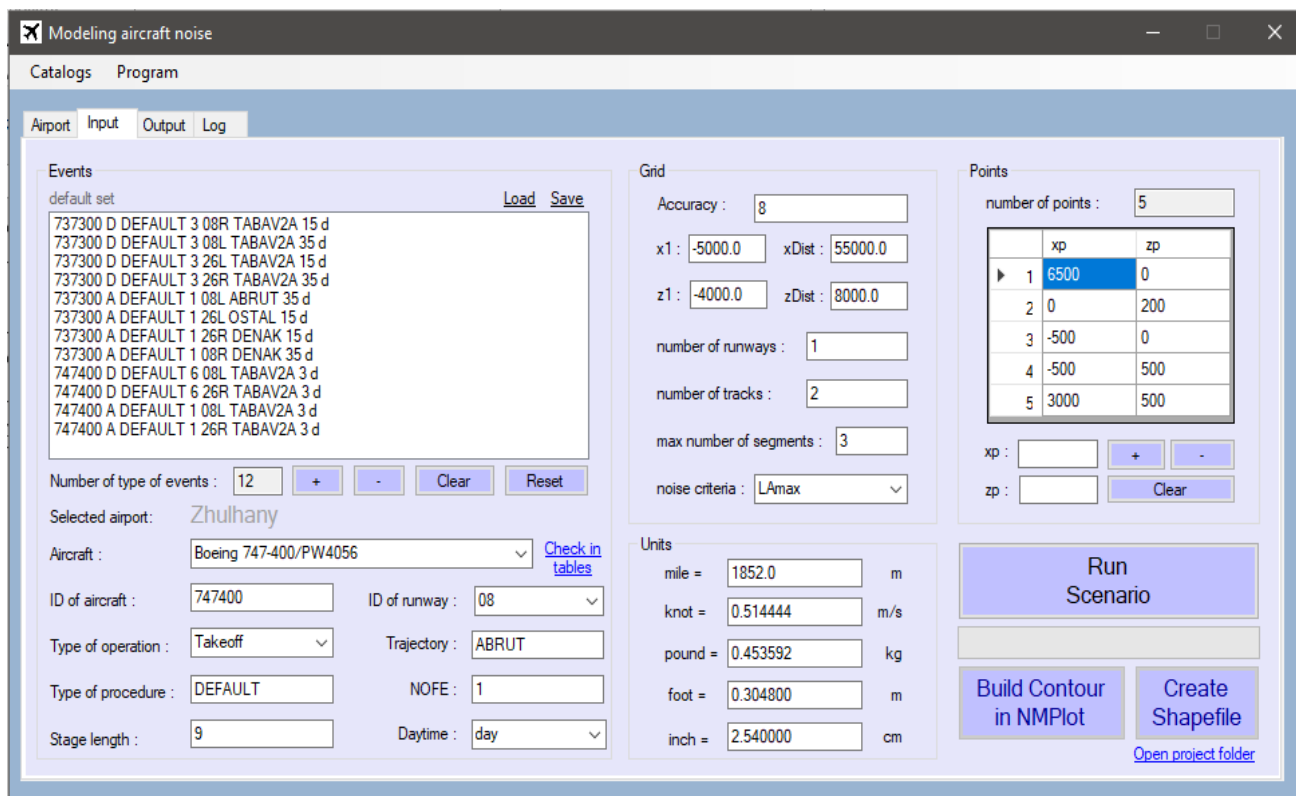


Рис. 5.18. Сценарій моделювання рівнів шуму для аеропорту «Київ»

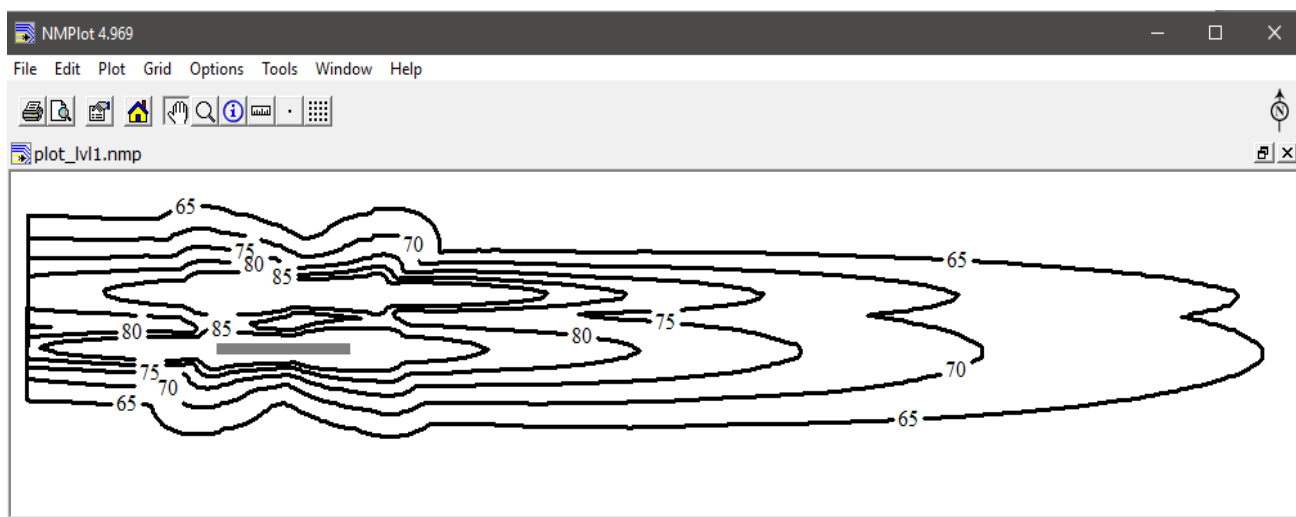


Рис. 5.19. Візуалізація розрахованих контурів шуму сценарію відправлення (106 подій) та прибуття (106 подій)

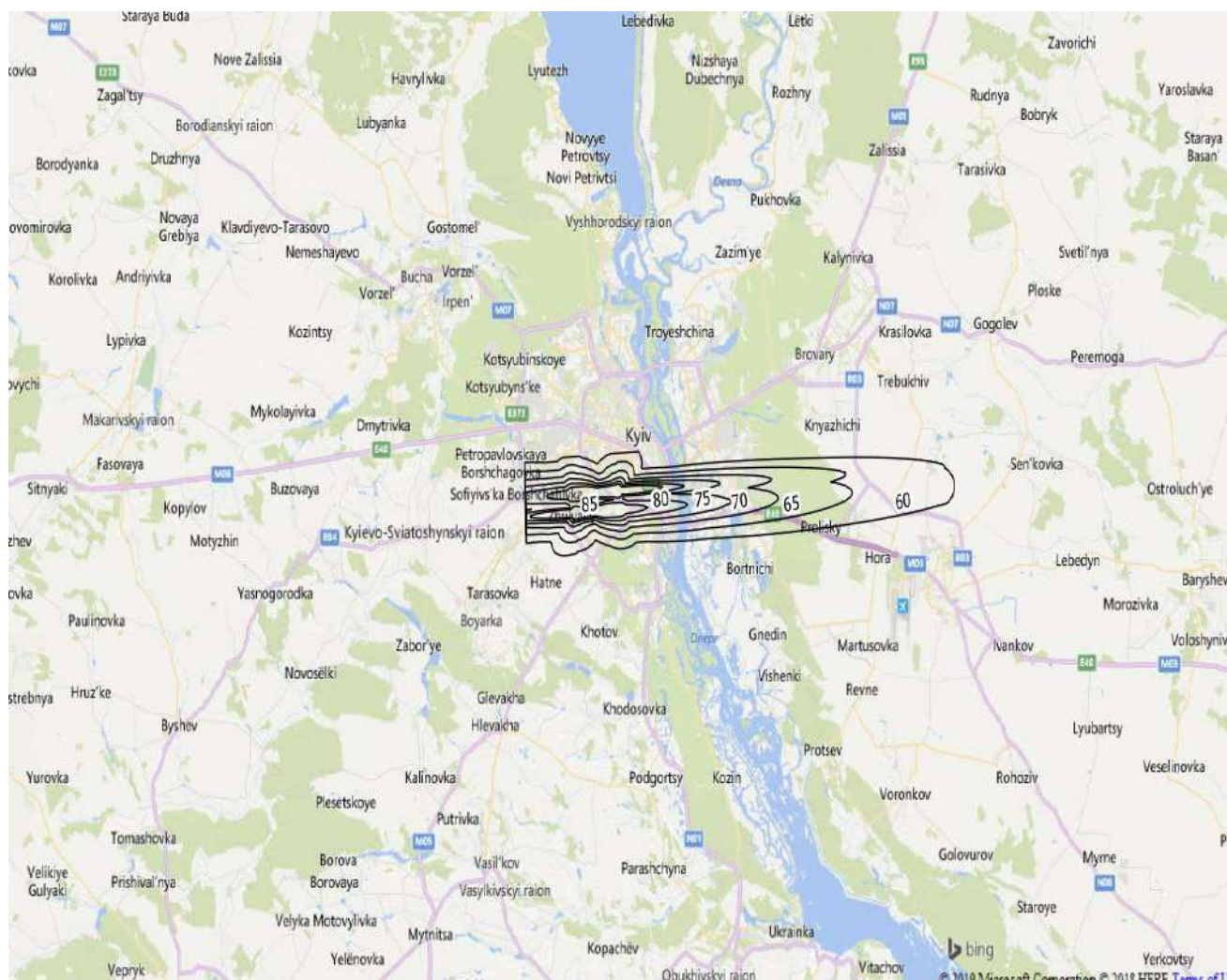


Рис. 5.20. Контури рівнів шуму для аеропорту «Київ»  
(відправлення/прибуття 212 подій)

В роботах [290-292] також наведено результати оцінювання впливу авіаційного шуму в районі аеропорту із застосуванням ГІС-технології для візуалізації отриманих контурів рівнів шуму, отриманих шляхом моделювання.

### 5.3. Верифікація результатів моделювання рівнів авіаційного шуму

З метою встановлення наскільки запропонована інформаційна система моніторингу, обрана математична модель, вихідні умови, прийняті допущення для моделі, обраний метод рішення моделі є прийнятними щодо отриманих результатів моделювання значень рівнів шуму в рамках виконання бюджетної

теми № 181-ДБ18 «Розробка ГІС-платформи удосконалених моделей обчислення чинників впливу авіації на довкілля для моніторингу, зонування та оптимізації діяльності аеропорту» в аеропорту «Київ» були проведені натурні вимірювання рівнів шуму.

Відповідно до Протоколу випробувань № 1 від 7.08.2018 були проведені натурні вимірювання рівнів шуму шумоміром-аналізатором спектру «Октава-110А». Протягом дня було проведено декілька сценаріїв (відправлення/прибуття) згідно розкладу рейсів ПС. Також проведено моделювання рівнів шуму для ПС, для яких виконувалися заміри. Нижче наведено результати вимірювань та моделювання рівнів шуму (рис. 5.21 – 5.51).

### Сценарій 1 (Відправлення)

12:30:00    12:35:00    ButaAirways    E190    Відправлення

The screenshot displays the 'Modeling aircraft noise' software interface. The window title is 'Modeling aircraft noise'. It features a menu bar with 'Catalogs' and 'Program'. Below the menu bar are tabs for 'Airport', 'Input', 'Output', and 'Log'. The main area is divided into three columns: 'Airport', 'Runways', and 'Tracks'.

**Airport:**

- Town: Kiev
- Name: Zhulhany
- Number of runways: 1
- Latitude: 50.2407
- Longitude: 30.2707

**Runways:**

Runway name: 08  
lat= 50.244    lon= 30.2612

XL: 0.00    ZL: 0.00  
XR: 3500.00    ZR: 0.00  
RTL: 90.000    RTR: 270.000

Runway name: 26  
lat= 50.248    lon= 30.2759

XL: 580.00    ZL: 1330.00  
XR: 4080.00    ZR: 1330.00  
RTL: 90.000    RTR: 270.000

**Tracks:**

Name of track: FR\_26\_A\_01  
Angle: 270.00    Segment: 3

Name: DSTR    X: 0.00    Z: 8600.00  
Name: DARR    X: 90.00    Z: 2500.00  
Name: DSTR    X: 0.00    Z: 5000.00

Name of track: FR\_08\_D\_01  
Angle: 90.00    Segment: 3

Name: DSTR    X: 0.00    Z: 5400.00  
Name: DARR    X: -90.00    Z: 2500.00  
Name: DSTR    X: 0.00    Z: 15000.00

Рис. 5.21 Аеропорт «Київ»

Modeling aircraft noise

Catalogs Program

Airport Input Output Log

Events  
custom set [Load](#) [Save](#)  
EMB14L D DEFAULT 1 08 ABRUT 1 d

Number of type of events : 1 [+](#) [-](#) [Clear](#) [Reset](#)

Selected airport: Zhulhany

Aircraft : Embraer 145 LR / Allison AE3007A1 [Check in tables](#)

ID of aircraft : EMB14L ID of runway : 08

Type of operation : Takeoff Trajectory : ABRUT

Type of procedure : DEFAULT NOFE : 1

Stage length : 1 Daytime : day

Grid  
Accuracy : 8  
x1 : -5000.0 xDist : 55000.0  
z1 : -4000.0 zDist : 8000.0  
number of runways : 1  
number of tracks : 2  
max number of segments : 3  
noise criteria : LAmax

Points  
number of points : 5

	xp	zp
▶ 1	6500	0
2	0	200
3	-500	0
4	-500	500
5	3000	500

xp :  [+](#) [-](#)  
zp :  [Clear](#)

Units  
mile = 1852.0 m  
knot = 0.514444 m/s  
pound = 0.453592 kg  
foot = 0.304800 m  
inch = 2.540000 cm

[Run Scenario](#)

[Build Contour in NMPlot](#) [Create Shapefile](#)

[Open project folder](#)

Рис. 5.22. Сценарій відправлення для літака Embraer 145 ER

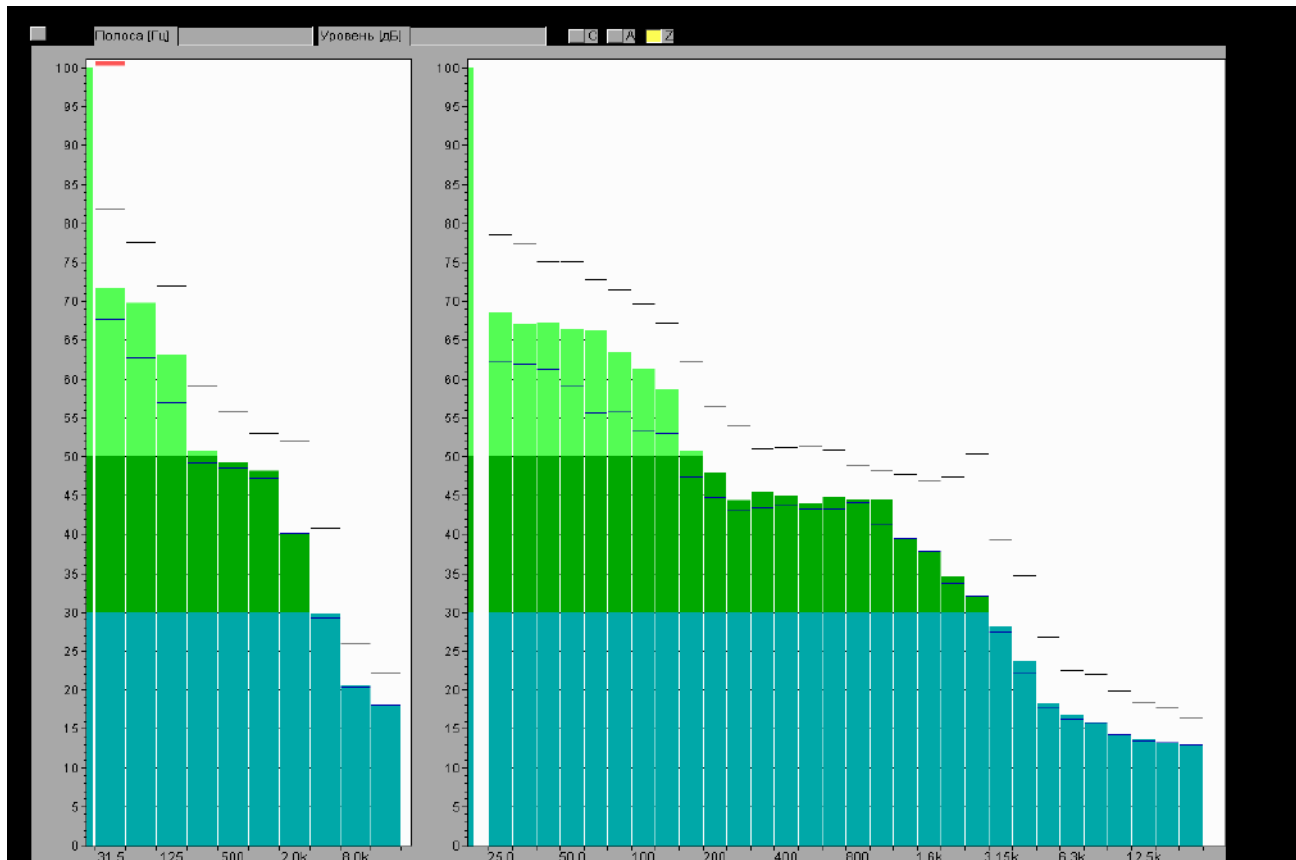


Рис. 5.23. Вимірювання рівнів шуму для літака Embraer 145 ER



Рис. 5.24. Розраховані рівні шуму для літака Embraer 145 ER

12:50:00 Чартер Cessna 680 Відправлення

	xp	zp
1	6500	0
2	0	200
3	-500	0
4	-500	500
5	3000	500

Рис. 5.25. Сценарій відправлення для літака Cessna 680

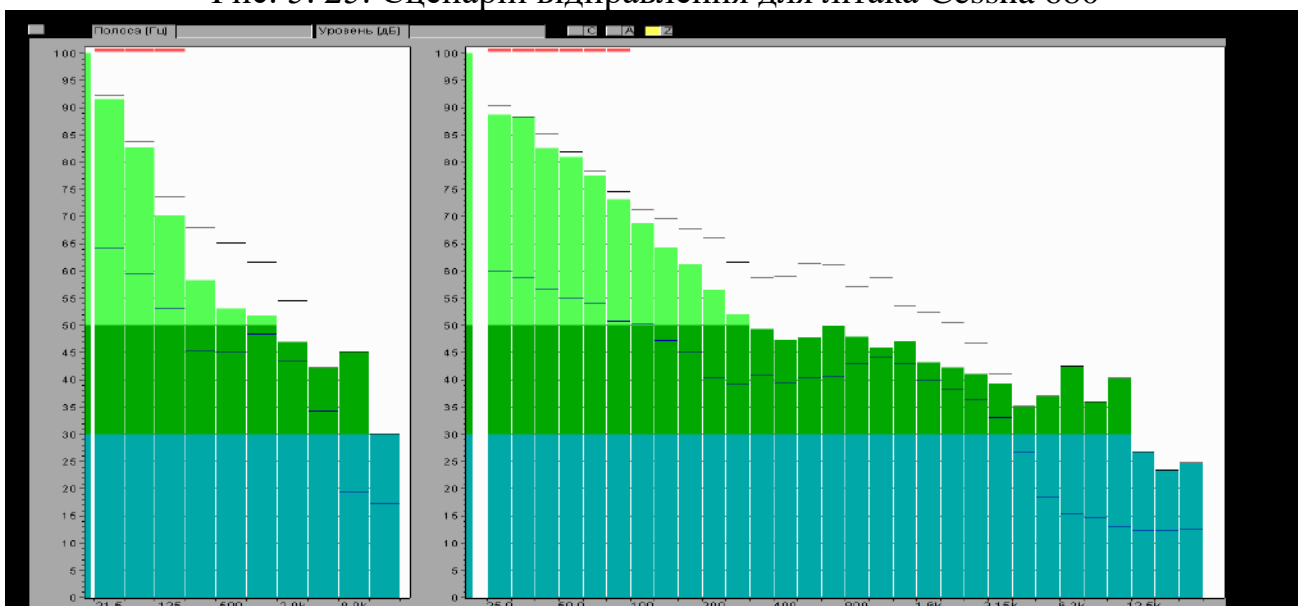


Рис. 5.26. Вимірювання рівнів шуму для літака Cessna 680

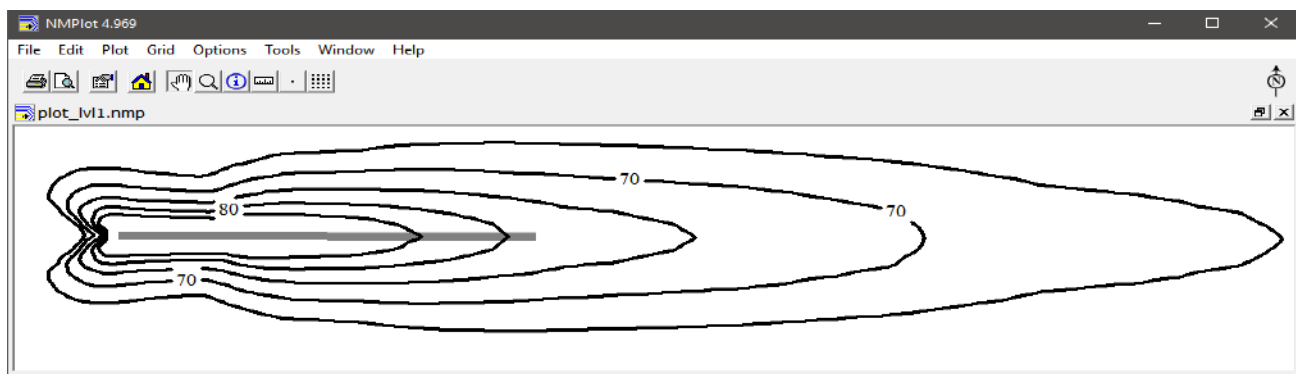


Рис. 5.27. Розраховані рівні шуму для літака Cessna 680

12:50

Boeing 737-548

Відправлення

number of points :	xp	zp
1	6500	0
2	0	200
3	-500	0
4	-500	500
5	3000	500

Рис. 5.28. Сценарій відправлення для літака Boeing 737-548

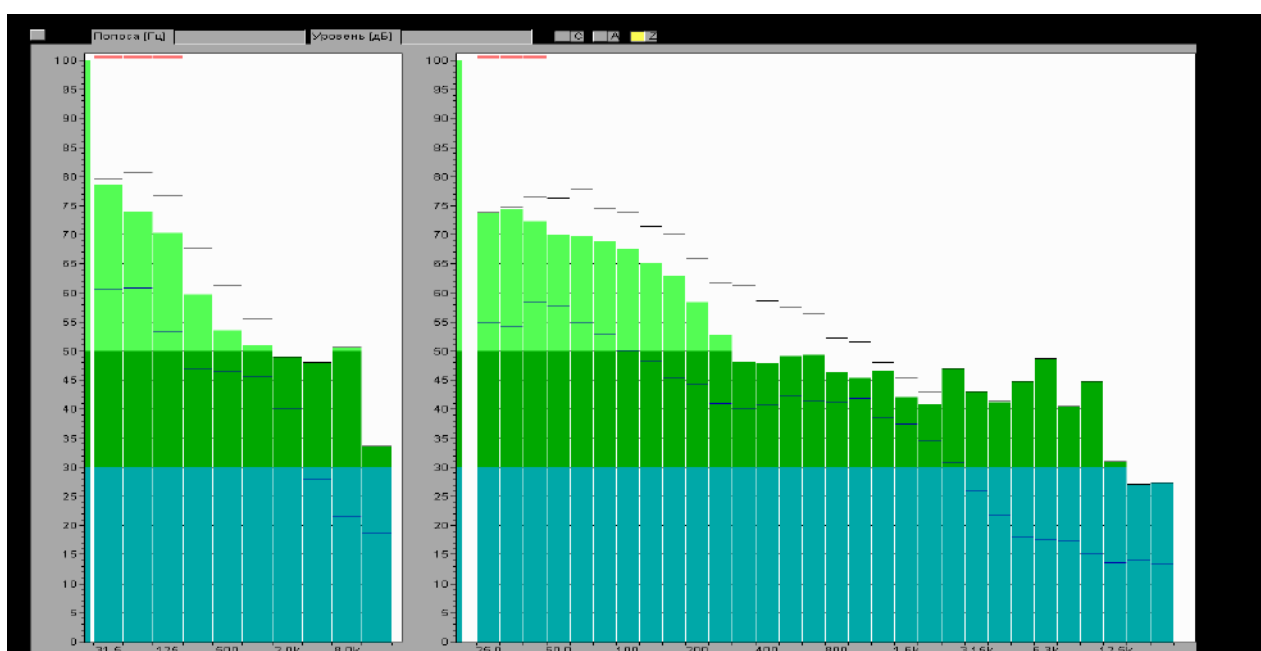


Рис. 5.29. Вимірювання рівнів шуму для літака Boeing 737-548

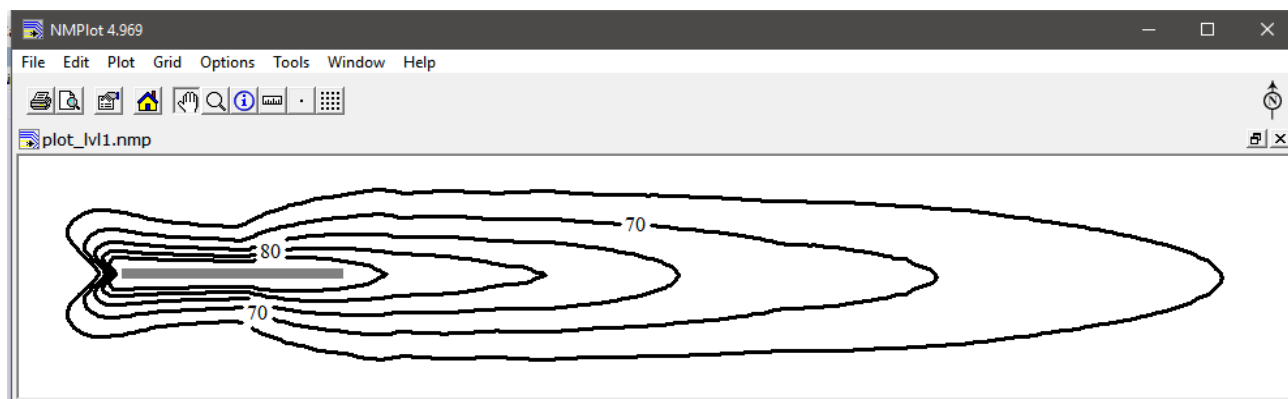


Рис. 5.30. Розраховані рівні шуму для літака Boeing 737-548

13:05:00 A320-232 Відправлення

Modeling aircraft noise

Catalogs Program

Airport Input Output Log

Events  
custom set  
A320-232 D DEFAULT 5 08 ABRUT 1 d

Number of type of events : 1

Selected airport: Zhulhany

Aircraft : Airbus A320-232/V2527-A5

ID of aircraft : A320-232

Type of operation : Takeoff

Type of procedure : DEFAULT

Stage length : 5

ID of runway : 08

Trajectory : ABRUT

NOFE : 1

Daytime : day

Grid

Accuracy : 8

x1 : -5000.0 xDist : 55000.0

z1 : -4000.0 zDist : 8000.0

number of runways : 1

number of tracks : 2

max number of segments : 3

noise criteria : LAmax

Units

mile = 1852.0 m

knot = 0.514444 m/s

pound = 0.453592 kg

foot = 0.304800 m

inch = 2.540000 cm

Points

number of points : 5

	xp	zp
1	6500	0
2	0	200
3	-500	0
4	-500	500
5	3000	500

Run Scenario

Build Contour in NMPLOT

Create Shapefile

Open protect folder

Рис. 5.31. Сценарій відправлення для літака A320-232

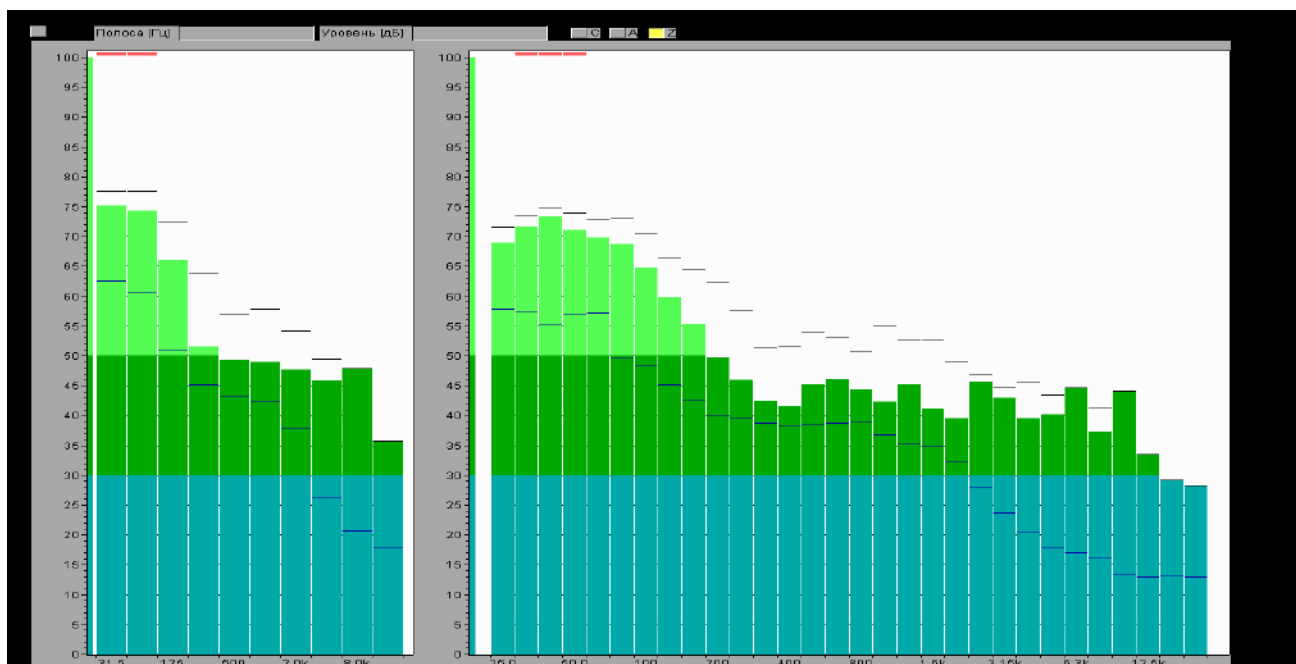


Рис. 5.32. Вимірювання рівнів шуму для літака A320-232



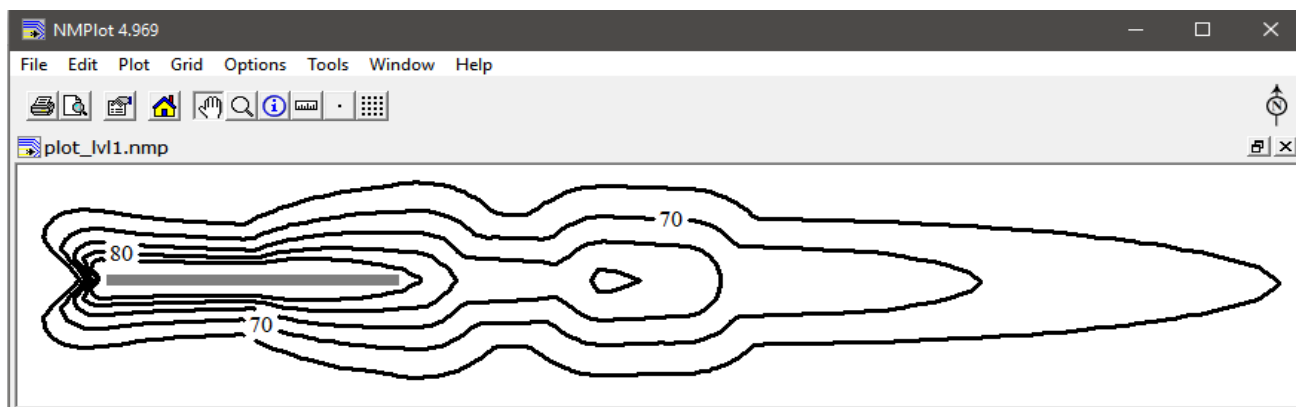


Рис. 5.33. Розраховані рівні шуму для літака A320-232

Сценарій 1 (відправлення сумарний)

Modeling aircraft noise

Catalogs Program

Airport Input Output Log

Events  
custom set  
EMB14L D DEFAULT 1 08 ABRUT 1 d  
CNA680 D DEFAULT 1 08 ABRUT 1 d  
737500 D DEFAULT 5 08 ABRUT 1 d  
A320-232 D DEFAULT 5 08 ABRUT 1 d

Number of type of events : 4 + - Clear Reset

Selected airport: Zhulhany

Aircraft: Airbus A320-232/V2527-A5 Check in tables

ID of aircraft: A320-232 ID of runway: 08

Type of operation: Takeoff Trajectory: ABRUT

Type of procedure: DEFAULT NOFE: 1

Stage length: 5 Daytime: day

Grid

Accuracy: 8

x1: -5000.0 xDist: 55000.0

z1: -4000.0 zDist: 8000.0

number of runways: 1

number of tracks: 2

max number of segments: 3

noise criteria: LAmax

Units

mile = 1852.0 m

knot = 0.514444 m/s

pound = 0.453592 kg

foot = 0.304800 m

inch = 2.540000 cm

Points

number of points: 5

	xp	zp
▶ 1	6500	0
2	0	200
3	-500	0
4	-500	500
5	3000	500

xp: + - zp: Clear

Run Scenario

Build Contour in NMPlot Create Shapefile

Open project folder

Рис. 5.34. Сценарій відправлення для літаків Embraer 145 ER, Cessna 680, Boeing 737-548, A320-232

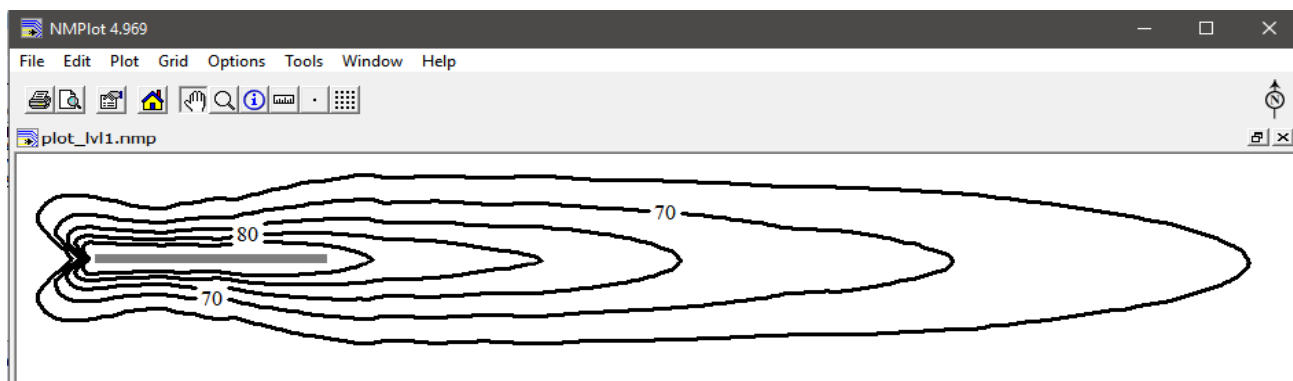


Рис. 5.35. Розраховані рівні шуму для літаків Embraer 145 ER, Cessna 680, Boeing 737-548, A320-232

## Сценарій 2 (прибуття)

14:08:00 A320-232 Прибуття

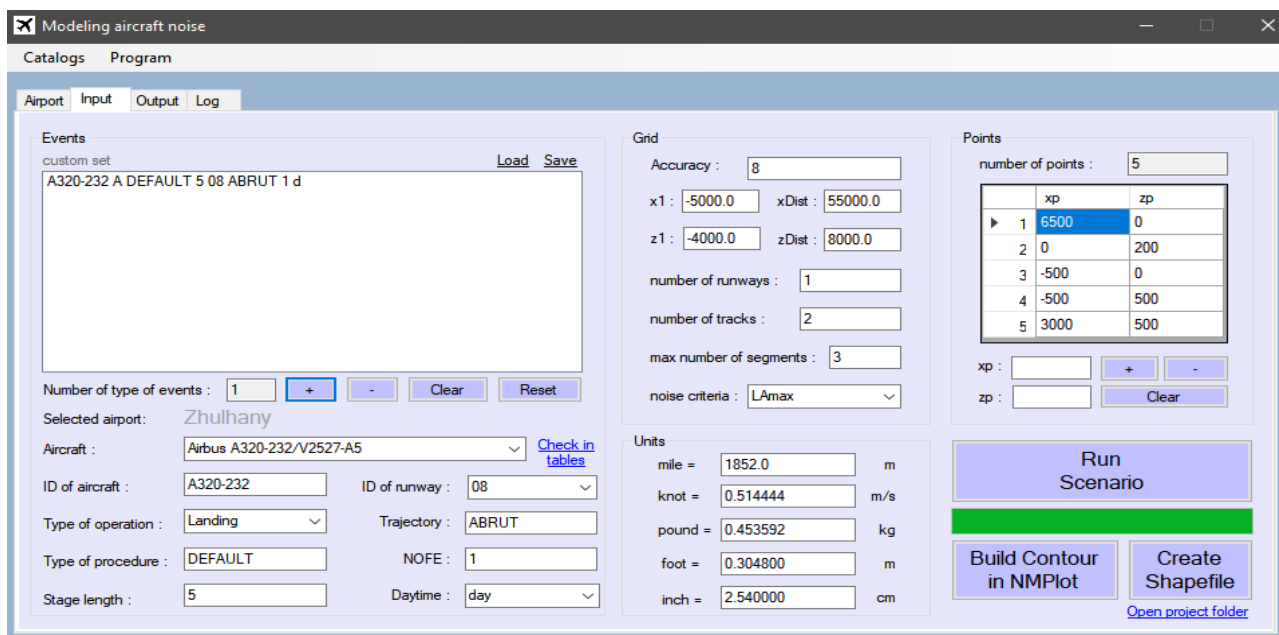


Рис. 5.36. Сценарій прибуття для літака A320-232

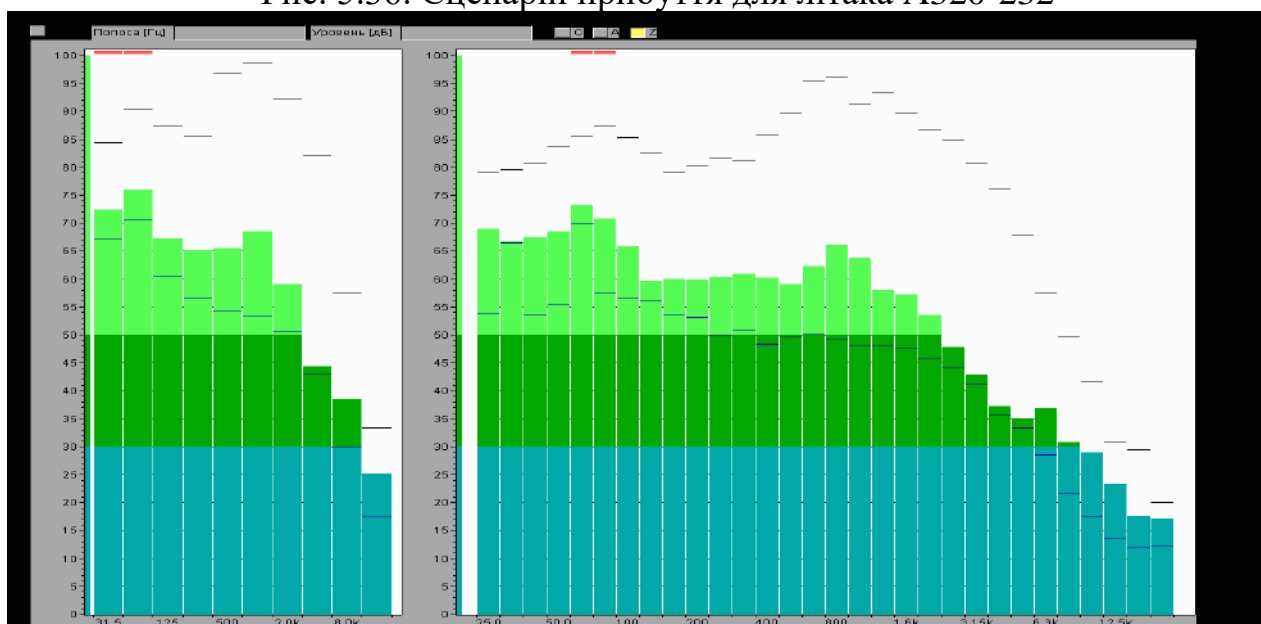


Рис. 5.37. Вимірювання рівнів шуму для літака A320-232

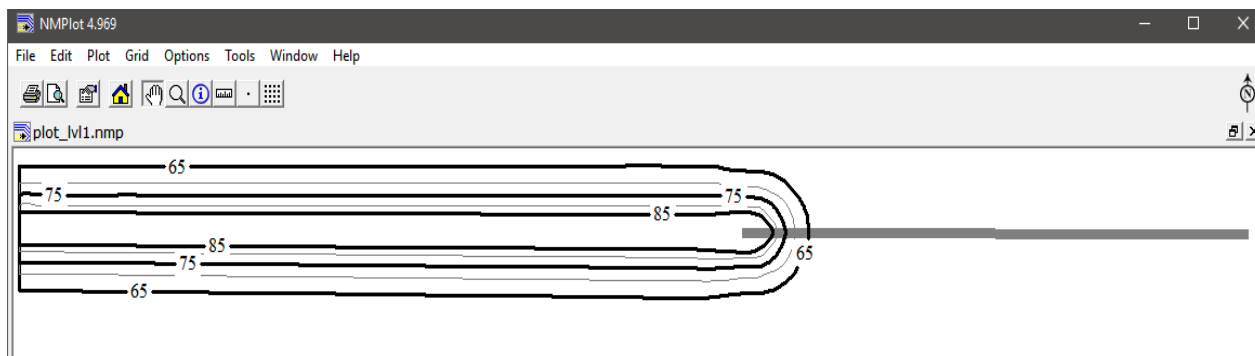


Рис. 5.38. Розраховані рівні шуму для літака A320-232

14:17:00 Boeing 737-Max8 Прибуття

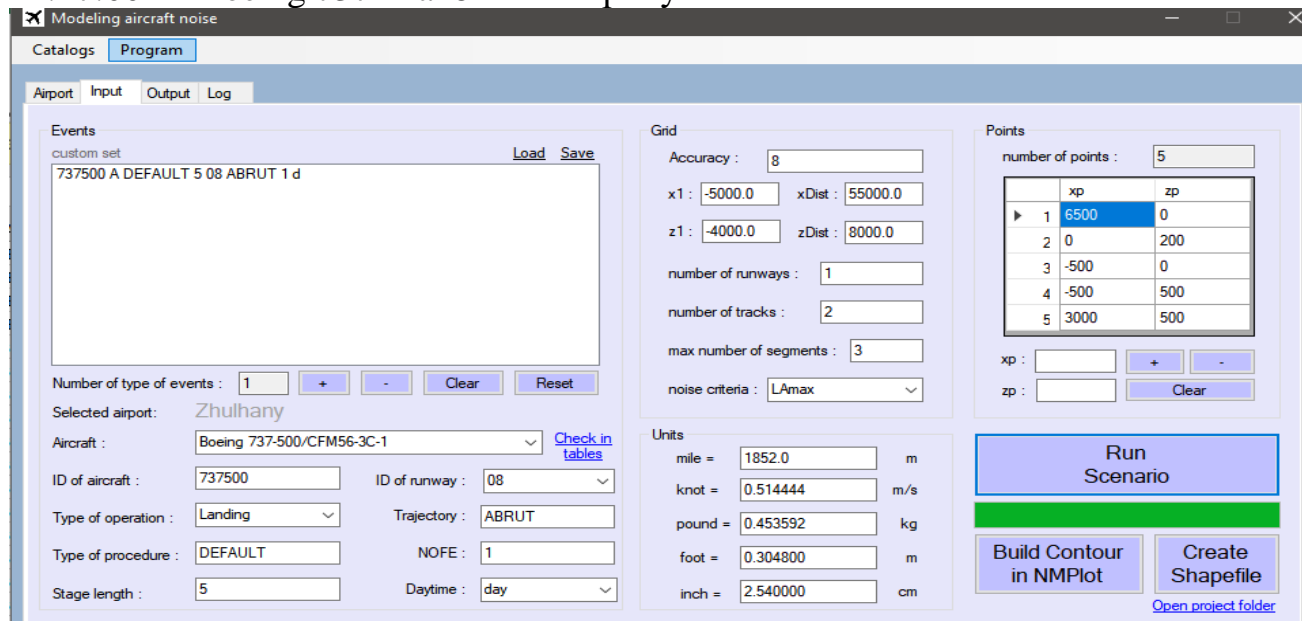


Рис. 5.39. Сценарій прибуття для літака Boeing 737-Max8

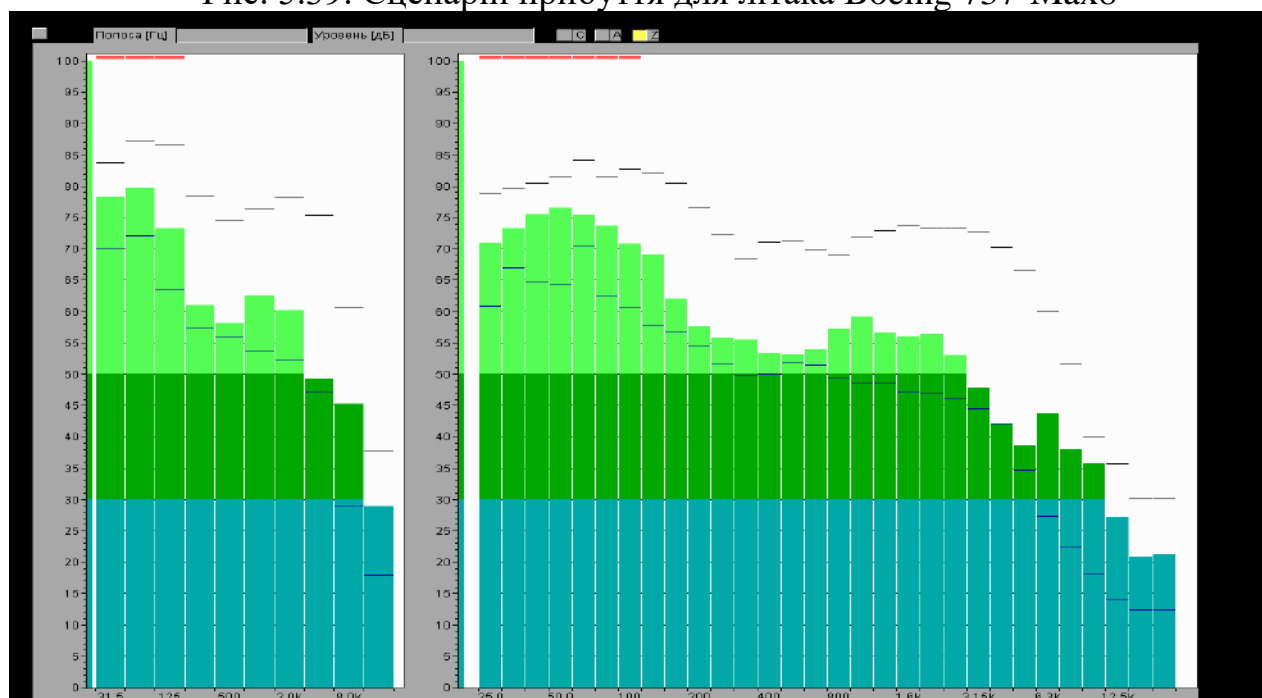


Рис. 5.40. Вимірювання рівнів шуму для літака Boeing 737-Max8

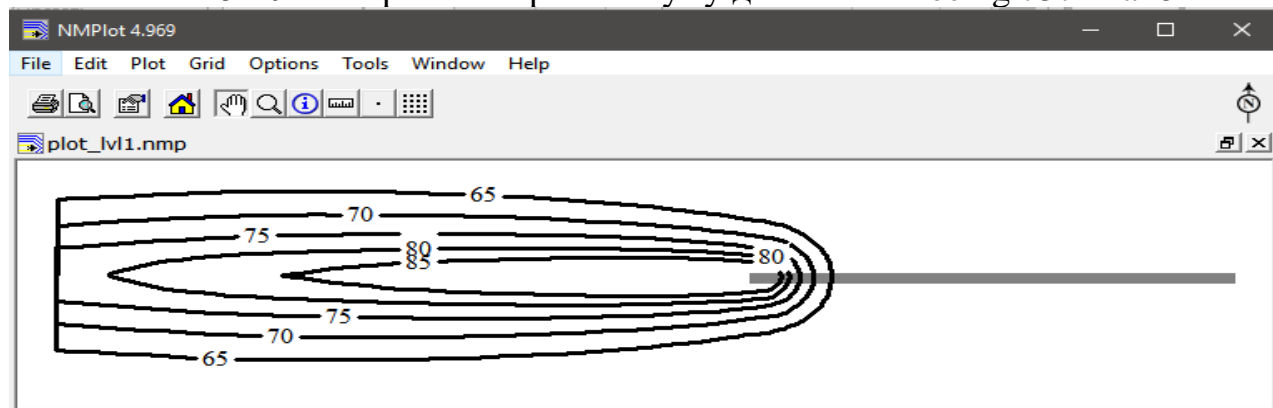


Рис. 5.41. Розраховані рівні шуму для літака Boeing 737-Max8

14:20:00 Boeing 737-31S

Прибуття

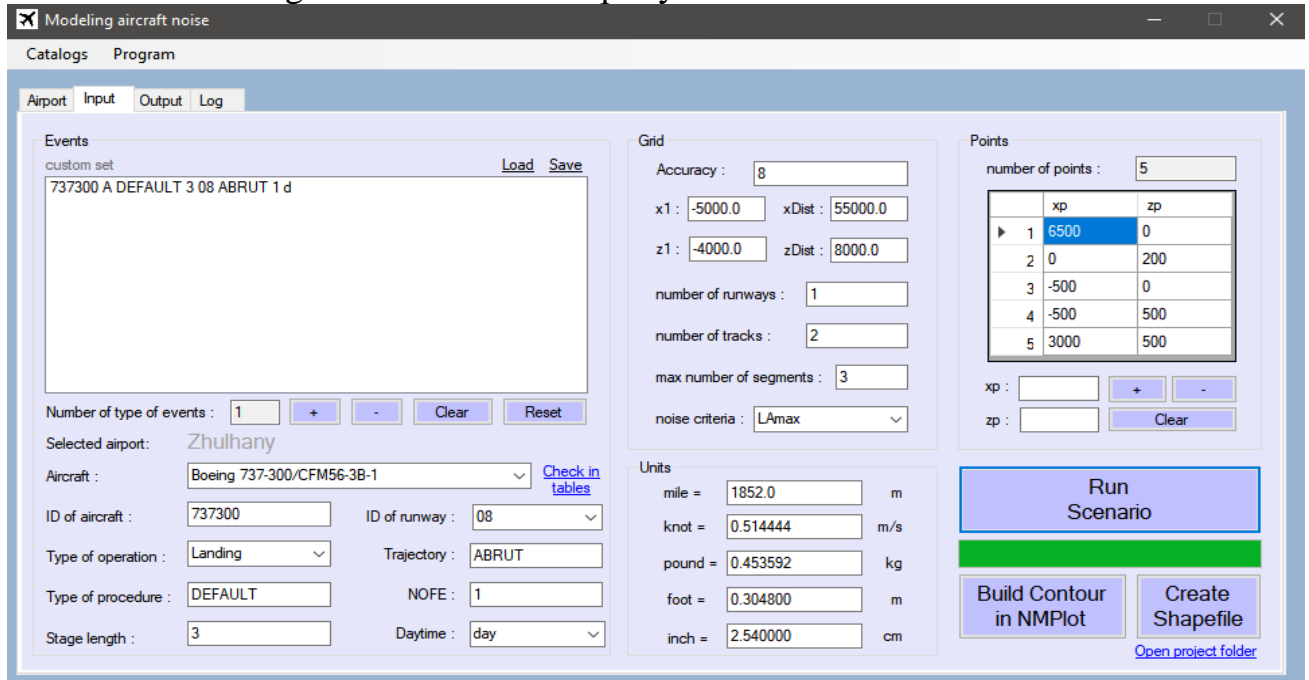


Рис. 5.42. Сценарій прибуття для літака Boeing 737-31S

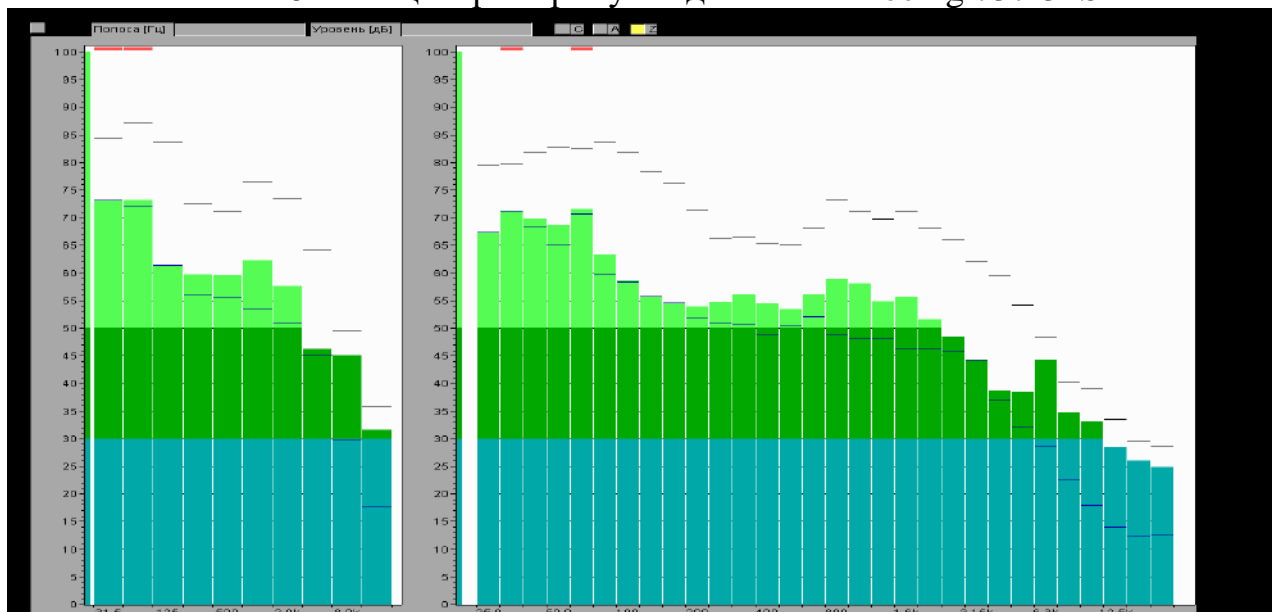


Рис. 5.43. Вимірювання рівнів шуму для літака Boeing 737-31S

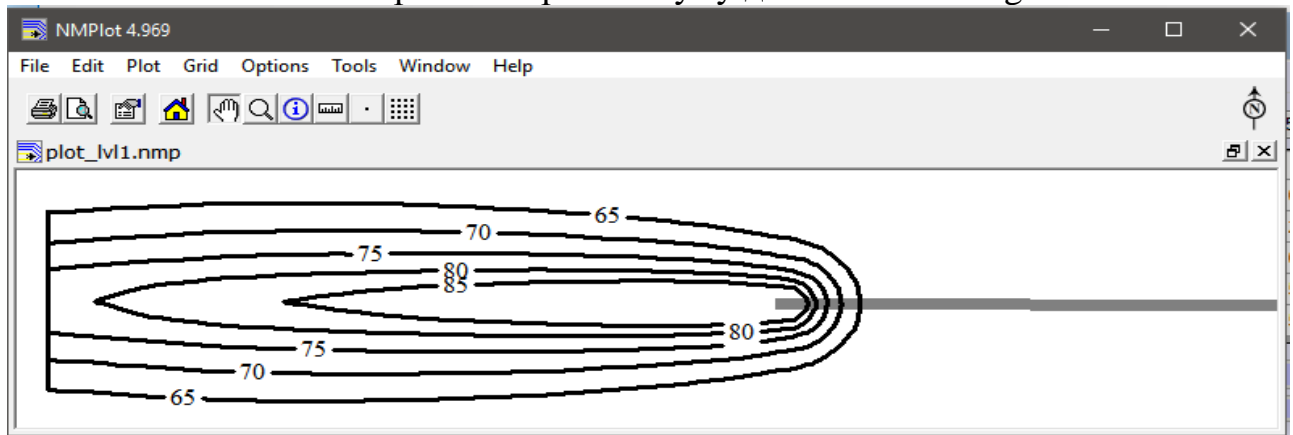


Рис. 5.44. Розраховані рівні шуму для літака Boeing 737-31S

14:16:00 UR-CDX

Прибуття

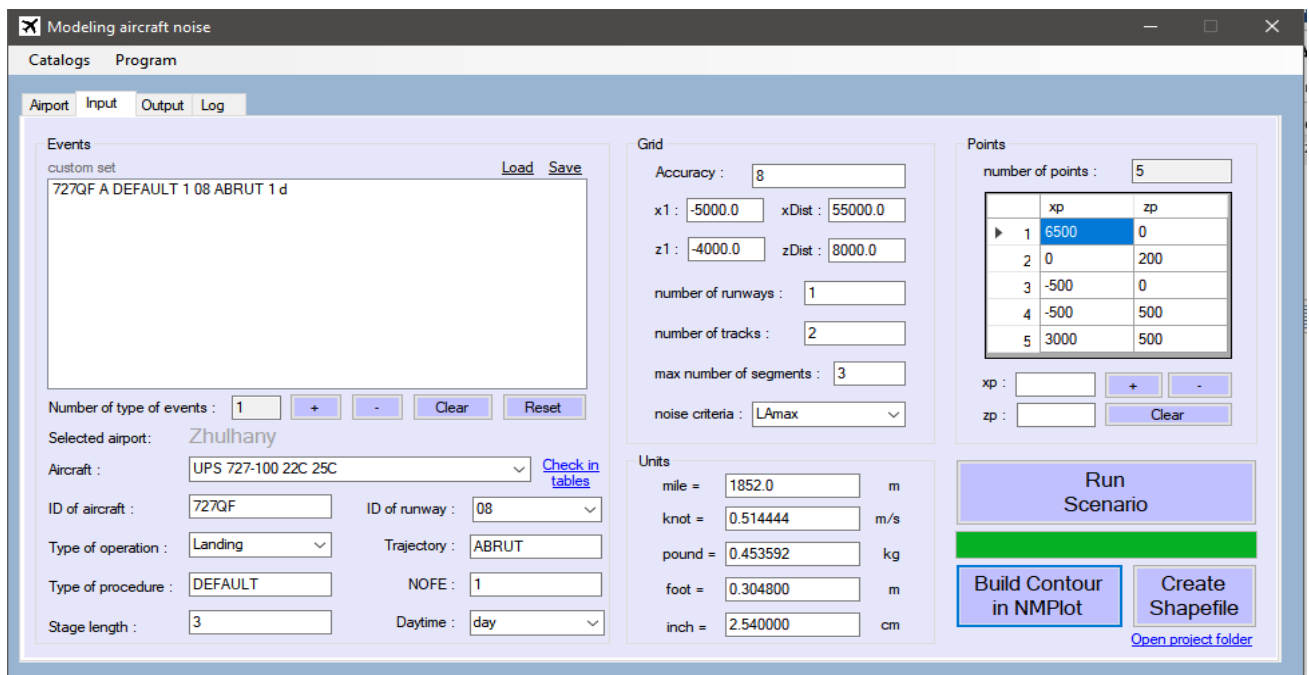


Рис. 5.45. Сценарій прибуття для літака UR-CDX

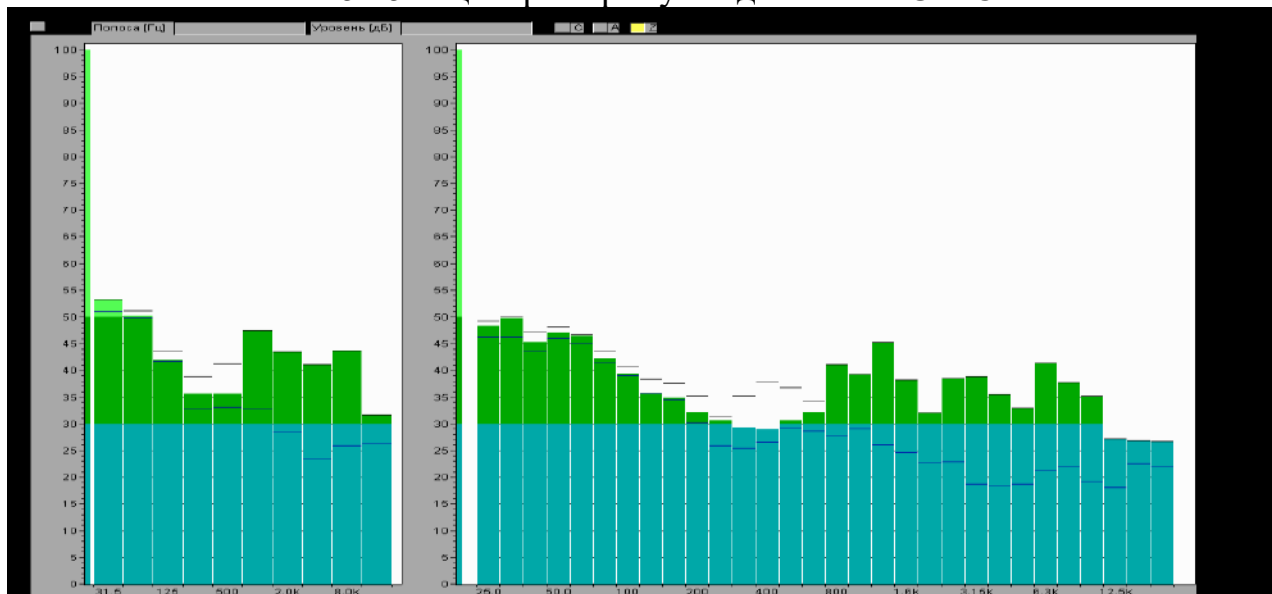


Рис. 5.46. Вимірювання рівнів шуму для літака UR-CDX

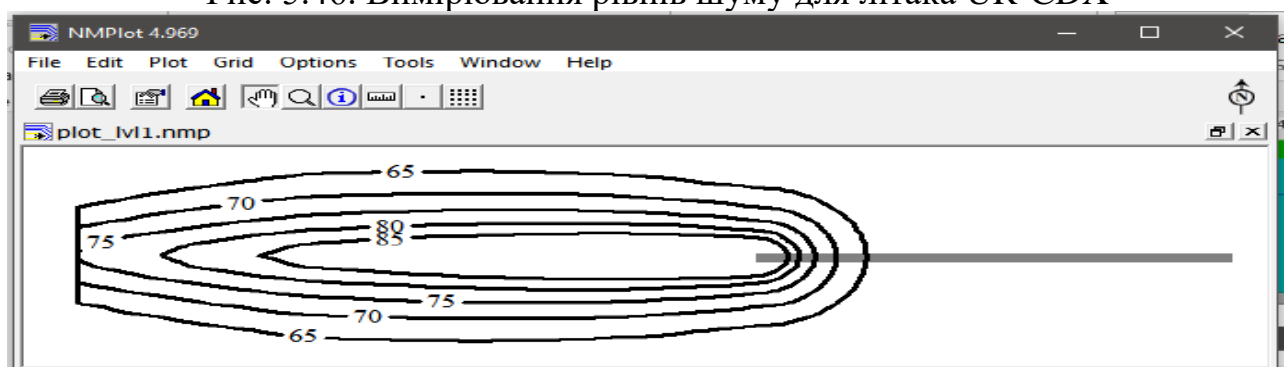


Рис. 5.47. Розраховані рівні шуму для літака UR-CDX

## Спільний сценарій прибуття

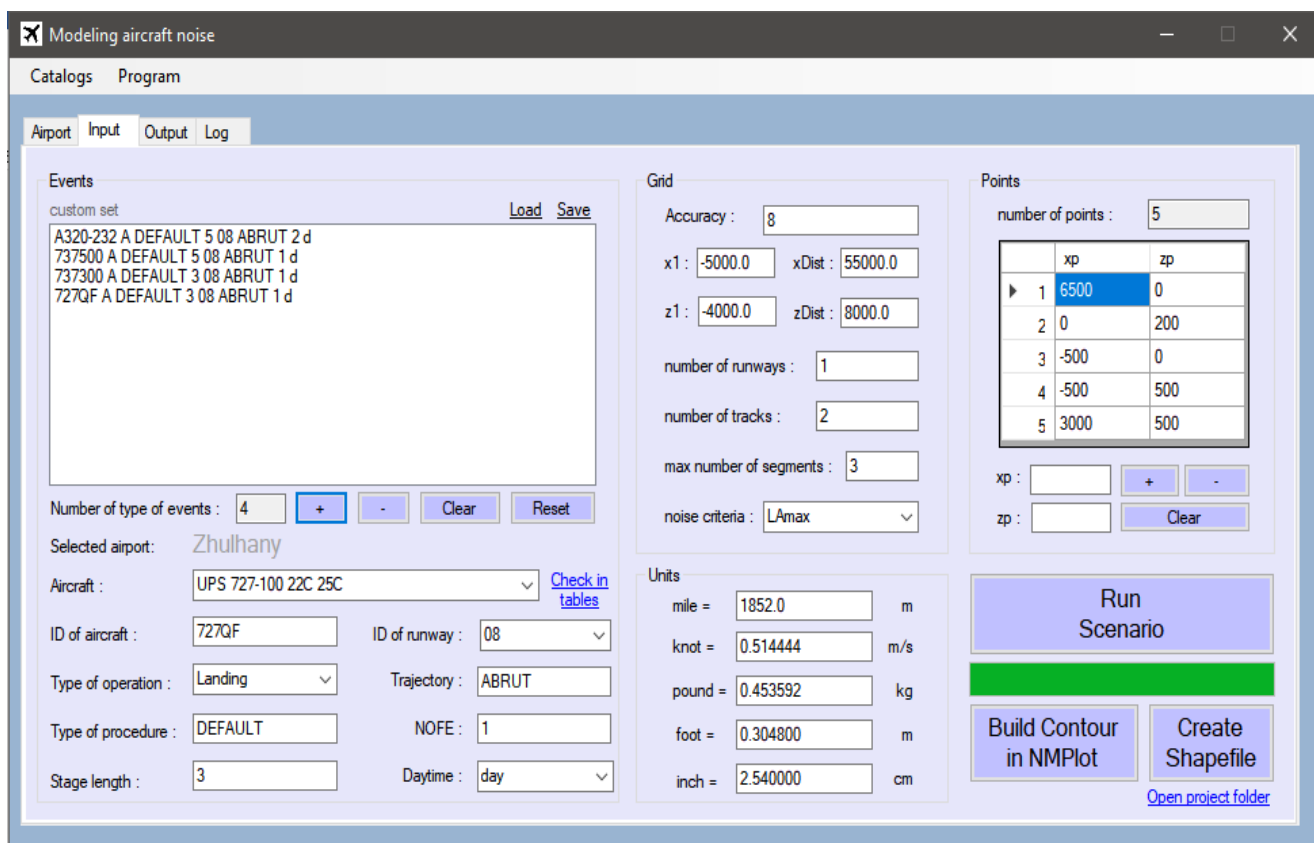


Рис. 5.48.5 Сценарій прибуття для літаків A320-232, Boeing 737-Мах8, Boeing 737-31S, UR-CDX

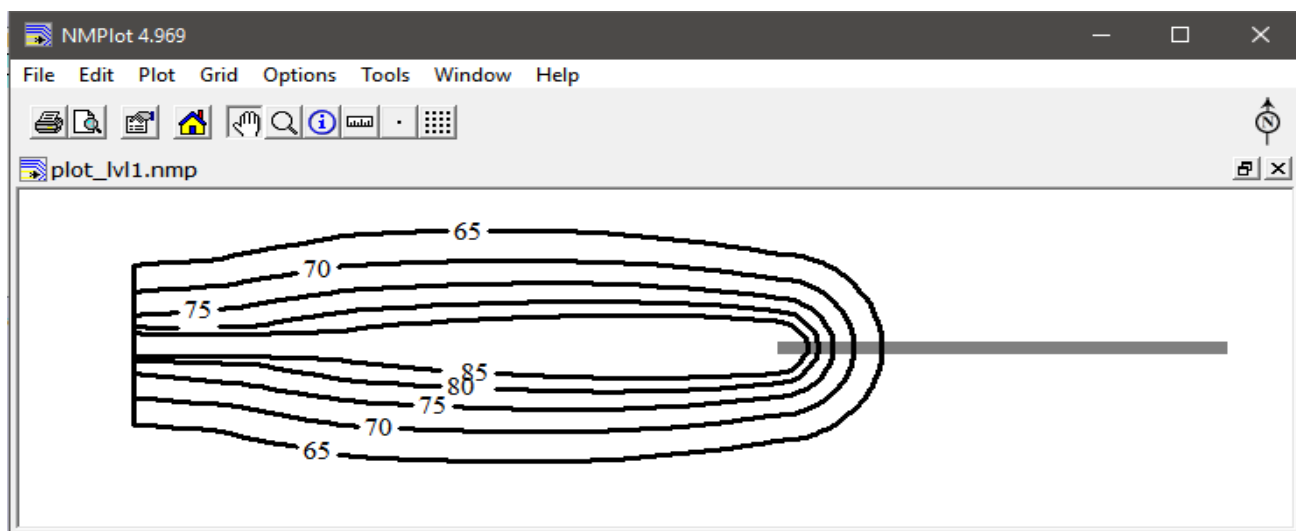


Рис. 5.49. Розраховані рівні шуму для спільного сценарію прибуття

## Моделювання спільного сценарію відправлення та прибуття літаків

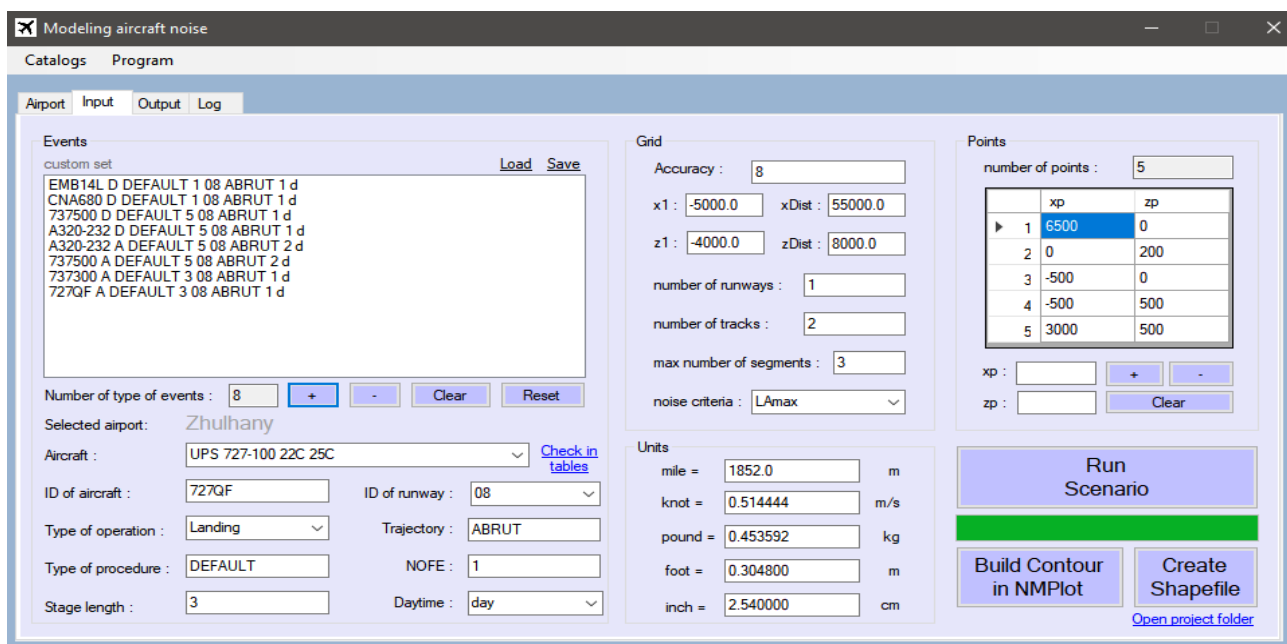


Рис. 5.50. Сценарій відправлення та прибуття літаків

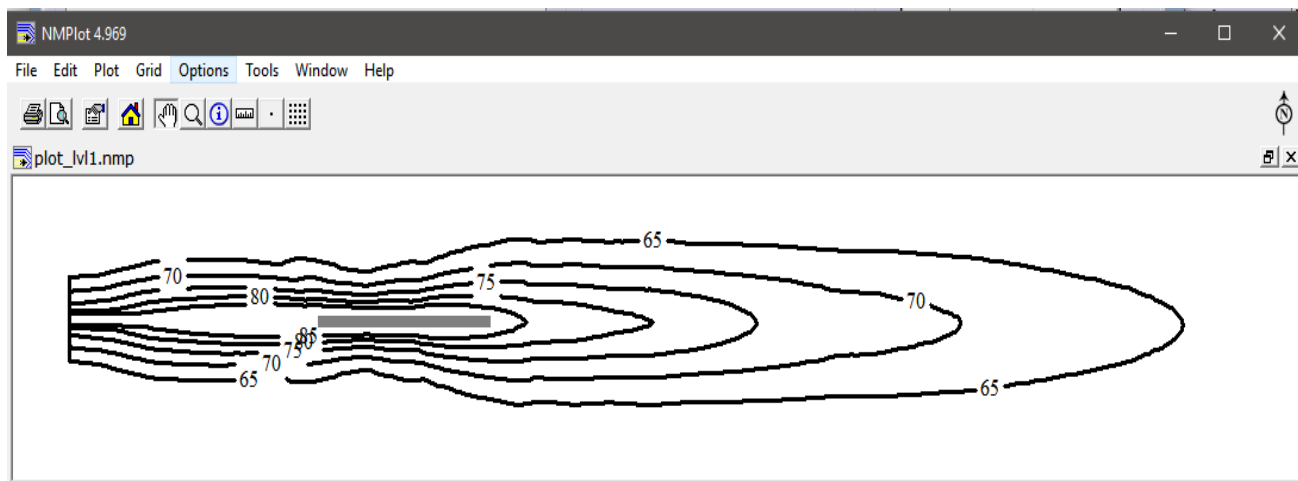


Рис. 5.51. Розраховані рівні шуму для спільного сценарію відправлення та прибуття

Порівняння значень рівнів шуму, отриманих натурними вимірюваннями та шляхом моделювання, показало в цілому адекватність математичної моделі, запропонованого методу та розрахованих значень рівнів шуму.

Результати моделювання та прогнозування можуть бути враховані для планування використання земельних ділянок навколо аеропортів з урахуванням

умов шумового забруднення, що є одним з найбільш значимих елементів збалансованого підходу ІСАО до проблеми регулювання шуму.

#### 5.4. Обґрунтування методології оцінки та регулювання ризику роздратування населення авіаційним шумом

Шумове забруднення навколо аеропортів визнано головною проблемою не тільки щодо впливу на навколишнє середовище, а й таке, що спричиняє істотний негативний вплив на громади, які проживають навколо аеропортів. Перевищення гранично допустимих значень рівнів шуму призводить до проблем зі здоров'ям та благополуччям людей. Це також впливає на зниження продуктивності праці, вартості майна, збільшення витрат на охорону здоров'я, експлуатаційних витрат в аеропортах, крім того це ще викликає і зростаюче занепокоєння серед населення. Підвищення гігієнічно значущих рівнів електромагнітних полів у зв'язку із збільшення енергоспоживання аеропортом також негативно впливає на населення, що мешкає поряд з аеропортом. Все це потребує розроблення комплексної системи заходів і засобів захисту населення і довкілля від впливу авіаційного шуму та електромагнітних полів.

У новому Керівництві Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) для Європейського регіону [313] експерти визначили як критичні наступні показники здоров'я, пов'язані з екологічним шумом: серцево-судинні захворювання, роздратування, порушення сну, когнітивні порушення (пам'ять, логіка, вирішення завдань), порушення слуху та шум у вусі. Серед цих показників (шумових ефектів) саме роздратування шумом визнається домінуючою суб'єктивною реакцією на шум [314]. Слід зазначити, що роздратування авіаційним шумом є постійно зростаючою проблемою, особливо в густонаселених районах, таких як міські мегаполіси. Це ускладнює збільшення авіаційного трафіка, побудову нових злітно-посадкових смуг, розвиток іншої інфраструктури аеропорту для збільшення його потужності.



Для відображення збільшеного роздратування, яке викликане звуковим втручанням вночі, був виведений денний-нічний рівень звуку. Вважається, що еквівалентний рівень шуму ( $L_N$ ) між 22.00 та 7.00 повинен бути збільшений на 10 дБ, перш ніж поєднуватись з еквівалентним рівнем шуму ( $L_D$ ) за період від 7.00 до 22.00, щоб отримати денний-нічний рівень [315]:

$$L_{dn} = 10 \lg \left[ \frac{1}{24} \left( 15 \cdot 10^{0,1L_D} + 9 \cdot 10^{0,1(L_N+10)} \right) \right].$$

У стандарті ISO 1996-1:2016 [315]  $L_d$  та  $L_n$  відносяться до вимірювання або розрахунку шуму на найбільш відкритому фасаді - на відкритому повітрі, що відображає довготривалий середній вплив. Таким чином,  $L_d$  і  $L_n$  репрезентують всі одиночні шумові події завдяки специфічному джерелу шуму, що відбуваються протягом більш тривалого періоду часу, наприклад, протягом року. У Керівництві ВООЗ для Європейського регіону рекомендовано для денного часу зменшити рівень шуму, вироблений літаком, нижче 45 дБ  $L_d$ , протягом нічного часу - нижче 40 дБ  $L_n$ . Такі значення вважаються безпечними для здоров'я. Рекомендації щодо шкідливого шуму для Європейського регіону ВООЗ спрямовані на вирішення двох основних питань, які висвітлюють проблеми:

- У загальній кількості людей, що піддаються впливу шуму на навколишнє середовище, який існує взаємозв'язок між експозицією та реакцією між впливом шумів на навколишнє середовище (представлено різними показниками) та часткою людей, які мають підтвержені показники результатів охорони здоров'я?

- Чи є ефективним втручання у зменшення впливу та/або наслідків шкідливого впливу на навколишнє середовище в загальній кількості населення, що піддається впливу шуму на навколишнє середовище?

Загальновідомо, що реакції роздратування жителів, які зазнали впливу шуму на навколишнє середовище, частково визначаються акустичними особливостями середовища, а частково специфікою саме як особистості жителів. Приблизно одна третина реакцій роздратування пояснюється акустичними

особливостями, друга і третя частини – неакустичними чинниками [316], для яких індивідуальні реакції на шум серед населення можуть значно змінюватися, але соціальний контекст також визнається важливим [317]. Термін «роздратування» використовується для опису негативних реакцій на шум, таких як порушення, подразнення, незадоволення та неприємності [316, 318]. Роздратування від будь-якого джерела означає погіршення стану добробуту, а шум часто називають стресором, який пов'язаний з різними реакціями особистості (рис. 5.52).

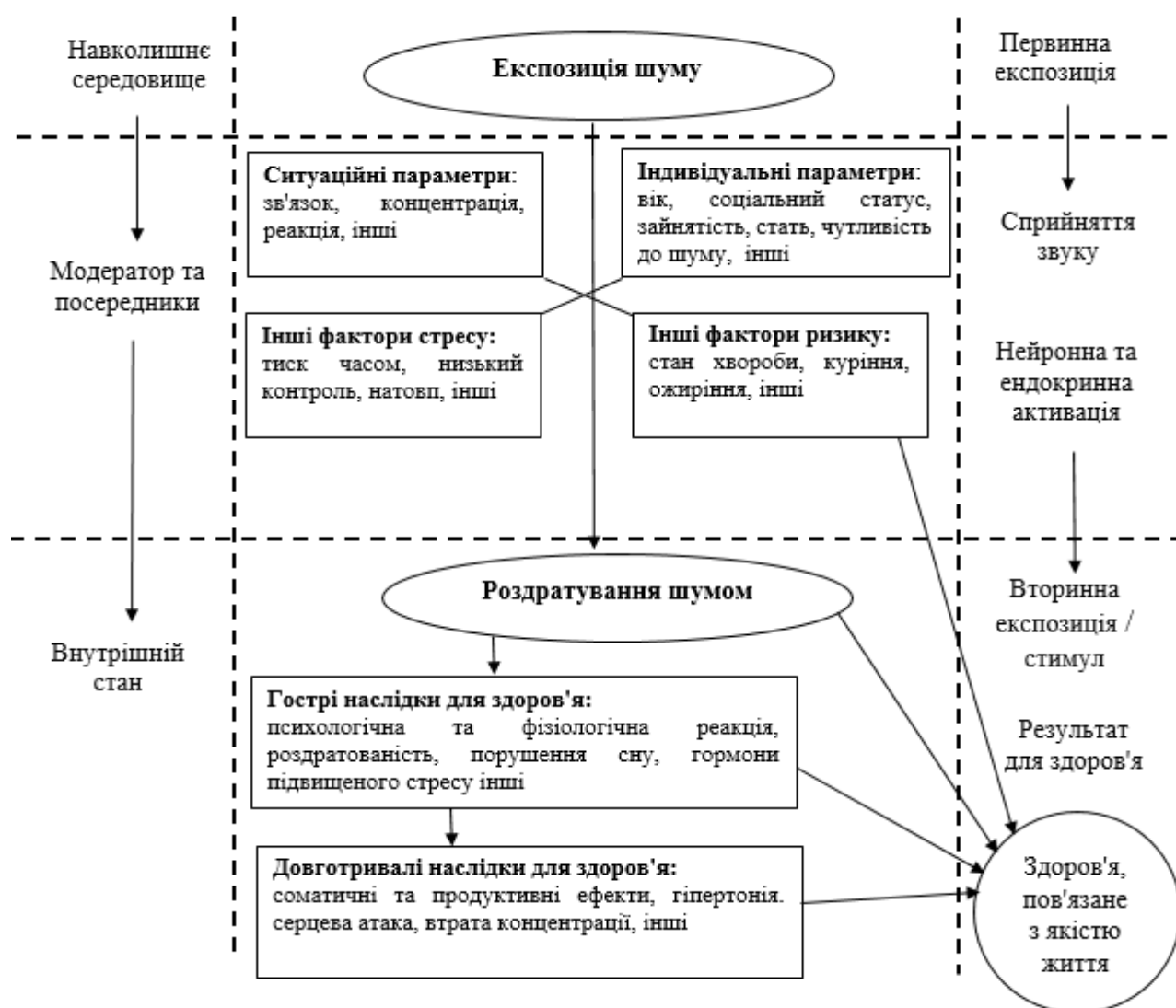


Рис. 5.52. Концептуальна модель не слухових ефектів шуму навколишнього середовища та роздратування шумом (наведено в [319])

На ступінь роздратування шумом також впливають численні неакустичні чинники, такі як особисті, відносні та ситуаційні фактори, крім кількості шуму

як такого [320]. У цьому контексті основна увага приділяється сучасним дослідженням щодо шуму, який викликає роздратованість, а саме - як на них впливають неакустичні, а також акустичні входні змінні. Перелік неакустичних чинників є неоднозначним. Так група експертів ВООЗ [313] визначила наступні чинники: стать, вік, освіта, суб'єктивна чутливість шуму, екстраверсія / інтроверсія, загальний показник стресу, спільна захворюваність, тривалість проживання, тривалість перебування в житлі в день, орієнтація вікна спальні або вітальні на вулицю, персональна оцінка джерела, ставлення до джерела шуму, здатність до справності по відношенню до шуму, сприйняття зловмисників відповідними органами влади, індекс маси тіла, куріння.

Вейдер у роботі [321] склав масив з 31 неакустичного чинника і класифікував кожний з них за двома вимірами: його вплив на роздратування (сильний, проміжний, слабкий - також показаний у табл. 5.1) та можливість їх модифікації.

Таблиця 5.1

## Акустичні і неакустичні чинники роздратування шумом

Акустичні чинники	Неакустичні чинники	Змінна	Взаємозалежність і кореляція
<i>Рівень звуку:</i> визначений для рівня експозиції шуму	<i>Чутливість до шуму:</i> загально визнано, що існують індивідуальні відмінності в чутливості до шуму [55.5].	Експозиція шуму $L_{DEN}$	Сильна 0.02
<i>Частота:</i> остаточний для сприйняття внеску у експозицію шуму	<i>Страх від джерела шуму:</i> взаємозалежність з іншими небезпечними факторами для навколишнього середовища, наприклад, ризик третьої сторони і забруднення повітря навколо аеропортів	Стурбованість негативними наслідками для здоров'я від шуму та забруднення	Сильна -1.15
<i>Тривалість:</i> певний внесок у сприйняття шуму	<i>Особисті вигоди та витрати на операції в аеропортах:</i> зайнятість в аеропорту або промисловості; компенсації та власність на житло можна визначити об'єктивно, але ці фактори можуть мати психологічний ефект	Позитивна соціальна оцінка джерела шуму	Сильна -0.05... -0.40

<p><i>Кількість шумових подій:</i> кількість польотів за період спостереження</p>	<p><i>Ставлення до адміністрації як джерела шуму:</i> усвідомлення будь-яких переваг - економічних та соціальних - від зобов'язань, що створюють шум, таких як аеропорт, усвідомлення витрат на програму контролю шуму, побоювання авіакатастроф тощо;</p>	<p>Негативне ставлення до адміністрації як джерела шуму та до шумової політики</p>	<p>Сильна  0.11 ... -0.22</p>
<p><i>Спектральний склад:</i> визначений внесок у сприйняття впливу шуму, включаючи вплив тональних компонентів в спектрі, імпульсний шум (зі специфічною частотною складовою) тощо.</p>	<p><i>Передбачуваність, яка сприймається:</i> це стосується ймовірності прогнозування рівня шуму, яка сприймається, що збільшується від авіаційного шуму</p>	<p>Порушення, яке сприймається</p>	<p>Сильна  0.56</p>
<p><i>Флуктуація амплітуди:</i> регулярні та / або нерегулярні амплітудні коливання, більш доречні для дорожніх шумів</p>	<p><i>Поінформованість про проблеми з джерелами без шуму:</i> взаємозалежність з іншими небезпечними факторами, такими як ризик третьої сторони та забруднення повітря навколо аеропортів</p>	<p>Стурбованість негативними наслідками для здоров'я від шуму та забруднення</p>	<p>Сильна  0.59</p>
<p><i>Сезонні та метеорологічні умови:</i> довготривале роздратування є незначним, але статистично значно вище влітку, ніж взимку; відмінності існують в кліматі в різних місцях</p>	<p><i>Сприймається контроль і подолання труднощів:</i> або особою в безпосередній близькості від аеропорту або адміністрацією аеропорту</p>	<p>Контроль, який сприймається, та здатність справлятися</p>	<p>Сильна  -0.51</p>
<p><i>Рівень фонового шуму:</i> доповнюють зміну шумового</p>	<p><i>Очікування та передбачуваність:</i> це стосується ймовірності поточного рівня шуму авіаційного шуму, який сприймається, та є важливим для</p>	<p>Негативні очікування, пов'язані з розвитком</p>	<p>Помірна 0.26... -0.42</p>

середовища	випадку щоб захисти - бути менш вразливим, а також, чи є інформація, яка використовується для прийняття рішення, точною та актуальною	шуму	
<i>Маршрут польоту:</i> предиктор для події шуму	<i>Недоторканність, довіра та визнання:</i> останні стосуються визнання того, що впливи визнаються місцевими та органами аеропорту, а також чи є інформація, надана про процес та рішення ясною та доречною, та чи є органи є вільними від упереджень та чи довіряють люди їх мотивам		Сильна
<i>Зміни в навколишньому середовищі шуму:</i> комплементарний рівень фонового шуму	<i>Шумоізоляція / компенсація:</i> шумова ізоляція та / або схеми покриття вартості проживання	Віра у те, що шуму можна запобігти	Сильна 0.03... 0.24
	<i>Рівень фонового шуму:</i> сільські місцевості з низьким фоновим шумом вважаються більш вразливими умовами для повітряних шумів		Помірна
	<i>Голос:</i> це стосується того, як люди можуть розмовляти з органами влади і бути почутими, або іншими словами, чи є можливості брати участь у процесі прийняття рішень або принаймні, чи враховуються думки всіх залучених сторін		Сильна
	<i>Доступність інформації:</i> це може розглядатися як засіб впливу на загальне ставлення, але це також може вплинути на ступінь, до якого органи влади сприймають інтерес до спільноти, що піддається шуму		<i>Помірна</i>
	<i>Домоволодіння:</i> власники житла можуть бути стурбовані впливами на вартість їх майна	Турбота про девальвацію власності	Помірна 0.08 -0.15

Слід зазначити, що час доби відіграє домінуючу роль, коли люди вказують на їхнє шумове роздратування [322]. При однакових рівнях шуму (звуковий

еквівалент або рівні експозиції або шумові індекси) спостерігається різниця у роздратуванні між денною та нічною реакцією людей. Нічне роздратування перевищує денне роздратування. Такий ефект спостерігається для шуму повітряних суден у будь-якому випадку, а у випадку шумів дорожнього руху відсутній. Навпаки, для залізничного сполучення, людину менш дратує шум у нічний час, ніж протягом дня. Швейцарське дослідження шуму [322] показало, що люди відчують сильний розлад, особливо вранці, близько полудня та увечері. Тоді було запропоновано розділити 24 години на три сегменти (день, вечір та ніч), а не два, а ввечері (4 години з 19:00 до 23:00 зазвичай).

Крім того, протягом багатьох років було зроблено багато спроб встановити відсоток жителів, які сильно роздратовані авіаційним шумом (%НА – «highly annoyed») до добового еквівалентного рівня шуму  $L_{DEN}$  [323, 324]. В роботі [325] запропоновано наступне рівняння регресії:

$$\%НА = -50.9693 + 1.0168 \times L_{den} + 0.0072 \times L_{den}.$$

В таблиці 5.2 наведено співвідношення між добовим еквівалентним рівнем шуму літака ( $L_{den}$ ) та роздратуванням (%НА) [313].

Таблиця 5.2

Співвідношення між впливом добового еквівалентного рівня шуму ( $L_{den}$ ) та роздратуванням (%НА)

$L_{den}$ (дБ)	%НА
40	1,2
45	9,4
50	17,9
55	26,7
60	36,0
65	45,5
70	55,5

Відсоток населення, у якого сильно порушений сон вночі HSD (percentage of the population “highly sleep-disturbed”, до нічного еквівалентного рівня шуму  $L_{night}$  розраховується наступним чином [313]:

$$\%HSD = 16,79 - 0,9293 \times L_{night} + 0,0198 \times L_{night}.$$

Співвідношення між впливом нічного еквівалентного рівня шуму ( $L_{\text{night}}$ ) та порушенням сну (%HSD) наведено в таблиці 5.3 [313].

Таблиця 5.3

Співвідношення між впливом нічного еквівалентного рівня шуму ( $L_{\text{night}}$ ) та порушенням сну (% HSD)

$L_{\text{night}}$	%HSD
40	11,3
45	15,0
50	19,7
55	25,5
60	32,3
65	40,0

Експозиція охоплює ряд акустичних чинників, які, в першу чергу, стосуються максимальних рівнів експозиції звуку, кількості рейсів протягом періоду спостереження, як правило, протягом дня. Можна припустити, що ризик для людей, що живуть в аеропорту, дуже дратує шум повітряного судна, визначається денним нічним еквівалентним рівнем шуму  $L_{\text{DN}}$  або  $L_{\text{DEN}}$ . Це потребує керування роздратуванням таких мешканців з боку адміністрації аеропорту, інакше майбутні плани щодо розвитку або модернізації самого аеропорту будуть негативно сприйматися населенням. Оскільки за рекомендаціями ВООЗ два параметри - несприйняття шуму та порушення сну від ПС оцінюються для обґрунтування зонування шуму та планування землекористування навколо аеропортів, використовуючи критичні межі, гранично допустимі значення рівнів шуму [326], тому необхідно постійно контролювати вплив шуму на повітряний простір у звичайному режимі функціонування аеропорту. Постраждалі від позитивних або негативних змін шумового впливу повинні бути добре інформовані і залучені до процесу прийняття рішень, щоб максимізувати потенційні вигоди для здоров'я. Саме тому четвертий принцип Керівництва ВООЗ для Європейського регіону є інформування та залучення громад, на які може вплинути зміна експозиції шуму. Такий підхід є ключем до суспільної прийнятності та залучення громад до успішного керівництва процесом прийняття рішень.

В роботі [327] Дейвідсон запропонував так зване «Колесо участі», в якому наведено методи залучення громади:

- Інформація: надавати громадськості чітку та об'єктивну інформацію, яка може допомогти їм зрозуміти можливості, проблеми, альтернативи та / або рішення. Такий процес спілкування є однонаправленим і може здійснюватися через інформаційні бюлетені, веб-сайти, буклети тощо.

- Консультації: отримання зворотного зв'язку від населення щодо інформації, яку вони отримали, шляхом обстеження, проведення інтерв'ю один на один, панелі і т.д.

- Участь: на відміну від консультації, це процес, який прагне: (а) залучення (знати і розуміти занепокоєння і прагнення громади до прийняття рішень, тому відповідь громади враховується під час прийняття рішень); (б) співпраці: процес прийняття рішень із залученням громади, в якому рішення є загальними і узгодженими.

- Повноваження: прийняття рішень залишається в руках громади. Це ще один інструмент управління шумом.

В роботі [328] наведено сучасні неакустичні заходи щодо реагування громадськості на шум навколо аеропорту, які є двостороннім комунікаційним підходом. Такий підхід забезпечує реагування на скарги жителів, довіру громади, можливість задовольняти її очікування та дозволяє будувати довготривалі партнерські відносини. До таких заходів належать: громадські слухання; робочі сесії; консультативні комітети / круглі столи; віртуальні зустрічі та вебінари; інтернет-системи webtrack з інформацією про шум в реальному часі; веб-сайти; моделювання рівнів шуму та їх візуалізація з урахуванням сценаріїв функціонування та розташування злітно-посадкової смуги, кількості злетів/ посадок протягом періоду, типів ПС; соціальні мережі та соціальні групи, мікроблоги, форуми, тимчасові проектні офіси, гарячі лінії.

Таким чином, для зменшення негативного впливу авіаційного шуму на навколишнє середовище окрім акустичних чинників необхідно враховувати неакустичні чинники, які спричиняють суспільне несприйняття через брак



інформації, непрозорість щодо реалізації майбутніх планів розвитку аеропорту. Для управління роздратуванням жителів, які мешкають навколо аеропорту, необхідно встановити зв'язки з місцевими громадами, залучати їх у процес обговорення та сприйняття нових рішень щодо функціонування аеропорту. Такий двосторонній підхід дозволить унеможливити протистояння аеропорту з боку громад при зростанні повітряного руху або експлуатаційних можливостей аеропорту.

#### 5.5. Ризик орієнтований підхід до оцінювання впливу шуму повітряного судна поблизу аеропорту

Уточнена модель оцінювання авіаційного шуму, наведена у розділі 3, дозволяє у кожній конкретній точці отримати рівні шуму, які візуалізуються у вигляді контурів добового шуму з урахуванням сценарних подій відправлення/приземлення різних типів повітряних суден та особливостей конкретного аеропорту протягом доби. Таким чином, ми обчислюємо експозицією шуму і маємо можливість нею управляти/регулювати.

Аналіз складових збалансованого підходу показує, що він має дві складові - стратегічне регулювання та оперативне регулювання. До стратегічної складової належать наступні пункти збалансованого підходу: 1). зниження шуму у джерелі та 3). експлуатаційні процедури по зниженню шуму. Ці пункти базуються виключно на національних нормативних документах, а саме, вимоги до нормативу у самому джерелі (пункт 1) та вимоги до акустичної обстановки (норми для жителів), пункт 3. Такі державні нормативні документи застосовуються до розміщення аеропорту з урахуванням характеристик повітряних суден та характеристик навколишнього середовища. Однак при експлуатації аеропорту оперативне регулювання проводиться двома іншими пунктами збалансованого підходу - 2). планування (зонування) та управління землекористуванням та 4). обмеження експлуатації ПС.

Крім того, ІСАО, зберігаючи свою ключову функцію, прагне до обмеження або зменшення кількості людей, які постраждали від значного впливу повітряного шуму. Тому постає питання як окрім регулювання експозицією регулювати реакцією населення на шум. Відповідно до досліджень ВООЗ на останні 15 років виявився парадоксальний факт – на сьогодні при досягненні більш низьких рівнів шуму у порівнянні з раніше більш високими рівнями шуму кількість роздратованого населення не зменшилася.

Для цього необхідно перейти до оцінювання ризику захворювань через поняття «вразливість» населення. Вразливість визначається фізичними, соціальними, економічними та екологічними чинниками (або просто умовами чи процесами), які підвищують сприйнятливість спільноти до впливу небезпек. Вразливість може бути класифікована як показано в табл. 5.4 [329].

Таблиця 5.4

## Загальна класифікація вразливості населення

	Соціальний чинник	Фізичний чинник	Економічний чинник	Культурний, екологічний чинники
Прямі збитки	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Смертельні випадки</li> <li>- Травми</li> <li>- Втрата доходу або зайнятості</li> <li>- Безпритульність</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Структурні пошкодження або обвалення будівель</li> <li>- Неструктурні пошкодження та пошкодження вмісту</li> <li>- Структурна інфраструктура збитку</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Переривання бізнесу через пошкодження будівель та інфраструктури</li> <li>- Втрата продуктивної робочої сили через смертельні події, травми та зусилля з надання допомоги</li> <li>- Капітальні затрати на допомогу</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Седиментація</li> <li>- Забруднення</li> <li>- Вимираючі види</li> <li>- Знищення екологічних зон</li> <li>- Знищення культурної спадщини</li> </ul>
Непрямі збитки	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Хвороби</li> <li>- Постійна інвалідність</li> <li>- Психологічний вплив</li> <li>- Втрата соціальної згуртованості в зв'язку з порушенням спільноти</li> <li>- Політична</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Поступове погіршення пошкоджених будівель та інфраструктури, які не ремонтуються</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Економічні втрати внаслідок короткотермінового зриву діяльності</li> <li>- Довгострокові економічні збитки</li> <li>- Страхові збитки, що послаблюють страховий ринок</li> <li>- Менше інвестицій</li> <li>- Капітальні витрати</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Втрата біорізноманіття</li> <li>- Втрата культурного різноманіття</li> </ul>

	нестабільність		на ремонт - Скорочення туризму	
--	----------------	--	--------------------------------------	--

Оцінка ризику пов'язана з визначенням тих чинників, які особливо небезпечні, та визначенням вірогідності неприпустимого шкідливого впливу. Серед уразливих груп населення, що піддаються ризику впливу шуму, є ряд акустичних чинників (склад парку літаків, їх розподіл за заданим періодом спостереження) та неакустичні чинники (особиста шумова чутливість, відношення до джерела шуму, дії, що виконуються на даний момент і т. д.).

Ризик визначається як ймовірність шкідливих наслідків або очікуваних втрат (смертей, травм, майна, коштів для існування, руйнування економічної діяльності або пошкодження навколишнього середовища) в результаті взаємодії між природними або антропогенними небезпеками і уразливими умовами [330].

**R** (Ризик) може бути представлений концептуально щодо **H** (небезпеки), **V** (вразливості) і **A** (кількості елементів, що піддаються ризику, з наступним основним рівнянням:  $R = H * V * A_{\text{elements-at-risk}}$ .

Або беручи до уваги **C** (Здатність) (протилежна характеристика уразливості), щоб впоратися з наслідками небезпеки [331]:

$$R = H * V / C.$$

Математично ризик (**R**) пропорційний виміру ймовірності події (**P**) (частота, ймовірність) і наслідкам події (**I**) (втрати, збитки) [332, 333.]:

$$R = P * I.$$

Для індивідуального ризику це основна умова, яка може бути виражена формулою [334]:  $R = P_f * P_{df}$ ,

де  $P_f$  - ймовірність шкідливої події (наприклад, авіаційна аварія);

$P_{df}$  - ймовірність наслідків (ефекту або збитку), особливо смертельних наслідків, викликаних фізичними особами за відсутності захисту від (або опору) небезпеки.

В більш загальному вигляді вірогідність аварії  $P_f$  може бути розділена на вірогідність сценарію  $p_{Sc}$  і вірогідність впливу на безпеку  $p_{Ex}$ :

$$P_f = p_{Sc} p_{Ex}.$$

Ефекти зазвичай описуються з точки зору пошкоджень типу  $k$  (наприклад, летальність, травма, фізичний збиток, втрата навколишнього середовища, втрата доходу і т. д., залежно від того, які елементи піддаються ризику) та їх уразливість (наприклад, уразливість людини може бути визначена як смертність):

$$P_{d/f} = k * v_k$$

Оцінка ризиків повинна бути використана в рамках їх регулювання. Для вивчення наслідків небезпек існують важливі чинники вразливості - фізичні, соціальні, економічні та екологічні умови та процеси, які, як правило, збільшують шкоду від впливу небезпек на людину або суспільство в цілому. Необхідний потенціал покриття - це можливості людини, системи, суспільства, природи протистояти наслідкам небезпек і загроз, тобто є необхідні ресурси, які можуть знизити негативні наслідки.

#### 5.5.1 Програма зниження кількості роздратованого населення від впливу авіаційного шуму

Моделювання шуму в аеропорту є засобом оцінки експозиції шуму аеропорту на навколишнє середовище та населення, а також дозволяє оцінити як у майбутньому буде розвиватися експозиція шуму аеропорту в результаті зростання інтенсивності польотів та прогнозу еволюції парку літаків з урахуванням цілей планування землекористування [336]. Європейському агентству з авіаційної безпеки (European Aviation Safety Agency - EASA) доручено сертифікувати ПС, перевіряти їх придатність до польотів, дотримання екологічних стандартів та публікувати в режимі online надійні достовірні дані про парк літаків, що експлуатуються в Європі, з урахуванням ПС з найбільшим внеском в експозицію шуму [337]. Це дозволяє поліпшити результати порівняння між змодельованими та вимірними рівнями шуму. Системи інструментального моніторингу шуму в аеропортах вимірюють експозицію шуму в окремих точках аеропорту, а системи інформаційного моніторингу шуму дозволяють моделювати і отримувати контури шуму саме на тій території, яка

цього потребує. Моделювання шуму дозволяє розрахувати контури шуму і відповідно визначити зони, в яких шум перевищує певний пороговий рівень. Це дозволяє оцінити кількість людей, що знаходяться в межах контуру, а також кількість населення, що потерпає від впливу шуму.

Задача зонування території навколо аеропорту в Україні регулюється наступними нормативними документами: ДСТУ ISO 9612:2008 Акустика. Настанови щодо вимірювання та оцінювання експозиції шуму у виробничому середовищі [338], Авіаційні правила України «Вимоги до експлуатанта аеродрому щодо просторового зонування території навколо аеродрому з умов впливу авіаційного шуму» [339], наказ Міністерства охорони здоров'я України «Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови» [340]. ДСТУ ISO 9612:2008 відповідає міжнародному стандарту ISO 9612:1997 і містить оцінювання еквівалентного рівня шуму  $L_{Aeq}$ . В Авіаційних правилах України в якості показників просторового зонування території навколо аеропорту визначено еквівалентний рівень шуму  $L_{Aeq}$  та максимальний рівень шуму  $L_{Amax}$ . Однак не наведено таблиці з конкретними допустимими значеннями еквівалентного та максимального рівнів шуму, а є тільки посилання на Державні будівельні та санітарні норми, крім того залишається  $L_{Amax}$ , чого немає в документах ІКАО та директивах ЄС. При цьому пропонується застосування комбінованого добового еквівалентного рівня шуму  $L_{dn}$  з коригуванням на день (07:00- 23:00) і ніч (23:00-07:00) або  $L_{den}$  з коригуванням на день (07:00-19:00), вечір (19:00-23:00), ніч (23:00-07:00). Але для визначення межі зони впливу авіаційного шуму при застосуванні збалансованого підходу до управління шумом комбінований добовий еквівалентний рівень шуму  $L_{den}$  використовується одночасно з нормативними критеріями  $L_{Aeq}$  та  $L_{Amax}$ . З одного боку світова практика свідчить, що для оцінки шуму та вирішення задач зонування достатньо використовувати добовий критерій шуму, а саме, ІКАО рекомендує  $L_{dn}$ , а  $L_{den}$  відповідає вимогам Директиви Євросоюзу № 2002-49, що є позитивним моментом. З іншого боку документ не містить формули розрахунку  $L_{Aeq}$ , а тільки

для  $L_{Amax}$ , не наведено таблиці нормативних значень  $L_{dn}$  та  $L_{den}$ , для яких треба показувати контури шуму (на території житлової забудови  $L_{Aeq}$  запропоновано обмеження вдень – до 65 дБА, вночі – 55 дБА, а для  $L_{den}$  нічого не визначено) з урахуванням зон житлової забудови А, Б, В, Г. Тобто не зрозуміло як будувати контури.

Між тим має місце неузгодженість з наказом Міністерства охорони здоров'я України №463 від 22.02.2019 р., в якому визначається поділ доби на періоди – день 08:00-22:00 та ніч 22:00-08:00, встановлено у житлових приміщеннях обмеження допустимого рівня шуму вдень 40 дБА / вночі 30 дБА, а максимального рівня шуму вдень 55 дБА / вночі 45 дБА. В цьому наказі також відсутні вимоги до визнаних міжнародними документами критеріїв  $L_{dn}$  та  $L_{den}$ .

Слід окремо зазначити, що в Україні не проводилися дослідження для визначення нормативних значень  $L_{Aeq}$  та  $L_{Amax}$  для денного і нічного періодів доби, ці значення просто переписані з аналогічних документів СРСР та РФ. Ще однією проблемою є той факт, що в Україні немає жодного закону чи нормативного документу, в якому був би реалізований ризик-орієнтований підхід у сферах охорони здоров'я, охорони навколишнього середовища, хоча в Європі визначено в нормативних документах ризику для побутових та виробничих умов. Між тим в Україні діє національний стандарт ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику» [341], який відповідає міжнародному стандарту ІЕС/ISO 31010:2009, IDT.

Тому для реалізації ризик-орієнтованого підходу як доповнення до збалансованого підходу управління авіаційним шумом окрім оцінки добового індексу шуму необхідно оцінити ризику щодо негативного впливу шуму та запропонувати обчислення експозиції шуму з урахуванням можливості обчислення ризику для населення раптового пробудження (sleep disturbance) від події авіаційного шуму, бути роздратованим від авіаційного шуму (aircraft noise annoyance) або іншого виду несприятливого впливу [343]. Це дозволить не тільки удосконалити метод розрахунку рівнів звуку АШ, а й підвищить точність методу, забезпечить максимально точну оцінку експозиції, можливість

управляти чинниками роздратування населення з метою зменшення кількості роздратованих людей.

Загальний алгоритм оцінки ризику для здоров'я населення складається з наступних кроків:

- виявлення небезпек;
- оцінка залежностей «вплив-відповідь» («доза-ефект»);
- оцінка впливу;
- характеристика ризику;
- невизначеність оцінки;
- підготовка даних для врахування ризиків, у тому числі особами, що

приймають рішення.

Загальна класифікація вразливості населення наведена в таблиці 5.4.

Індивідуальний ризик визначається формулою [334, 335]:

$$R = P_f * P_{d/f} = p_{Sc} p_{Ex} k v_k, \quad (5.1)$$

де  $v_k$  – оцінка вразливості  $k$ -го типу пошкодження в результаті експозиції шуму.

Для авіаційного шуму будь-який політ призводить до сценарію експозиції шуму, тому вірогідність сценарію такої події  $p_{Sc}=1$ . Вірогідність виникнення небезпеки внаслідок цього сценарію  $p_{Ex}$  залежить від конкретного розташування точки спостереження відносно траєкторії польоту. Якщо  $k$  відповідає ефекту роздратування від шуму, то ймовірність несприятливих наслідків  $P_{d/f}$  в такому випадку пропонується представити як залежність відсотка роздратованого шумом населення  $HA\%$  від експозиції шуму. В даний час добовий еквівалентний індекс шуму  $L_{DN}$  (або його аналог  $L_{DEN}$ ) використовується як його метрика, оскільки вона найкраще корелюється роздратуванням населення, що мешкає під впливом шуму навколо аеропортів. На рис. 5.53 наведена крива співвідношення «доза-ефект», запропонована Шульцем [343].

Крива «доза-ефект» для екологічного шуму використовує нормалізоване значення  $L_{DN}$  – воно є базовим значенням, яке визначене з рядом коригувань, доданих до вимірних значень (розкидані точки навколо нормалізованої кривої в

межах 90-% довірчого інтервалу розташовуються в межах зміни відсотка роздратованого шумом населення  $HA\%$  на 20-30%) в конкретному дослідженні для обліку конкретних характеристик і факторів звуку – таблиця 5.5.

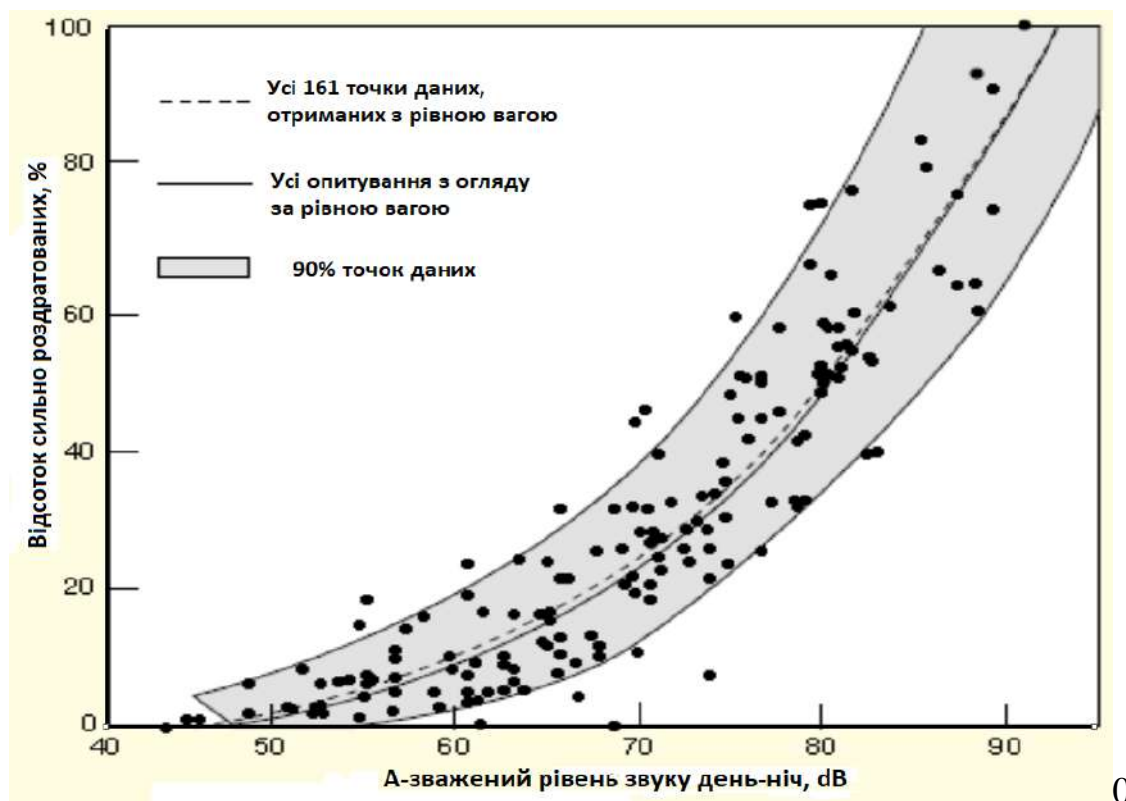


Рис. 5.53. Крива «доза-ефект» для екологічного шуму – частка сильно роздратованих людей від впливу добової експозиції шуму

Таблиця 5.5

Коригування, рекомендовані Агенством з охорони навколишнього середовища США (ЕРА)

Тип коригування	Опис умови	Коригування для додавання до виміряного $L_{DN}$ , дБА
<i>Сезонні умови</i>	Літо (або протягом року операція) Тільки взимку (або вікна завжди закриті)	0 -5
<i>Коригування для зовнішнього фоновому шуму, виміряного за відсутності шуму, (зміна шумового)</i>	<i>Тиха приміська або сільська громада</i> (віддалена від великих міст і від промислової діяльності та автоперевезень) <i>Звичайна приміська громада</i> (не розташована поблизу промислової діяльності) <i>Міська житлова громада</i> (не безпосередньо примикає до доріг з великою кількістю	+10 +5 0



<i>середовища</i> )	подорожей або промислових районів)	
	<i>Гучна</i> міська громада (поблизу відносно зайнятих доріг або промислових районів) <i>Дуже гучна</i> міська громада	-5 -10
Коригування попереднього впливу (зміна шуму у довкіллі) і суспільних відносин	Спільнота <i>не має попереднього досвіду</i> втручання шуму.	+5
	Спільнота мала <i>деякі попередні впливи</i> на вторгнення шум, але мало зусиль робиться для контролю шуму. Таке коригування може також застосовуватися в ситуації, коли громада раніше не була піддана впливу шуму, але люди усвідомлюють, що великі зусилля спрямовані на боротьбу з шумом.	0
	Спільнота мала <i>значні попередні впливи</i> на втручання, і відносини голосуючих з громадою є добрими.	-5
	Спільнота усвідомлює, що <i>операція, яка створює шум, дуже необхідна і не буде тривати безмежно</i> . Це коригування може застосовуватися для операції обмеженої тривалості та за надзвичайних обставин.	-10
Чистий тон або імпульсивний звук	<i>Немає чистого тону</i> або імпульсивного характеру	0
	<i>Чистий тон</i> або імпульсивний характер присутній	+5

Miedema Н.М. в роботі [344] показав, що ряд відхилень результатів натурних досліджень Шульца [343] від нормалізованої кривої роздратування може інтерпретуватися як вразливість населення на джерело шуму довкілля. На рис. 5.54 показані криві роздратування населення від авіаційного, дорожнього та залізничного шуму [343] у порівнянні з нормалізованою кривою стандарту ISO 1996-1 (це фактично нормалізована крива Шульца).

Таку зміну вразливості експонованого шумом населення стосовно джерела шуму пропонується включати у формі коригування  $\Delta L_s$  до визначення роздратування за стандартом [345] у наступній формі:

$$L_{DN \text{ norm}} = L_{DN \text{ cal/meas}} + \Delta L_s.$$

Це означає, що при умові визначеного індексу шуму, наприклад  $L_{DN \text{ cal/meas}}$  60 дБА (нормалізований відсоток роздратування населення близько 10%), для експозиції авіаційним шумом слід додати зсув (коригування)  $\Delta L_s = 5$  дБА і визначити відсоток роздратованого шумом населення величиною біля 17%.

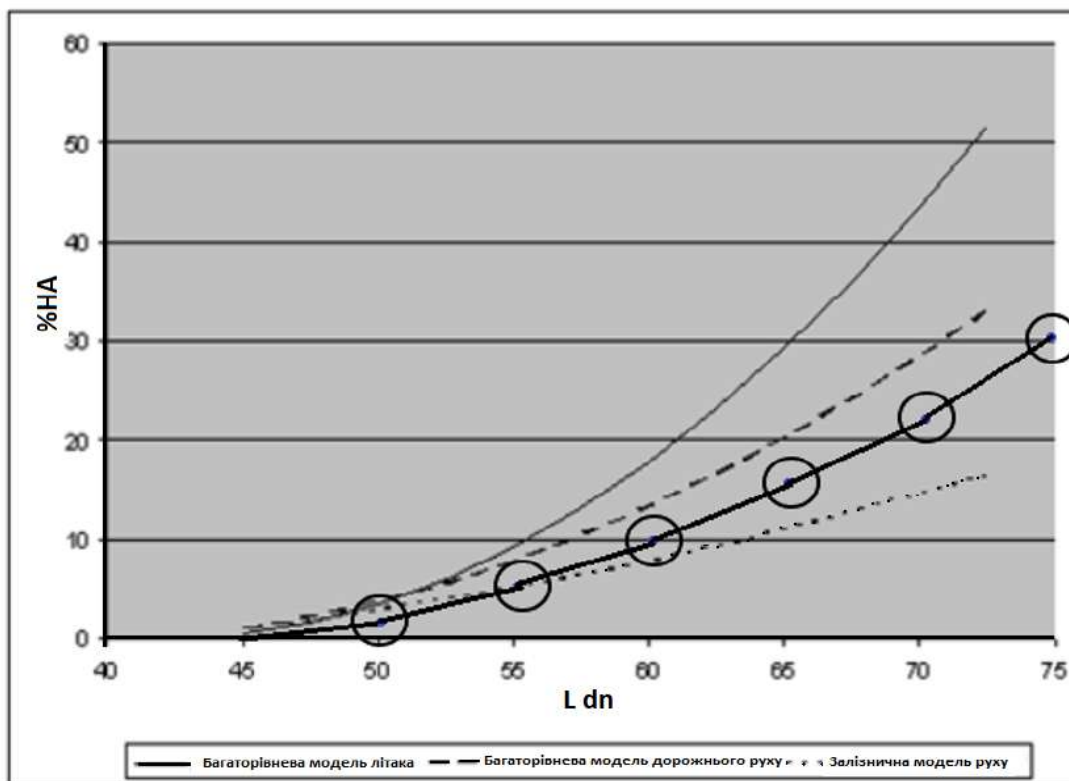


Рис. 5.54. Крива роздратування населення від транспортного (авіаційного, дорожнього та залізничного) шуму у порівнянні з нормалізованою кривою стандарту ISO 1996-1

Сьогодні коригування на вразливість населення до джерела шуму  $\Delta L_s$  є найвищим для шуму від вітрових турбін (вітрових електростанцій), оскільки найвищим є чинник очікування серед населення у відносно тихому приміському або сільському населеному пункті (див. в табл. 5.5 коригування для зовнішнього фонового шуму або зміни шумового середовища), де зазвичай встановлюються вітрові електростанції. Такий чинник очікування вводиться для оцінки впливу на уразливість населення через величину максимальної реакції на шум і коефіцієнт очікування  $F_{ex}$  (рис. 5.55) [346]:

$$\Delta L_{si} = \Delta L_{simax} F_{ex},$$

де  $i$  – вид чинника вразливості,  $\Delta L_{simax}$  – максимально можливе значення зсуву вразливості для чинника  $i$ .

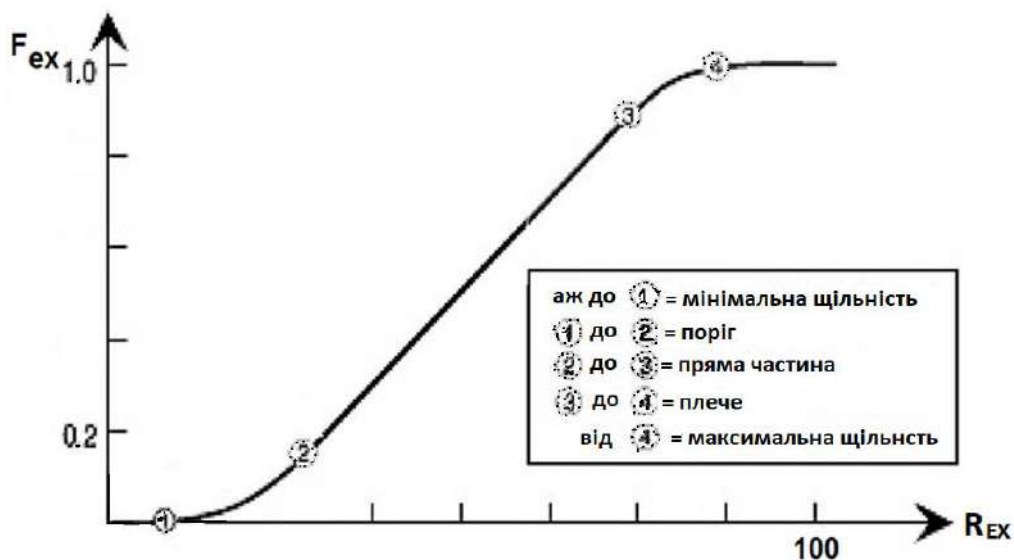


Рис. 5.55. Чинник очікування (коефіцієнт очікування)  $F_{ex}=[0,1]$  в залежності від рівня (величини, розміру, міри, розмаху) очікування  $R_{ex} = [0,100\%]$ : будь-яке відхилення від очікуваного рівня в напрямку зростання викликає зростання  $F_{ex}$

В такій інтерпретації коригування, рекомендовані ЕРА (табл. 5.5), також для конкретних умов шумової експозиції населення слід розглядати як чинники вразливості населення на експозицію шумом з урахуванням їх очікування на конкретні умови. Наприклад, для чинника впливу зовнішнього фонового шуму або зміни шумового середовища коригування умов міського житлового середовища  $\Delta L_{smax} = 0$ , для *тихої* приміської або сільської забудови  $\Delta L_{smax} = 10$ , а для *дуже гучної* міської забудови  $\Delta L_{smax} = -10$  дБА і в обох випадках коефіцієнт очікування  $F_{ex} = 1$ . А для *звичайної* приміської забудови, що не розташована поблизу території промислової діяльності (індустріальної зони), коефіцієнт очікування  $F_{ex} = 0,5$ .

При одночасній наявності кількох чинників впливу на вразливість населення до експозиції шуму процедуру коригування (або приведення до нормалізованого) індексу шуму треба провести з урахуванням усіх поправок – сумарної поправки  $\Delta L_{si}$  доданої до виміряного або прогнозованого індексу шуму  $L_{DN}$ :

$$L_{DN\ norm} = L_{DN\ cal/meas} + \Delta L_{s\Sigma}$$

По значенню  $L_{DN\ norm}$  знаходимо на графіку на рис. 5.2 відповідне значення відсотка населення роздратованого шумом % НА. Сумарний зсув вразливості  $\Delta L_{s\Sigma}$  може включати адитивно або лог-адитивно ряд чинників, що впливають на вразливість населення до експозиції шуму випадку, що розглядається. Перелік акустичних та неакустичних чинників наведений в табл. 5.1.

### 5.5.2. Копінгова спроможність для управління роздратуванням населення від авіаційного шуму

Запропоновано розширити поняття вразливості населення до експозиції шуму з урахуванням *копінгової* спроможності даного населення (системи, що розглядається), як це розглядається [347], рис. 5.5б, і враховує багатофункціональну залежність між ризиком, вразливістю та спроможністю людини попереджувати наслідки.

*Копінгова* спроможність – це здатність людини долати труднощі, в психологічній літературі її означено терміном “*копінг*” (від англійського слова “*cope*” – перебороти, впоратися, подолати). Істотним доповненням когнітивної теорії Лазаруса [348] стала поведінкова концепція С. Хобфолла, який вважає, що стресогенними у житті є не самі події, а пов'язана з ними втрата (статусу, влади, грошей, звичних речей, самоповаги). Основним поняттям його концепції стало поняття *копінгу*, запропоноване Лазарусом для розмежування понять фізіологічної неспецифічності та психологічної вибірковості стресу.

Аналіз існуючого наукового доробку засвідчує, що *копінг* вивчають у рамках психологічних захисних можливостей людини [349, 350], сукупності її особистісних рис [351] або в процесі взаємодії з навколишнім середовищем [352]. У процесі первинної оцінки особа трактує виниклу ситуацію як таку, що містить втрату, загрозу або випробування для неї. Якщо особа сприймає, що через ситуацію зазнала втрат, то розцінює її як шкідливу для себе. Вважаючи ситуацію загрозовою, вона усвідомлює або думає, що така ситуація спричинить

якісь труднощі. Якщо ставиться до ситуації як до випробування, то вбачає в ній поштовх до подальшого особистісного зростання і розвитку [352].

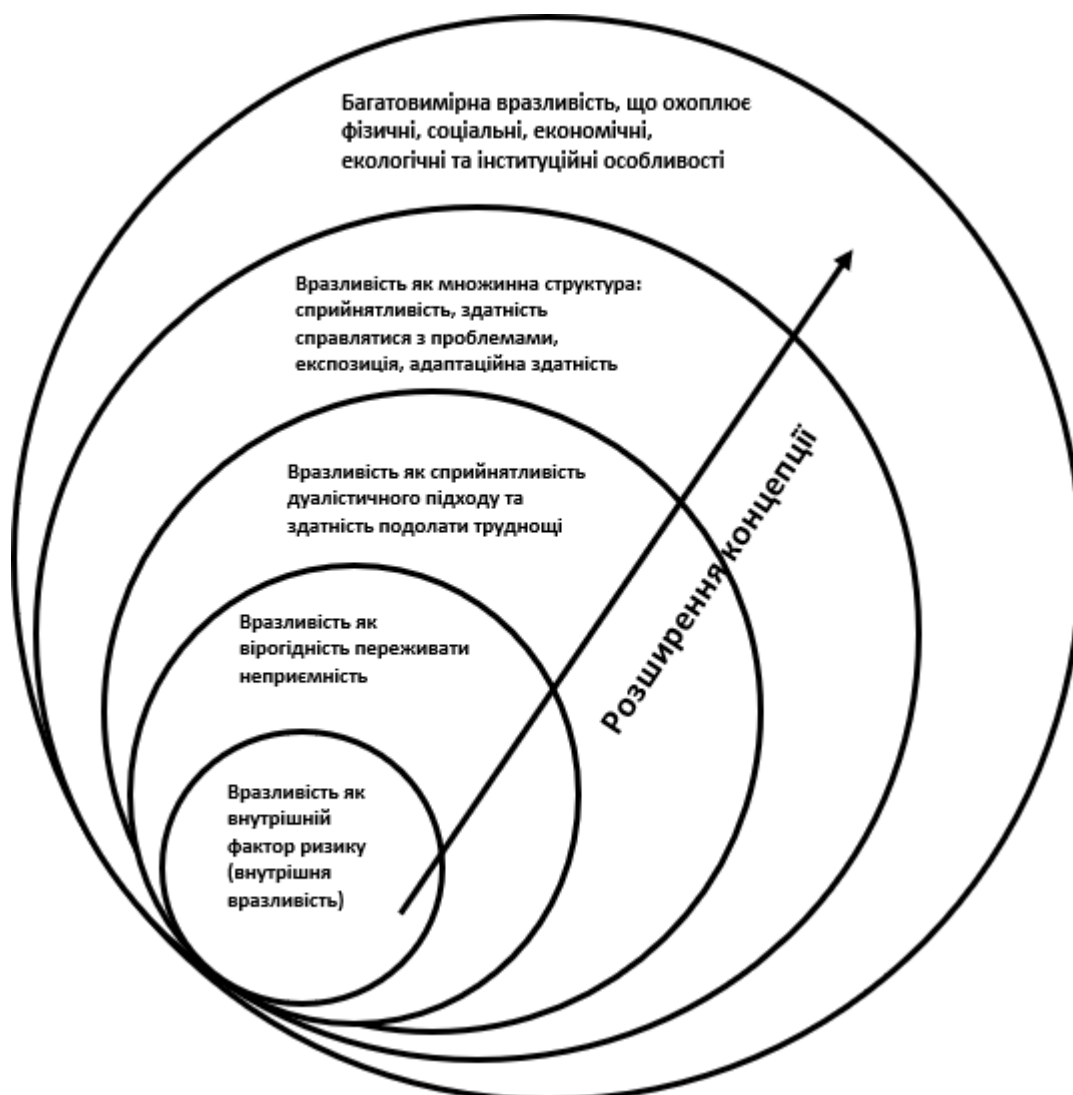


Рис. 5.56. Ключові сфери поняття вразливості [346]

Зараз терміном *копінг* позначають когнітивні та поведінкові змінні спроби людини справитися зі специфічними зовнішніми та внутрішніми вимогами, які вона сама сприймає як такі, що переважають її можливості їх опанувати. У копінгу в першу чергу увага акцентується на різних формах поведінки, які призводять до адаптації або дезадаптації особистості. Адже опанування ситуацією означає здатність своєчасно і чітко визначити причини виникнення стресу та вчасно і адекватно на них відреагувати.

Існують різні класифікації копінг-стратегій. Наприклад, Л. Перлін і К. Шулер виокремлюють такі групи копінг-стратегій [353]:

- стратегії зміни погляду на проблему, ракурсу її бачення;
- стратегії зміни проблеми, переструктурування ситуації, пошук її структурних блоків, з яких можна починати розв'язання проблеми;
- стратегії управління емоційним стресом (або, радше, дистресом).

Шеффер [350] пропонує поділити *копінг-стратегії* на три групи залежно від їхньої скерованості (напряму головного вектора дій):

- фокусовані на проблемі (пов'язані з різноманітними способами ухвалення рішень і конкретними діями для подолання труднощів);
- фокусовані на переживаннях (підтримування емоційної рівноваги та керування емоціями й почуттями);
- фокусовані на оцінці (з'ясувати для себе значення ситуації).

Захист мешканців від несприятливого впливу шуму (від роздратування шумом зокрема) розуміється як динамічний процес, що означає, що критерії оцінювання повинні бути неодноразово перевірені і, якщо необхідно, адаптовані до нових наукових результатів [346]. Єдиним істотним об'єктивним чинником, що спричиняє роздратування, є рівень (індекс) експозиції шуму. Таким чином, завдяки ефективному управлінню та контролю над авіаційним шумом, найкращою практикою - через збалансований підхід ІСАО, може бути можливим мінімізувати негативний вплив авіаційного шуму на здоров'я та якість життя.

Все більше аеропортів у стратегію управління шумом включають низку неакустичних чинників, з якими зтикається більшість аеропортів, а саме:

- створення і підтримка довіри місцевої громади,
- впровадження змін у повітряному просторі (маршрути).

Прикладом такої роботи є аеропорт Хітроу [354], в якому були створені форуми взаємодії:

- форум з авіаційного шуму Хітроу, що забезпечило більшу прозорість щодо надання даних у реальному часі про достовірні рівні шуму літаків під час відправлення / прибуття,

- громадський форум з шуму, що дозволяє адміністрації аеропорту встановити зворотній зв'язок з громадою, проводити опитування та анкетування громади, спільні дослідження, консультації, круглі столи, а також здійснювати зовнішню експертну оцінку та аудит щодо впливу шуму.

Таким чином, прозора і регулярна взаємодія адміністрації та громади, надання відкритої інформації про акустичний стан дозволяє керівництву аеропорту формувати нові пропозиції щодо своєї діяльності, усунути супротив опонентів аеропорту, регулювати і зменшити кількість населення, роздратованого шумом. Залучення неакустичних чинників до стратегії зменшення шуму стає все більше важливою складовою, якою не можна нехтувати. В рамках збалансованого підходу необхідно враховувати думки усіх прошарків громади. Опитування місцевих громад та спільні дослідження є ключовими аспектами посилення стратегії по управлінню шумом. Це забезпечує застосування ефективних заходів по управлінню шумом, зменшення впливу на здоров'я, а також взаємодію і співпрацю з місцевими громадами для зменшення кількості роздратованого населення та управління його реакцією на роздратування шумом. Щоб оцінити вплив впроваджених заходів захисту, необхідно провести комплексне обстеження для оцінки довгострокових (впровадження нормативів і стандартів з шуму до літаків, запровадження нормативів акустичного стану довкілля і відповідно до них зон обмеження забудови навколо аеропортів) та короткострокових (експлуатаційні процедури та обмеження в аеропорту) наслідків. Низка попередніх досліджень показують, що коли зміни в експозиції шуму досягаються за допомогою заходів, пов'язаних з джерелом (менш шумні літаки та / або процедури експлуатації з низьким рівнем шуму, та ін.), то відповідні реакції населення можуть бути вищими, ніж це передбачено у взаємозв'язках експозиції-відповіді встановлених для більш-менш стабільного стану. У дослідженнях, де зміни включають шумові екрани або зусилля з ізоляції, зміни можуть бути меншими, ніж передбачалося. Наприклад, усередині житлових приміщень «експериментальної» групи, яка отримала інтервенцію зі зменшення шуму, усередині приміщень було обчислено

середнє еквівалентне зниження шуму на 7 дБА. Але деякі інтервенційні дослідження показують, що люди часто задовольняються втручанням незалежно від результату втручання (ефект Хоторна - Hawthorne). Наприклад, одне дослідження показує позитивний ефект, рівний середньому еквівалентному зниженню експозиції шуму на 5 дБА, від інформування населення про програму моніторингу шуму, ретельно реалізовану навколо аеропорту. Ці характеристики з особливостями визначеної задачі забезпечують необхідність вирішення загальної проблеми управління експозицією шуму в аеропортах і навколо них, обґрунтовуючи комплексний системний підхід, що включає наступні елементи (табл. 5.6). Така система повинна продовжувати пошук відсутніх компонентів та їхнє подальше включення всередину окремих інструментів, враховуючи існуючі та нещодавно визначені неакустичні чинники роздратування шумом в будь-якому аеропорті, що розглядається, та необхідність забезпечити контроль *сприйнятного* шуму та *копінгову* спроможність для управління роздратуванням населення від шуму. Наприклад, інструментарій вимірювання шуму може/повинен містити 2 або 3 альтернативні рішення для автономної локалізації шумових подій:

- Пасивний акустичний радар;
- Комбінація аналізу акустичних сигналів та інших датчиків (наприклад ADS-B);
- Ідентифікація літака шляхом виявлення зображень;
- Використання додаткової інформації, якщо вона є доступною для системи (плани польоту, дані режиму експлуатації, тощо).

Таблиця 5.6

Робочі пакети загального інструментарію для управління впливом шуму в аеропорту

РП	Завдання, що вирішуються РП
Набір інструментів вимірювання шуму	Прямі вимірювання рівнів шуму (експозиції) Розроблення відсутніх компонентів в ланцюзі вимірювання
Набір інструментів моделювання	Безпосереднє моделювання експозиції шуму і її впливу на населення



РП	Завдання, що вирішуються РП
	Розроблення відсутніх компонентів в ланцюзі моделювання
Набір інструментів зв'язку та спілкування з громадськістю	Пряме та непряме зв'язки/спілкування з громадою Розроблення відсутніх компонентів в ланцюгу комунікації з громадським
Екологічний менеджмент	Інтегрування інструментів для оцінки/управління авіаційного шуму в Інструментарій загального управління навколишнім середовищем Оцінювання поточних результатів та надання керівних принципів
Менеджмент проекту	Управління проектами в аеропорту та в громаді, що мешкає навколо аеропорту

Інструментарій екологічного менеджменту надає аналіз і оцінку взаємозалежності, що охоплює залежність шумових завдань і їх рішень від інших екологічних проблем, таких як забруднення повітря та оцінка ризику третьої сторони (авіакатастрофи).

Розробка інструментів зв'язку та спілкування з громадськістю включає такі елементи, як: віртуальний мікрофон (шумомір), система візуалізації та віртуальна служба підтримки.

У найбільш відомих рішеннях в інших сферах цей процес продовжується за допомогою процедур оприлюднення та консультацій з громадськістю і навіть є механізмом вирішення спорів. Тип зібраної інформації та спосіб її аналізу та звітування будуть відрізнятися відповідно до мети програми управління шумом. Очікується, що ця мета буде досягнута шляхом наближення інформації до людей, що живуть в оточенні аеропорту, її пристосування до цільової та дружньої спрямованості, з метою оптимізації стратегій пом'якшення впливу авіаційного шуму на населення. Наприклад, існує певне попереднє припущення, що загальні результати моніторингу шуму можуть покращити сприйняття шуму в аеропорту, оскільки широка громадськість може перевірити відповідність шумовим обмеженням, підвищуючи рівень обізнаності людей. Узагальнене використання Інтернету в останні роки дозволило підвищити доступність даних для широкої громадськості, але: а) інформація, що повідомляється, є надто технічною і повинна бути налаштована для різних профілів користувачів, щоб вони могли розуміти надану інформацію; б) найчастіше використовувані індекси

оцінки шуму не задовольняють очікувань широкої публіки, оскільки, в деяких випадках, вони маскують реальне забруднення в різних математичних формулюваннях і операціях. Необхідно запровадити нові дослідження для тестування традиційних та нових шаблонів звітності, спрямованих на підвищення обізнаності, зрозумілості та належного зіставлення сценаріїв шуму з сприйняттям людей. Вимірювання авіаційного шуму та аналіз результатів є необхідними для того, щоб правильно захистити місцеву громаду, що мешкає в прилеглих районах до аеропорту. Постійний та / або тимчасовий моніторинг шуму, який здійснюється, як правило, усередині території мешкання громади, припускаючи, що шум літака перевищить рівень, що вважається прийнятним або допустимим законом (стандартом), і в зв'язку з цим необхідно послатися на законодавче регулювання шуму повітряних суден. Результати показують, що для аеропортів з низькою інтенсивністю польотів довгостроковий еквівалентний рівень звуку сильно змінюється у порівнянні з довгостроковим максимальним рівнем звуку, але для повітряного руху високої інтенсивності цей взаємозв'язок досить стабільний. У безпосередній близькості від аеропортів з низькою інтенсивністю польоту максимальний рівень звуку як метрика впливу шуму є більш чутливим, ніж еквівалентний рівень.

У загальному випадку цілі моніторингу описуються як:

- 1) для оцінки поточного стану ресурсу, що підлягає управлінню, або для визначення пріоритетів управління,
- 2) визначення того, чи дотримувалися бажані стратегії управління і чи досягалися бажані наслідки,
- 3) забезпечити більш глибоке розуміння системи, що управляється,
- 4) показати, що залучення населення до управління шумом допомагає досягти цілей програми управління шумом тощо.

Хоча сьогодні в більшості випадків головним занепокоєнням є негативний вплив. Найбільшою метою авіаційного шуму є показати, що вимірювання та моніторинг авіаційного шуму можна використовувати для позитивних цілей. Наприклад, щоб показати в рутинному режимі, що літак перевищив допустимий

рівень в точці контролю шуму, щоб показати навіть, чому це було перевищено (помилка в процедурі польотів або тип літака досить шумний для експлуатації в певних умовах), будь-який політ питання безпеки можуть бути порушені з використанням системи моніторингу і в той же час забезпечувати довіру до авіації в цілому. Слід очікувати нового виклику: як забезпечити полегшення від впливу авіаційного шуму в аеропорту, яке може бути оцінене громадськістю, і що узгоджується з ефективною роботою?

5.6. Загальні засади електромагнітного моніторингу, нормування та зниження електромагнітного навантаження на населення та довкілля

Передумовою організації та проведення моніторингу електромагнітного навантаження на людей і довкілля є його технічне та методичне забезпечення у неперервному режимі [355] та інформаційне забезпечення такого моніторингу. Останнє передбачає наявність системи передачі інформаційних потоків відповідної бази даних, що дозволяє не тільки отримувати дані для швидкого реагування на несприятливі зміни обстановки, а й накопичувати інформацію з метою її подальшого аналізу для прийняття перспективних рішень [356]. Такий супровід має враховувати можливість настання надзвичайної ситуації, наприклад, у енергетичній галузі, що може бути результатом глобальних фізичних процесів [357]. При цьому обов'язковим є врахування економічного фактору, тобто співвідношення ступеню впливу електромагнітних полів на людей і довкілля та витрат на організацію моніторингу в умовах різноманітності джерел випромінювань за їх компактного розташування [358, 359].

Організація і проведення електромагнітного моніторингу потребує чіткої і ієрархічної структури щодо пріоритетності контролю та нормалізації електромагнітних полів та випромінювань у залежності від їх амплітудно-частотних характеристик, наближеності до гранично допустимих рівнів за прогнозними оцінками тощо. Крім того, слід враховувати, що в Україні з 1.01.2016 набули чинності міжнародні стандарти з електромагнітної сумісності

технічних засобів, яких необхідно дотримуватись. Це вимагає принципово нового підходу до моніторингу електромагнітної обстановки у виробничих, побутових приміщеннях та довкілля в цілому. В роботі [360] запропонований підхід щодо зниження рівнів електромагнітних полів і випромінювань з урахуванням електромагнітної сумісності технічних засобів при роботі електронного та електричного обладнання у виробничому середовищі. Такий підхід полягає у реєстрації частотно-амплітудних характеристик електромагнітного поля технічних засобів різного призначення з урахуванням їх сумісної дії та отримання кращих значень коефіцієнтів відбиття захисних екранів в умовах значних рівнів електромагнітних полів та випромінювань ультрависоких та вищих частот, що узгоджується з діючими міжнародними стандартами.

Особливістю формування електромагнітної обстановки у населених пунктах є значні відмінності кількісного та якісного складу джерел електромагнітного забруднення в залежності від загальної кількості населення, роду діяльності промислових підприємств, наявності електричного транспорту, засобів бездротового зв'язку тощо. При цьому має місце певне протиріччя між забезпеченням екологічних вимог та стабільністю функціонування інфраструктури, комфортністю населення і т.ін. Тобто, розвиток електричних мереж та мереж зв'язку має певні негативні наслідки для населення.

Очевидно, що стабільний стан екосистеми вимагає здійснення неперервного системного контролю стану навколишнього середовища, складовим якого електромагнітний моніторинг. Як у побуті, так і у виробничих умовах людину оточують різноманітні технічні засоби, які генерують електромагнітні поля з різними просторово-часовими характеристиками. При цьому для одних технічних засобів генерація електромагнітних полів є наслідком їх функціонального призначення, для інших – побічним явищем. Проте в обох випадках вони є фактором електромагнітного забруднення середовища. У загальному випадку електромагнітний моніторинг складається з трьох напрямів:

- розрахункові методи визначення та прогнозування електромагнітної обстановки на певній території, у окремій будівлі тощо. Найбільш ефективним методом є метод моделювання поширення та часових змін електромагнітної обстановки, який дозволяє здійснювати «накладання» полів різних частот з урахуванням гранично допустимих рівнів для кожної частоти (діапазону частот);
- натурні вимірювання рівнів електромагнітних полів і випромінювань різних об'єктів під час їх експлуатації;
- розроблення комплексу заходів та рекомендацій з поліпшення (нормалізації) електромагнітної обстановки.

Одночасне забезпечення ефективності функціонування та безпечності технічних засобів, які є джерелами електромагнітних випромінювань на окремій території та окремому населеному пункті, є актуальною економічною задачею. Від адекватності підходів до її вирішення залежить ефективність впровадження господарських, інвестиційних та комерційних проектів, у яких зацікавлене населення. При цьому слід усвідомлювати, що досягнення повної електромагнітної безпеки принципово неможливе. Тому метою робіт з електромагнітного моніторингу та прогнозування електромагнітного навантаження на довкілля повинне бути оптимізація (раціоналізація) топології розміщення технічних засобів (в основному – радіотехнічних об'єктів) з урахуванням щільності та середньої поверховості житлової забудови, наявності зелених насаджень, водоймищ тощо.

За метою та спрямованістю можна виділити такі типи електромагнітного моніторингу:

1. Моніторинг, який має на меті оцінювання санітарно-гігієнічних параметрів довкілля. Він регламентується чинними санітарними нормами з захисту населення від впливу електромагнітних полів та випромінювань. Його доцільно проводити на стадіях проектування об'єктів та підприємств, які є потенційними джерелами електромагнітного забруднення певної території. За результатами розрахунків та моделювання поширення випромінювань здійснюється оцінювання їх рівнів на критичних відстанях. Наприклад, усі

параметри базових станцій мобільного зв'язку, що використовуються в Україні, є відомими. Це діаграми спрямованості, азимутальні кути, потужності випромінювання тощо. Виходячи з цього, можна досить точно спрогнозувати електромагнітну обстановку у межах впливу як однієї, так і кількох станцій.

Слід спростувати поширену думку про намагання операторів мобільного зв'язку розміщувати на територіях якомога більшу кількість базових станцій та підвищувати їх потужності. Розміри зони обслуговування однієї станції обумовлюються тільки необхідною якістю зв'язку. При цьому якість зв'язку визначається часом його встановлення, а не потужністю випромінювання. Усі базові станції працюють з номінальною потужністю: її підвищення призводить до нештатних режимів роботи та небажаного впливу одного випромінювача на інший. Висока вартість базових станцій та їх обслуговування обумовлює намагання усіх операторів оптимізувати схему їх розміщення.

2. Територіальний електромагнітний моніторинг охоплює, як правило, великі площі населених пунктів (або усю їх територію) і включає контроль за емісією великої кількості різнорідних джерел полів та випромінювань різних частотних діапазонів. При цьому враховується не тільки просторове розташування таких об'єктів (рознесення по території), а й рельєф поверхні та особливості забудови. Результатом такого моніторингу є аналіз електромагнітної обстановки з оцінювання внеску усіх джерел полів та випромінювань. Такий моніторинг дає також інформацію для оцінки (прогнозування) перспектив і можливостей розвитку електричних мереж та засобів зв'язку.

3. Інформаційно-орієнтований моніторинг має на меті подолання страхів і фобій у населення щодо підвищення насиченості населених пунктів різноманітними радіотехнічними об'єктами. Поінформованість громадськості про фактичні рівні електромагнітного навантаження на довкілля сприяє зниженню соціальної напруженості. Наприклад, мобільний зв'язок стабільно функціонує за потужності сигналу  $0,08 \text{ мкВт/см}^2$ . Населення повинне знати, що в Україні гранично допустимий рівень випромінювання цих частот складає  $10 \text{ мкВт/см}^2$  як у країнах Євросоюзу.

4. Важливою складовою електромагнітного моніторингу є оперативний моніторинг. Його необхідність обумовлена складною динамікою електромагнітної обстановки. Вона залежить від фактичних навантажень на силову електромережу, яка значною мірою обумовлюється порою року, днем тижня тощо. При цьому слід орієнтуватися на номінальні або пікові навантаження. Це стосується засобів зв'язку, випромінювальні спроможності яких залежать від орієнтації та будівельних матеріалів споруд, атмосферних умов тощо. Оперативний контроль здійснюють як власники технічних засобів, так і уповноважені державні установи, а також органи місцевого самоврядування.

Практична реалізація системи моніторингу електромагнітної обстановки у населеному пункті повинна починатися з обліку усіх джерел електромагнітних полів та випромінювань з чітким визначенням їх розташування на території. При цьому критичною (важливою) є градація цих джерел за розмірами та характером емісії.

За розмірами усі джерела можна розділити на дві групи:

- джерела, локалізовані у просторі (засоби радіомовлення та телебачення, базові станції мобільного зв'язку, засоби керування повітряним рухом цивільної авіації, трансформаторні підстанції, відкриті розподільчі пристрої електрозабезпечення),
- розподілені джерела (повітряні лінії електропередачі, підземні кабельні лінії, контактна мережа електротранспорту).

За характером емісії доцільно розділити джерела електромагнітних полів та джерела випромінювань:

- джерела електромагнітних полів промислової частоти та стаціонарні магнітні поля (усе обладнання електропостачання та електричного транспорту),
- джерела електромагнітних випромінювань (радіотехнічні об'єкти різного призначення).

Наступним етапом є фактичне визначення інтегрального електромагнітного навантаження на довкілля. Не дивлячись на можливість

моделювання просторових розподілів полів та поширення випромінювання, виходячи з фундаментальних співвідношень електродинаміки, практична його реалізація потребує великих обсягів вихідних даних. Їх отримання можливо виключно за рахунок натурних вимірювань. При цьому абсолютно необхідні заміри у різні дні тижня та пори року. Наприклад, у вихідні дні, особливо у теплу пору року, навантаження на лінії електропередачі знижується, що має наслідком кількарразове зниження рівнів магнітних полів промислової частоти. У холодну пору року, у робочі дні ситуація протилежна. Реалізація системи моніторингу потребує організації і здійснення інформаційного супроводу, тобто раціоналізації інформаційних потоків з наявністю зворотних зв'язків, підтримання бази у актуальному стані і т.ін. Загальну схему здійснення електромагнітного моніторингу наведено на рис. 5.57.



Рис. 5.57. Загальна схема автоматизованої системи моніторингу електромагнітної обстановки

Пропонована схема дозволяє розв'язувати наступні задачі моніторингу:

- виявлення джерел електромагнітного впливу на довкілля;
- контроль кількісних значень електромагнітних полів та випромінювань;
- неперервне спостереження за станом довкілля і змінами, що відбуваються у ньому під впливом електромагнітного фактора;
- комплексна оцінка фактичного стану довкілля [361];
- прогнозування змін електромагнітної обстановки і оцінка її прогнозованого стану [362];



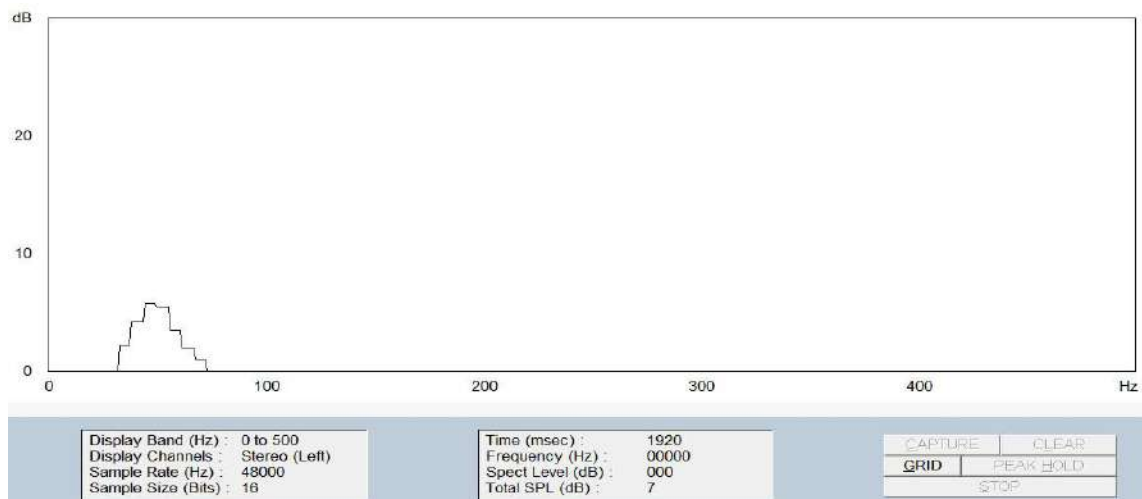
- регламентація і автоматичне реагування на несприятливі зміни (тенденції) у електромагнітному навантаженні на довкілля;
- впровадження організаційно-технічних заходів з нормалізації електромагнітної обстановки.

Як прив'язку до місцевості джерел електромагнітних полів та випромінювань, так і надання даних про рівні електромагнітного навантаження на території доцільно здійснювати з використанням геоінформаційних технологій. Необхідним уявляється проектування сучасної бази даних, за допомогою якої може здійснюватися візуалізація інформації з урахуванням динамік змін електромагнітної обстановки. Вільний доступ громадян до актуалізованих даних щодо фактичного стану довкілля, поінформованість про нормативи (національні та міжнародні) з гранично допустимих рівнів електромагнітних полів усіх частотних діапазонів сприятиме подоланню упередженості населення та розвитку міської інфраструктури [363, 364].

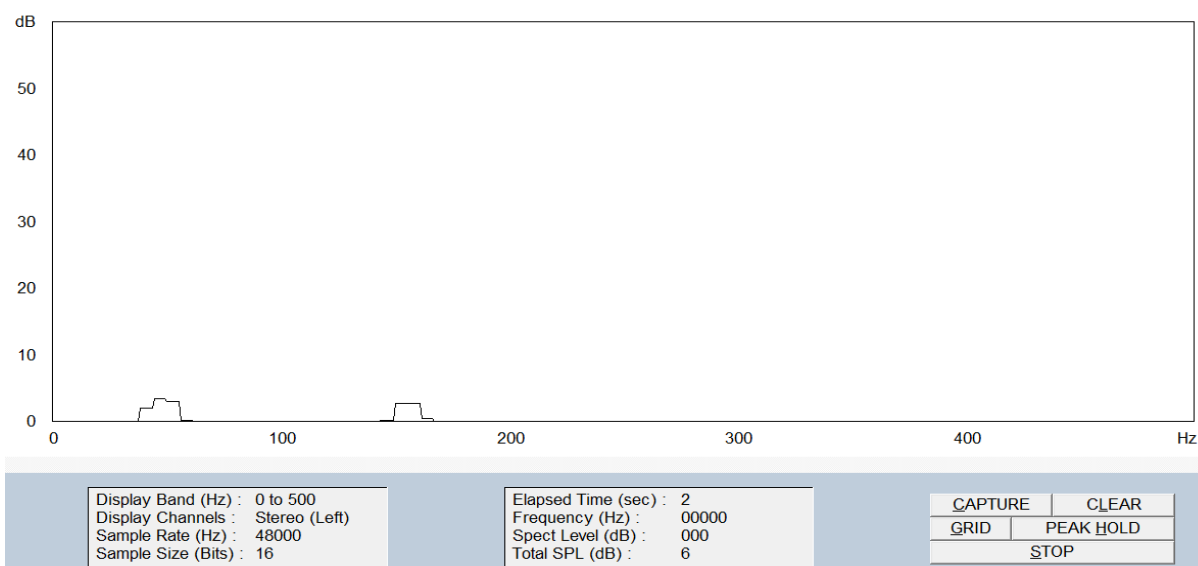
Ефективність організаційно-технічних заходів з нормалізації рівнів електричних та магнітних полів широкого частотного спектра значною мірою залежить від їх нормування національними стандартами та санітарними нормами та правилами. У розділі 1 наведено значні невідповідності як серед окремих вітчизняних документів, так і вітчизняних документів міжнародним.

У сучасних умовах нормування електромагнітного навантаження на довкілля потребує значного вдосконалення [365, 366]. Як показано нами у роботах [367, 368], хибне визначення фактичного електромагнітного навантаження на середовище перебування людей має наслідком невірне визначення впливу цього фізичного фактора на організм людини.

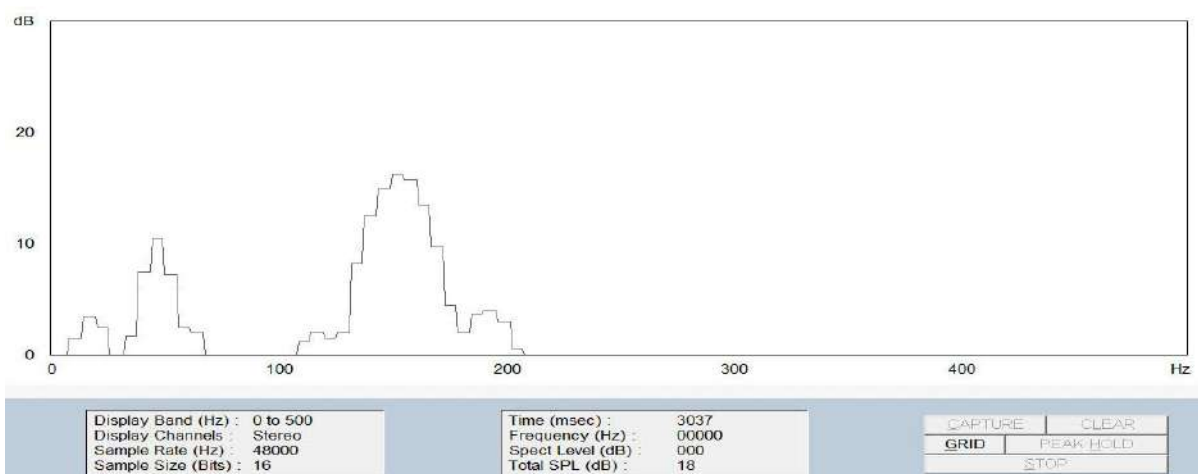
Найбільшу проблему складають гармоніки та інтергармоніки магнітного поля промислової частоти. Особливо це стосується гармонік, кратних трьом (в основному третьої – 150 Гц). У сучасних умовах ця гармоніка може бути меншою, порівняною та більшою за амплітудою ніж основна частота (рис. 5.58) [369].



а) Доля нелінійних споживачів до 15%



б) Доля нелінійних споживачів до 20%



в) Доля нелінійних споживачів вище 20%

Рис. 5.58. Спектральний склад магнітних полів у виробничих приміщеннях з різним внеском нелінійного електроспоживання

Тобто при визначенні електромагнітного навантаження на середовище необхідне врахування амплітудних значень усіх критичних гармонік, що не передбачено чинними нормативними актами та методиками з визначення напруженостей електричної та магнітної складових поля ліній електропередачі і сегментів струмонесучих ліній промислової частоти [370].

Слід зазначити, що у більшості наведені явища (поява гармонік та інтергармонік промислової частоти) притаманні виробничому середовищу з різною кількістю електроспоживачів з нелійними вольт-амперними характеристиками. Але дослідження показали, що навіть на територіях житлової забудови спектр магнітного поля досить складний (рис. 5.59).

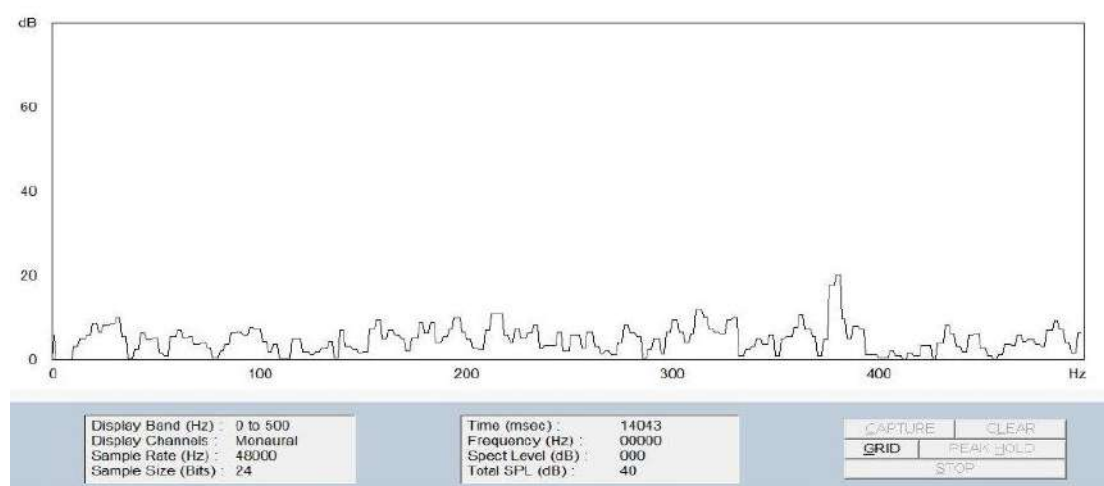


Рис. 5.59. Спектр магнітного поля на території житлової забудови

При цьому промислові підприємства суттєво впливають на електромагнітну обстановку на прилеглих територіях (рис.5.60) [371].

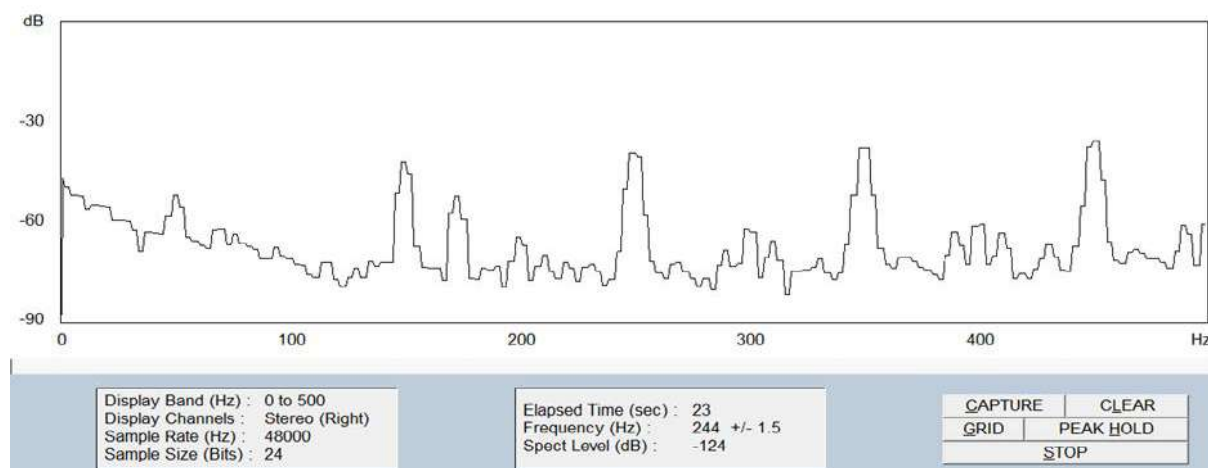


Рис. 5.60. Спектр магнітного поля на території промислового підприємства

Як видно з рисунку, у спектрі магнітного поля присутні не тільки гармоніки, а інтергармоніки (канонічні та неканонічні) магнітного поля промислової частоти. Наведена електромагнітна обстановка не може бути змодельована через передбачуваність складу електромагнітного спектра, який формується різнорідними джерелами поля на різних відстанях від них. Тому у залежності від наявних джерел електромагнітних полів та критичності їх амплітудних значень потребує закладення у проектування розміщення ліній електропередачі (повітряних та підземних) локального потужного обладнання певного коефіцієнту запасу щодо максимально допустимого інтегрального електромагнітного навантаження на середовище.

З метою визначення реального внеску магнітних полів різних частот у згаданий показник було виміряно низькочастотний спектр магнітного поля на великій відстані від суттєвих джерел поблизу повітряної лінії електропередачі напругою 330 кВ від Південноукраїнської АЕС (рис. 5.61).

Вимірювання виконувалися повіреним спектроаналізатором Spectran 5030. Згідно інструкції з експлуатації коректні дані отримуються на частотах, вищих за 10 Гц.

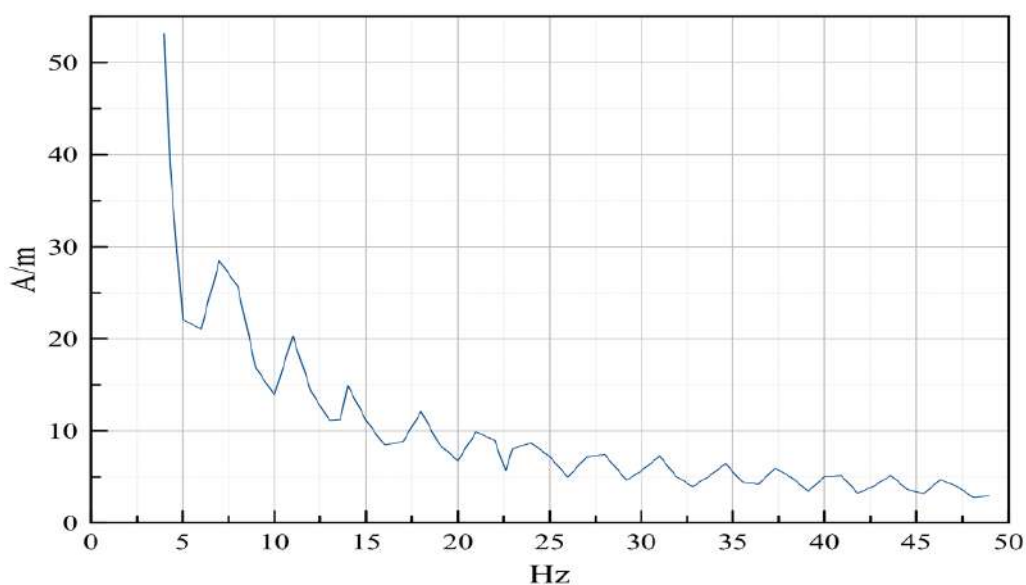


Рис. 5.61. Спектр магнітного поля на відстані 20 м від проекції на землю крайнього фазного дроту повітряної лінії напругою 330 кВ (межа санітарно-захисної зони)

Аналіз рисунку свідчить, що рівень магнітного поля промислової частоти відповідає даним, отриманих у результаті моделювання (рис. 4.12). Але наявність нижчих за 50 Гц частотних складових магнітного поля потребує їх врахування при визначення електромагнітного навантаження на довкілля, або визначення, чи є їх джерелом повітряна лінія, що перебуває у експлуатації. Визначені явища породжують ще одну супутню задачу – забезпечення електромагнітної сумісності електронних та електричних технічних засобів, що дуже актуально з огляду прийняття Україною як національних кількох десятків загальноєвропейських стандартів з електромагнітної сумісності [372].

5.7. Заходи і засоби нормалізації рівнів електромагнітних полів, генерованих розосередженими та локальними джерелами

Найбільш складною задачею є зниження рівнів магнітних полів розосереджених джерел – повітряних ліній електропередачі, дротів живлення електричного транспорту. Що стосується ліній на стадії їх проектування, можливості регулювання напруженості магнітного поля може здійснюватися за рахунок змін або оптимізації технічних параметрів повітряної лінії – висота підвісу, стріла прогинання, відстань між фазними дротами, розщеплення фаз тощо.

Зниження напруженості електричного поля лінії електропередачі неможливо через те що, вона обумовлена робочою напругою лінії. А зниження напруженості магнітного поля можливе за рахунок обмеження сили електричного струму. Але це не завжди доцільно через велику кількість енергоспоживання і обмежені можливості диспетчерських служб щодо альтернативних шляхів енергопостачання. У таких умовах найефективнішим заходом зі зниження рівнів електромагнітних полів є їх екранування екрануючими матеріалами і конструкціями.

Екранування електричної складової електромагнітного поля не викликає труднощів, оскільки вона екранується будь-якою металевою поверхнею. В той

же час екранування магнітної складової є складною технічною задачею. Для екранування магнітного поля розосереджених джерел – ліній електропередачі, контактної мережі електричного транспорту було розроблено загальні засади і пристрій екранування магнітного поля лінійного струмонесучого джерела [298], практичне використання якого докладно описано у роботі [373].

Як зазначалося вище, електромагнітна обстановка у багатьох випадках характеризується широким частотним спектром, великими амплітудами електромагнітного поля на деяких частотах або у смугах частот. Тому на підприємствах різних галузей та у межах їх впливу привалюють електромагнітні впливи визначених характеристик, що ускладнює створення універсальних засобів захисту.

Було розроблено, випробувано та впроваджено серію засобів захисту від впливу електромагнітних полів та екрануючих матеріалів. Випробування захисних властивостей конструкцій і матеріалів здійснювалося з використанням розроблених методик і обладнання [374].

Для підприємств електроенергетики, яким притаманні магнітні поля промислової частоти великих амплітуд, було розроблено і впроваджено спеціальний екрануючий комплект одягу [375]. А для захисту поверхонь – матеріал для екранування електромагнітних полів та випромінювань [376].

І екрануючий комплект одягу, і матеріал для екранування електромагнітних полів і випромінювань виготовлені зі стрічок висококабьольтового аморфного сплаву завширшки 3–5 см та товщинами 20–30 мкм. Такий матеріал характеризується високою механічною міцністю, стабільністю захисних властивостей за значних деформацій (на відміну від пермалоїв). Високі захисні властивості обумовлені великими значеннями відносної магнітної проникності аморфного кобальтового сплаву (до 800 000). Перевагою його використання є те, що він у достатній кількості виробляється в Україні. Але його використання для створення екрануючих поверхонь великих площ проблематичне через високу вартість. Крім того, він має великі коефіцієнти відбиття електромагнітних випромінювань надвисоких та вищих

частот, що може погіршувати електромагнітну обстановку поза зонами, які ним захищаються.

Дослідження свідчить, що багато підприємств, наприклад, аеродроми цивільної авіації в Україні є джерелом електромагнітних полів широкого частотного спектра [377]. При цьому у багатьох випадках виникає потреба, поряд зі зниженням загального електромагнітного фону, значно знизити рівень електромагнітного випромінювання однієї привалюючої частоти (вузької смуги частот). Для цього було розроблено електромагнітний екран з вибіркоким поглинанням електромагнітної енергії [378]. Його конструкція складається з металополімерного матеріалу (полімерна матриця з вмістом металевих та металовмісних частинок), у який імпантовано металеву сітчасту структуру з розмірами комірки, яка є непрозорою для електромагнітної хвилі визначеної частоти, виходячи з фундаментальних фізичних законів.

Для блокування електромагнітних випромінювань від потужних джерел електромагнітних полів розроблено поглинальний електромагнітний екран, який блокує певну смугу частот у залежності від обраних геометричних характеристик [379]. Екран виготовляється з будь-якого металевого матеріалу, у якому регулярно розташовані отвори визначеного діаметра у вигляді хвилеводів. Діаметри отворів обираються таким чином, щоб відповідати частоті зрізу електромагнітної хвилі (мінімальна частота хвилі, для якої хвилевод є прозорим). Розміри отворів, довжина хвилеводів та відстані між ними розраховуються, виходячи з відомих напівемпіричних співвідношень для круглих хвилеводів.

Але розглянуті конструкції мають спеціальне спрямування і призначені для захисту людей або окремого простору від впливу специфічних електромагнітних полів, притаманних тому чи іншому обладнанню. На сьогоднішній день актуальною є задача захисту від електромагнітного впливу як окремих приміщень, так і споруд в цілому.

Загальним недоліком усіх феромагнітних екрануючих конструкцій є можливість погіршення електромагнітної обстановки внаслідок намагнічування

самого екрану. Це показано нами у роботі [380]. При цьому такий вплив залежить від розташування екрана відносно джерела магнітного поля та геометричних характеристик самого екрана.

Для визначення рівнів магнітних полів за екраном скористаємося ітераційним методом розв'язку наведених співвідношень [182]. Через громіздкість розрахунків приводити їх повністю недоцільно. Розташування електромагнітного екрана відносно лінійного джерела магнітного поля наведено рис. 5.62.

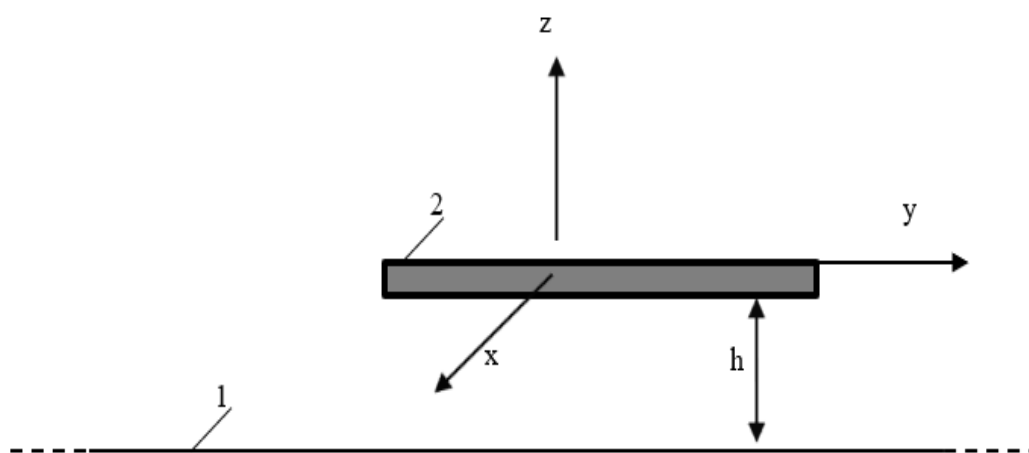


Рис. 5.62. Схема розташування екрана

1 – лінійний електрострум; 2 – електромагнітний екран, розташований у площині  $xy$ ;  $x$  – вісь  $Ox$ ;  $y$  – вісь  $Oy$ ;  $z$  – вісь  $Oz$ ;  $h$  – відстань від струмопроводу до екрана

При проведенні розрахунків були використані наступні початкові умови: довжина екрана уздовж лінійного електроструму  $L_z = 2$  м, ширина  $L_x = 4$  м, відстань від струмопроводу до екрана  $0,2$  м, сила струму промислової частоти  $50$  Гц –  $10$  А, питома провідність екрана –  $9 \cdot 10^7$  см/м (електротехнічна сталь), товщина екрана –  $0,63$  мм.

При цьому розглядається співвідношення напівдовжини екрана  $L_y$  та відстані до джерела поля  $h$  і напівширини екрана  $L_x$  до  $h$ . Результати розрахунку наведені на рис. 5.63.



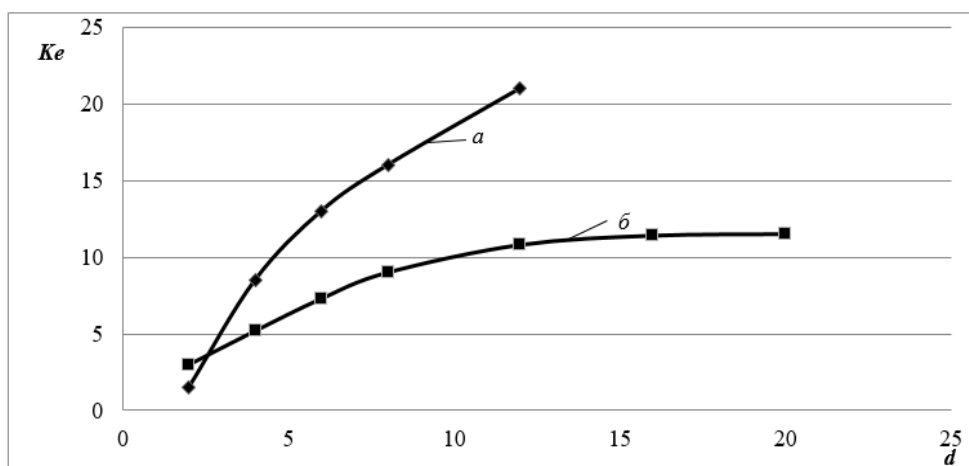


Рис. 5.63. Залежності захисних властивостей електромагнітного екрана від його розмірів: а –  $d=L_x/2h$ ; б –  $d=L_y/2h$

Аналіз отриманих результатів свідчить, що найбільш критичним параметром для підвищення ефективності екранування є довжина екрана уздовж лінійного джерела магнітного поля: збільшення довжини дозволяє підвищувати коефіцієнти екранування до необхідних значень. В той же час ширина екрана, починаючи із співвідношення напівширини екрана до відстані до джерела 12–14, стає некритичною і може бути зафіксованою у реальних умовах перед впровадженням заходів з електромагнітної безпеки. Але найбільш раціональне розташування екрана не завжди можливе через брак простору, незручність його розташування у потрібному місці тощо. Тобто є потреба у розробленні електромагнітних екранів, позбавлених наведених недоліків.

Попередні дослідження, наприклад, [305] свідчать, що найбільш перспективним напрямом створення екрануючих матеріалів для захисту великих площ та об'ємів є композитні металополімерні матеріали. Тому було розроблено, досліджено захисні властивості та визначено умови і засоби керування ними композитні матеріали на основі полімерних матриць з металевими і металовмісними наповнювачами різної дисперсності [381].

Визначення захисних властивостей екрануючого матеріалу здійснювалося методами прямого вимірювання щільностей потоків енергії ( $\text{мкВт}/\text{см}^2$ ), що передбачено чинними нормативами електромагнітної безпеки для електромагнітних полів частотами вище 300 МГц.

Вимірювання виконувалося з допомогою повіреного вимірювача щільності потоку енергії ПЗ–31. Відносна похибка вимірювань не перевищувала 1 дБ. Довжина електромагнітної хвилі на частоті 5 ГГц складає 0,06 м. Розміри зразків для проведення випробувань виключали вплив дифракційних явищ на краях екрана (виникнення «напівтіні» спотворює результати вимірювань).

Джерело випромінювання розташовувалося на відстані 1 м від екрана, що відповідало двом обов'язковим умовам. Перше – перебування зразка у хвильовій області електромагнітного поля. Друга – розміри екрана набагато більші за довжину електромагнітної хвилі.

Вимірювання здійснювалися у три етапи. На першому виконувалося вимірювання щільності потоку енергії без застосування екрана. На другому вимірювався цей параметр при розташуванні екрана між джерелом електромагнітного випромінювання та вимірювальною антеною. Це надає змогу визначити загальний коефіцієнт екранування випробуваного зразка. На третьому етапі вимірювальна антена розташовувалася між джерелом випромінювання та екраном. Це дозволило визначити внесок відбиття електромагнітних хвиль у загальний коефіцієнт екранування.

В усіх випадках орієнтація приймальної антени вимірювального приладу була однаковою. Під час вимірювань фон зовнішнього електромагнітного вимірювання ультрависоких і вищих частот не перевищував 0,08–1,00 мкВт/см<sup>2</sup>. Інтенсивність випромінювання тестового джерела електромагнітного поля була принаймні на два порядки вищою, що мінімізувало похибку вимірювань за рахунок зовнішніх електромагнітних впливів.

Великий розмір екрана, навіть на стадії експериментального визначення його властивостей, критичний з точки зору коректності вимірювань (мінімізація впливу дифракційних явищ на кромках виробу). Рівномірність розподілу наповнювача критична для однорідності захисних властивостей і зменшує обсяги експериментальних робіт. При цьому на стадіях випробувань така рівномірність повинна бути гарантована для унеможливлення отриманих хибних даних.

Отримання композитного матеріалу з потрібною концентрацією наночастинок можливе за допомогою двох способів. Перший – синтез частинок безпосередньо у полімерному матеріалі з відповідних домішок (*in situ*). Другий – додавання до розчину або розплаву готових металовмісних дрібнодисперсних частинок. Перший спосіб розроблений достатньо. Але отримання зразків великих площ для випробувань виявилось досить проблематичним. Для отримання дослідних зразків використовувалися дрібнодисперсні оксиди заліза  $Fe_2O_3$  та  $Fe_3O_4$  з середніми розмірами 50–300 нм. Це мінімізує ефекти відбиття, які проявлялися при застосуванні алюмінієвої пудри (пелюстки товщиною 0,25–0,50 мкм з середніми мінімальними розмірами 20–50 мкм).

У якості матриці (модельного матеріалу) було обрано епоксидну смолу з наступною полімеризацією з використанням поліамідного затверджувача. Кількість металевої компоненти визначалася за вагою. Вимірювання загального коефіцієнта екранування та внеску у нього екранування за рахунок відбиття здійснювалося на зразках розмірами  $0,75 \times 0,75$  м. Проникнення випромінювання поза екраном виключалося. У якості джерела випромінювання був використаний високочастотний генератор і антена. Випробування проводилися для зразків з дисперсністю металовмісної компоненти 50–100 нм та 200–300 нм і товщиною 5 мм. Результати вимірювання наведені на рис. 5.64, 5.65.

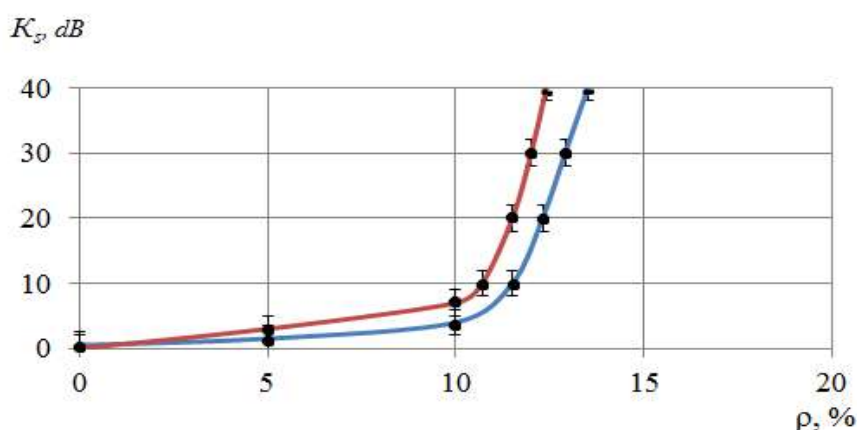


Рис. 5.64. Залежність коефіцієнта екранування композитного матеріалу від розмірів металовмісних частинок та їх концентрації (за вагою):

◆ – 50–100 нм; ■ – 200–300 нм

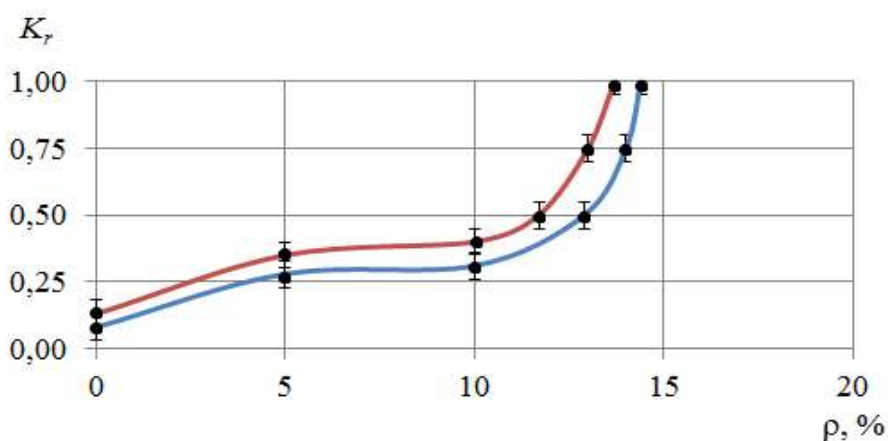


Рис. 5.65. Залежність коефіцієнта відбиття композитного матеріалу від розмірів металовмісних частинок та їх концентрації (за вагою):

◆ – 50–100 нм; ■ – 200–300 нм

Наведені на рис. 5.13–5.14 дані свідчать про значний запас захисних властивостей, виходячи з реальних умов навіть у енергонасиченому середовищі. Розрахунки, виходячи з наведених вище співвідношень, свідчать, що збільшення розмірів металовмісних частинок до 2–10 мкм підвищить коефіцієнт відбиття лише на 18–20 %, що для більшості реальних умов не є критичним. Такі частинки у великих кількостях є побічним продуктом на підприємствах зі збагачення залізної руди. Такий пил осідає на фільтрувальних завісах аспіраційних систем. Аналіз показав, що вміст Fe у пилогазових потоках в залежності від ділянки виробництва складає 43–58 %, а FeO – 8–15 %. При цьому на останній завісі осідає залізорудний пил із розмірами частинок 2,5–10,0 мкм (до 90 %). Використання такого пилу має також і екологічну складову через постійну необхідність його утилізації.

Для отримання захисної поверхні залізорудний пил у необхідній кількості розчинявся у водній суспензії полівінілацетату з наступною полімеризацією за температури 60–70° С. У результаті був отриманий металополімерний матеріал з товщиною від 0,8 мм. Контрольні випробування довели, що залежності коефіцієнта екранування та коефіцієнта відбиття від концентрації металевої та металовмісної субстанції відрізняються від наведених на рис. 5.13, 5.14 у межах похибки вимірювань. При цьому за товщини матеріалу 1,0–1,2 мм внаслідок

різних розмірів металовмісних частинок можна отримати різну їх концентрацію у тілі матриці за товщиною. Така конструкція дозволяє більш ефективно екранувати електромагнітне випромінювання певної смуги частот або широкосмугового випромінювання. Це обумовлене тим, що відбувається узгодження за глибиною поглинальної структури з середовищем розповсюдження електромагнітної хвилі.

Було розроблено і виготовлено серію електромагнітних екранів на основі залізородного пилу для екранування електромагнітних випромінювань ультрависоких частот та магнітних полів промислової частоти.

Випробування захисних властивостей здійснювалося двома серіями – щодо електромагнітного поля ультрависокої частоти та магнітного поля промислової частоти [382]. Частота екранованого електромагнітного поля – 1,8 ГГц. Ця частота обрана, виходячи з її найбільшого, на сьогоднішній день, використання у засобах бездротового зв'язку. Залежність коефіцієнта екранування від вагового вмісту екрануючого матеріалу наведено на рис. 5.66.

Для високочастотних електромагнітних полів важливим є визначення внеску у загальний коефіцієнт екранування за рахунок відбиття електромагнітних хвиль малої довжини, тобто коефіцієнта відбиття. Це обумовлене можливістю відбиття випромінювання у небажаний бік, тобто погіршення електромагнітної обстановки поза зоною, захищеною екраном. Залежність коефіцієнта відбиття від тих же параметрів наведено на рис. 5.17.

Аналіз отриманих результатів свідчить, що підвищення дисперсності екрануючої субстанції у 2–3 рази гарантовано підвищує коефіцієнт екранування у 2 рази. При цьому суттєво (до 0,1) знижується коефіцієнт відбиття. Слід відмітити, що навіть за використання великих металевих та металовмісних частинок коефіцієнти екранування є високими при достатній концентрації (14–15 %). Однак коефіцієнт відбиття наближається до показника металевих матеріалів, тому є вже неприйнятним для використання захисних покриттів великих площ.

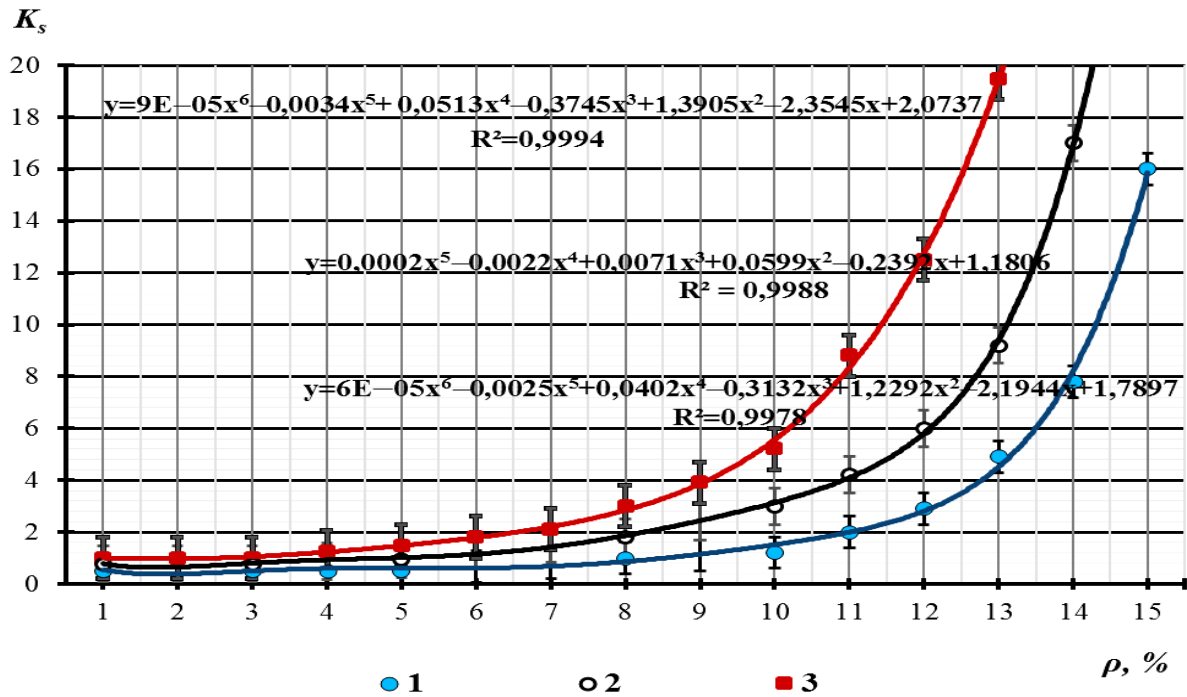


Рис. 5.66. Залежність коефіцієнта екранування ( $K_s$ ) металополімерного матеріалу від вмісту ( $\rho$ ) та дисперсності екрануючої субстанції:

● – 50–100 мкм, ○ – 15–25 мкм, ■ – 5–10 мкм

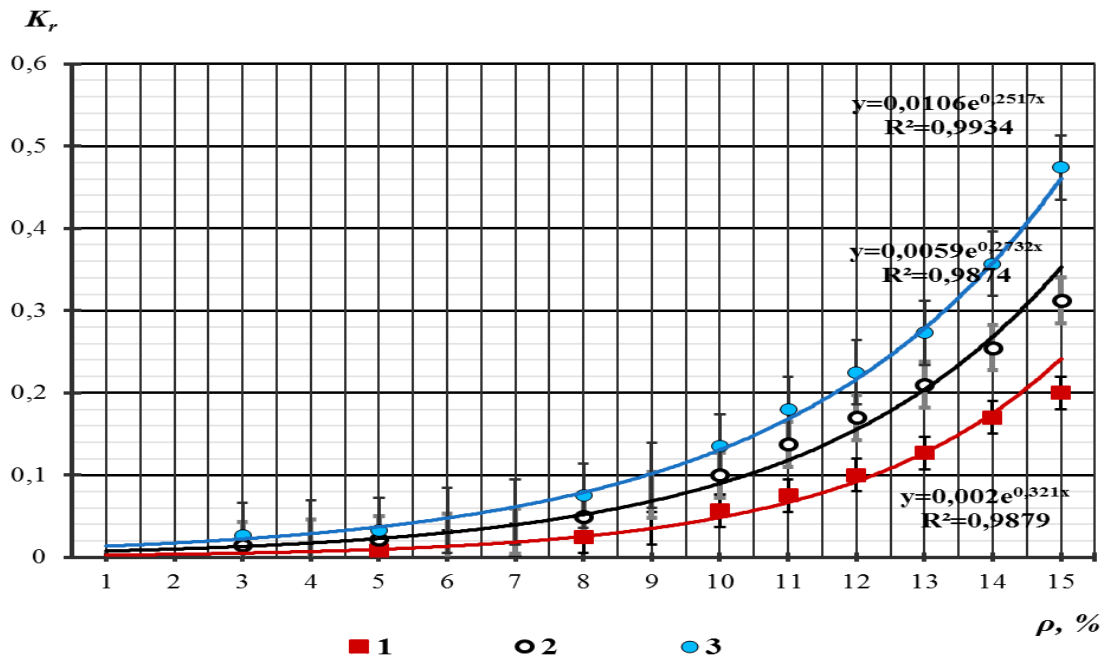


Рис. 5.67. Залежність коефіцієнта відбиття ( $K_r$ ) електромагнітних хвиль металополімерного матеріалу від вмісту ( $\rho$ ) та дисперсності екрануючої

субстанції: ● – 50–100 мкм, ○ – 15–25 мкм, ■ – 5–10 мкм

З досліджених матеріалів було виготовлено геометрично замкнені конструкції для визначення ефективності екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц. Враховуючи квазістаціонарність такого поля, вимірювання коефіцієнта відбиття не має сенсу.

Результати випробувань наведено на рис. 5.68.

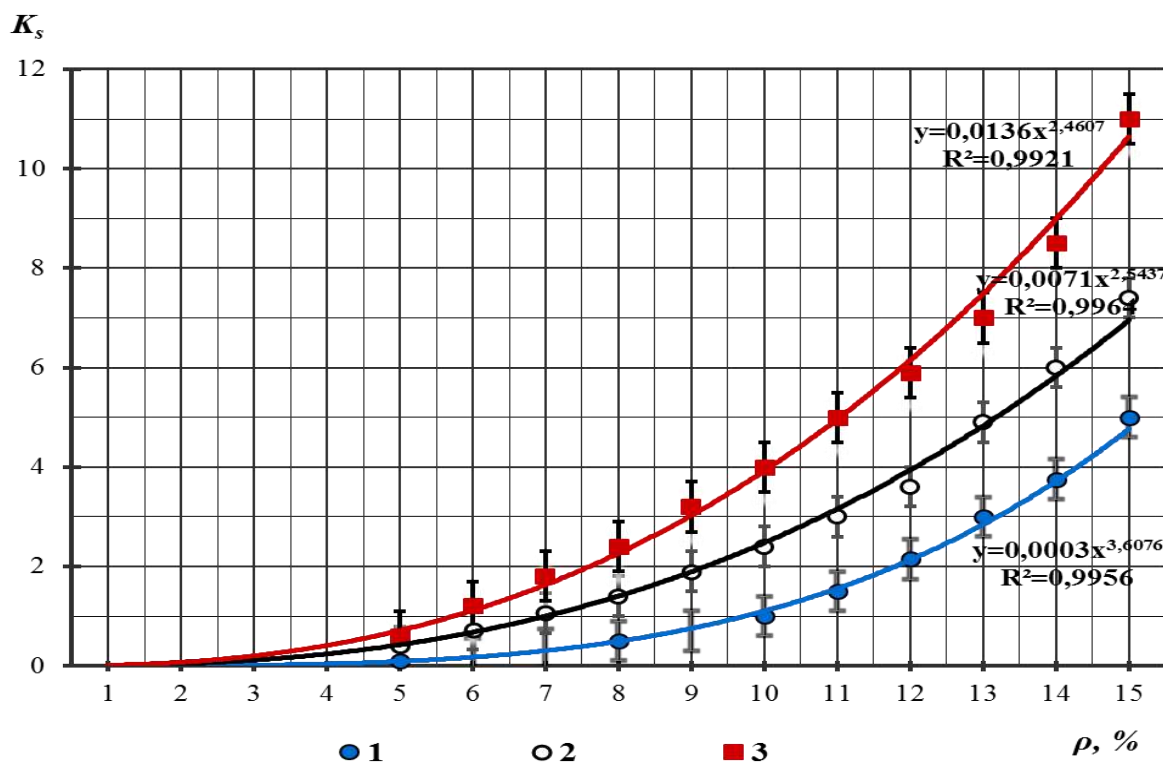


Рис. 5.68. Залежність коефіцієнта екранування ( $K_s$ ) магнітного поля промислової частоти 50 Гц від вмісту ( $\rho$ ) та дисперсності металевієї субстанції у полімерній матриці: ● – 50–100 мкм, ○ – 15–25 мкм, ■ – 5–10 мкм

Наведене свідчить, що розроблений екран дозволяє гарантовано знизити рівні магнітних полів наднизьких частот удвічі за вмісту наповнювача у 12 % [382].

У багатьох випадках, наприклад, у транспортній галузі потрібне одночасне зниження рівнів електромагнітних полів і випромінювань та шуму. З цією метою було розроблено універсальний електромагнітний та шумозахисний екран. Вимогами до захисних конструкцій є технологічність при виготовленні та застосуванні (простота процесу виготовлення і можливість створення поверхонь

складних конфігурацій) та прийнятна вартість одиниці площі матеріалу. Ступені захисту від впливу електромагнітних полів та випромінювань визначались за методиками, описаними вище.

Шумозахисні властивості матеріалу визначалися у ревербераційній камері акустичної лабораторії Національного авіаційного університету. Вимірювання виконувалися за допомогою конденсаторних мікрофонів та стаціонарного каліброваного обладнання «Брюль і К'єр». Похибка вимірювань не перевищувала 2 дБ. Показником ефективності шумозахисного екрана є індекс зниження шуму, тобто різниця рівнів шуму перед і за екраном. Звукові хвилі різних частот згасають по різному (низькочастотні повільніше, високочастотні – швидше). Тому визначення ефективності шумозахисту здійснюється в октавних смугах частот згідно ISO 140-4-1998.

Для однозначного поглинання електромагнітної енергії та механічних (звукових) хвиль матеріал повинен мати відповідні властивості щодо ступенів захисту. У якості основи обрано латекс. Технологія його виробництва відома та відпрацьована. Перевага латексу полягає у тому, що у процесі виготовлення у нього можна додавати дрібнодисперсну металеву та металовмісну субстанцію без втрати механічних властивостей полімером. Для отримання потрібних коефіцієнтів екранування у вихідні компоненти виготовлення латексу додався залізородний пил у потрібній кількості (за вагою) та потрібної дисперсності. Дисперсність залізородного пилу залежить від місця видобутку і збагачення руди, тому цей показник попередньо досліджується.

Для забезпечення високих шумозахисних властивостей матеріал повинен бути структурно неоднорідним. Тому латекс з домішками залізородного пилу виготовляється у вигляді пінолатексу. Для цього перед термічною обробкою вихідної суміші у неї додавався піноутворювач (синтетична олеїнова кислота) у кількості 1,1–1,7 %. Товщина виготовлених зразків складала 5–10 мм (рис. 5.69а)). Для підвищення структурної неоднорідності матеріалу було виготовлено також серію зразків з додаванням готового гранульованого



полістиролу (foam-polystyrene). Розміри гранул склали 1–3 мм. Товщина отриманих листових матеріалів становить 5–10 мм (рис. 5.69.б)).



а)



б)

Рис. 5.69. Зовнішній вигляд універсальних електромагнітних та шумозахисних екранів: а) на основі пінолатексу; б) на основі пінолатексу та пінополістиролу

Дослідження захисних властивостей електромагнітних екранів з пінолатексу в області ультрависоких частот здійснювалися для випромінювань частотами 2,4–2,6 ГГц, які є робочими для бездротових інформаційних мереж та 3G зв'язку. Досліджувалася серія екранів товщинами 5 мм та 10 мм з різним вмістом металевої субстанції. Результати вимірювань коефіцієнтів екранування ( $K_s$ ) у залежності від вмісту (за вагою) екрануючої субстанції ( $\rho$ , %) наведено у табл.5. 7.

Таблиця 5.7

Залежність коефіцієнтів екранування електромагнітних полів ультрависоких частот від товщини екрана та вмісту металевої субстанції

$\rho$ , %	$K_s$	
	5 мм	10 мм
5	1,8	2,9
10	10,2	18,7
15	33,0	38,0
20	44,0	52,0

Аналогічні випробування були виконані для магнітного поля промислової частоти (табл. 5.8).

Таблиця 5.8

Залежність коефіцієнтів екранування магнітного поля промислової частоти від товщини екрана та вмісту металевої субстанції

$\rho$ , %	$K_s$	
	5 мм	10 мм
5	1,2	2,3
10	4,7	10,8
15	11,0	24,0
20	15,0	38,4

Були проведені вимірювання коефіцієнтів екранування матеріалу з вмістом залізорудного пилу 10% та гранульованого пінополістиролу (вміст – 30% за об'ємом). Коефіцієнти екранування для частот електромагнітного поля 2,4–2,6 ГГц склали 5,2–5,8, для магнітного поля промислової частоти 50 Гц – 2,2–2,3.

Були випробувані шумозахисні властивості пінолатексного екрана товщиною 10 мм та пінолатексного екрана з пінополістиролом товщиною 5 мм. Ці властивості визначаються індексом зниження шуму (дБ), який залежить від частоти звукових хвиль (рис. 5.70). Як видно з рис. 5.19, неперервний спектр зниження рівня шуму досить складний і нерівномірний. Згідно нормативу ISO 140-4-1998 та національного нормативу України, рівні шуму у октавних смугах частот нормуються за різними гранично допустимими значеннями. Це пояснюється різною чутливістю людського вуха до різних частот.

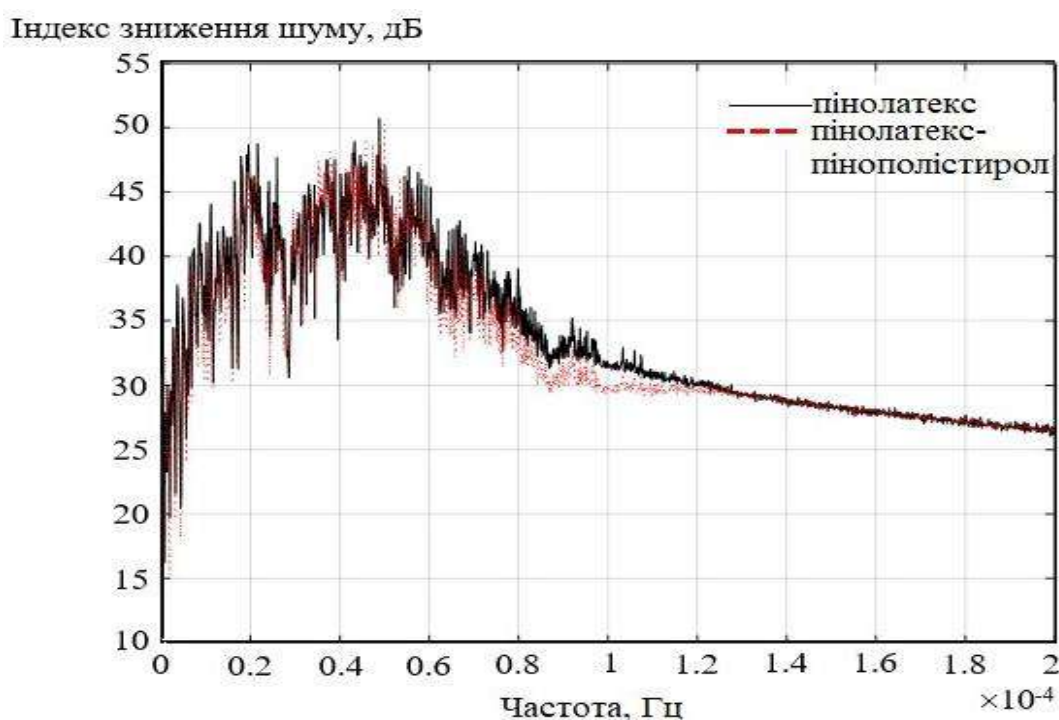


Рис. 5.70. Залежність зниження рівня шуму від частоти звукових хвиль екранів з пінолатексу та пінолатексу з гранулами пінополістиролу

Результати вимірювання зниження рівнів шуму у октавних смугах частот наведено на рис. 5.71. Отримані дані свідчать, що ефективність шумозахисного екрана підвищується зі збільшенням частоти звукових хвиль. При цьому найбільші індекси зниження шуму припадають на частоти 6-8 кГц, до яких вуха людини найбільш чутливе, а гранично допустимі рівні шуму найжорсткіші.

Наведені результати досліджень свідчать, що застосування універсального електромагнітного та шумозахисного екрана для одночасного зниження рівнів цих фізичних факторів можливе.

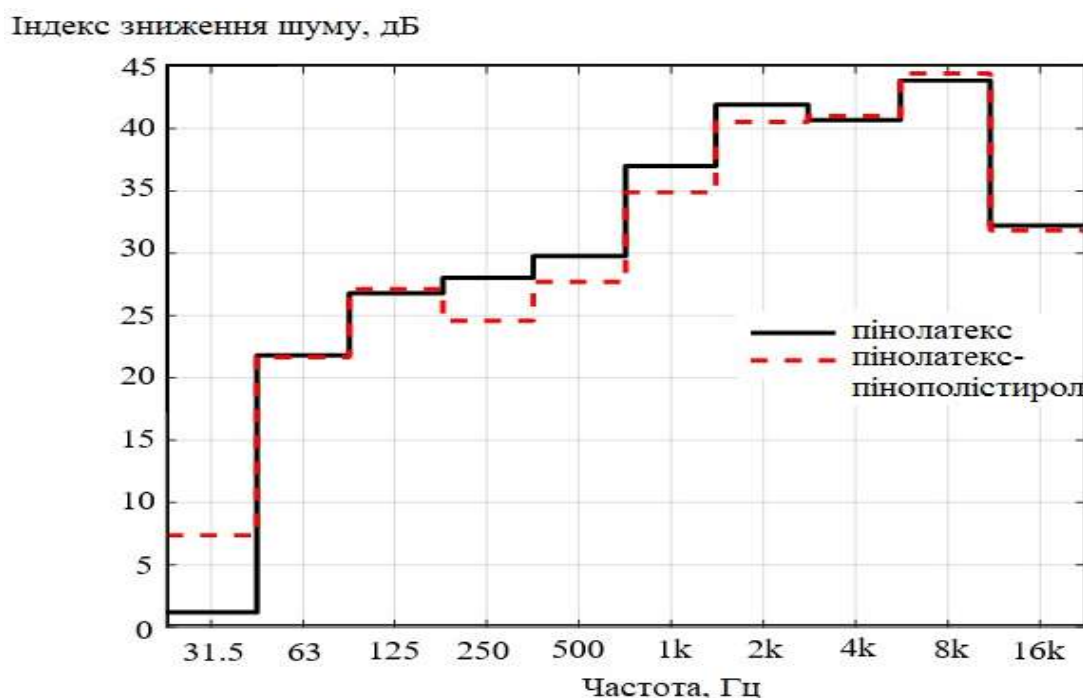


Рис. 5.71. Зниження рівнів шуму шумозахисними екранами з пінолатексу та пінолатексу з гранулами пінополістиролу у октавних смугах частот

Доцільно проаналізувати ефективність застосування екранів з пінолатексу та пінолатексу з пінополістиролу. Гранули пінополістиролу через малу густину, порівняно з пінолатексом, фактично є пустотами у тілі основного матеріалу. Це сприяє поглинанню звукових хвиль у відповідності з відомими фізичними законами. Не дивлячись на те, що зразок з гранулами удвічі тонший за зразок з суцільного пінолатексу, їх шумозахисні властивості практично не відрізняються (відхилення у 2–3 дБ). Таке відхилення можна вважати несуттєвим. Так, для смуги звукових хвиль 4–8 кГц зниження рівнів шуму у обох випадках складає 41–44 дБ. Максимальні рівні шуму на підприємствах енергетики, машинних відділеннях морських суден складають 90–110 дБ. Тобто, застосування розроблених екранів знижує шуми нижче гранично допустимих значень для таких підприємств (80 дБ). У багатьох випадках у таких умовах потрібно знижувати і рівні магнітних полів (турбогенераторні цехи, судові генератори). Відомо, що перевищення рівнів магнітних полів поблизу такого обладнання може складати 1,5–1,8 разів. Тобто, навіть застосування екранів з гранульованим пінополістиролом може нормалізувати рівні таких полів у виробничому

просторі. А використання суцільного пінолактексу можливе за менших товщин матеріалу. Доцільно раціоналізувати процес проектування екранів. Найбільш складною задачею є визначення ефективної магнітної проникності матеріалу для з'ясування потрібної товщини екрана. Маючи експериментальні дані щодо екранування магнітного поля промислової частоти для циліндричного суцільного екрана, можна точно розрахувати значення магнітної проникності  $\mu$  [383]:

$$K_s = \frac{\mu(b^2 - a^2)}{4b^2}$$

де  $K_s$  – коефіцієнт екранування;  $a$  – внутрішній радіус циліндричного магнітного екрана;  $b$  – зовнішній радіус циліндричного магнітного екрана.

Знаючи цей параметр, можна однозначно визначити параметри екрана потрібної ефективності. Використовуючи це співвідношення та наведений вище графічний матеріал, можна однозначно визначити склад та геометричні параметри універсального електромагнітного та шумозахисного екрана, ефективність якого відповідає конкретній електромагнітній та акустичній обстановці [384]. Також розроблено технологію виготовлення текстильного матеріалу з вмістом феромагнітних наночастинок для екранування електромагнітних полів. Показано, що найбільш ефективним методом зчеплення наночастинок з волокнами текстильного матеріалу є нанесення магнітної рідини з наночастинками на матеріал та витримка його у неоднорідному постійному магнітному полі. За умов напруженості магнітного поля 450 А/м та його впливу протягом 12 годин імплантація наночастинок у льняну тканину стає практично незворотною. Досліджено захисні властивості розробленого матеріалу. За просочення магнітною рідиною з витратами 45–50 г/м<sup>2</sup> (вміст феромагнітних частинок – 9 % за вагою) коефіцієнти екранування для 1–3 шарів матеріалу складають: для електричного поля промислової частоти 1,4÷4,8; для магнітного поля – 1,9÷8,1. Після магнітної обробки ці показники складають 2,9÷8,6 та 2,3÷8,9 відповідно. Для видалення з магнітної рідини технологічних компонентів, таких як вакуумне мастило та олеїнова кислота, достатньо

застосувати синтетичний миючий засіб, що підтверджено експериментальним шляхом.

Досліджено ефективність отриманого результату у реальних виробничих умовах. Встановлено, що зниження напруженості магнітного поля промислової частоти та її інтергармонік одним шаром просоченого матеріалу без магнітної обробки складає 1,4, з магнітною обробкою – 2. При цьому не відбувається суттєвого зниження рівня природного геомагнітного поля. Проведено моделювання розподілу магнітного поля у тілі людини у разі виготовлення з розробленого матеріалу захисного костюму (рис. 5.72).

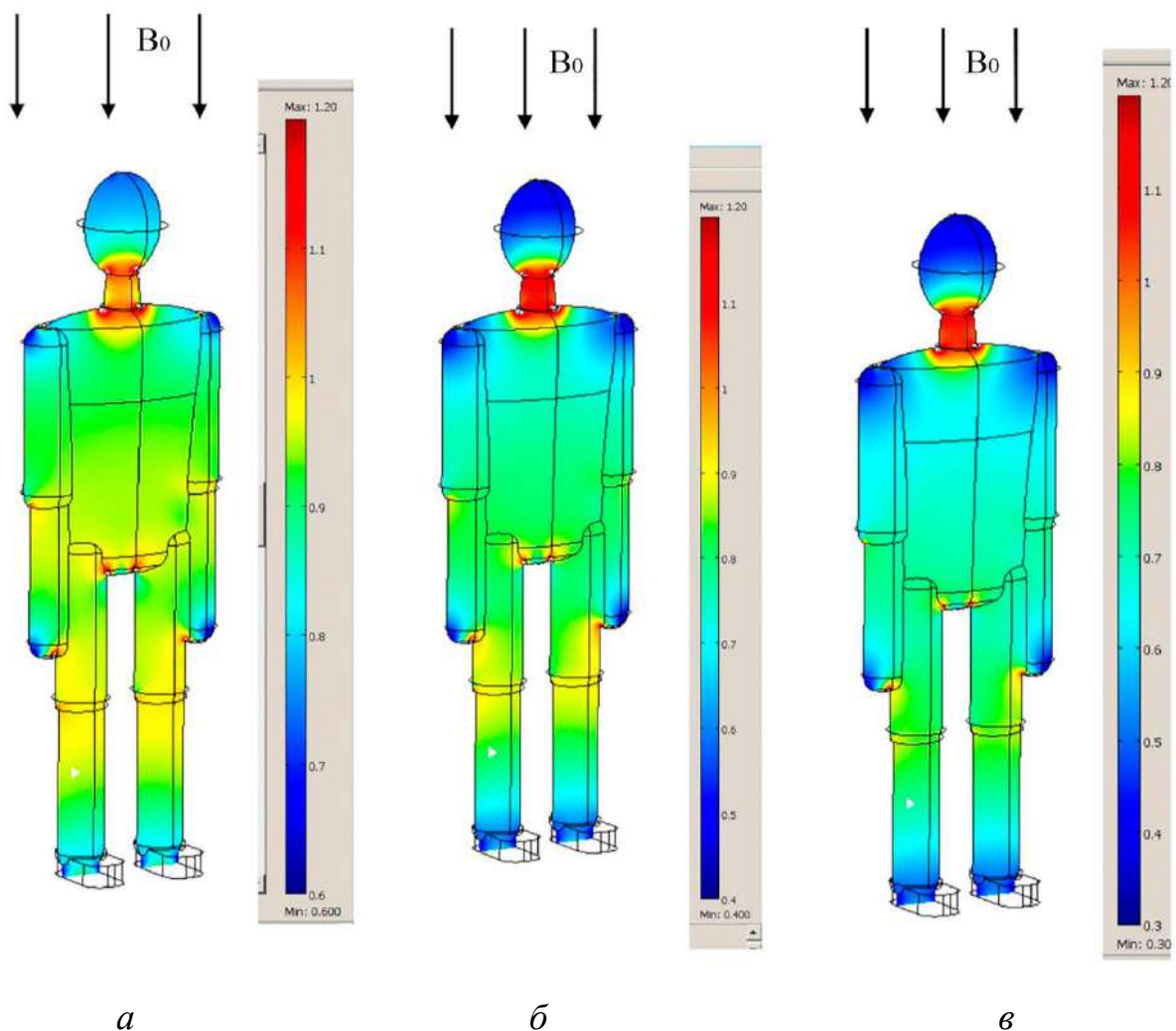


Рис. 5.72. Розподіл магнітного поля  $B/B_0$  у тілі людини (у середній площині) при його перебуванні у продольному магнітному полі  $B_0$  і за наявності захисного одягу: *а*, *б*, *в* – наявність 1, 2, 3 шарів захисної тканини

За умов гарантованого зниження напруженості магнітного поля у 2 рази у критичних місцях спостерігається підвищення рівня поля у шийному відділі через підвищення у цьому місці магнітного опору. Це необхідно враховувати при проектуванні конфігурації захисного костюму [385]. Підвищення захисних властивостей можливо за рахунок більш ефективної магнітної обробки металотекстильного матеріалу та ультразвукової обробки металополімерної суміші для виготовлення полімерного композиту малої товщини (1,0-1,5 мм). Цей металополімерний матеріал за коефіцієнтами екранування полів промислової частоти (3,0-3,5) та ультрависоких частот (5,2-5,7), за технологічністю застосування та вартістю придатний для облицювання великих площ поверхонь стін, будівель і споруд [386].

#### 5.8. Впровадження результатів дослідження та їх ефективність

Результати дослідження щодо моделювання та отримання контурів авіаційного шуму в районі аеропорту було впроваджено у Міжнародному аеропорту «Київ» імені Ігоря Сікорського (Додаток А). Ці результати дозволяють оцінити рівні шуму та встановити їх відповідність міжнародним і національним нормативним вимогам, визначити несприятливий вплив на оточуюче середовище. Було передано програмний комплекс, який здійснює постійний моніторинг акустичного навантаження в районі аеропорту. Цей програмний комплекс реалізовано з урахуванням методології документа ICAO DOC 9911 Керівництва щодо рекомендованого методу розрахунку контурів шуму навколо аеропортів, який є обов'язковим для фахівців з моделювання авіаційного шуму різних країн, та з використанням міжнародної бази акустичних та льотно технічних характеристик літаків Aircraft and Noise Performances Data Base (ANP), яка є стандартом ICAO.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє моделювати різні сценарії добового завантаження аеропорту щодо кількості зльотів та посадок типів повітряних суден, які експлуатуються, з урахуванням міжнародного критерію оцінювання шуму  $L_{Aeq}$  та вітчизняних нормативів -  $L_{Aeq}$  та  $L_{Amax}$ ; будувати

контури шуму та оцінювати рівні шуму з використанням набору критеріїв країн Євросоюзу, а саме -  $L_{AeqD}$ ,  $L_{AeqN}$ ,  $L_{A_{den}}$ , SEL, EPNL для різних категорій літаків.

Таке програмне забезпечення в залежності від типової конструкції літака, типу встановлених двигунів, режимів їх роботи на окремих етапах руху літака та поширення звуку в умовах чинної експлуатації в аеропорту дозволяє:

- здійснювати контроль відповідності показників шуму встановленим законодавством вимогам;
- накопичувати об'єктивні статистичні дані щодо оцінювання рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту та його околицях;
- отримувати інформацію щодо визначення компенсації, платежів або штрафів за збитки, завдані шумом;
- отримувати прогнозні оцінки щодо подальшого розвитку та завантаження аеропорту;
- використовувати отримані дані про рівні шуму для планування і забудови земельних ділянок;
- визначати зонування території навколо аеропорту щодо виявлення несприятливих умов відповідно до перевищення нормативних значень рівнів шуму,
- запровадити експлуатаційні заходи під час зльоту і посадки повітряних суден,
- запровадити відповідну організацію повітряного руху з метою зменшення впливу авіаційного шуму та інших несприятливих екологічних факторів.

Результати дослідження щодо моделювання просторових поширень електромагнітних полів розосереджених і локальних джерел було впроваджено у Південній Електроенергетичній Системі ДП «НЕК Укренерго» на ПС 330 кВ «Усатове» (Додаток Б), а також поширено на ПС 330 кВ «Аджаликська», «Арцізьська», «Новоодеська» та «Подільська». Впровадження полягало у наступному. На основі диспетчерської інформації щодо реальних середніх електричних струмів електроустаткування, розташованого на відкритому



розподільчому пристрої (ВРУ) 330 кВ ПС «Усатове», було розраховано індукції магнітних полів електроустаткування та визначені межі перевищення гранично допустимих рівнів поля. На підставі розрахунків було визначено зони обмеження перебування людей поблизу електроустаткування. Встановлені та промарковані попереджувальними знаками маршрути переміщення обслуговуючого персоналу ПС й охорони. Одночасно були проведені натурні вимірювання напруженості електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц, її гармонік та інтергармонік. Вимірювання виконувались повіреними приладами ПЗ-50 та Spectran 5030. За результатами вимірювань отримано рекомендації щодо місць перебування та шляхів пересування персоналу у межах відкритих розподільчих пристроїв. У частині виробничих приміщень здійснено екранування внутрішніх поверхонь екрануючим матеріалом. Контрольні вимірювання показали, що по маршрутах переміщення персоналу та усіх приміщеннях, де постійно перебуває персонал з експлуатації електротехнічного обладнання ВРУ 330 кВ ПС «Усатове», значення напруженості інтегрального електричного поля не перевищують 28 В/м, а індукції магнітного поля – 0,35 мкТл, що менше за гранично допустимий рівень для населення. Інтегральне значення розраховувалось згідно ДСанПіН 3.3.6.096-2002 «Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів». Також результати дослідження щодо моделювання просторових поширень електромагнітних полів розосереджених і локальних джерел було впроваджено на Київському підприємстві ТОВ «ЕКОТЕХЕНЕРГІЯ» для розрахунку зон безпечного перебування і пересування персоналу, а також для раціонального розміщення електричного й електронного обладнання на виробничих площах.

Контрольні вимірювання щодо реальних рівнів магнітних полів проводилися повіреним вимірювачем напруженості електричного та магнітного поля промислової частоти ПЗ-50. Крім того, вимірювалися приладом ВЕметр – АТ рівні електричного та магнітного полів у смугах частот 5 Гц – 2 кГц та 2кГц – 400 кГц, нормованих для засобів обчислювальної техніки. Вимірювання

показали, що магнітні поля навколо потужного електроприладу перевищують гранично допустимі рівні і розподіляються нерівномірно та зростають на певній відстані від агрегатів. На основі вихідних даних було проведено моделювання поширення магнітного поля у двох ортогональних площинах. У результаті було визначено місця мінімального значення рівнів магнітного поля промислової частоти, що було використано для визначення шляхів пересування працівників.

За результатами вимірювань у приміщеннях, які містять комп'ютерну техніку, було визначено місця перевищення нормативних значень на окремих робочих місцях. Вимірюваннями визначено ранжування технічних засобів, що перебувають в експлуатації за випромінювальними властивостями. За допомогою представленого програмного забезпечення було проведено моделювання розподілів напруженостей електричного і магнітного полів зазначених частотних смуг у площині постійного перебування людей. За результатами моделювання було проведено раціоналізацію розміщення технічних засобів, що дозволило нормалізувати рівні магнітних полів. Аналогічні роботи, на базі отриманих вихідних даних, було проведено на території трансформаторної підстанції та відкритого розподільчого пристрою. За результатами розрахунків було визначено і позначено відповідними знаками зону безпечного перебування та пересування персоналу.

## Висновки до розділу 5

1. Створено інформаційну систему екологічного моніторингу авіаційного шуму, яка являє собою міні-сценарій для моделювання рівнів авіаційного шуму, враховуючи національні санітарно-гігієнічні нормативи щодо впливу шуму та міжнародні стандарти, рекомендовані практики і процедури при експлуатації міжнародних повітряних ліній. Розроблено структуру бази даних з урахуванням особливостей аеропорту, типів повітряних суден, що експлуатуються в аеропорту, та їх акустичних характеристик, злітно-посадкових смуг, кількості польотів, метеорологічних даних та розроблено графічний інтерфейс для

введення і редагування великої кількості вхідних даних з метою моделювання різних сценаріїв польоту.

2. Автоматизовано процес генерації програмних секцій для побудови та візуалізації контурів авіаційного шуму з використанням grid-технології та Shape-файлу, який містить поворот координат на кут для злітно-посадкової смуги з найменшими географічними координатами нижнього торця ЗПС відносно екватора, побудовані контури шуму зі значеннями рівнів шуму, злітно-посадкові смуги та їх географічні координати, координатну систему геодезичних параметрів Землі WGS84. Здійснено відображення контури авіаційного шуму на Google-мапі (мапі зі супутника) конкретного аеропорту з використанням геоінформаційної платформи Quantum GIS з прив'язкою до контрольної точки аеропорту.

3. Моделювання контурів рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту проведено з використанням методу сегментації для побудови моделі поширення контурів авіаційного шуму, методу розрахунку рівня звуку при одиночному прольоті літака для зльоту та посадки для оцінювання рівня шуму. Це дозволить забезпечити постійний моніторинг рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту та виявити несприятливі умови щодо перевищення гігієнічних нормативів допустимих рівнів шуму

4. Здійснено тестування системи на наборі тестових сценаріїв для аеропортів «Бориспіль», «Київ», «Херсон», що дозволить запропонувати заходи зі зниження впливу авіаційного шуму на населення. Проведена верифікація отриманих результатів моделювання та натурних вимірювань значень рівнів шуму в аеропорту «Київ», що підтверджує адекватність моделі та методу розрахунку рівнів шуму.

5. Реакції роздратування жителів, які зазнали впливу шуму на навколишнє середовище, частково визначаються акустичними чинниками (33%), а частково неакустичними чинниками, які визначаються виключно індивідуальною реакцією особистості на шум. Підхід із залученням місцевої громади, що проживає біля аеропорту, та її участі у вирішенні проблем

роздратування від авіаційного шуму дає нові можливості як в управлінні реакцією громади на шум, так і врахуванні таких проблем при прийнятті рішень керівництвом аеропорту.

6. Випробування розроблених матеріалів щодо зниження рівнів електромагнітних полів показало, що на частоті 2,4 ГГц – 2,6 ГГц за вмісту металевої субстанції 10 % (за вагою) відбувається різке підвищення коефіцієнта екранування (10,2–44,0) коефіцієнт екранування практично лінійно підвищується зі збільшенням товщини екрана. За наявності гранульованого пінополістиролу (30 % за об'ємом) коефіцієнт екранування знижується удвічі. Коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти монотонно зростають від 1,2 до 15,0 зі збільшенням вмісту металевої субстанції з 5 до 20 % (товщина – 5 мм). За вмісту пінополістиролу цей показник знижується удвічі. Збільшення товщини екрана підвищує коефіцієнт екранування також практично лінійно.

7. Дослідження шумозахисних властивостей екранів показало, що підвищення індексу зниження шуму відбувається зі збільшенням частоти звукових хвиль. Визначення індексу зниження шуму у октавних смугах частот показало, що найбільші його значення (41–44 дБ) припадають на частоти звукових хвиль 6–8 кГц, частот найвищої чутливості людського вуха. Додавання до пінолатексу гранульованого пінополістиролу (30% за об'ємом) підвищує шумозахисні властивості матеріалу. Матеріал з пінолатексу (10 мм) та пінолатексу з пінополістиролом (5 мм) мають відмінності шумозахисту у 1–2 дБ, що з огляду на загальні індекси зниження шуму не є критичним.

8. Впровадження результатів дослідження у Міжнародному аеропорту «Київ» імені Ігоря Сікорського дозволяють оцінити рівні шуму та встановити їх відповідність міжнародним і національним нормативним вимогам, визначити несприятливий вплив на оточуюче середовище.

9. Впровадження результатів дослідження на Південній Електроенергетичній Системі ДП «НЕК Укренерго» довело їх ефективність. На підставі розрахунків індукції магнітних полів електроустаткування були

визначені межі перевищення гранично допустимих рівнів поля, зони обмеження перебування людей поблизу електроустановки, встановлені і промарковані попереджувальними знаками маршрути переміщення обслуговуючого персоналу, охорони.

10. Впровадження результатів дослідження на Київському підприємстві ТОВ «ЕКОТЕХЕНЕРГІЯ» за результатами моделювання було запропоновано раціональне розміщення технічних засобів, що дозволило нормалізувати рівні магнітних полів. На території трансформаторної підстанції та відкритого розподільчого пристрою за результатами розрахунків було визначено і позначено відповідними знаками зону безпечного перебування та пересування персоналу.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичної проблему зниження негативного впливу авіаційного шуму та електромагнітних полів на населення, яке проживає біля аеропорту, та довкілля шляхом зниження похибки встановлення границь зон регульованої забудови навколо аеропорту на основі удосконалення моделей поширення авіаційного шуму, електромагнітних полів розосереджених та локальних джерел, а також розроблення і удосконалення комплексу заходів зниження їх впливу. Це дозволить здійснювати як планування, прогнозування та сталий розвитку аеропорту у зв'язку із збільшенням інтенсивності повітряного руху літаків, так і розроблення заходів та засобів захисту населення і довкілля від впливу авіаційного шуму та електромагнітних полів. В результаті проведеного дослідження отримано наступні узагальнені результати:

1. На підставі проведеного аналізу міжнародних (документів ІКАО, Євросоюзу) та національних нормативних документів щодо несприятливого впливу авіаційного шуму та електромагнітних полів на населення і довкілля, порівняльного аналізу програмних засобів щодо моделювання поширення авіаційного шуму та електромагнітних полів, аналізу заходів зі зниження негативного впливу цих фізичних чинників обґрунтовано актуальність

дослідження, сформульовано науково-прикладну проблему, мету, об'єкт, предмет та завдання дослідження.

2. Розроблено інформаційну систему екологічного моніторингу авіаційного шуму для моделювання акустичного навантаження від повітряних суден навколо аеропорту на основі удосконаленої інтегрованої моделі обчислення контурів шуму протягом злітно-посадкового циклу руху літака відповідно до політики ІКАО та національної політики охорони довкілля і здоров'я населення. Удосконалення моделі дозволяє обчислювати рівень експозиції звуку  $L_{AE}$  та максимальний рівень звуку  $L_{Amax}$  для оцінки одиночної події за вимогами до точності обчислення еквівалентних рівнів звуку та добових індексів шуму, чого неможливо досягти за методологією чинного Керівництва ІКАО DOC 9911. Основний елемент моделі - залежність «шум-режим роботи двигуна-дистанція», яка рекомендована Керівництвом ІКАО DOC 9911, обґрунтовано на заміну залежністю «шум-режим роботи двигуна-аеродинамічна конфігурація літака-дистанція», для обчислення контурів шуму навколо аеропорту з урахуванням реальних умов експлуатації літаків, включаючи їх аеродинамічну конфігурацію, та стан атмосфери. Похибка оцінки рівнів звуку від окремих відрізків траєкторій зльоту та зниження перед посадкою таким чином зменшена до 5 дБА, а на ділянці зниження уздовж глісади – до 10 дБА. Це дозволяє обґрунтовувати і встановлювати границі зони обмеження забудови навколо аеропорту, зменшувати не тільки рівень експозиції АШ в межах ЗОЗ, а й кількість населення, яке потерпає від його впливу, що відповідає ключовій цілі політики ІКАО з охорони населення і довкілля від впливу шуму.

3. Удосконалено поправку на спрямованість випромінювання звукових хвиль у задню напівсферу літака  $\Delta_{SOR}$ , яка на відміну від рівняння другого порядку, що узагальнено описує у моделі ІКАО будь-який тип літака, враховує внесок у рівні шуму від наземних ділянок руху літаків за рахунок промодельованих і запропонованих залежностей четвертого порядку для різних груп (категорій) літаків. Це дозволило при розрахунку максимального рівня звуку  $L_{Amax}$  та експозиції звуку  $L_{AE}$  для досліджених вагових класів літаків

Jumbo, Heavy, Large зменшити значення поправки  $\Delta_{SOR}$  на 5 дБА, а для Regional Jet, Propeller – на 2-2,5 дБА, що суттєво підвищує точність обчислення рівнів шуму і дозволяє враховувати внески до експозиції шуму, які утворюються при рулінні літаків, випробуванні двигунів, використанні допоміжних силових установок, якими раніше нехтували та не враховували у моделі ICAO DOC 9911 при розрахунку рівнів і контурів АШ навколо аеропорту.

4. Удосконалено модель оцінки ефекту впливу земної поверхні (інтерференції прямих і відбитих звукових променів) у порівнянні з моделлю Керівництва ICAO, яка вважається завищеною і невідповідною тим типам літаків, що експлуатуються сьогодні. Це дозволяє зменшити похибку на 4-6 дБА при розрахунку рівнів звуку  $L_{Amax}$  та  $L_{AE}$  для оцінки одиночної події шляхом вилучення внеску ефекту інтерференції з NPD-залежностей та врахування поправки для кожного спектрального класу літака (турбореактивного, турбовентиляторного, турбогвинтового/гвинтового) при зльоті/посадці для двох типів поверхні відбиття звукових променів – акустично м'якої та жорсткої.

5. Отримала подальший розвиток автоматизація процесу побудови контурів авіаційного шуму на основі ГІС-платформі для нанесення їх на цифрову мапу приаеродромної території, що дозволяє найбільш точно визначати зони обмеженої забудови, обґрунтовувати заходи по зниженню експозиції шуму для населення в межах ЗОЗ, зменшувати кількість роздратованого населення від впливу АШ шляхом надання достовірної інформації про рівні шуму та ефективність реалізованих заходів по їх зниженню як адміністрації аеропорту, так і населенню з метою управління реакцією громади на шум та подальшого спільного розвитку аеропорту і його заселених околиць.

6. Запропоновано ризик орієнтований підхід додатково до збалансованого підходу управління авіаційним шумом, що забезпечує максимально точну оцінку його експозиції, можливість управляти акустичними та неакустичними чинниками вразливості населення з метою зменшення кількості роздратованих людей як кінцевого результату впливу АШ на населення навколо аеропорту.

7. Для прогнозування електромагнітного навантаження на довкілля було обґрунтовано і реалізовано моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних та кабельних ліній електропередачі, моделювання просторового розподілу магнітного поля одиночних дипольно-квадрупольних джерел та множинних джерел; крім того, було застосовано методи натурних вимірювань показників авіаційного шуму та електромагнітних полів з використанням повіреного атестованого обладнання для верифікації результатів моделювання. Результати вимірювань свідчать, що розбіжності з розрахунковими даними не перевищують 12% для одиночних джерел.

8. Удосконалені методологічні засади моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних і кабельних ліній електропередачі дозволили сформулювати основні принципи прогнозування та керування електромагнітним навантаженням на території, а саме: удосконалення конструкцій ліній електропередачі, регулювання робочих струмів, застосування екрануючих поверхонь і конструкцій тощо. Здійснене моделювання електромагнітних полів повітряних та кабельних ліній електропередачі придатне для прогнозування електромагнітного навантаження на довкілля як на стадіях проектування нових ліній, так і під час модернізації тих, що перебувають у експлуатації; моделювання дозволяє оптимізувати конфігурації розщеплення фаз, міжфазні відстані, конфігурації підвісу дротів тощо, що дозволило тільки за рахунок інженерних рішень знизити рівні магнітних полів промислової частоти у 1,7-2,4 рази.

9. Обґрунтовано і реалізовано моделювання просторових поширень магнітних полів локальних джерел з урахуванням амплітудних значень та різних закономірностей зміни окремих просторових гармонік. Моделювання просторової структури магнітного поля електричних машин, зокрема, чотиріполюсних генераторів дозволило визначити зони мінімальної напруженості поля. Показано, що таке поле є несиметричним: існують точки нульового поля поблизу пристрою, з віддаленням від цих точок напруженість поля зростає. Це надає змогу однозначно визначати зони безпечного



перебування та пересування людей, а також санітарно-захисні зони умов напруженості магнітного поля.

10. Обґрунтовано методологію і реалізовано моделювання просторових розподілів електричних і магнітних полів множинних джерел з різними закономірностями їх генерації та поширення у приміщеннях на окремих об'єктах та на територіях, що дозволило раціоналізувати загальні схеми їх розміщення та впровадити заходи з електромагнітної безпеки на принципах розумної достатності з виділенням контурів санітарно-захисних зон та зон обмеження забудови.

11. Розроблено та визначено захисні властивості інноваційних металополімерних композитних магнітних, електромагнітних екранів, а також універсальних електромагнітних шумозахисних матеріалів. Показано, що за вмісту металевої субстанції 5-20% за вагою коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти складають 1,5-15, електромагнітного поля ультрависокої частоти – 10-44. Максимальні індекси зниження шуму (41-44 дБ) припадають на частотні смуги звукового спектру 6-8 кГц, які є найбільш чутливими для вуха людини.

12. Проведено верифікацію отриманих результатів моделювання поширення авіаційного шуму на результатах натурних вимірювань рівнів звуку для реальних сценаріїв відправлення та прибуття в Міжнародному аеропорту «Київ» ім. Ігоря Сікорського і підтверджено адекватність моделі та методу розрахунку рівнів звуку АШ. Проведено тестування інформаційної ГІС-технології на реальних сценаріях виконання польотів в аеропортах «Бориспіль», «Київ», «Херсон», що дозволяє обґрунтувати і запропонувати заходи зі зниження впливу авіаційного шуму на населення.

13. Отримані результати дослідження були впроваджені в практику у Міжнародному аеропорту «Київ» імені Ігоря Сікорського, на Південній Електроенергетичній Системі ДП «НЕК Укренерго», на Київському підприємстві ТОВ «ЕКОТЕХЕНЕРГІЯ», що підтверджено Актами впровадження.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Семашко П. В. Визначення диференційних порогів слухового сприйняття широкопasmового шуму в експерименті. *Гігієна населених місць*. 2008. Вип. 51. С. 277–281.
2. Шумак О. В., Обухан К. І. Оцінка біологічної дії шуму в умовах експерименту. *Гігієна населених місць*. 2009. Вип. 53. С. 208–211.
3. Kihlman T., Kropp W., Lang W. Quieter Cities of the Future. Lessening the Severe Health Effects of Traffic Noise in Cities by Emission Reductions. A report from The CAETS Noise Control Technology Committee and the International Institute of Noise Control Engineering. Göteborg : Reproservice, Chalmers University of Technology. 2014. 28 p.
4. Kihlman T., Kropp W., Lang W. Quieter Cities of the Future. Lessening the Severe Health Effects of Traffic Noise in Cities by Emission Reductions. Source book. Göteborg: Reproservice, Chalmers University of Technology. 2014. 247 p.
5. Гігієнічна характеристика електромагнітного випромінювання від радіотехнічних та електроенергетичних об'єктів та засобів в умовах населених місць (за матеріалами досліджень 2008 – 2010 р.р.) / Ю. Д. Думанський та ін. *Гігієна населених місць*. 2010. Вип. 56. С. 185–195.
6. Современное состояние исследования влияния электромагнитных излучений на организм человека / О. П. Чорный та ін. *Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах*. 2013. № 2. С. 112–124.
7. Ledent M., Beauvois V., Demaret I., Anseau M., Scantamburlo G. 50 Hz electric and magnetic fields and health: which message to the public? *Rev Med Liege*. 2015. № 70(4). P. 172–180.
8. Электромагнитные поля и здоровье человека / Ю.Г. Григорьев, Л.И. Хейфец, В.С. Степанов и др. Москва : РУДН, 2002. 214 с.
9. Назаренко В.І. Комбінована дія магнітного поля промислової частоти, шуму, підвищеної температури повітря як проблема медицини праці: дис. ... д-ра. біол. наук.: 14.02.01 / Ін-т медицини праці АМН України. Київ, 2011. 365 с.

10. Назаренко В.І. Біологічні ефекти комбінованої дії магнітного поля 50 Гц, шуму та мікроклімату при хронічній експозиції (експериментальні дослідження). *Український журнал з проблем медицини праці*. 2008. № 4. С. 70–79.

11. Smith A., Mc Namara R., Welleus B. Combined Effects of Occupational Health Hazards. Cardif. Univer. : Research Report. 2004. № 287. 182 p.

12. Охрана окружающей среды. Авиационный шум. Приложение 16 к Конвенции Международной гражданской авиации. Монреаль : ИКАО, т. 1, 7-е изд., 2014. 258с.

13. ICAO Doc. 9184–AN/902/3 Руководство по проектированию аэропортов. Ч.2: Использование земельных участков и контроль над окружающей средой. Монреаль : ИКАО, 2005. 35с.

14. ICAO DOC 9829 AN/451 Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management Ed 2. Montreal : ICAO, 2008. 130 p.

15. ICAO Doc.8168-1 Руководство по выполнению полетов. OPS. Т.1: Процедуры выполнения полетов. Монреаль : ИКАО, 2006. 386 с.

16. ICAO DOC 9911 Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports. Canada, Montreal : ICAO, 2008. 131 p.

17. Environmental protection. Annex 16 to the convention on international civil aviation. Aircraft noise, Sixth Edition. Montreal : ICAO, 2011. Vol. 1. 228 p.

18. Doc 9501 AN/929 Environmental Technical Manual Volume 1 Procedures for the Noise Certification of Aircraft, Second Edition. Montreal : ICAO, 2015. 287 p.

19. Directive 2002/30/EC of the European Parliament and of the Council of 26 March 2002 on the establishment of rules and procedures with regard to the introduction of noise-related operating restrictions at Community airports. *Official Journal of the European Communities*. 2002. L 189. P. 12–25.

20. Directive 2002/49/EC Of The European Parliament and of The Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Official Journal of the European Communities*. 2002. L 085. P. 0040–0046.

21. ISO 1996-1:2016 Acoustics – Description and measurement on environmental noise. – Part 1: Basic quantities and procedures. – Part 2: Acquisition

of data pertinent to land use. – Part 3: Application to noise limits. International Standard ISO 1996-1:2016 (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2016).

22. Advisory Circular 36-1H – Noise Levels for U.S. Certificated and Foreign Aircraft, dated 11/15/2001.

23. INM Pre-approved List of Aircraft Substitutions. March 10, 1998. P.P. 1–6.

24. Резолюция 39-й Сессии Ассамблеи ИКАО, Монреаль, 27 сентября - 6 октября 2016 года. Канада, Монреаль : ИКАО, 2016. 148 с.

25. Конвенция о международной гражданской авиации. Приложение 16: Охрана окружающей среды. Т. 1: Авиационный шум. 7-е изд.; Июль 2014. Канада, Монреаль: ИКАО, 2014. 258 с.

26. Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення : Закон України від 06.09.2018 № 2530-VIII. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2018. № 41, ст. 239.

27. Про екологічну експертизу : Закон України зі змінами від 16.10.2012 № 5456-VI. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2013. № 46, ст. 640.

28. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*, 2017, № 29, ст. 315.

29. Про охорону атмосферного повітря : Закон України зі змінами від 18.12.2017 № 2707-XII. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 1992. № 50, ст. 54.

30. Про затвердження Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів : наказ МОЗ від 19.06.96 № 173 зі змінами від 18.05.2018 № 952. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96>.

31. ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. Київ : Мінрегіон України, 2014. 85 с.

32. ГОСТ 22283-88. Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения (Шум авіаційний. Допустимі рівні шуму на території житлової забудови і методи його вимірювання)

33.ДСТУ-Н Б В.1.1-32:2013. Настанова з проектування захисту від шуму в приміщеннях засобами звукопоглинання та екранування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 47 с.

34.ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013. Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сельбищних територій. Київ : Мінрегіон України, 2014. 46 с.

35.ДСТУ-Н Б В.1.1-34:2013. Настанова з розрахунку та проектування звукоізоляції огорожувальних конструкцій житлових і громадських будинків. Київ : Мінрегіон України, 2014. 92 с.

36.ДСТУ-Н Б В.1.1-35:2013 Настанова з розрахунку рівнів шуму в приміщеннях і на територіях. Київ : Мінрегіон України, 2014. 57 с.

37.Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України зі змінами від 12.10.2018 № 1264-ХІІ. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 1991. № 41, ст. 546.

38.Повітряний кодекс України : Закон України зі змінами від 04.11.2018 № 3393-VI. *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*. 2011. № 48–49, ст. 536.

39.ДСН 239-96. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. Київ : МОЗ України, 1996. 28 с. (Державні санітарні норми України).

40.Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів: затв. наказом Міністерства охорони здоров'я України від 19 червня 1996 р. № 173. Київ: Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2002. 59 с.

41. Про затвердження змін до Державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань: наказ Міністерства охорони здоров'я України № 266 від 13.03.2017. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0625-17>.

42.СОУ-Н ЕЕ 20.1179:2008. Розрахунок електричного і магнітного полів лінії електропередавання Методика. Київ : Мінпавливіенерго України, 2008. 33 с. (Нормативний документ Мінпавливіенерго України).

43.Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)/-International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Physics*. 1998. № 74. p. 494–522.

44.Directive 2013/35/EU of the European Parliament and of the Council of 26 June 2013 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields).

45.Standard of Building Biology Testing Methods: SBM–2015 [acting from in May 2015]. Germany: Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN, 2015. 5p.

46. ДСанПін 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Київ : МОЗ України, 2003. 16 с. (Державні санітарні норми України).

47.Феоктистова О., Зубков Б. Современные проблемы экологической безопасности воздушного транспорта. *Авиасоюз*. 2014. № 5/6(53). С. 26–27.

48.Кузнецов В.М. Проблемы снижения шума пассажирских самолетов. *Акустический журнал*. 2003. Т. 49. №3. С. 293–317.

49.Чу Ван Туан, Рябков В. И. Необходимость и пути снижения шума агрегатов самолета. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2012. №57. С. 46–54.

50.Копьев В. Ф., Мунин А. Г., Чернышев С. А. Проблемы экологии летательных аппаратов. *Техника воздушного флота*. 2012. №1. С. 40–46.

51.Попуга А.И. Основные направления уменьшения шума воздушных судов. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 9(126). С. 20–25.

52. Экологические проблемы авиации / под ред. Ю. Д. Халецкого. Москва : ТОРУС ПРЕСС, 2010. 504 с.

53.Феоктистова О., Зубков Б. Современные проблемы экологической безопасности воздушного транспорта *Авиасоюз*. 2014. № 5/6(53). С. 26–27.

54.Семенов Р. Р., Бабурин А. А., Миронова В. А., Чижевская М. В. Влияние авиационного шума на человека. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2014. Вып. №10. Т. 1. С. 238–239.

55. Копьев В. Ф., Мунин А. Г., Медведев Ю. В. Учёт влияния новых типов воздушных судов на экологическую ситуацию. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2012. №3(34). С. 247–252.

56. Мунин А.Г. Авиационная акустика. Часть 1. Москва : Машиностроение, 1986. Т. 1. 244 с.

57. Самохин В.Ф. Шум ГДТ. Введение в авиационную акустику. Москва : МАИ, 2007. 152 с.

58. Jagniatinskis A., Fiks B., Zaporozhets O., Oosten N. Annual noise assessment in the vicinity of airports with different flights intensity. *Applied Acoustics*. 2016. Vol. 101. P. 168–178.

59. Медведев В. В., Тимко О. С. Сравнительный анализ методов снижения шума выхлопной струи авиадвигателя. *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*. 2012. №179. С. 57–62.

60. Рыбинская Л. А., Бульбович Р. В., Кычкин В. И. Эффективность методов снижения шума турбулентных струй. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэродинамическая техника*. 2017. № 48. С. 104–118.

61. Копьев В. Ф., Мунин А. Г., Остриков Н. Н. Проблемы создания перспективных магистральных самолетов, способных удовлетворять нормам ИКАО по шуму на местности. *Труды ЦАГИ*. 2014. Вып. 2739. С. 3–13.

62. Исследование характеристик сопла ТРДД с регулируемым шевроном / Алексенцев А. А., Бекурин Д. Б., Власов Е. В. и др. *Ученые записи ЦАГИ*. 2009. Т. XL. № 6. С. 14–21.

63. Любимов Д. А. Анализ турбулентных струйных и отрывных течений в элементах ТРД комбинированными RANS/LES-методами высокого разрешения: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра физ.-мат. наук : 01.02.05. Москва, 2014. 40 с.

64. Leylekian L., Lebrun M., Lempereur P. An overview of aircraft noise reduction technologies. *Journal Aerospace Lab*. 2014. Iss. 7. P.1–15.

65. Задняя кромка для двигателя летательного аппарата, оснащенная подвижными шевронными элементами, и гондола летательного аппарата, снабженная такой задней кромкой: пат. 2492337 Рос. Федерация: МПК F02K 1/46. № 2010139205/06; заявл. 10.04.2012; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 25.

66. Противошумовой шеврон для сопла, а также сопло и турбореактивный двигатель, оснащенные таким шевроном: пат. 2466290 Рос. Федерация: МПК F02K 1/48. № 2010109411/06; заявл. 20.09.2011; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31.

67. Исследование характеристик сопла ТРДД с регулируемыми шевронами / А.А. Алексенцев, Д.Б. Бекурин, Е.В. Власов и др. *Ученые записки ЦАГИ*. 2009. Т. XL, № 6. С. 14–21.

68. 3D numerical studies on jets acoustic characteristics of chevron nozzles for aerospace applications / R. Kanmaniraja, R. Freshipali, J. Abdullah et al. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*. 2014. Vol. 8. P. 1510–1516.

69. Макаренко Т. М., Халилулина Д. И. Турбулентные характеристики шевронных сопел. Третья открытая Всероссийская конференция по аэроакустике: 1–3 октября, 2013 г.: тезисы докл., Звенигород, 2013. С. 160–162.

70. Губанов Д. А., Запрягаев В. И., Киселев Н. П. Структура течения сверхзвуковой недорасширенной струи с вдувом микроструй. *Вестник Новосибирского государственного университета. Сер. Физика*. 2013. Т. 8., Вып. 1. С. 44–55.

71. Губанов Д.А. Влияние микроструй на структуру и акустическое излучение сверхзвуковой недорасширенной струи: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05. Новосибирск, 2014. 140 с.

72. Pul R. Dielectric barrier discharge plasma actuators for unsteady aerodynamic load control. Delft: Delft University of Technology, 2013. 110 p.

73. Редчиц Д.А. Моделирование воздействия диэлектрического барьерного разряда при работе плазменного актуатора на находящийся в покое воздуха. *Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій*. 2012. Вип. 18. С. 161–174.



74. Управление шумом струи с помощью плазменных актуаторов диэлектрического барьерного разряда / В.Ф. Копьев, В.А. Битюрин, И.В. Беляев и др. *Акустический журнал*. 2012. № 4. Т. 58. С. 473–481.

75. Кузнецов В. М. Основы теории шума турбулентных струй. Москва : Физматлит, 2008. 240 с.

76. Гиневский А. С., Власов Е. В., Каравосов Р. К. Акустическое управление турбулентными струями: монография. Москва: Физматлит, 2001. 204 с.

77. Пимштейн В.Г. О скорости конвекции возмущений в турбулентных струях при аэроакустических взаимодействиях. *Прикладная механика и техническая физика*. 2007. № 5. Т. 48. С. 21–25.

78. Экспериментальные исследования по управлению волнами неустойчивости в турбулентной струе / В.Ф. Копьев и др. *Труды ЦАГИ*. 2014. Вып. 2739. С. 44–57.

79. Копьев В. Ф., Остриков Н. Н., Беляев И. В., Каравосов Р. К. и др. Расчетное исследование ожидаемых уровней шума на местности самолета СДС с двигателями ПД-14С по различным методикам, с использованием экспериментальных данных, полученных для модели струй различной геометрии. Четвертая открытая Всероссийская конференция по аэроакустике: 29 сентября – 1 октября 2015 г.: тезисы докл., Звенигород, 2015. С. 53–55.

80. Кузнецов В. М. Эффективность методов снижения шума реактивных струй двигателей пассажирских самолетов. *Акустический журнал*. 2010. № 1. Т. 56. С. 91–102.

81. Секундов А.Н., Чепрасов С. А., Якубовский К. Я. Анализ возможностей методов расчета шума турбулентных струй. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2012. № 5. С. 126–136.

82. Управление шумом струи с помощью плазменных актуаторов диэлектрического барьерного разряда / В.Ф. Копьев и др. *Акустический журнал*. 2012. Т. 58. № 4. С. 473–481.

83. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик / В. Ф. Копьев и др. *Акустический журнал*. 2017. Т. 63. № 1. С. 114–126.

84. Применение метода плоского бимформинга к идентификации вращающихся звуковых мод / Ю. В. Берсенев и др. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2016. № 1. С. 26–38.

85. Идентификация вращающихся звуковых мод в канале воздухозаборника авиационного двигателя с помощью кольцевой решетки микрофонов / Ю. В. Берсенев и др. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2016. № 2(45). С. 114–132.

86. Экспериментальное исследование шума турбулентных вихревых колец в заглушенной камере / В. Ф. Копьев и др. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2016. № 2(45). С. 133–151.

87. Влияние авиационного шума на человека / Р. Р. Семенов и др. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2014. Вып. № 10. Т. 1. С. 238–239.

88. Халецкий Ю. Д. ИКАО: новый стандарт на шум самолётов гражданской авиации. *Двигатель*. 2014. № 2. С. 8–11.

89. Бабкин В., Полев А., Халецкий Ю. Обеспечение требований ИКАО к перспективной авиационной технике. *Авиасоюз*. 2014. № 5/6(53). С. 12–15.

90. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы». Соглашение № 14.628.21.0006 от 20.06.2016 на период 2016 - 2017 гг. Тема: Развитие и реализация многомикрофонных методов акустических измерений применительно к исследованиям эффекта интеграции силовой установки с планером самолета. Руководитель Копьев Виктор Феликсович.

91. Emir M. Ganic Analysis of noise abatement measures on European airports / Emir M. Ganic, Fedja Netjasov, Obrad Babic. *Applied Acoustics*. 2015. Vol. 92. P. 115–123.

92. Jelinek-Nigitz Heidelinde Vienna International Airport Noise Abatement / Heidelinde Jelinek-Nigitz. *Journal of Airline and Airport Management (JAIRM)*. 2016. Iss. 6(1). P. 61–91.

93. Annoyance due to aircraft noise has increased over the years-Results of the HYENA study / W. Babisch, D. Houthuijs, G. Pershagen, E. Cadum, K. Katsouyanni, M. Velonakis et al. *Environment International (online journal)*. 2009. Iss. 35. P. 1169–1176.

94. Dekkers J., W. van der Straaten. Monetary valuation of aircraft noise: A hedonic analysis around Amsterdam airport. *Ecological Economics (online journal)*. 2009. Iss. 68. P. 2850–2858.

95. Suau-Sanchez P., Pallares-Barbera M., Paul V. Incorporating annoyance in airport environmental policy: Noise, societal response and community participation. *Journal of Transport Geography (online journal)*. 2011. 19 P.

96. Von der Lippe, P. Wie gros muss meine Stichprobengroesse sein, damit sie repraesentativ ist (online document. 2011). [Available online at]: <http://www.von-der-lippe.org/dokumente/Wieviele.pdf>.

97. Zaporozhets O., Tokarev V., Attenborough K. Aircraft Noise. Assessment, prediction and control. Glyph International, Taylor and Francis. 2011. 480 p.

98. Vidović A., Štimac I., Zečević-Tadić R. Aircraft Noise Monitoring in Function of Flight Safety and Aircraft Model Determination. *Journal of Advanced Transportation*. 2017. Iss. 1. P. 40–49.

99. Ozkurt N., Hamamci S. F., Sari D. Estimation of airport noise impacts on public health. A case study of İzmir Adnan Menderes Airport. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2015. Vol. 36. P. 152–159.

100. Ozkurt N. Current assessment and future projections of noise pollution at Ankara Esenboğa Airport, Turkey. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2014. Vol. 32. P. 120–128.

101. Bentes F.M., Heleno T.A., Slama J.G. Analysis of airport noise exposure around Viracopos International Airport using geographic information systems. *Journal of Air Transport Management*. 2013. vol. 31. P. 15–17.

102. Licitra G., Gagliardi P., Fredianelli L., Simonetti D. Noise mitigation action plan of Pisa civil and military airport and its effects on people exposure. *Applied Acoustics*. 2014. Vol. 84. P. 25–36.

103. Zachary D. S., Gervais J., Leopold U. Multi-impact optimization to reduce aviation noise and emissions. *Transportation Research Part. D: Transport and Environment*. 2010. Vol. 15, No. 2. P. 82–93.

104. Guarnaccia C., Quartieri J., Tepedino C., Rodrigues R. An analysis of airport noise data using a non-homogeneous Poisson model with a change-point. *Applied Acoustic*. 2015. Vol. 91. P. 33–39.

105. Asensio C., Recuero M., Pavón I. Citizens' perception of the efficacy of airport noise insulation programmes in Spain. *Applied Acoustics*. 2014. Vol. 84. P. 107–115.

106. Vogiatzis K. Airport environmental noise mapping and land use management as an environmental protection action policy tool. The case of the Larnaka International Airport (Cyprus). *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 424. P. 162–173.

107. Modeling of noise pollution and estimated human exposure around Istanbul Atatürk Airport in Turkey / N. Ozkurt, D. Sari, A. Akdag, M. Kutukoglu, A. Gurarslan. *Science of the Total Environment*. 2014. Vol. 482–483, No. 1. P. 486–492.

108. Prats X., Puig V., Quevedo J. A multi-objective optimization strategy for designing aircraft noise abatement procedures. Case study at Girona airport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2011. Vol. 16, No. 1. P. 31–41.

109. Dynamic hierarchical aggregation of parallel outputs for aircraft take-off noise identification / L.A. Sanchez-Perez, L.P. Sanchez-Fernandez, S. Suarez-Guerra, M.G. Lopez-Pacheco. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2015. Vol. 46, Part A. P. 33–42.

110. Adaptive noise cancelling and time-frequency techniques for rail surface defect detection / B. Liang, S. Iwnicki, A. Ball, A. Young. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015. Vol. 54–55. P. 41–51.
111. Štimac I., Vidović A., Sorić V. «Determination of aircraft model using a noise measuring system», in Proceedings of the 4th International Conference on Transport Science (ICTS 2011), Portorož, Slovenia. 2011. P. 32–45.
112. Исследование магнитного поля высоковольтных линий электропередачи переменного тока / В.Ю. Розов, С.У. Реуцкий, Д.Е. Пелевин и др. *Технічна електродинаміка*. 2012. №1. С. 3–9.
113. Dezelak K., Stumberger G., Jak F. Arrangements of Overhead Power Line Conductors. *Electric Power Systems Research*. 2011. Vol. 81., № 12. P. 2164–2170.
114. Peric M., Ilic S., Aleksic S. Electromagnetic field analysis in vicinity of power line. *Electrotechnika and Electronica*. 2008. № 11–12. P. 51–56.
115. Пелевин Д. Е. Методы снижения магнитного поля воздушных линий электропередачи за пределами охранных зон. *Технічна електродинаміка*. 2015. №5. С. 14–16.
116. Пелевин Д. Е. Экранирование магнитного поля промышленной частоты стенами жилых домов. *Електротехніка і електродинаміка*. 2015. № 4. С. 53–55.
117. Здановський В. Г., Глива В. А., Паньків Х. В. Дослідження рівня магнітних полів енергетичних об'єктів. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2013. Вип.25. С. 22–29.
118. Пилюгин О.Ю. Магнитное поле линий электропередачи и методы его снижения до безопасного уровня. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 2. С. 3–8.
119. Щерба А. А., Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. *Технічна електродинаміка*. 2013. № 1. С. 9–15.
120. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизические процессы в области включения полиэтиленовой изоляции силового кабеля. *Техническая электродинамика*. 2015. № 3. С. 3–9.

121. Охорона здоров'я населення та працівників від впливу електромагнітного поля, що створюється кабельною лінією 330 кВ та її підстанцією / В. Ю. Думанський та ін. *Гігієна населених місць*. 2013. Вип.62. С. 154–166.

122. Гігієнічна оцінка пріоритетних чинників, що створюються високовольтними (110-330 кВ) кабельними лініями електропередачі та їх обладнанням / В. Ю. Думанський та ін. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип.63. С. 38–160.

123. Исследование магнитного поля трехфазных кабельных линий из одножильных кабелей при двустороннем заземлении их экранов / В. Ю. Розов та ін. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2015. № 4. С. 56–61.

124. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Москва : *Энергоатомиздат*, 2010. 375с.

125. Саєнко Ю. Л., Бараненко Т. К., Бараненко Е. Б. Зниження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік. *Електрифікація транспорту*. 2012. № 3. С. 78–83.

126. Конструктивні особливості системи електроживлення і можливі шляхи підвищення електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності технічних засобів / О. І. Запорожець, та ін. *Гігієна населених місць*. 2008. Вип. 51. С. 231–237.

127. Петухов В. С. Электромагнитная экология: TN-C – система виновник ухудшения. *Новости электротехники*. 2005. № 1. С. 14–19.

128. Саєнко Ю. Л. Бараненко Т. К., Бараненко Е. В. Методи компенсації реактивної потужності в сетях с нелинейными нагрузками. *Вісник приазовського державного технічного університету*. 2013. Вип. 26. С. 204–210.

129. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Автоматическое управление внешним магнитным полем технических объектов. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 1. С. 11–18.

130. Кирпанев А. В., Лавров В. Я. Электромагнитное поле: Теория идентификации ее применение. Москва : Радио и связь, 2012. 278 с.

131. Глива В. А. Моніторинг та нормалізація фізичних факторів виробничого середовища при експлуатації автоматизованих систем : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.26.01 / Держ. служба гірн. нагляду та пром. безпеки України, Держ. установа «Нац. НДІ пром. безпеки та охорони праці». Київ, 2012. 320 с.

132. Гетьман А. В. Пространственный гармонический анализ магнитного поля технических объектов: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.05 / Ин-т электродин. НАН Украины. Отд-ние магнетизма. Харьков, 2003. 153 с.

133. Волохов С. А., Добродеев П. Н. Закономерности распределения внешнего магнитного поля электрооборудований. *Электротехника*. 2006. № 4. С. 28–33.

134. Островский О. С., Одаренко Е. Н., Шматько А. А. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн. *Фізична інженерія поверхні*. 2003. Том 1. № 2. С. 161–173.

135. Рябов Ю. Г., Гуров И. Б. Экранирование встроенных трансформаторных подстанций. *Технологии ЭМС*. 2014. № 3. С. 21–28.

136. Глива В. А., Перелет Т. Н. Условия использования экранирования низкочастотных магнитных полей. *Безпека життєдіяльності на транспорті і виробництві - освіта, наука, практика*. II Міжнародна науково-практична конференція, 17–18 вересня 2015 р.: Херсон, 2015. С. 81–85.

137. Птицына Н. Г., Копытенко Ю. А., Исмагилов В. С., Коробейников А. Г. Электромагнитная безопасность транспортных систем: основные источники и параметры магнитных полей. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 2. С. 68–71.

138. Лелюхин А. М. Разработка методов оценки электромагнитных полей на объектах транспорта : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Моск. автомоб.-дорожн. гос. техн. ун-т. Москва, 2010. 86 с.

139. Тягунов Д. С. Пространственно-временные характеристики городского техногенного магнитного шума в частотном диапазоне 0,01–30 Гц: автореф. дис. на соиск. учн. степени канд. тех. наук : 25.00.10 / Институт геофизики Уральского отделения РАН. Екатеринбург, 2012. 20 с.

140. Сердюк А. М., Григор'єв П. Є, Акіменко В. Я. Екологічна значущість геомагнітного поля та медико-біологічні передумови гігієнічної регламентації його ослаблення в умовах України. *Довкілля і здоров'я*. 2010. № 3. С. 8–11.

141. Походзей Л. В. Гипогеомагнитные поля как неблагоприятный фактор производственной среды : дис. ... докт. мед. наук. : 14.00.50 / Моск. ГУ НИИ медицины труда РосАМН. Москва, 2004. 198 с.

142. Запорожець О. І., Панова О. В., Потапенко Г. Д., Паньків Х. В. Спотворення геомагнітного поля у виробничих умовах як проблема охорони праці. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2014. Вип. 28. С. 26–31.

143. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Левин С. В. Исследование явления ослабления статического геомагнитного поля стальной колонной. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 1. С. 12–19.

144. Резинкина М. М., Ерисова А. В., Пелевин Д. Е., Лобжанидзе Л. Э. Экспериментальное исследование влияния индуцированной и остаточной намагниченности ферромагнитных конструкций на ослабление магнитного поля в жилых помещениях. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2009. № 41. С. 111–120.

145. Грецьких С. В. Ослаблення статичного геомагнітного поля ферромагнітними елементами будинків : автореф. дис. на здобуття наук ступеня канд. техн. наук : 05.09.05. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2016. 21 с.

146. Розов В.Ю., Пелевин Д. Е., Реуцкий С. Ю. Оптимизация параметров систем компенсации стационарных искажений геомагнитного поля в помещениях. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 5. С. 11–16.

147. Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 *Technical Manual*. FAA-AEE-100. Office of Environment and Energy, the U.S. Department of Transportation. National Transportation Systems Center (Volpe Center) Acoustics Facility and the ATAC Corporation. May, 2015.

148. Bekanntmachung der Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb (AzD) und der Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB) vom 19.11.2008. *Instructions on the Acquisition of Data on Flight Operations and Calculation of Noise Protection Areas*. Bundesanzeiger Nr. 195a. 2008.



149. SoundPLAN noise software v 7.4. GmbH. March 2015.
150. French Civil Aviation Authority. *Activité des aéroports français Année 2011: Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Direction générale de l'aviation civile.* French. 2012: 169.
151. Aviation and the Environmental Noise Directive: an analysis of difficulties and gaps in the implementation. SISOM 2007 and Homagial Session of the Commission of Acoustics. Bucharest 29–31 May.
152. Ollerhead J. B., Rhodes D. P., Viinikainen M. S., Monkman D. J. & A. C. Woodley 'Dutch model of aircraft noise «R&D REPORT 9842 : *The UK Civil Aircraft Noise Contour Model ANCON : Improvements in Version 2*». 1999.
153. Noise Mapping in the EU: Models and Procedures, Gaetano Licitra Editor CRC Press Taylor & Francas Group. 2013. 412 p.
154. Olsen H., Granoien I., Liasjo K. Single Event Aircraft Noise Prediction by NORTIM. *The 29 th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering : 27-30 August 2000.* Nice. France. 2000. P. 46–56.
155. Bouter B., van der Ploeg Adviesbureau Peutz, Associes B.V. Aircraft noise management in the Netherlands vs. limited prediction capabilities of causal aircraft calculation models. *The 2001 International Congress and Exhibition on the Noise Control Engineering.* The Hague. The Netherlands. 2001 August 27–30. 2001. P. 78–86.
156. Thomann, G., Bütikofer, R. : FLULA2 – ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. *Technische Programmdokumentation.* Version 2. EMPA Nr.840'143/513.1933. Dübendorf (CH). Oktober 2001.
157. Картышев О. А., Запорожец А. И. Метод расчета контуров авиационного шума. Москва : ФГУП ГосНИИ ГА, ЗАО ЦЭБ ГА. 2008. 20 с.
158. Основи акустичної екології. / В.С. Дідковський та ін.. Кіровоград : ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. 520 с.
159. Zaporozhets O., Tokarev V., Attenborough K. Aircraft Noise: Assessment, Prediction and Control. *Glyph International. Taylor and Francis.* 2011. 480 p.

160. Kasar V., Pawar A. A Novel Approach to Electromagnetic Interference Shielding for Cell Phones. *International Journal of Science and Research*. 2014. Vol. 3. P. 1869–1872.

161. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения. / Лыньков Л.М. и др. *Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники* : Докл. НАН Беларуси 2004 год. № 3. С. 152–164.

162. Панова О.В. Захист працюючих від впливу електромагнітних полів екрануванням : дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / ДУ «Нац. НДІ пром. безпеки та охорони праці» Держ. служби гірничого нагляду та пром. безпеки України і НАН України. Київ, 2014. 151 с.

163. Bhattacharjee S. Protective Measures to Minimize the Electromagnetic Radiation. *Electronic and Electric Engineering*. 2014. Vol. 4. P. 375–380.

164. Электромагнитный экран с керованими захисними властивостями : пат. 74857 Україна : МПК G12B17/00 ; заявл. 12.05.2012 ; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.

165. Singh J. Computer Generated Energy Effects on Users and Shielding Interference. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2015. Vol. 3. P. 10022–10027.

166. Gliva V., Panova O., Voloshkina O. Methodological principles of electromagnetic screens application for public protection from electromagnetic field and radiation. *Environmental Problems*. Vol. 1. № 1. 2016. P. 69-72.

167. Демский Д. В., Ларишев М. А. Расчет эффективности экранирования неоднородных экранов. *Технологии ЭМС*. 2011. № 2. С. 55–56.

168. Демский Д. В., Фомина И. А., Марченко М. В. Автоматизация расчета эффективности экранирования. *Технологии ЭМС*. 2013. № 1(44). С. 44–54.

169. Electric, magnetic and high frequency properties of screen printed ferrite-ferroelectric composite thick films on alumina substrate / Patil N., Velhal N. V., Pawar R., Puri V. *Microelectronics International*. 2015. Vol. 32(1). P. 25–31.

170. Зотов И. С. Исследование электродинамических характеристик композитных материалов с регулярными структурами : автореф. дис. на

здобуття наук. ступеня канд. ф.-м. наук : 01.04.07. / Челябинский государственный университет. Челябинск, 2011. 18 с.

171. Демский Д. В. Метод расчета эффективности экранирования для неоднородных электромагнитных экранов : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.14 / Нац. исследов. ун.-т «Высшая школа экономики». Москва, 2014. 114 с.

172. ДБН А. 2.2-1-2003. Склад і вміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд. [Чинний від 01.01.03]. Київ : Держбуд України. 24 с. (Державні будівельні норми України).

173. Маслов М. Ю., Сподобаев М. Ю., Сподобаев Ю. М. Электромагнитный мониторинг мегаполиса. *Труды НИИР*. 2013. № 4. С. 1–6.

174. Графкина М.В., Свиридова Е. Ю. Экологический мониторинг и повышение электромагнитной безопасности урбанизированных территорий вблизи линий электропередач. *Государственное управление ресурсами*. Спецвыпуск. 2013. С. 149–185.

175. Довбыш В. Н. Технология регионального контроля природной среды по фактору электромагнитного излучения объектов энергетических систем : дис. ... д-ра. тех. наук : 05.11.13 / Поволжский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. Самара. 2010. 317 с.

176. Моррис Д. Моделирование электромагнитных полей – как выбрать лучший метод. *Электроника: Наука. Технология. Бизнес*. № 3(00117). 2012. С. 124–129.

177. Kuchuk G., Kovalenko A., Svyrydov A., Kharchenko V., Chapter 8. Improving Big Data Centers Energy Efficiency: Traffic Based Model And Method. PP. 161-183. *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications* : монографія. Springer International Publishing Switzerland. 2019. Vol. 171. Studies in Systems, Decision and Control, 604 p.

178. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach. *Jones and Bartlett Publishers*. 2009. 872 p.

179. Оптимизация электрофизических процессов для создания отечественных технологий изготовления высоконадежных кабелей на напряжения до 330 кВ с твердой полимерной изоляцией / А. А. Щерба та ін. *Праці ІЕД НАНУ*. 2009. Вип 23. С. 137–146.

180. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств. *Техническая электродинамика*. 2015. № 2. С. 3–15.

181. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике : монографія. Київ : ІЕДН НАНУ, 2011. 255 с.

182. Щерба А. А., Резинкина М. М. Моделирование и анализ электрических полей энергетических объектов : монографія. Київ : Наукова думка, 2008. 248 с.

183. Степанов А. Н. Моделирование внешнего магнитного поля трехфазной электрической машины. Ученые записки : *Комсомольского-на-Амуре ГТУ*. 2011. № III-1(7). С. 13–20.

184. Заблодский Н. Н., Филатов М. А., Грицюк В. Ю. Численное моделирование электромагнитных полей в полифункциональных электромеханических преобразователях с полым перфорированным ротором. *Електротехніка і електромеханіка*. 2012. № 1. С. 25–27.

185. Єгорова О. Ю., Мальцев О. Ю. Аналіз сучасного стану повітряних ліній та визначення шляхів підвищення їх надійності. *Системи обробки інформації*. 2010. Вип. 5. С. 35–38.

186. Комплексне моделювання системи автоматичного регулювання частоти та потужності в динамічних режимах роботи ОЕС України / О. В. Кириленко та ін. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 6. С. 44–50.

187. Белицын И. В. Получение и анализ экспериментальных данных электрического поля воздушной линии электропередачи. *Ползуновский вестник*. 2010. № 4. С. 96–104.

188. Магнитные поля воздушных и кабельных линий электропередачи: нормирование, расчет, проектирование / А. М. Абдурахманов и др. *Безопасность в техносфере*. 2014. № 2. С. 52–63.

189. Розов В. Ю., Реуцкий С. Ю., Пилюгина О. Ю. Метод расчета магнитного поля трехфазных линий электропередачи. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 11–13.

190. Метод синтеза замкнутых систем активного экранирования магнитного поля воздушных линий электропередачи / Б. И. Кузнецов и др. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 8–10.

191. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Автоматическое управление внешним магнитным полем технических объектов. *Технічна електродинаміка*. 2011. №1. С. 11–18.

192. Гетьман А. В. О нормировании уровня магнитного поля с помощью мультипольных моментов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. № 5. С. 7–10.

193. Глива В. А. Принципи моделювання просторових розподілів електромагнітних полів багатьох джерел у робочих приміщеннях. *Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво»*. 2009. Вип. 18. С. 130–135.

194. Моделирование электромагнитного поля в помещениях жилых домов, расположенных вблизи линий электропередачи / Розов В. Ю., Гринченко В. С., Пелевин Д. Е., Чунихин К. В.. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 3. С. 6–8.

195. Левченко Л. О. Формування сучасних підходів до моделювання і прогнозування динаміки шкідливих факторів виробничого середовища. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2012. Вип. 23. С. 78–84.

196. Розов В. Ю., Пелевин Д. Е., Реуцкий С. Ю. Оптимизация параметров систем компенсации стационарных искажений геомагнитного поля в помещениях. *Технічна електродинаміка*. 2009. № 5. С. 11–16.

197. Розов В. Ю., Левина С. В. Моделирование статистического геомагнитного поля внутри помещений современных жилых домов. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 8–10.

198. Галак С. С., Павлик В. М., Безверха А. П. Електромагнітний фон базових станцій систем рухомого зв'язку і напрямки його зниження. *Гігієна населених місць*. 2012. Вип. 60. С. 204–207.

199. Галак С. С. Гігієнічна оцінка електромагнітного випромінювання, що створюється базовими станціями та мобільними телефонами стандарту DCS-1800. *Гігієна населених місць*. 2014. Вип. 64. С. 171–182.

200. Агарышев А. И., Власов В. Г., Куклин В. Л. Анализ измеренных и рассчитанных напряженностей поля радиоволн УКВ диапазона. *Вестник иркутского государственного технического университета*. 2009. № 4. С. 189–192.

201. Мордачев В. И. Электромагнитная нагрузка на территорию, создаваемая абонентскими станциями сотовой связи. *Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2012. № 7(69). С. 25–33.

202. Мордачев В. И. Электромагнитная нагрузка на территорию в неоднородной радиоэлектронной обстановке. *Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2012. № 8(70). С. 23–31.

203. Мордачев В. И., Свистунов А. С. Необходимый и достаточный уровень мощности электромагнитного излучения базовых станций сети GSM. *Доклады белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2013. № 7. С. 44–50.

204. Kasar V., Pawar A. A Novel Approach to Electromagnetic Interference Shielding for Cell Phones. *International Journal of Science and Research*. 2014. Vol. 3. P. 1869–1872.

205. Singh J. Computer Generated Energy Effects on Users and Shielding Interference. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2015. Vol. 3. P. 10022–10027.

206. Magnetorheological elastomers with efficient electromagnetic shielding. / Sedlacik M., Mrlik M., Babayan V., Pavlinek V. *Composite Structures*. 2016. Vol. 135. P. 199–204.

207. Коваленко В. В., Тихенко О. М., Левченко Л. О Екранування електромагнітних полів локальних джерел. *Системи озброєння і військова техніка*. 2016. № 3. С. 64–68.

208. Aircraft and Noise Performances (ANP) Database. URL: <http://www.aircraftnoisemodel.org> (дата звернення: 14.05.2019).

209. ECAC/CEAC Doc 29 «Report on Standard Method of Computing Noise Contours Around Civil Airports». 4<sup>th</sup> Edition: Vol. 1. 7 December 2016. 104 p.

210. Society of Automotive Engineers: Procedure for the Calculation of Aircraft Noise in the Vicinity of Airports. SAE AIR-1845. 1986.

211. Hughes R., Filippone A. Flyover noise measurements and simulation for a turboprop aircraft. *Inter Noise : Noise control for quality of life*. Innsbruck, September 15-18, 2013, Austria. P. 1-10.

212. Society of Automotive Engineers: Procedure for the Calculation of Aircraft Noise in the Vicinity of Airports. SAE AIR-1845. 2014. 37 p.

213. Kenneth J. Plotkin. Analysis of Acoustic Modeling and Sound Propagation in Aircraft Noise Prediction. NASA/CR-2006-214503 Wyle Laboratories. Arlington. Virginia. September 2006.

214. Comparison of INM profiles and measured flight profiles at Gardermoen. Idar L N Granøien, et al. SINTEF Report STF40 A02032. 2002.

215. Darren Rhodes. Data used in noise monitoring and modelling. Environmental Research and Consultancy Department. Civil Aviation Authority. ERCD Report 0306. 2015.

216. Динамика полёта самолёта / А. В. Ефремов и др. . Москва : «Машиностроение», 2011. 776 с.

217. Баяндина Т. А., Кочян А. Г. Моделирование режимов полёта самолёта. Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королёва, 2012. 30 с.

218. Балакин В. Л., Лазарев Ю. Н. Динамика полёта самолёта. Устойчивость и управляемость продольного движения. Самара : СГАУ, 1999. 48 с.

219. Нормы летной годности гражданских самолетов. Авиационные правила, часть 23 (АП-23). Москва: Межгосударственный авиационный комитет, 2000. 155 с.

220. Бехтир В. П., Ржевский В. М., Ципенко В. Г. Практическая аэродинамика самолета Ту-154М. Москва : Воздушный транспорт, 1997. 288 с.

221. Rhodes D. P. The Sensitivity of Noise in the Community to Changes in Aircraft Design Parameters and Operating Practices. London : Loughborough University, 1998. 420 p.

222. ISO 1996-1:2003(E) Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise. Basic quantities and assessment procedures. Part 1. 2003. 32 p.

223. ISO 3891:2014. Acoustics – Procedure for describing aircraft noise heard on the ground. 2014. 24 p.

224. ECAC.CEAC Doc 29, 4th Edition, Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, Vol. 2: Technical Guide ECAC.CEAC. 2016. 139 p.

225. Aircraft Noise Measurements at Gardermoen Airport / Storeheier S. Å. et al. *Sintef Report*. 2001. 55 P.

226. Comparison of INM profiles and measured flight profiles at Gardermoen / Idar Granøien et al. *SINTEF Report STF40 A02032*. 2002.

227. Глива В. А., Левченко Л. О., Паньків Х. В. Основні напрями робіт з моніторингу електромагнітного навантаження. *Безпека людини у сучасних умовах* : зб. матеріалів IV Міжнар. наук.-метод. конф. НТУ "ХПІ". Харків : 6–7 груд. 2012, С. 131–134.

228. Electromagnetic load on the airport staff and basic methods of its reducing / Glyva V.A., Kovalenko V. V., Kychata N. N., Levchenko L. A. *Aviation in the XXI-*



*st century* : Proceedings The Sixth world congress. September 23–25, 2014. Vol. 2. P. 5.2.14–5.2.18.

229. Глива В. А., Теренчук С. А., Перельот Т. М. Моделі і методи розрахунку магнітних полів електротехнічного обладнання промислових будівель. *Техніка будівництва*. 2013. № 30. С. 70–73.

230. Кирпанев А. В., Лавров В. Я. Электромагнитное поле: Теория идентификации ее применение : Москва : Вуз. кн., 2012. 278 с.

231. Здановський В. Г., Глива В. А., Левченко Л. О. Загальні підходи до моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання. *Проблеми охорони в Україні*. 2014. Вип. 27. С. 18–24.

232. Перельот Т.М. Моніторинг та нормалізація рівнів низькочастотних електромагнітних полів у виробничих умовах: дис. ...канд.техн.наук: 05.26.01 / Держ. служба гірн. нагляду та пром. безпеки України, Держ. установа «Нац. НДІ пром. безпеки та охорони праці». Київ, 2017. 145 с.

233. ДСанПін 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів: [Чинний від 2003- 01-04]. Київ : МОЗ України, 2003. 16 с. (Державні санітарні норми України).

234. Измеритель напряженности поля промышленной частоты ПЗ-50. Паспорт. Санкт-Петербург : ТПО ЕвроСтандарт, 2001. 16 с.

235. Пат. 22961 Україна МПК G01R29/08, G01H17/08. Автоматизований комплекс контролю рівнів електромагнітних полів та звукового тиску / В.А. Глива, Л.О. Левченко, Г.Д. Потапенко. Заяв. 02.03.2007. Опуб. 25.04.2007. Бюл. № 5.

236. Zaporozhets O., Levchenko L., Sidko O. The evaluating the ecological state of the airport. *International Symposium on Sustainable Aviation 2017*. Abstract Book. 10-13 September, 2017. Kiev. Ukraine. P.73. URL: <http://issasci.org/issa2017>.

237. Левченко Л.О., Карпенко С.Г., Шпак А.О. Заходи мінімізації еколого небезпечного впливу діяльності авіаційного транспорту. *Економічна безпека держави: стратегія, енергетика, інформаційні технології* : монографія / за ред. С. О. Лук'яненко, Н. В. Караєвої. Київ : Тамподек ХХ, 2014. С. 136–142.

238. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України. 1999. 34 с. (Державні санітарні норми).

239. Глива В. А., Левченко Л. О., Євтушок О. Я. Сучасні підходи до зниження рівнів шуму поблизу підприємств з неперервним циклом виробництва. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2011. Вип. 20. С. 223–228.

240. Левченко Л. О., Глива В. А., Євтушок О. Я. Моделювання розповсюдження авіаційного шуму поблизу аеропортів та його впливу на оточуюче середовище. *Теорія і практика будівництва*. 2010. № 6. С. 25–29.

241. Левченко Л.О., Запорожець О.І., Глива В.А., Шпак А.О. Система моделювання авіаційного шуму у зоні аеропорту. *Економічна безпека територіально-виробничих комплексів: енергетика, екологія, інформаційні технології* : монографія / за ред. С.О. Лук'яненка, Н.В. Караєвої. Київ: «МП Леся», 2015. С. 211–217.

242. Левченко Л.О. Концептуальний підхід до побудови системи моніторингу авіаційного шуму. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2015. Вип. 2 (34). С. 120–123.

243. Левченко Л.О. Моделювання шумового навантаження, утворюваного повітряними суднами. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2015. Вип. 3 (35). С. 170–173.

244. Левченко Л.О. Сучасний стан нормативно-правового забезпечення оцінювання рівнів авіаційного шуму. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 9 (146). С. 208–212.

245. Левченко Л.О. Огляд програмного забезпечення з моделювання авіаційного шуму. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*: III Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 вересня 2016 р.: Херсон, 2016. С. 221–225.

246. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Оцінювання шумового впливу від повітряних суден в районі аеропорту. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ. 2017. Вип. 1/2017 (102). С. 121–128.

247. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Удосконалення складової оцінювання авіаційного шуму для випадку його випромінювання у задній сектор. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ. 2017. Вип. 2/2017 (103). С. 54–63.

248. Zaporozhets O., Levchenko L., Zbrozhek V. Considerations to assess accurately the aircraft noise level in rearward. *Aviation in the XXI-st century: The Seventh world congress*, September 19–21, 2016: Kyiv, 2016. P. 946–949.

249. Zaporozhets O., Levchenko L. Accuracy and Adequacy of Aircraft Noise Assessment Around the Airports. *Proceedings of International Symposium on Sustainable Aviation 2017, International Symposium on Sustainable Aviation 2017*. Kyiv, Ukraine 10–13 September, P. 103–110. (Google Scholar, ProQuest Advanced Technologies).

250. Zaporozhets O., Levchenko L. Detailed flight operation data for accurate aircraft noise assessment. *Авіація у XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології: VIII Всесвітній конгрес, 10–12 жовтня 2018 р.: Київ, 2018*. С. 740–744.

251. Aerospace Material Specification 5662M. *SAE International Journal of Aerospace*. № 7. 2004. P. 11.

252. Draft Aerospace Recommended Practice ARP 4721: Monitoring Noise from Aircraft Operations in the Vicinity of Airports. *SAE International Journal of Aerospace*. № 9. 2006. P. 50.

253. Instruction to Calculate Noise Protection Areas (AzB and ECAC). *Noise Control Engineering Journal*. № 58(4): 455.2008, BEnz. Springer-VDI-Vergal GmbH. 2008. P. 195a.

254. Thomas Schenk. Basis of Calculation for Engine Test Runs. Federal Environment Agency. Umweltbundesamt. 2013. P. 95.

255. Expansion of the Frankfurt Airport. Documents to the plan approval proceedings, Report G 10.1, Part B. *Examination of the noise caused by taxiing and ground noise. Planungsgemeinschaft BeSB*, October 31, 2006. Munich. 2006. 110 p.

256. IMAGINE – Improved Methods for the Assessment of the Generic Impact of Noise in the Environment. *AEA Tecnology Rail BV: Report IMA10TR-040423 AEATNL 32*, October 14, 2004: Netherland, 2004. 100 p.

257. Christopher Menge, Nicholas Bradley, Miller Robert. Attachment E: Noise Analysis of Taxi Queuing Alternatives for Centerfield Taxiway at Logan International Airport. *HMMH Report No. 300280.006*. HARRIS MILLER MILLER & HANSON INC. 2006. 54 p.

258. Myck Thomas, Berthold Vogelsang. Calculation of Aircraft Noise Countours in Germany. *International Conference on AcousticsNAG/DAGA*. Rotterdam. 2009. P. 13.

259. Myck Thomas, Vogelsang Berthold. Calculation Noise Exposure in Germany. *24-th International Congress on Sound and Vibratuion, 23–27 July 2017*. London. 2017. P. 1–6.

260. Enhanced Modeling of Aircraft Taxiway Noise—Scoping. [J. Page et al.]. *ACRP Web Report 9*. ACRP Project 11–02 Task 08. Washington, DC. 2009.

261. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Моделювання рефракції при поширенні звуку на відкритому повітрі. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ. 2017. Вип. 3/2017 (104). С. 106–113.

262. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Сідько О.С. Вплив ефекту рефракції у моделі поширення шуму, 19–21 квітня 2017 р.: Київ, 2017. С. 28.1–28.4.

263. Knut Waagan. Numerical prediction of long-range sound propagation – parametric uncertainty and atmospheric models. *Norwegian Defence Research Establishment (FFI)*. 2014. 24 p.

264. Vladimir E., Ostashov D., Wilson K. Acoustics in Moving Inhomogeneous Media, Second Edition. *CRC Press Taylor & Francis Group*. 2015. 541 p.

265. Lamancusa J. Noise Control. Outdoor Sound Propagation. Review of Hemispherical Sound. *Pennsylvania State University, USA*. 2009. 19 p.

266. Attenborough K. Benchmark cases for outdoor sound propagation models. *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. 1995. № 97 (1). P. 173–191.

267. Salomons Eric M. Computational atmospheric acoustics. *Springer-Science+Business Media, B.V.* 2001. 335 p.

268. Attenborough K., Kai Ming Li. Ground effect for A-weighted noise in the presence of turbulence and refraction. *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. 1997. №. 102 (2). P. 1013–1022.

269. L'Espérance A. Heuristic model for outdoor sound propagation based on an extension of the geometrical ray theory in the case of a linear sound speed profile. *Applied Acoustics*. 1992. Vol. 37. P. 111–139.

270. Daigle G.A. Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves above a finite impedance boundary. *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. 1979. № 65(1). P. 45–49.

271. Kai Ming Li. On the validity of the heuristic ray-trace-based modification of the Weyl-Van der Pol formula. *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. 1993. № 93 (4). P. 1727–1735.

272. Ögren M. Multi reflected rays in a refracting atmosphere. Nord 2000. Progress report, SP Technica INote 1999:28. *Physics and Electrotechnics*. Borås, Sweden. 1999. P. 25–40.

273. Investigation of calculation models and methods for aircraft noise propagation effects. *Report for the 1-st stage: Improving prediction models for noise footprint calculations in a part of sound propagation and installations effects in operating conditions*. Kyiv. 2002. 78 p.

274. Hidaka T., Kageyama K., Masuda S. Sound Propagation in the Rest Atmosphere with Linear Sound Velocity Profile. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*. 1985. Vol. 6. № 2. P. 117–125.

275. L'Espérance A. Modalisation de la propagation des ondes sonores dans un environnement naturel complexe. *PhD thesis*. Sherbrooke University, Canada. 1992. Vol. 55(08). Section: B. P. 3538–3545.

276. Embleton T.F., Thiessen G.J., Piercy J.E. Propagation in Inversion and Reflections at the Ground. *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. 1976. Vol. 59. № 2. P. 128–142.

277. Parkin P.H., Scholes W.F. The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground at Hatfield. *J. Sound Vib.* 1965. № 2(4). P. 353–374.

278. Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports. *4th Edition – 2016*. Vol. 1, Part 1 – Applications Guide. ECAC.CEAC. Doc 29. 2016. 106 p.

279. Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports. *4th Edition – 2016*. Vol. 3, Part 1 – Reference Cases and Verification Framework. ECAC.CEAC. Doc 29. 2016. 36 p.

280. Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports. *4th Edition – 2016*. Vol. 2, Part 1 – Data tables. ECAC.CEAC. Doc 29. 2016. 15 p.

281. EUROCONTROL: Seven-Year Forecast February 2015. Flight Movements and Service Units 2015–2021. EUROCONTROL, 2015. 84 p.

282. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Сідько О.С. Методичний підхід щодо оцінювання шумового навантаження від літаків у зоні аеропорту. *Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві: VI Міжнародна науково-практична конференція, 25–27 травня 2017 р.:* Луцьк. 2017. С. 155–158.

283. Левченко Л.О., Запорожець О.І., Сідько О.С. Дослідження екологічного стану аеропорту. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика: IV Міжнародна науково-практична конференція, 14–16 вересня 2017 р.:* Херсон, 2017. С. 356–359.

284. NMPlot Screen Captures. Gainesville, United States. 2003. URL: <http://wasmerconsulting.com/nmplot.htm>.

285. Sherman Gary. Quantum GIS. Workflow guide. Paperbask. Victorian, BC. 2007. 339 p.

286. Sherman Gary. The PyQGIS Programmer's Guide. Extending QGIS with Python. Paperbask. Locate Press. 2014. 200 p.

287. Левченко Л.О., Сідько О.С. Можливості геоінформаційних технологій. *Людина, природа, техніка у XXI столітті: IV Міжнародна науково-практична конференція, 17–18 листопада 2016 р.* Збірник матеріалів. Полтава : ФООП О.І. Кека, 2016. С. 34–35.

288. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Сідько О.С. Методичний підхід щодо оцінювання шумового навантаження від літаків у зоні аеропорту. *Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві: VI Міжнародна науково-практична конференція, 25–27 травня 2017 р.: Луцьк, 2017. С. 155–158.*

289. Левченко Л.О., Запорожець О.І., Сідько О.С. Дослідження екологічного стану аеропорту. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика: IV Міжнародна науково-практична конференція, 14–16 вересня 2017 р.: Херсон, 2017. С. 246–249.*

290. Левченко Л.О., Сідько О.С. Застосування гіс-технології для візуалізації результатів моделювання поширення авіаційного шуму. *Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. Вип. 2 (48). С. 120–125.*

291. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Вlyukher В. Застосування ГІС-платформи в умовах модернізації аеропорту. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика: V Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 вересня 2018 р.: Херсон, 2018. С. 257–262.*

292. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Оцінювання впливу авіаційного шуму в районі аеропорту з використанням ГІС-технології. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: III Міжнародна науково-практична конференція, 14 вересня 2018 р.: Львів, 2018. С. 177.*

293. Левченко Л.О., Перельот Т.М. Дослідження рівнів електромагнітних полів повітряних ліній електропередач та їх нормування. *Містобудування та територіальне планування. 2014. Вип. 53. С. 275–279.*

294. Левченко Л.О., Глива В.А., Ходаковський О.В., Кружилко В.О. Нормування рівнів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. *Безпека людини у сучасних умовах: VIII Міжнародна науково-методична конференція та 115-ї Міжнародна конференція EAS, 8–9 грудня 2016 р. НТУ «ХП», ГО «СФБЖДЛ». Харків, 2016. С. 346–350.*

295. Левченко Л.О. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. *Системи обробки інформації*. 2016. Вип. 1. С. 29–37.

296. Левченко Л.О., Ходаковський О.В., Колумбет В.П. Застосування моделювання поширення електромагнітних полів для зниження їх впливу на людей і довкілля. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2016. Вип. 2 (38). С. 129–132.

297. Пат. 97546 Україна: МКП G01R29/00. Пристрій контролю гармонічного складу електричного струму промислової частоти. Глива В.А., Здановський В.Г., Перельот Т.М. Опубл. 25.03.15, Бюл. № 6.

298. Пат. 118352 України: МПК H05K 7/00, G12B 17/02. Пристрій екранування магнітного поля лінійного струмонесучого джерела. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Ходаковський О.В., Кружилко В.О. Заявл. 19.12.2016; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15.

299. Правила улаштування електроустановок : 2010: Чинний від 1 січня 2007 р. Мінпаливенерго України. 2010. 736 с.

300. Левченко Л.О., Глива В.А., Карпенко С.Г. Просторові розподіли електромагнітних полів кабельних ліній електропередачі. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ. 2016. Вип. 1/2016 (33). С. 55–67.

301. Глива В.А., Левченко Л.О., Паньків Х.В. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання. *Управління розвитком складних систем*. 2014. Вип. 20. С. 174–179.

302. Здановський В.Г., Глива В.А., Левченко Л.О. Загальні підходи до моделювання просторових розподілів електромагнітних полів електротехнічного обладнання. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2014. Вип. 27. С. 18–24.

303. Левченко Л.О., Сукач С.В., Коновалова О.В. Моделювання просторових розподілів магнітних полів електричних машин для визначення зон безпечного перебування персоналу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук : КрНУ. 2014. Вип. 6 (89). Ч. 1. С. 27–31.



304. Глива В.А., Ніколаєв К.Д., Левченко Л.О. Дослідження напруженостей зовнішніх полів різнорозмірного електротехнічного обладнання. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. № 5 (45). С. 9–11.

305. Коваленко В.В., Тихенко О.М., Левченко Л.О. Екранування електромагнітних полів локальних джерел. *Системи озброєння і військова техніка*. 2016. № 3 (147). С. 64–68.

306. Левченко Л.О. Визначення та прогнозування електромагнітної обстановки у приміщеннях методом моделювання. *Гігієна населених місць*. 2012. Вип. 60. С. 186–191.

307. Халмурадов Б.Д., Левченко Л.О., Глива В.А., Перельот Т.М. Електромагнітна безпека та електромагнітна сумісність технічних засобів. *Системи обробки інформації*. 2015. Вип. 12 (137). С. 66–68.

308. Попов И.И., Тесленко О.И., Тесленко Н.И. Анализ состояния нормативной базы по обеспечению электромагнитной безопасности в Украине. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2015. Вип. 2. С. 124–131.

309. Глива В.А., Левченко Л.О., Теренчук С.А. Моделювання просторових розподілів електромагнітних полів множинних джерел. *Новітні комп'ютерні технології: VII Міжнародна науково-технічна конференція, 1–17 вересня 2010 р.: Севастополь, 2010. С. 34–35.*

310. Glyva V.A., Levchenko L.O. Determination and forecast of electromagnetic environment in the airport area using modelling method. *Safety in Aviation and Space Technologies: The Fifth World Congress: AVIATION IN THE XXI-st CENTURY, September 25–27, 2012: Kyiv, NAU, 2012. Vol. 2, P. 4.3.1–4.3.4.*

311. Левченко Л.О., Глива В.А. Технічне та методичне забезпечення моделювання та прогнозування електромагнітної обстановки у приміщеннях. *Гігієна населених місць*. 2013. Вип. 61. С. 222–225.

312. Запорожець О.І., Клапченко В.І., Левченко Л.О., Панова О.В. Сучасні підходи до моделювання просторових змін геомагнітного поля у будівлях та спорудах. *Управління розвитком складних систем*. 2015. Вип. 21. С. 133–138.

313. Environmental noise guidelines for the European Region. *World Health Organization*. 2018. 160 p.

314. Clark C. Aircraft noise effects on health. *The London School of Medicine*. 2015. 32 p.

315. Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental sound – Part 1: Basic Quantities and assessment procedures, International Standard ISO 1996-1:2016. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2016.

316. Guski R. Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise Health*. 1999. Vol. 1(4). P. 45–56.

317. Job R.F.S. Community response to noise: A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. 1988. Vol. 83. P. 991.

318. Guski R. Who Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017. № 14. 1539 p.

319. Aircraft Noise and Annoyance: Recent findings CAP 1588. Published by the Civil Aviation Authority. 2018. 57 p.

320. Scheuch K., Griefahn B., Jansen G., Spreng M. Evaluation criteria for aircraft noise. *Rev Environ Health*. 2003. Vol. 18 (3). P. 185–201.

321. Vader R. D. Noise annoyance mitigation at airports by non-acoustic measures. Aviation Noise Impacts Research Roadmap. Organization Plan and Project reference. D/R&D 07/026. 2007. 48 p.

322. Katja Wirth, Mark Brink, Christoph Schierz. Aircraft Noise Annoyance at Different Times of Day. *Joint Congress CFA/DAGA*. 2004. Vol. 1. P. 1267–1268. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228790089>.

323. Schultz T.J. Synthesis of social surveys on noise annoyance. *The Journal of the Acoustical Society of America (JASA)*. 1979. № 65. P. 840–849.

324. Miedema H.M., Oudshoorn C.G. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environ Health Perspectives*. April, 2001. № 109 (4). P. 409–416.

325. Guski K., Schreckenberg D., Schuemer R. WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Annoyance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017. № 14. P. 1–39.

326. Griefahn and Scheuch, Protection goals for residents in the vicinity of civil airports. *Noise Health*. 2004. Vol. 6, №. 24. P. 51–62.

327. Davidson S. Spinning the wheel of empowerment, community planning. *Planning*. April, 1998. P. 14–15.

328. Asensio C., Gasco, L., de Arcas G. A Review of Non-Acoustic Measures to Handle Community Response to Noise around Airports. *Current Pollution Reports*. September, 2017. Vol. 3, № 3. P. 230–244.

329. Zaporozhets O., Levchenko L., Blyukher B. Risk methodology as a tool for aircraft noise assessment and control. *Авіація у XXI столітті – Безпека в авіації та космічні технології: VIII Всесвітній конгрес, 10–12 жовтня 2018 р.: Київ, 2018. С. 7–66–7–71.*

330. Terminology on Disaster risk Reduction. *UN-ISDR*: веб-сайт. URL:

<https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>. (дата звернення 11.09.2009).

331. Blyukher B., Zaporozhets O. Hazard Analysis And Risk Assessment Methodology: Generalized Model. *Encyclopedia of Energy Engineering and Technology*. 2016. P. 1–15.

332. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Блюхер Б. Ризик орієнтований підхід у забезпеченні екологічної безпеки авіатранспортної галузі. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи: III Міжнародна науково-практична конференція, 14 вересня 2018 р.: Львів, 2018. С. 174–176.*

333. Запорожець О.І., Левченко Л.О., Блюхер Б. Застосування ризик-методології для оцінювання впливу шуму повітряного судна поблизу аеропорту.

*Сталий розвиток — XXI століття: управління, технології, моделі. Дискусії 2018* : колективна монографія. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національний університет «Києво-Могилянська академія», Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Донецький державний університет управління, Вища економіко-гуманітарна школа. Електронне видання. ISBN: 978-83-63649-17-3. Київ, 2018. С. 531–538.

334. Запорожец О. І., Blykher В., Левченко Л. О. Ризик – орієнтований підхід як доповнення до збалансованого підходу управління авіаційним шумом. Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика: матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф., 11-14 вересня 2019 р. Херсон: ХДМА, 2019. С. 133–136.

335. O. Zaporozhzhets, L. Levchenko, K. Synylo. Risk and exposure control of aviation impact on environment. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol.3. No 3. PP. 17 – 24. (*Index Copernicus*).

336. Sharon Mahony. Airport Noise Modelling – Overflow. Noise Policies in Airport Regions : Proceeding of Conference. Paris : Airport Regions, November 15th, 2017. P. 27–29.

337. Ivan de Lipinay. Verification of Aircraft Noise and Performance Data. Noise Policies in Airport Regions : Proceeding of Conference. Paris : Airport Regions, November 15th, 2017. P. 25–26.

338. ДСТУ ISO9612:2008. Акустика. Настанови щодо вимірювання та оцінювання експозиції шуму у виробничому середовищі. Київ : Держспоживстандарт, 2013. 19 с.

339. Про затвердження Авіаційних правил України «Вимоги до експлуатанта аеродрому щодо просторового зонування території навколо аеродрому з умов впливу авіаційного шуму» : наказ Державної авіаційної служби України від 26 березні 2019 р. № 381. Офіційний вісник України. № 39. 20 с.

340. Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової

забудови : наказ Міністерства охорони здоров'я від 22 лютого 2019 р. № 463. 6 с.  
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0281-19>.

341. ДСТУ ІЕС/ISO31010:2013 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 74 с.

342. Berglund B., Lindval T., Schwela D. Guidelines For Community Noise. World Health Organization, Geneva. 1999.

343. Schultz, T. J. Synthesis of Social Surveys on Noise Annoyance *J. Acoust. Soc. Am.* 1978. 64(2). P. 377–405.

344. Miedema H.M., Oudshoorn C.G. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. *Environmental Health Perspectives*. 2001. Apr. 109(4). P. 409–416.

345. I SO 1996-1 (2016). *Acoustics—Description, measurement and assessment of environmental sound—Part 1: Basic Quantities and assessment procedures*, International Standard ISO 1996-1:2016 (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2016).

346. Zaporozhets O., Blyukher B. Risk Methodology to Assess and Control Aircraft Noise Impact in Vicinity of the Airports. Chapte 2 in “Sustainable Aviation”, Editors T. Hikmet Karakoc, C. Ozgur Colpan, Onder Altuntas, Yasin Sohret, 2018, Springer Nature Switzerland AG, P. 37-79.

347. Birkmann J., ed. Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies. United Nations, University Press, Tokyo, New York, Paris. 2006. 524 p. ISBN 9280811355.

348. Lazarus R., Folkman S. Stress, Appraisal and Coping. New York : Springer, 1984. 456 p.

349. Compas B., Connor-Smith J., Saltzman H., Thomsen A., Wadsworth M. Coping with stress during childhood and adolescence: Problems, progress, and potential in theory and research. *Psychological Bulletin*. 2001. Vol. 127. N 1. P. 87–127.

350. Cramer P. Defense mechanismus and Coping strategies: What's the difference? *American Psychologist*. 2000. June. P. 638–646.

351. Schaefer C., Gorsuch R. Situational and personal variations in religious coping. *Journal for the Scientific Study of Religion*. 1993. Vol. 32. № 2. P. 136–47.
352. Lazarus R., Folkman S. *Stress, Appraisal and Coping*. New York : Springer, 1984. 456 p.
353. Pearlin L., Schooler C. The Structure of Coping. *The Journal of Health and Social Behavior*. 1999. Vol. 19. № 1. P. 2–21.
354. Risk Norman. Modeling towards a 4th generation aircraft noise management program. *Noise Policies in Airport Regions : Proceeding of Conference*. Paris : Airport Regions, November 15th, 2017. P. 41–44.
355. Глива В.А., Левченко Л.О., Яровой М.В. Інноваційні методи забезпечення неперервного моніторингу параметрів довкілля. *Проблеми науки*. 2008. Вип. 6. С. 28–31.
356. Левченко Л.О., Глива В.А., Клапченко В.І., Репко А.Ю. Інформаційний супровід екологічного моніторингу. *Науково-технічна інформація*. 2009. Вип. 1. С. 16–19.
357. Левченко Л.О., Халмурадов Б.Д., Грицаюк А.М. Інформаційний супровід моніторингу стану довкілля у надзвичайних ситуаціях. *Містобудування і територіальне планування*. 2013. Вип. 49. С. 279–284.
358. Левченко Л.О., Лук'яненко С.О., Карпенко С.Г., Глива В.А. Оцінка економічної складової екологічних досліджень. *Науково-технічна інформація*. 2009. Вип. 3. С. 7–9.
359. Левченко Л.О., Коваленко В.В., Осадчий Б.М. Методологія розрахункового визначення рівнів електромагнітних полів різномірних джерел. *Новини енергетики*. 2017. Вип. 8. С. 16–20.
360. Левченко Л.О., Панова О.В., Тихенко О.М., Ходаковський О.В. Методологія зниження рівнів електромагнітних полів в умовах переходу на міжнародні стандарти електромагнітної сумісності. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування: Зб. наук. праць*. Дніпро: ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». 2018. Вип. 105. С. 174–179.

361. Пат. 107696 Україна: МПК G01R 29/08. Спосіб визначення електромагнітного навантаження на середовище. Адаменко М.І., Дармофал Е.А., Коваленко В.В., Левченко Л.О. Опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.

362. Khalmuradov Batyr, Glyva Valentyn, Levchenko Larisa. Forecasting of electromagnetic load on the environment. *Narodna A Medzinarodna Bezpechost 2013: IV Medzinarodna Vedecka Konferencia, Zbornik vedeckych a odbornych prac: SLOVAKIA*, 2013. P. 268–274.

363. Запорожець О.І., Левченко Л.О. Засади електромагнітного моніторингу міста в умовах підвищення електромагнітного навантаження на довкілля. *Екологічна безпека та природокористування*. 2015. Вип. 17. С. 28–34.

364. Левченко Л.А. Система електромагнітного моніторинга города в условиях повышения электромагнитной нагрузки на окружающую среду. *Стратегия качества в промышленности и образовании: Сборник материалов XI Международной конференции, 5–12 июня 2015 г., Технический университет. Специальный выпуск международного научного журнала Acta Universitatis Pontica Euxinus: Варна, Болгария, 2015. Том 1. С. 346–351.*

365. Левченко Л.О. Нормування електромагнітного навантаження на довкілля населених пунктів та шляхи його вдосконалення. *Містобудування та територіальне планування*. 2015. Вип. 55. С. 241–248.

366. Левченко Л.О., Глива В.А., Ходаковський О.В., Кружилко В.О. Нормування рівнів електромагнітних полів повітряних ліній електропередачі. *Безпека людини у сучасних умовах: VIII Міжнародна науково-методична конференція та 115-ї Міжнародна конференція EAS, 8–9 грудня 2016 р.: НТУ «ХП», ГО «СФБЖДЛ», Харків, 2016. С. 346–350.*

367. Козловська Т.Ф., Сукач С.В., Левченко Л.О. Критерії впливу електромагнітних полів на організм людини при плануванні працезохоронних заходів. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. Київ: НТУУ «КПІ», ЗАТ «Техновибух». 2016. Вип. 31. С. 87–95.

368. Козловська Т.Ф., Сукач С.В., Левченко Л.О. Проблема оцінки і прогнозування впливу електромагнітних полів на фізіологічний стан людини в

умовах виробничих приміщень. *Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві – освіта, наука, практика*: III Міжнародна науково-практична конференція, 13–15 вересня 2016 р.: Херсон, 2017. С. 114–117.

369. Левченко Л.А., Перелёт Т.Н., Паньків К.В. Гармоники электрических токов промышленной частоты как источники магнитных полей и методы снижения их уровней. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2015. Вып. 1. С. 14–22.

370. Глива В.А., Перелёт Т.Н., Левченко Л.А. Электромагнитная обстановка и влияние на неё гармоник магнитного поля промышленной частоты. *Безпека людини у сучасних умовах*: Матеріали VI Міжнародної науково-методичної конференції, 4–5 грудня 2014 р.: Харків, 2014. С. 103–105.

371. Глива В.А., Ніколаєв К.Д., Колумбет В.П., Левченко Л.О. Методологія дослідження низькочастотних електромагнітних полів в умовах сталого розвитку технологій. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2017. Вип. 6 (46). С. 219–223.

372. Халмурадов Б.Д., Левченко Л.О., Глива В.А., Перельот Т.М. Проблеми узгодженості нормативної бази з електромагнітної сумісності та електромагнітної безпеки. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. Вип. 4 (21). С. 103–106.

373. Глива В.А., Левченко Л.О., Коваленко В.В., Осадчий Б.М. Екранування магнітних полів лінійних струмонесучих елементів об'єктів енергетики. *Новини енергетики*. 2017. Вип. 6. С. 28–31.

374. Пат. 58604 Україна: МПК G01L9/00. Пристрій контролю захисних властивостей електромагнітних екранів. Глива В.А., Левченко Л.О., Панова О.В., Азнаурян І.О., Подобєд І.М. Заяв. 15.03.2011; опубл. 11.04.2011, Бюл. № 7.

375. Пат. 90892 Україна: МПК G12B 17/00. Екрануючий комплект. Здановський В.Г., Левченко Л.О., Осадчий Д.Б., Паньків Х.В., Подобєд І.М. Опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

376. Пат. 112305 Україна: МПК G12B 17/00. Матеріал для екранування електромагнітних випромінювань. Глива В.А., Здановський В.Г.,



Коваленко В.В., Левченко Л.О., Тихенко О.М. Заявл. 10.06.2016; опубл. 12.12.2016, Бюл. № 23.

377. Glyva V., Kichata N., Levchenko L. Measures for electromagnetic safety of radiotechnical objects of civil aviation. *Aviation in the XXI-st century: The Seventh world congress*, September 19–21, 2016: Kyiv, 2016. P. 922–925.

378. Пат. 103339 Україна: МПК (2015.01) H05K 9/00 G12B 17/00. Електромагнітний екран з вибіркоvim поглинанням. Волошкіна О.С., Левченко Л.О., Панова О.В., Коваленко В.В., Перельот Т.М. Заявл. 24.06.2015; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 23.

379. Пат. 112161 Україна; МПК G12B 17/00. Поглинальний електромагнітний екран. Глива В.А., Коваленко В.В., Левченко Л.О., Матвєєва О.Л., Тихенко О.М. Заявл. 04.05.2016; опубл. 12.12.2016, Бюл. № 23.

380. Глива В.А., Левченко Л.О., Перельот Т.М. Просторові критерії екранування низькочастотних магнітних полів. *Управління розвитком складних систем*. 2015. Вип. 22. С. 158–164.

381. Glyva V., Kovalenko V., Levchenko L., Tykhenko O. Research into protective properties of electromagnetic screens based on the metal-containing nanostructures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3/12 (87). P. 50–55.

382. Glyva V., Podkopaev S., Levchenko L., Karaieva N., Nikolaiev K., Tykhenko O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B. Design and study of protective properties of electromagnetic screens based on iron ore dust. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1/5 (91). P. 10–17.

383. Glyva V., Lyashok J., Matvieieva I., Frolov V., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Khodakovskyy O., Khalmuradov B., Nikolaiev K. Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and sound proofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6. №. 5 (96). P. 54–61.

384. Пат. 138018, Україна МПК G12B 17/00. Шумозахисний та електромагнітний екран. Глива В.А., Левченко Л.О., Ніколаєв К.Д., Панова О.В.,

Тихенко О.М., Ходаковський О.В.; заявник та патентовласник: Глива В.А., Левченко Л.О., Ніколаєв К.Д., Панова О.В., Тихенко О.М., Ходаковський О.В. № u 2019 05577; заявл. 23.05.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.

385. Studying the shielding of an electromagnetic field by a textile material containing ferromagnetic nanostructures / Glyva V., Barabash O., Kasatkina N., Katsman M., Levchenko L., Tykhenko O., Nikolaiev K., Panova O., Khalmuradov B., Khodakovskyy O.. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No 10 (103). P. 26 – 31. (Scopus).

386. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range / V. Glyva, N. Kasatkina, V. Nazarenko, N. Burdeina, N. Karaieva, L. Levchenko, O. Panova, O. Tykhenko, B. Khalmuradov, O. Khodakovsky. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1. No 12 (103). PP. 40 – 47. (Scopus).

## **Додаток А**

Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження



# Комунальне підприємство Міжнародний аеропорт “Київ” (Жуляни)

Україна, 03036, м. Київ, Повітрофлотський пр. 79, Аеропорт “Київ” (Жуляни), телефон – (380 44) 3392677, факс – 2490136,  
E-Mail: ukkk@airport.kiev.ua, assistant@airport.kiev.ua, поточний рахунок – 260043011721 в ПАТ «Державний ощадний банк  
України» м. Києва, МФО – 300465, ІПН – 011315126653, номер свідоцтва – 200028163, код СДРПОУ – 01131514

## АКТ

про впровадження результатів наукового дослідження

Левченко Лариси Олексіївни щодо оцінювання акустичного навантаження в  
районі аеропорту

Цей Акт складено про те, що наукові дослідження Левченко Л.О. використані для моделювання та отримання контурів шуму, що дозволяє оцінити рівні шуму та встановити їх відповідність міжнародним і національним нормативним вимогам, визначити несприятливий вплив на оточуюче середовище.

Левченко Л.О. передано програмний комплекс, який дозволяє проводити постійний моніторинг акустичного навантаження в районі аеропорту. Цей програмний комплекс реалізовано з урахуванням методології документа ICAO DOC 9911 Керівництва щодо рекомендованого методу розрахунку контурів шуму навколо аеропортів, який є обов'язковим для фахівців з моделювання авіаційного шуму різних країн, та з використанням міжнародної бази акустичних та льотно технічних характеристик літаків Aircraft and Noise Performances Data base (ANP), яка є стандартом ICAO.

Розроблене програмне забезпечення дозволяє моделювати різні сценарії добового завантаження аеропорту щодо кількості зльотів та посадок типів повітряних суден, які експлуатуються, з урахуванням міжнародного критерію оцінювання шуму  $L_{Aeq}$  та вітчизняних нормативів -  $L_{Aeq}$  та  $L_{Amax}$ ; будувати контури шуму та оцінювати рівні шуму з використанням набору критеріїв країн Євросоюзу, а саме -  $L_{AeqD}$ ,  $L_{AeqN}$ ,  $L_{Aден}$ , SEL, EPNL для різних категорій літаків.

Таке програмне забезпечення в залежності від типової конструкції літака, типу встановлених двигунів, режимів їх роботи на окремих етапах руху літака та поширення звуку в умовах чинної експлуатації в аеропорту дозволяє:

- здійснювати контроль відповідності показників шуму встановленим законодавством вимогам;

- накопичувати об'єктивні статистичні дані щодо оцінювання рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту та його околицях;

- отримувати інформацію щодо визначення компенсації, платежів або штрафів за збитки, завдані шумом;

- отримувати прогностичні оцінки щодо подальшого розвитку та завантаження аеропорту;
- використовувати отримані дані про рівні шуму для планування і забудови земельних ділянок;
- визначати зонування території навколо аеропорту щодо виявлення несприятливих умов відповідно до перевищення нормативних значень рівнів шуму,
- запровадити експлуатаційні заходи під час зльоту і посадки повітряних суден,
- запровадити відповідну організацію повітряного руху з метою зменшення впливу авіаційного шуму та інших несприятливих екологічних факторів.

Виконане дослідження проводилось на безоплатній основі без будь-яких фінансових зобов'язань.

Технічний директор КП МА «Київ» (Жуляни)  
д.т.н., професор

«13» травня 2019 р.



А.В. Міщенко

Південної ЕС ДП «НЕК Укренерго» на ПС 330 кВ «Усатове» та поширено на ПС 330 кВ «Аджалик», «Арциз», «Новоодеська», «Подільська».

«10» \_\_\_\_\_ 2017р.

Директор технічний  
 Південної ЕС ДП «НЕК Укренерго»  
 Краєнянський



## АКТ

### Впровадження дисертаційного дослідження

**Левченко Лариси Олексіївни**

**з моделювання поширення електромагнітних полів  
розосереджених і локальних джерел**

Цей акт складено на підтвердження того, що результати дослідження Левченко Л.О. впроваджено у Південній ЕС ДП «НЕК Укренерго» на ПС 330 кВ «Усатове» та поширено на ПС 330 кВ «Аджалик», «Арциз», «Новоодеська», «Подільська».

Впровадження полягає у наступному:

На основі диспетчерської інформації щодо реальних середніх електричних струмів електроустаткування розташованого на відкритому розподільчому пристрої (ВРУ) 330 кВ ПС «Усатове» було розраховано індукції магнітних полів електроустаткування та визначені межі перевищення гранично допустимих рівнів поля.

На підставі розрахунків було визначено зони обмеження перебування людей поблизу електроустаткування.

Встановлені та промарковані попереджувальними знаками, маршрути переміщення обслуговуючого персоналу ПС її охорони.

Одночасно були проведені натурні вимірювання напруженості електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц, її гармонік та інтергармонік.

Вимірювання виконувались повіреними приладами ПЗ-50 та Spectran 5030.

За результатами вимірювань отримано рекомендації щодо місць перебування та шляхів пересування персоналу у межах відкритих розподільчих пристроїв.

У частині виробничих приміщень здійснено екранування внутрішніх поверхонь екрануючим матеріалом.

Контрольні вимірювання показали, що по маршрутах переміщення персоналу та усіх приміщеннях, де постійно перебуває персонал з експлуатації електротехнічного обладнання ВРУ 330Кв. ПС «Усадове», значення напруженості інтегрального електричного поля не перевищують 28 В/м, а індукції магнітного поля – 0,35 мкТл, що менше за гранично допустимий рівень для населення.

Інтегральне значення розраховувалось згідно ДСанПіН 3.3.6.096-2002 «Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів».

Впровадження виконано на безоплатній основі.

**Цей документ не є підставою для висунування фінансових претензій Південній ЕС.**

Начальник відділу експлуатації  
електричних підстанцій Південної ЕС



О.В.Остапенко

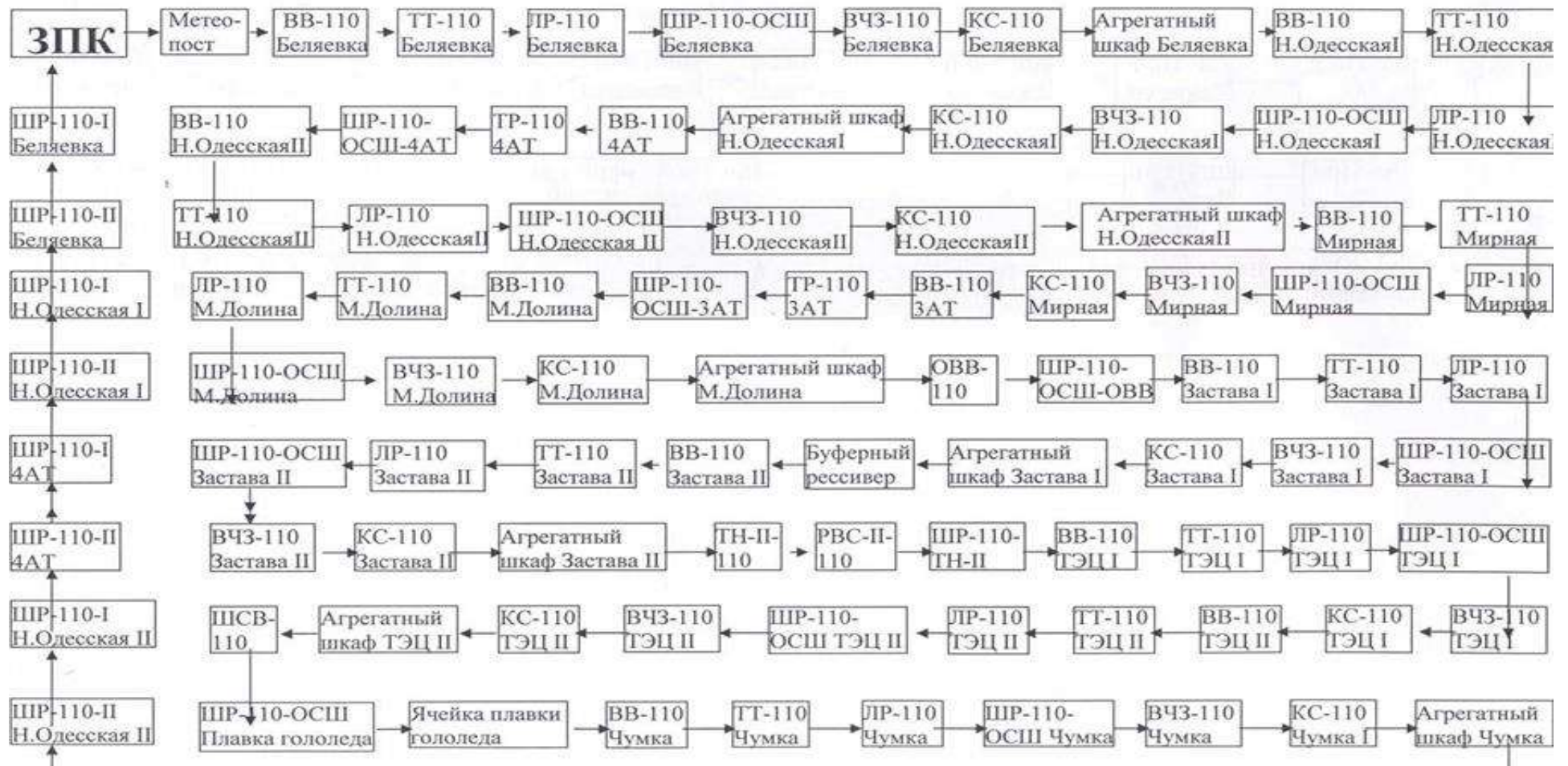
Додаток на 5 арк.

Маршрути пересування персоналу ПС по ВРУ 330 кВ,  
які розроблені на підставі проведених вимірів та  
розрахунків.

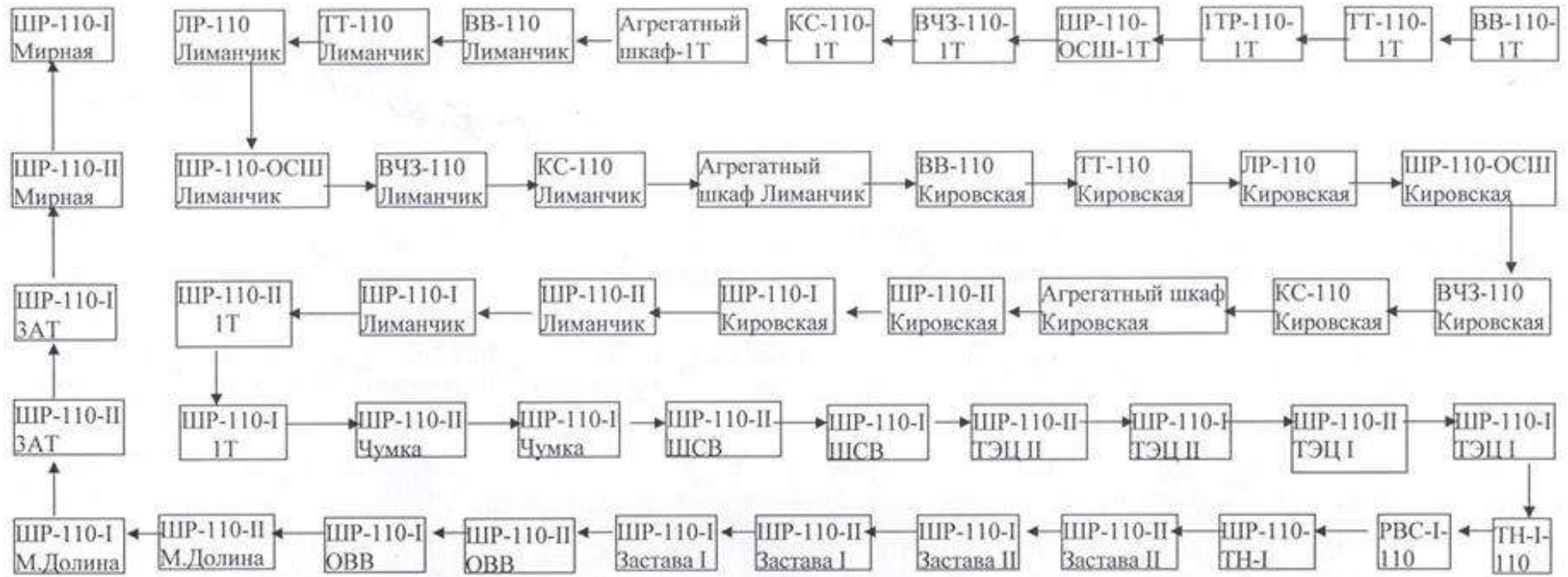
Начальник відділу експлуатації  
Електричних підстанцій Південної ЄС  
О.В.Остапенко

26.02.2017

### Маршрут обходу персоналом ПС «Усатове» ОРУ 110 кВ





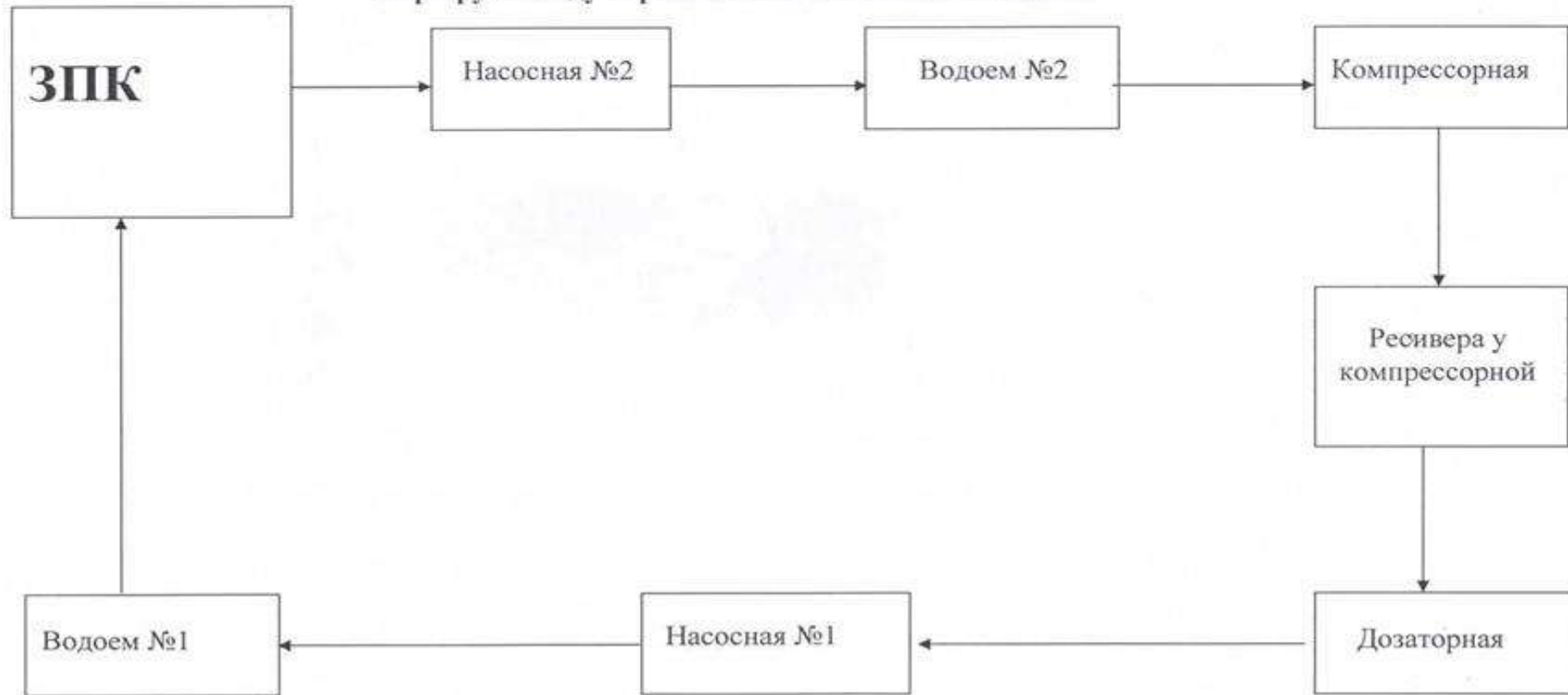


Затверджую:  
Начальник відділу експлуатації  
електричних підстанцій Південної ЄС  
О.В.Остапенко

026.02.2017

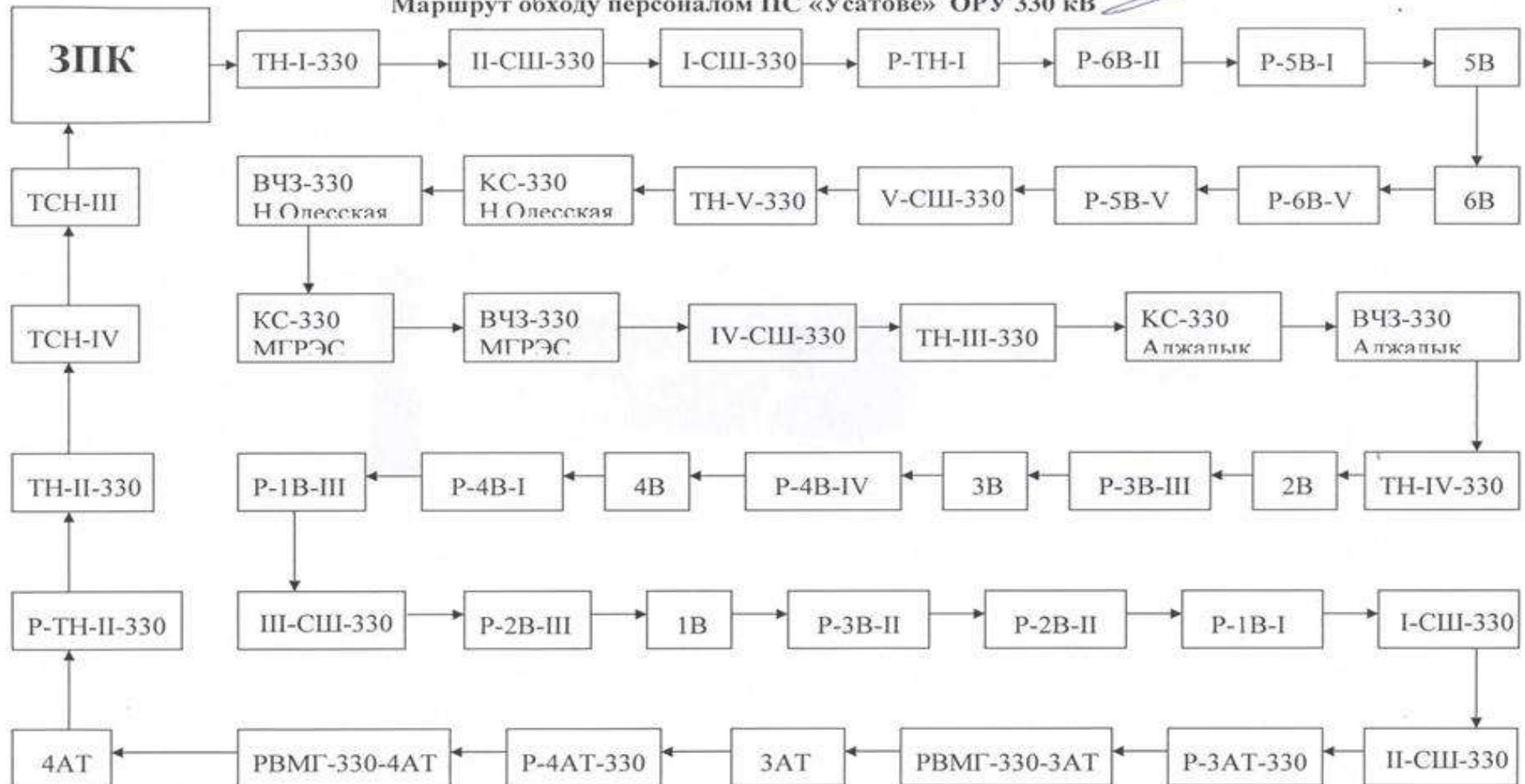
..

Маршрут обходу персоналом ПС«Усатове» насосных



Затверджую:  
 Начальник відділу експлуатації  
 електричних підстанцій Південної ЄС  
 О.В.Остапенко  
 26.10.2017.

Маршрут обходу персоналом ПС «Усатове» ОРУ 330 кВ



Затверджую:  
Начальник відділу експлуатації  
електричних підстанцій Південної ЄС  
О.В.Остапенко  
26.02.2017

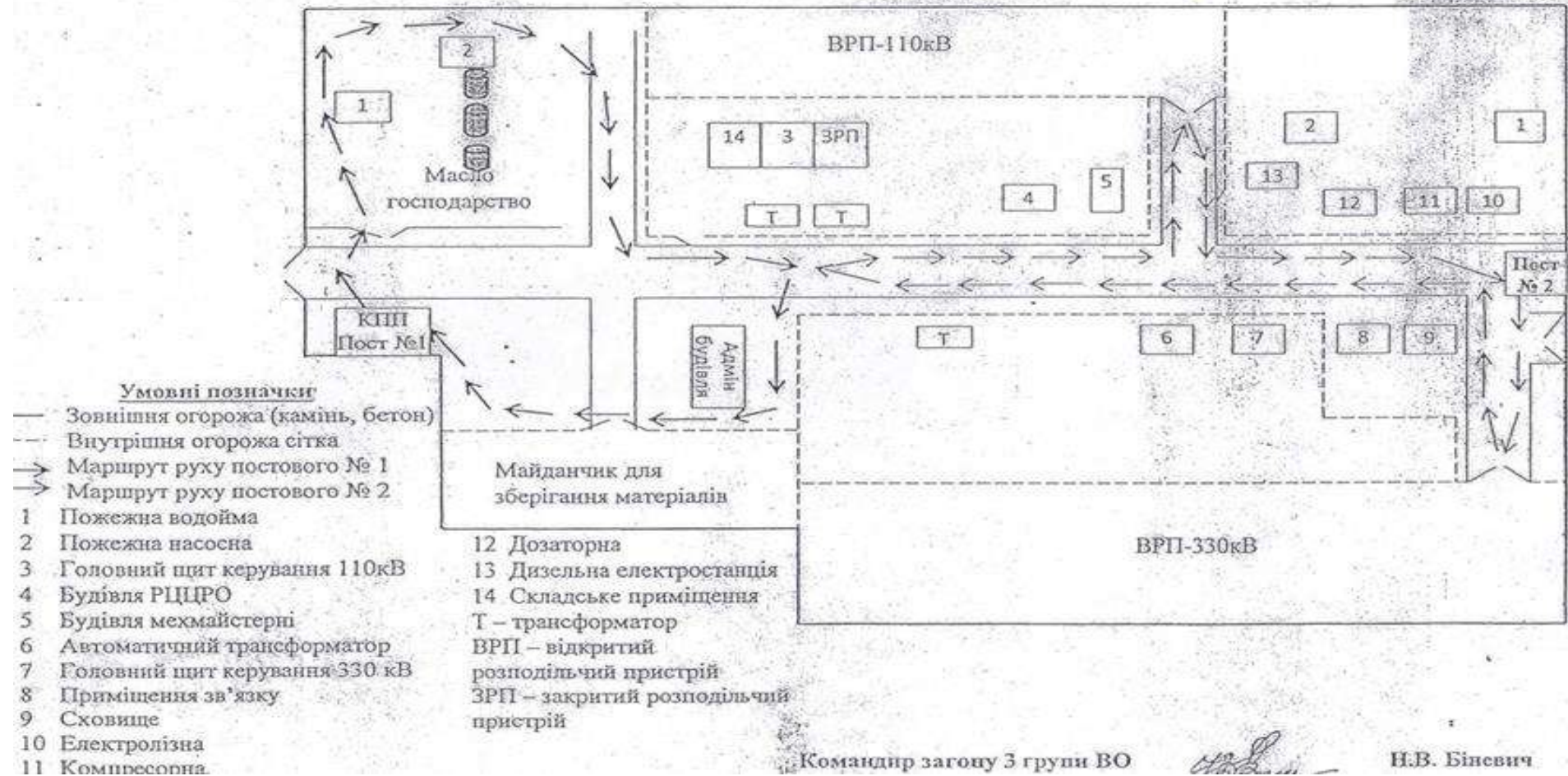
Маршрут обходу персоналом ПС «Усатове» реакторів та трансформаторів



## Схема організації охорони ПС 330 кВ «Усатове»

Затверджую:  
 Начальник відділу експлуатації  
 електричних підстанцій Інженерної СС  
 О.В. Остапенко

26.07.2019





м. Київ, вул. Мигнітогорська 5, к. 19, тел.; +38 044 383 87 44; моб.+38 097 954 39 21; +38 067 607 95 52

«11» грудня 2017 р.

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

дисертаційного дослідження Левченко Л.О. з моделювання просторових поширень електромагнітних полів розосереджених та локальних джерел

Цим Актом підтверджується, що результати дисертаційного дослідження Левченко Л.О. було використано Підприємством для розрахунку зон безпечного перебування і пересування персоналу та оптимізації розміщення електричного й електронного обладнання на виробничих площах.

Контрольні вимірювання щодо реальних рівнів магнітних полів проводилися повіреним вимірювачем напруженості електричного та магнітного поля промислової частоти ПЗ-50. Крім того, вимірювалися приладом ВЕметр – АТ рівні електричного та магнітного полів у смугах частот 5 Гц – 2 кГц та 2кГц – 400 кГц, нормованих для засобів обчислювальної техніки. Вимірювання показали, що магнітні поля навколо потужного електроприладу перевищують гранично допустимі рівні і розподіляються нерівномірно та зростають на певній відстані від агрегатів. На основі вихідних даних було проведено моделювання поширення магнітного поля у двох ортогональних площинах. У результаті було визначено місця мінімального значення рівнів магнітного поля промислової частоти, що було використано для визначення шляхів пересування працівників.

За результатами вимірювань у приміщеннях, які містять комп'ютерну техніку, було визначено місця перевищення нормативних значень на окремих робочих місцях. Вимірюваннями визначено ранжування технічних засобів, що перебувають в експлуатації за випромінювальними властивостями. За

допомогою представленого Левченко Л.О. програмного забезпечення було проведено моделювання розподілів напруженостей електричного і магнітного полів зазначених частотних смуг у площині постійного перебування людей. За результатами моделювання було проведено раціоналізацію розміщення технічних засобів, що дозволило нормалізувати рівні магнітних полів. Аналогічні роботи, на базі отриманих вихідних даних, було проведено на території трансформаторної підстанції та відкритого розподільчого пристрою. За результатами розрахунків було визначено і позначено відповідними знаками зону безпечного перебування та пересування персоналу.

Впроваджені роботи виконані на безоплатній основі.

Генеральний директор  
ТОВ «ЕКОТЕХЕНЕРГІЯ»



Гордійчук В.І.

**Додаток Б**

Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір



УКРАЇНА



**СВІДОЦТВО**  
про реєстрацію авторського права на твір

№ 75642

Комп'ютерна програма "Оцінювання рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту"

(вид, назва твору)

Автор(и) **Запорожець Олександр Іванович, Левченко Лариса Олексіївна, Сідько Олексій Станіславович**

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

*Дата реєстрації* 29.12.2017



**Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев**

## **Додаток В**

### **Інструкція користувача щодо оцінювання рівнів авіаційного шуму**

1. Запустити програму `xampp-control.exe`, у вікні встановити значення «Stop» для веб-серверу Apache та бази даних MySQL (рис. В.1):

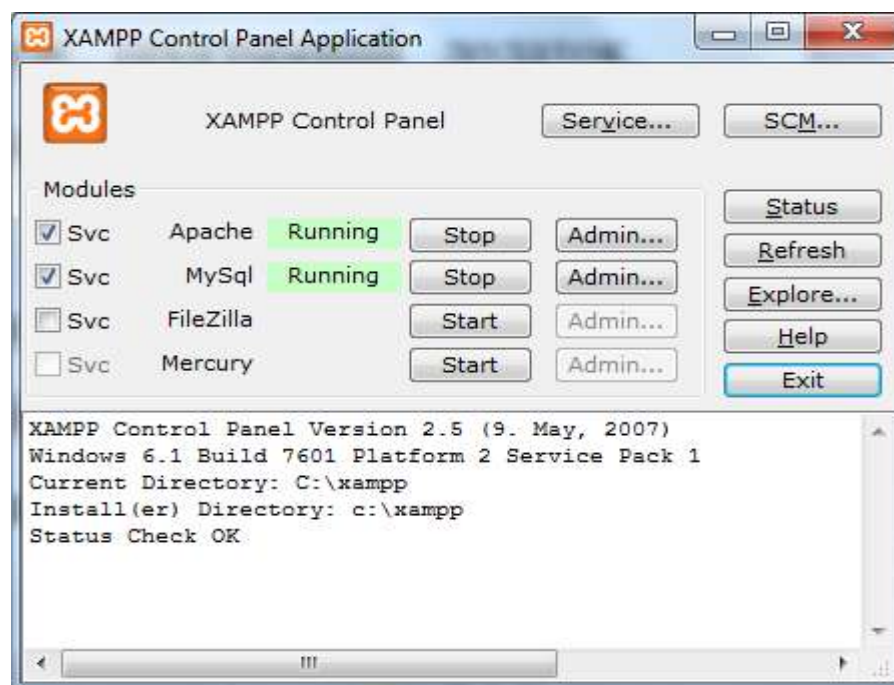


Рис. В.1. Вікно запуску веб-серверу та бази даних

2. Запустити додаток `MasterProject.exe` від імені адміністратора.

Програмний додаток завантажує головне вікно програми, яке складається з чотирьох вкладок. Автоматично відкривається перша вкладка.

Перші дві вкладки надають можливість введення вхідних даних. Друга вкладка також надає можливість запуску сценарій польоту для розрахунків та запуску побудову контуру шуму. Третя вкладка відповідає за виведення результуючої інформації користувачу на екран. Остання вкладка – відображення журналу сценаріїв.

Перша вкладка має назву *Airport*. Вона відповідає за введення усіх необхідних характеристик аеропорту. Головне вікно програми з першою вкладкою представлено на рис. В.2.

Рис. В.2. Головне вікно програми, вкладка *Airport*

Вкладка має поля для введення даних та два випадаючих списки, які згруповані в 4 групи : *Airport*, *Meteo*, *Runways*, *Tracks*.

Група полів *Airport* призначена для введення загальних характеристик аеропорту, зокрема: місто, назва аеропорту, кількість злітно-посадкових смуг, широта та довгота. Усі інші характеристики аеропорту автоматично витягуються з бази даних по ключу обраного аеропорту. Коли користувач обирає з випадаючого списку назву міста, у випадаючому списку назв аеропортів з'являються назви аеропортів обраного міста. Аналогічно, коли користувач обирає назву аеропорту, автоматично у відповідному полі з'являється кількість злітно-посадкових смуг.

Група полів *Runways* призначена для введення інформації про злітно-посадкові смуги, а саме: позначення злітно-посадкової смуги для правого, лівого торця, координати лівого та правого торця тощо.

Група полів *Tracks* забезпечує введення інформації щодо маршрутів польоту та розбиття їх на відрізки.

Група полів *Meteo* призначена для введення інформації щодо метеорологічних даних в аеропорту під час проведення сценарію (значення температури повітря у градусах Цельсія, атмосферний тиск в паскалях, вологість повітря у відсотках та швидкість вітру в метрах за секунду).

Друга вкладка має назву *Input*. У цій вкладці вводиться інформація про літаки, розрахункову сітку та безпосередньо формування сценарію. Вкладка має низку полів для введення, 4 випадаючих списки, вікно списку, індикатор виконання, таблицю та вісім кнопок, які також згруповані у чотири групи: *Events*, *Grid*, *Points* та *Units*. Головне вікно програми з другою вкладкою представлено на рис. В.3.

Група *Events* відповідає за формування списку подій сценарію.

Завдяки вікню списку та кнопок додавання, видалення та очистки записів, користувач має змогу сформувати список подій.

Для того, щоб додати новий запис, потрібно заповнити поля вводу та значення випадаючих списків, зокрема визначити модель літака, злітно-посадкову смугу, тип операції, траєкторію польоту, тип процедури, кількість однакових подій, ваговий коефіцієнт та час доби, після чого натиснути кнопку зі знаком “+”. Новий запис в конвертованому вигляді з'явиться у вікні списку.

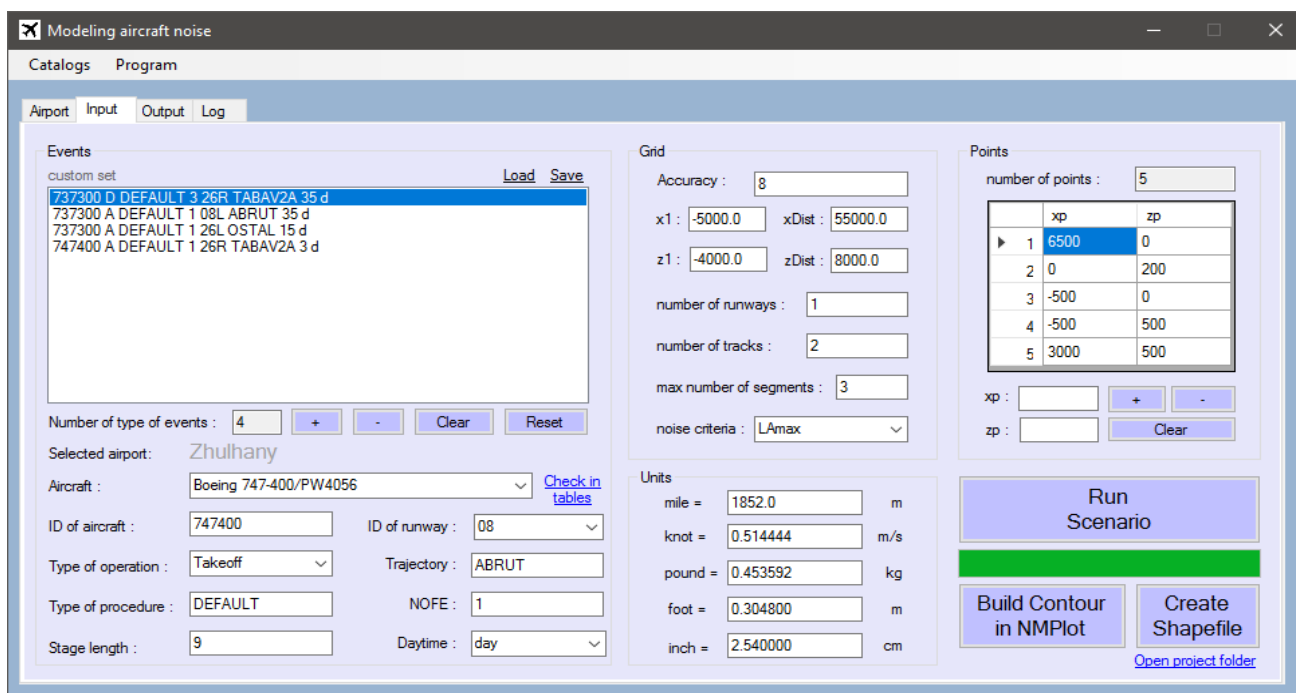


Рис. В.3. Головне вікно програми, вкладка *Input*.

Після того, як користувач обере значення моделі літака з випадуючого списку *Aircraft*, поле ідентифікатора літака *ID Aircraft* заповниться автоматично.

Розглянемо приклад конвертованого запису, що зазначено у вікні списку на рис. В.3.

Даний запис має вигляд: **747400 D DEFAULT 6 26R TABAV2A 3 d.**

Він означає, що літак з ідентифікатором 747400 (тобто Boeing 747-400/PW4056) злетить по процедурі за замовчуванням з ваговим коефіцієнтом 9 зі злітно-посадкової смуги 08R за траєкторією TABAV2A вдень і таких подій буде три. Розглянемо детальніше опис події:

- 747400 – ідентифікатор літака;
- D – тип події (D – зліт, A - посадка);
- DEFAULT – тип процедури;
- 6 – ваговий коефіцієнт;
- 26R – назва злітно-посадкової смуги;
- TABAV2A – траєкторія польоту;
- 3 – кількість таких подій;
- d – час доби (d – день, e – вечір, n - ніч).

Якщо користувач хоче видалити певний запис у вікні списку, він має обрати його у списку та натиснути кнопку зі знаком “-”. Обраний запис зникне з вікна списку. Якщо ж користувачу необхідно видалити одразу усі записи з вікна списку, достатньо натиснути кнопку «Clear». Вікно списку очиститься. Поле кількості подій редагується автоматично в залежності від того, скільки записів знаходиться у вікні списку.

*Група Grid* призначена для введення даних щодо розрахункової сітки (координати лівого нижнього вузла, ширина та довжина сітки), рівень точності розрахунків, кількість злітно-посадкових смуг, кількість маршрутів, кількість сегментів, а також критерій шуму, за яким в подальшому будуть розраховуватись рівні шуму.

*Група Points* використовується в тому випадку, коли користувач хоче дізнатись значення рівнів шуму в конкретних точках. Завдяки таблиці та кнопок

додавання, видалення та очистки записів, користувач має змогу сформувати список точок. Для того, щоб додати нову точку, необхідно заповнити значення координат  $x$ ,  $z$  та натиснути кнопку зі знаком “+”. Введений запис про точку буде доданий до таблиці.

Якщо користувач хоче видалити якусь точку, йому необхідно обрати її у таблиці та натиснути кнопку зі знаком “-”. Запис про цю точку буде видалений з таблиці. Якщо користувач хоче видалити усі точки з таблиці, йому необхідно натиснути кнопку “Clear”. Усі записи в таблиці будуть видалені. Поле *кількості точок* редагується автоматично в залежності від того, скільки записів знаходиться у таблиці. Якщо кількість точок дорівнює нулю, то під час обробки сценарію буде розрахований лише загальний контур шуму. Якщо кількість точок більше 0, користувач отримає додатково інформацію про значення рівнів шуму і в цих точках.

*Група Units* відповідає за переведення одиниць вимірювання (зазвичай ці значення статичні), а саме метри в милі, метри за секунду у вузли, кілограми в фунти, метри в фути та сантиметри в дюйми.

Окрім чотирьох груп є три кнопки – для запуску сценарію (Run Scenario), побудови контуру (Build Contour in NMPLOT), створення \*.shp - файлу (Create Shapefile). Доки сценарій не буде опрацьований, кнопка побудови контуру буде недоступною для користувача.

Процес обробки сценарію відображається за допомогою індикатора виконання. Приклад процесу обробки сценарію та заповнення індикатора виконання зображено на рис. В.4. Коли індикатор буде повністю заповнений, розрахунки завершуються і користувач отримує можливість отримати побудований контур шуму шляхом натискання на кнопку побудови контуру.



Рис. В.4. Головне вікно програми, вкладка Input, процес обробки сценарію

За допомогою програмного середовища NMPlot користувач системи має змогу отримати візуальне відображення контурів авіаційного шуму. Для цього після обробки сценарію необхідно натиснути кнопку *Build Contour in NMPlot*. Автоматично підключається середовище NMPlot, де в якості параметру передається створений після розрахунків \*.grd-файл. Вікно середовища NMPlot є незалежним від головного вікна програми. Воно продемонстроване на рис. В.5.

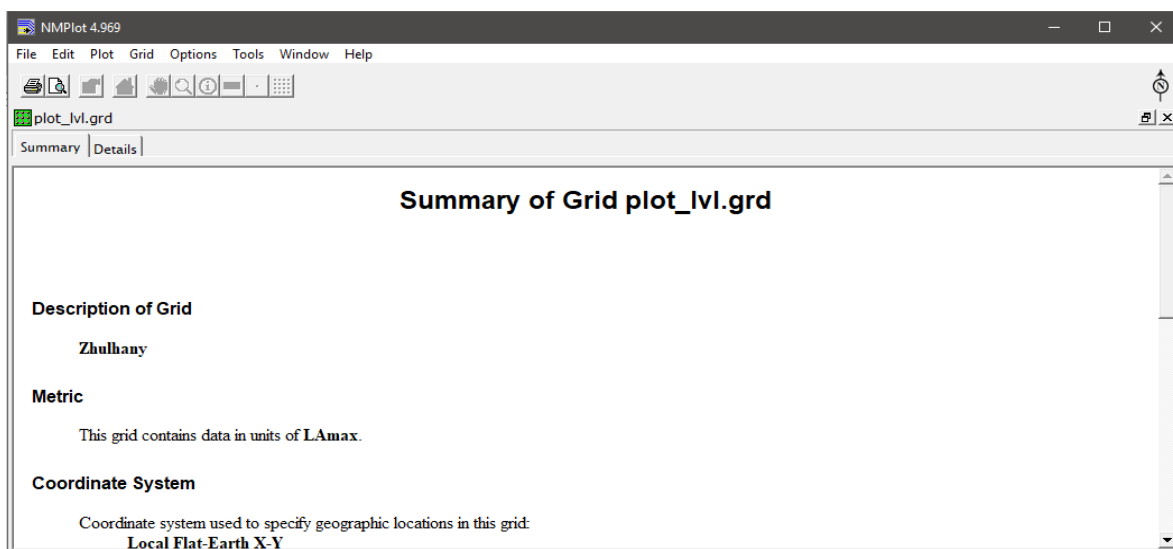


Рис. В.5. Вікно середовища NMPlot



У середовищі NMPLOT можна переглянути вихідну інформацію за розділами, з яких складається отриманий файл \*.grd, що є вхідним для даного середовища, а саме: опис координатної системи в метрах, місце розташування, дані аеропорту, характеристики злітно-посадкових смуг, інформація про лінії шляху, опис відрізків траєкторії, метод оцінки шуму, список пар розташувань та значення в точках розрахункової сітки. Для отримання цієї інформації користувачу необхідно перейти до вкладки “Details” головного вікна середовища (рис. В.6).

При натисканні на відповідний розділ на панелі в нижній частині вікна відобразиться відповідна інформація.

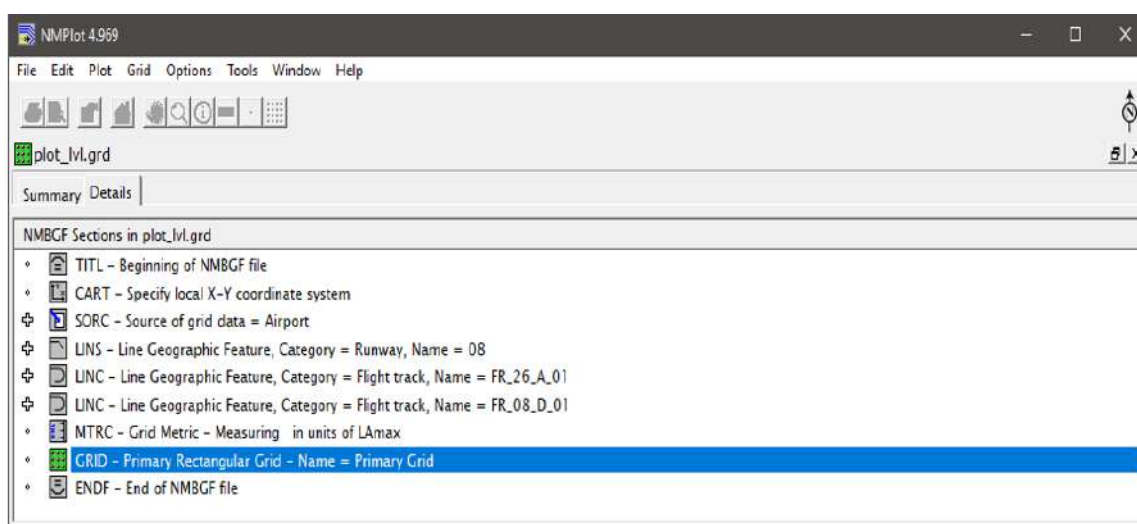


Рис. В.6. Перегляд інформації за розділами

Головною метою використання середовища NMPLOT є побудова контурів авіаційного шуму на основі розрахованих даних. Побудова контуру здійснюється на основі розрахованих координат по осі OX та OZ, а також значень розрахованого максимального або еквівалентного рівня шуму в кожній з отриманих точок. Отриманий контур можна масштабувати за допомогою колеса мишки.

Далі користувачу необхідно вибрати пункт меню *Grid* середовища NMPLOT та натиснути підпункт *Create Plot of This Grid*, обрати пункт меню *Plot*, підпункт *Options*. Далі необхідно обрати *Manually specify each contour level*, після цього обрати *Thick With Labels* та натиснути кн. *Apply* та *OK*.

Наступним кроком є робота у середовищі QGIS.

## Робота в QGIS - середовищі

### 1. Запустити Qgis - QGIS Desktop 2.18.20 (рис. В.7)

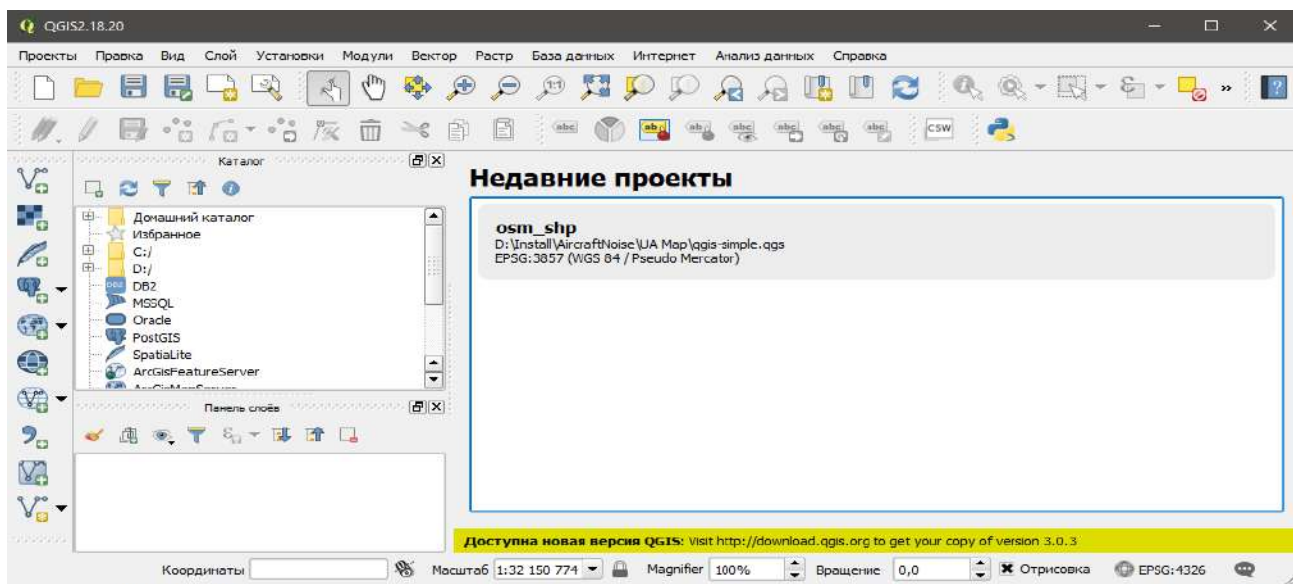


Рис. В.7. Середовище QGIS

Для роботи з платформою QGIS необхідно створити шейп-файл побудованого контуру шуму. Для цього треба натиснути у головному вікні програми на кн. **Create Shapefile (рис.2)**. У цьому файлі необхідно отриманий контур повернути на північ, для цього треба скоригувати кут повороту зображення, яке повинно чітко накладатися на злітно посадкові смуги аеропорту.

2. Відкрити карту України qgis-simple.qgs (більш вживана, рис. В.8). Qgis-mapnik – це дороги, qgis-mapnik-lc - більш детально.

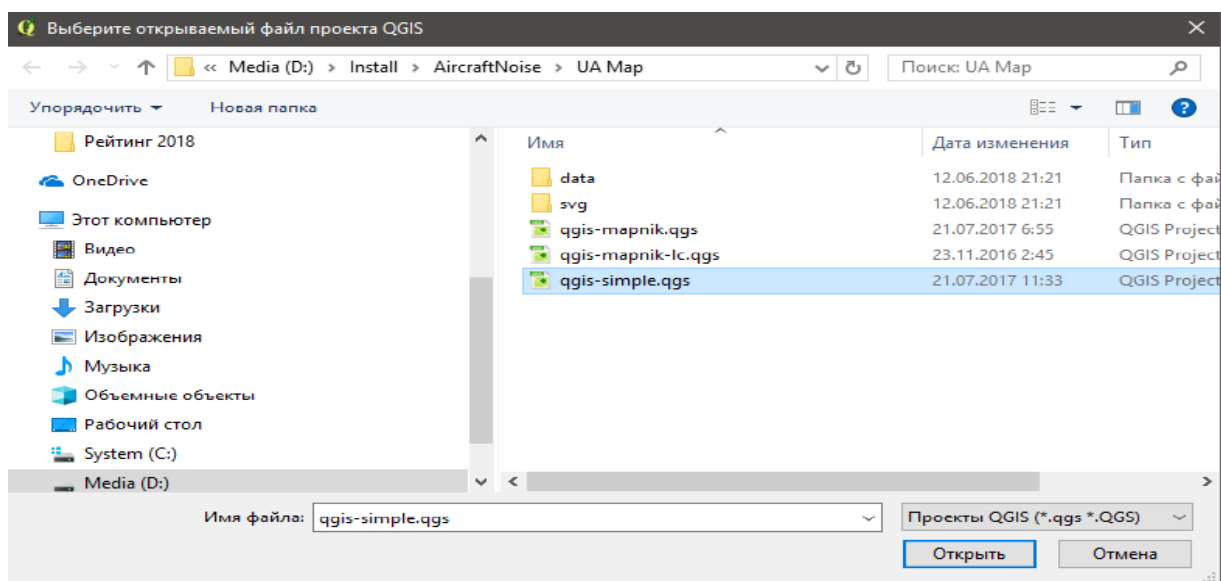


Рис. В.8. Вибір поточного проекту

3. Встановити plugin для карт: пункт Меню – Управление модулями (пошук OpenLayersPlugin – Установить, або перевірити що цей plugin підключений, рис. В.9).

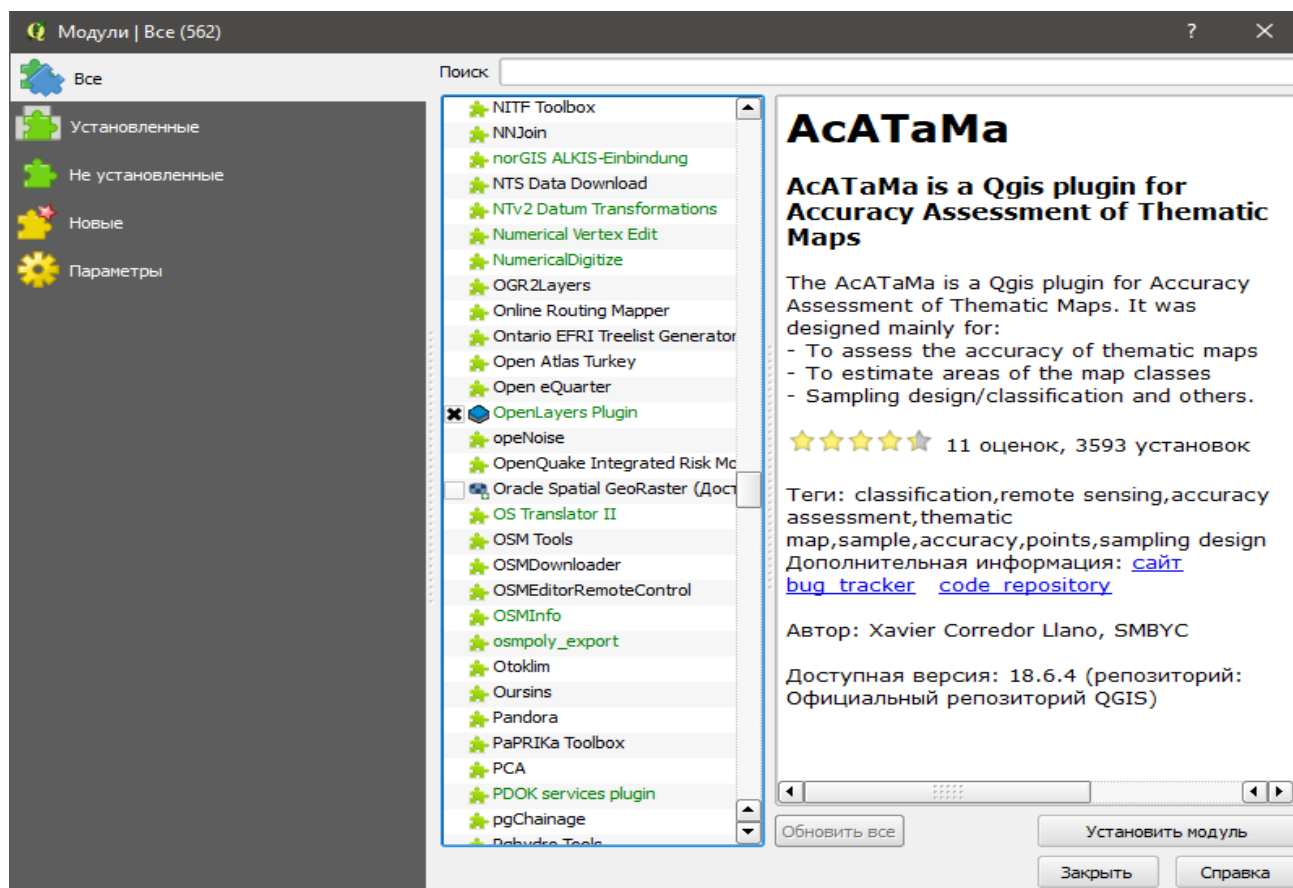


Рис. В.9. Вибір OpenLayersPlugin (або QuickMapServices)

Далі треба обрати карту: пункт меню *Интернет* – підпункт *OpenLayers Plugin* – *Google Maps* – *Google Streets*. Або *Google Maps* (далі *Google Hybrid*), або *Bing Maps* (*Bing Road*), можна вибрати іншу карту.

4. Для зображення отриманого контуру даних шейп-файл можна відкрити в QGIS натиснувши кнопку «Добавить векторный слой» на панелі інструментів (рис. В.10), або ж скористатися комбінацією клавіш **Ctrl + Shift + V**.

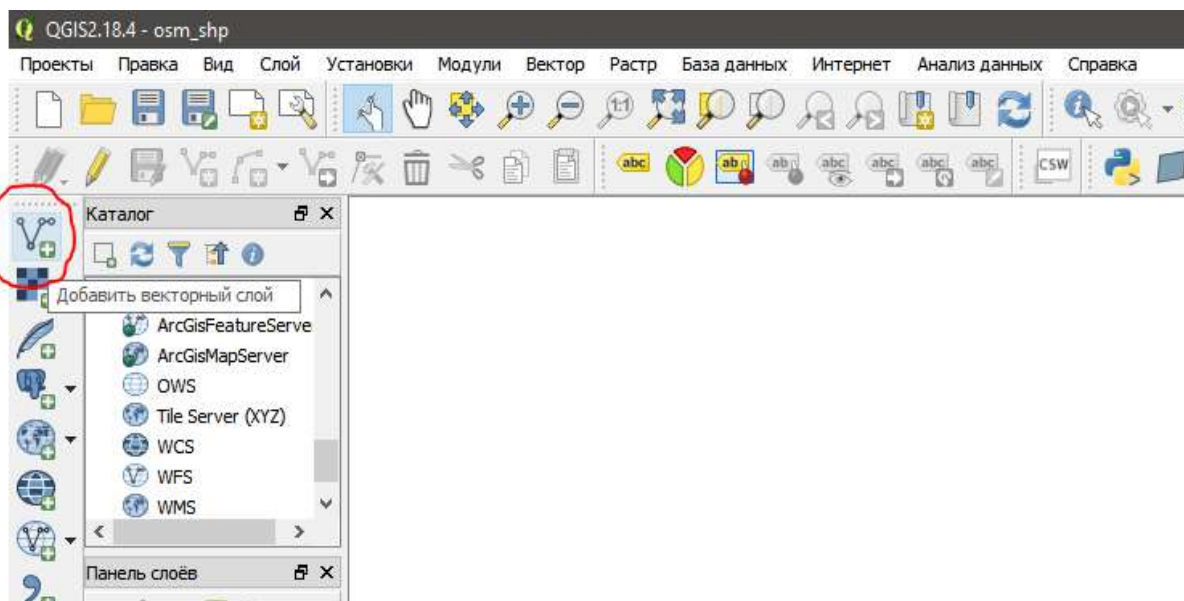


Рис. В.10. Додання векторного шару в середовищі QGIS

Для цього треба вказати шлях до файлу **plot\_lv1\_ContourLine\_Lines.shp**.

Це

D:\Install\AircraftNoise\masterprojectnew\bin\Debug\plot\shp\

**plot\_lv1\_ContourLine\_Lines.shp** (рис. В.11)

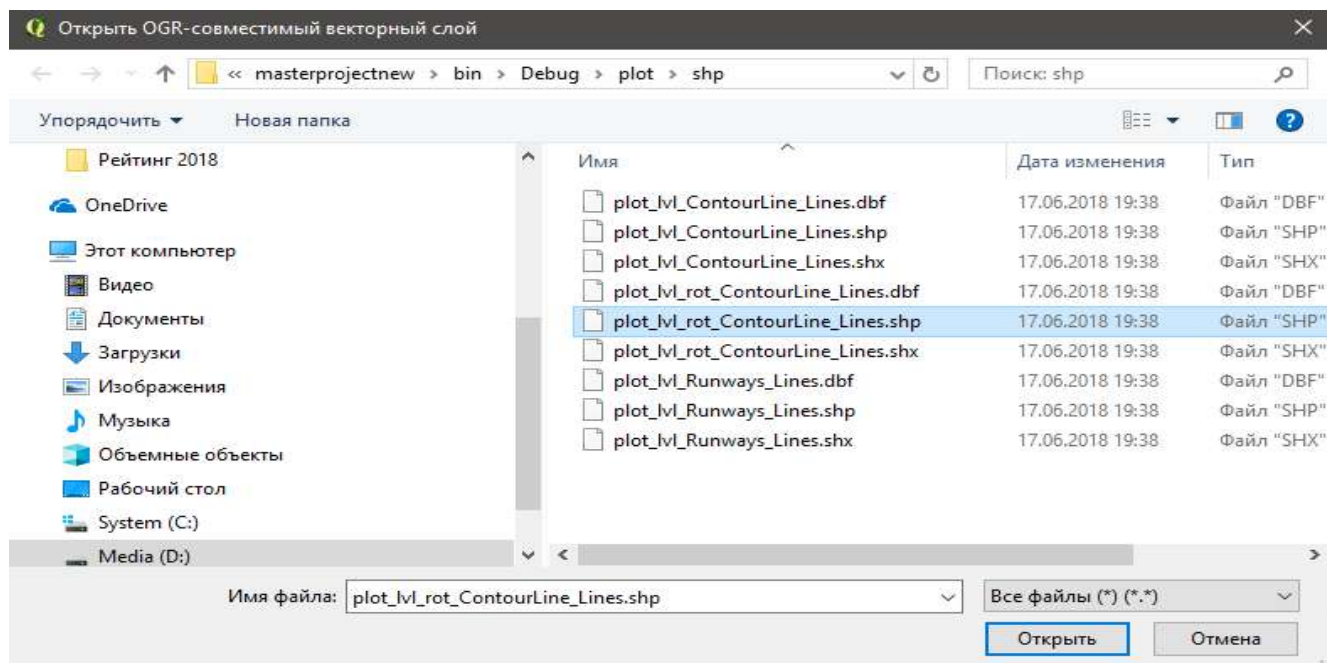


Рис. В.11. Вибір shp-файлу

5. Далі QGIS запропонує обрати координатну систему для нового шару (рис. В.12).

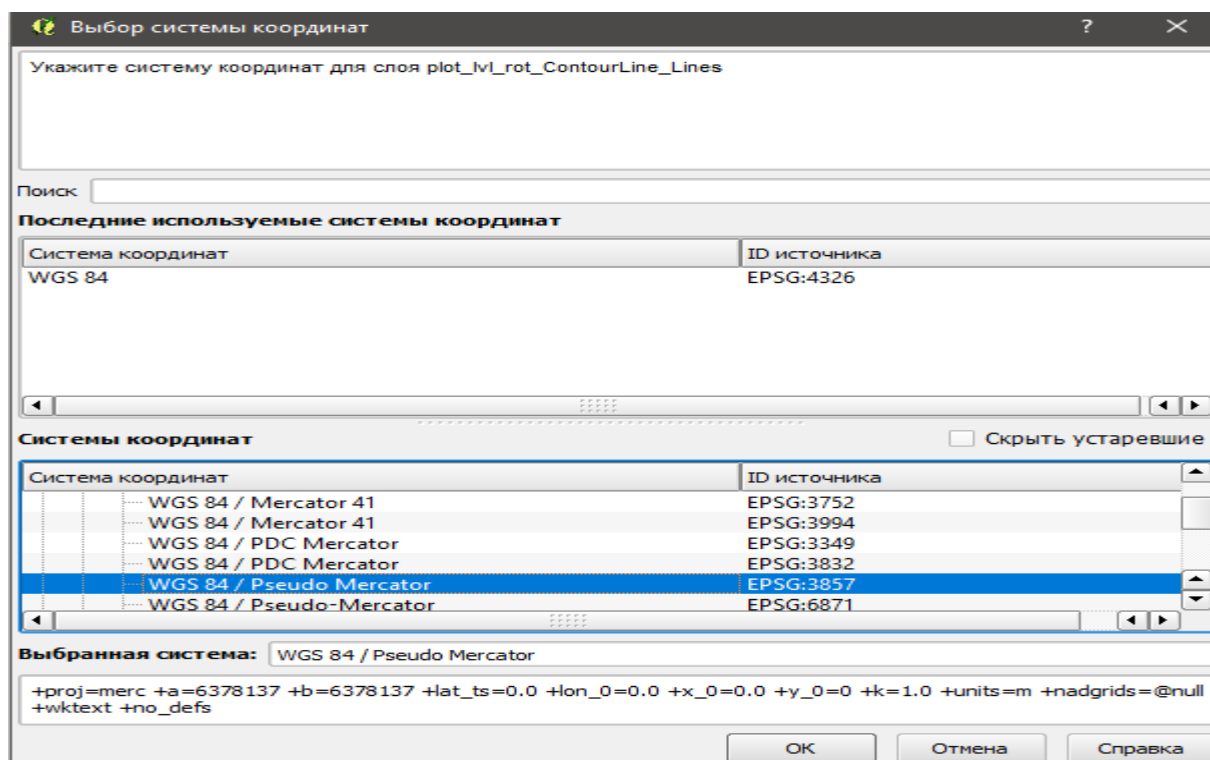


Рис. В.12. Вибір системи координат

Слід обрати систему координат WGS 84 EPSG:4326.

6. Правою кнопкою на шарі **plot\_lvl\_rot\_Control\_lines.shp** вибрати команду *Увеличить до слоя* (рис. В.13).

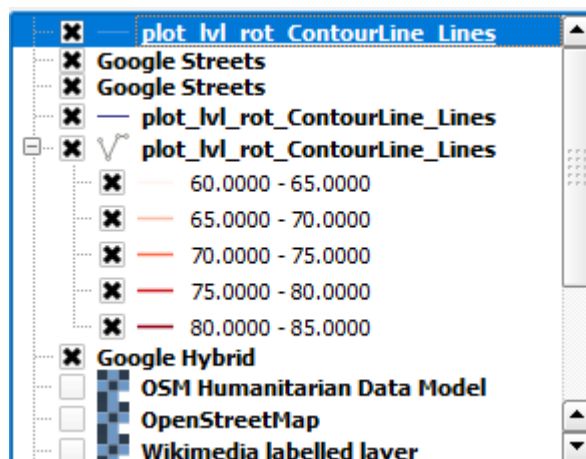


Рис. В.13. Вибір шару

Отримали карту з контурами (рис. В.14).

7. Далі слід обрати стиль, для цього на шарі **plot\_lvl\_rot\_Control\_lines.shp** лівою кнопкою обрати *Свойства*, кнопка *Стиль*, *Загрузка стиля*, вибрати *Debug ---layer\_style\_city.qml*, *Ок*. Отримали контури у кольорі і підписами рівнів (рис. В.14).

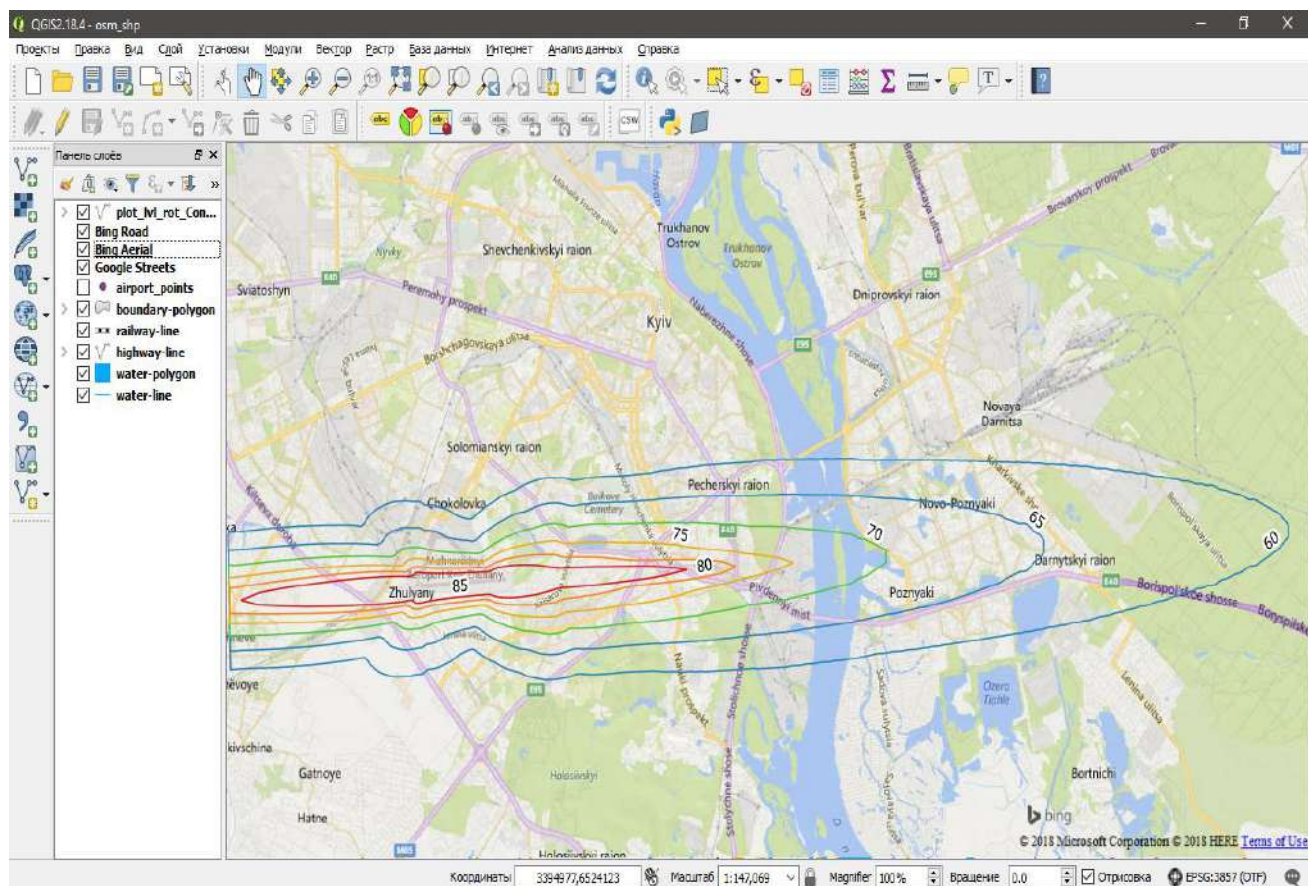


Рис. В.14. Карта з контурами шуму

8. Найбільш вживаними є карти Google Maps – в них міста написані, ще Google Streets, Google Physical, Google Road, Bing Road.

### **Додаток Г**

**Інструкція користувача щодо оцінювання елетромагнітних  
випромінювань повітряних та кабельних ліній електропередачі**

Запустити файл *electromag.exe*, відкривається головна сторінка додатку (рис. Г.1). Система візуально має три логічних розділи, а саме: розрахунок напруженості електричного поля; розрахунок індукції магнітного поля; вихід.



Рис. Г.1. Головне вікно розрахунку ЕМП ліній електропередачі

При натисканні на кнопку «Розрахунок напруженості електричного поля» відкривається вікно для введення даних та розрахунку (рис. Г.2).

Рис. Г.2. Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії (ПЛ)

На рис. Г.3 наведено дані для розрахунку напруженості електричного поля повітряної лінії електропередачі напругою 220 кВ.



Розрахунок напруженості електричного поля

Повітряні лінії | Кабельні лінії

### Введіть дані для розрахунку

Напряга	220	кВ
Висота підвішування провoda на стояку	17,5	м
Висота з урахуванням стріли провисання (габарити)	14	м
Кількість провідів у фазі	1	
Відстань між осями фаз	6,5	м
Радіус провoda	0,01	м
Крок розщеплення	Відсутній	м

**Розрахунок** **Очистити**

Рис. Г.3. Розрахунок напруженості електричного поля ПЛ 220 кВ

Натиснувши на кнопку «Розрахунок», отримуємо графік напруженості електричного поля повітряної лінії електропередачі напругою 220 кВ (рис. Г.4).

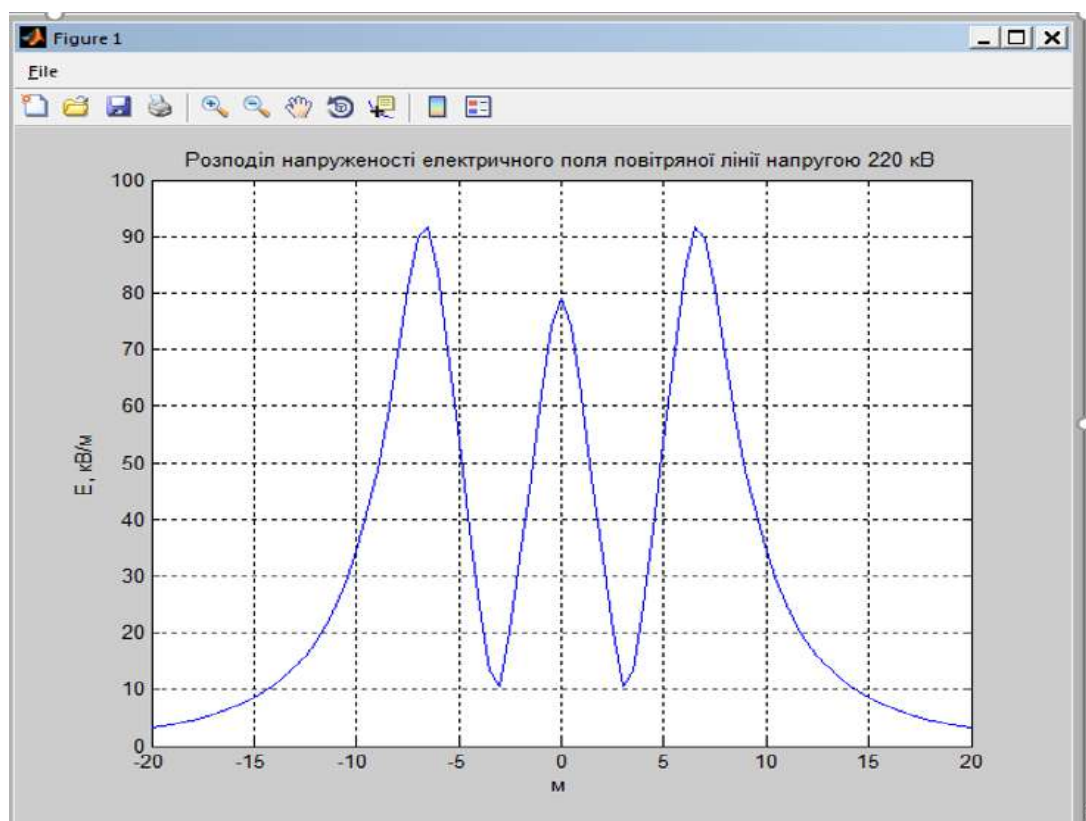


Рис. Г.4. Розподіл напруженості електричного поля ПЛ 220 кВ

Для отримання індукції магнітного поля ПЛ 220 кВ необхідно головному вікні (рис. Г.1) натиснути на «Розрахунок індукції магнітного поля» отримуємо вікно (рис. Г.5). Після натискання кн. Розрахунок, в результаті розрахованих даних отримуємо графік розподілу індукції магнітного поля ПЛ 20 кВ (рис. Г.6).

Розрахунок індукції магнітного поля

Повітряні лінії | Кабельні лінії

**Введіть дані для розрахунку**

Напруга  кВ

Висота підвішування провода на стояку  м

Висота з урахуванням стріли провисання (габарити)  м

Кількість проводів у фазі

Відстань між осями фаз  м

Радіус проводу  м

Крок розщеплення  м

Максимальна потужність  МВА

Рис. Г.5. Введення даних для розрахунку індукції магнітного поля ПЛ

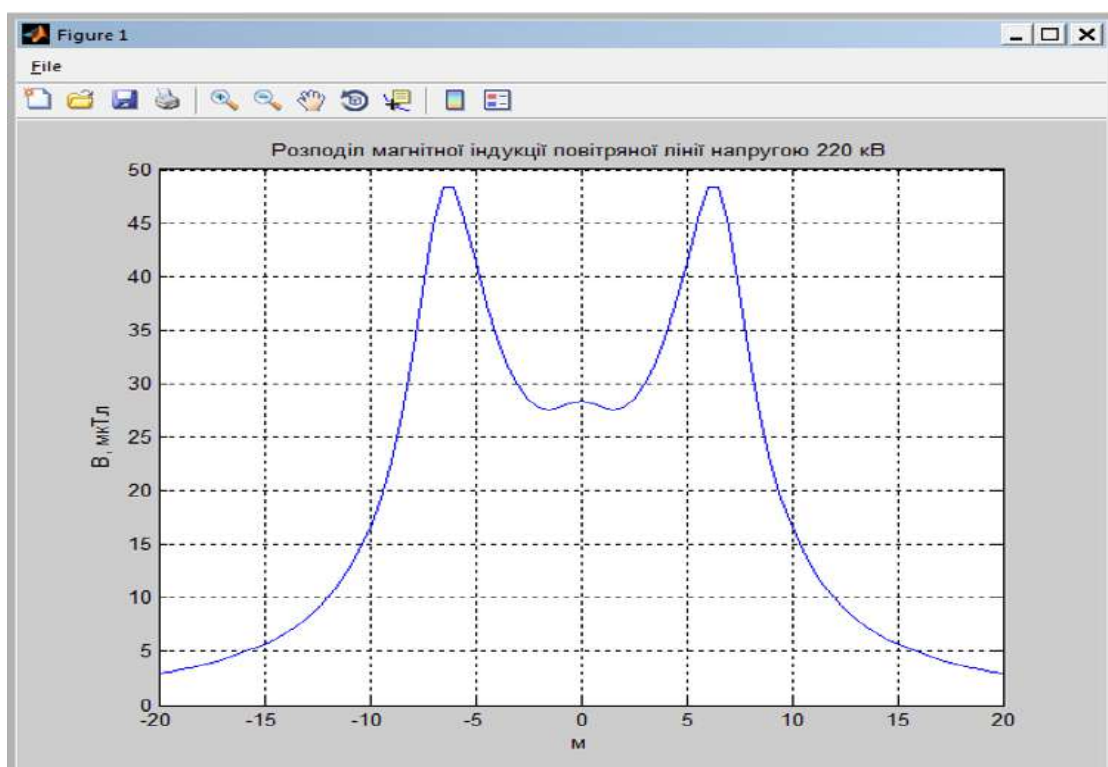


Рис. Г.6. Розподіл індукції магнітного поля ПЛ напругою 220 кВ

Для розрахунку електричного поля кабельної лінії електропередачі (КЛ) треба у головному вікні (рис. Г.1) натиснути на кнопку «Розрахунок напруженості електричного поля», перейти на вкладку «Кабельні лінії» відкривається вікно (рис. Г.7).

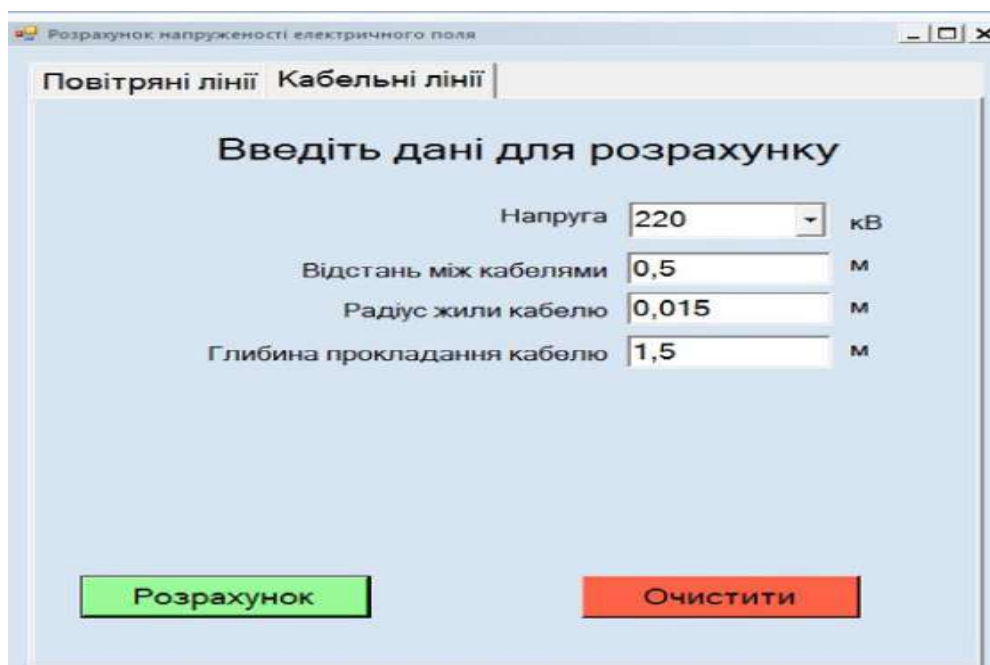


Рис. Г.7. Введення даних для розрахунку електричного поля  
КЛ напругою 220 кВ

Після натискання кн. Розрахунок, в результаті розрахованих даних отримуємо графік поширення напруженості електричного поля КЛ (рис. Г.8).

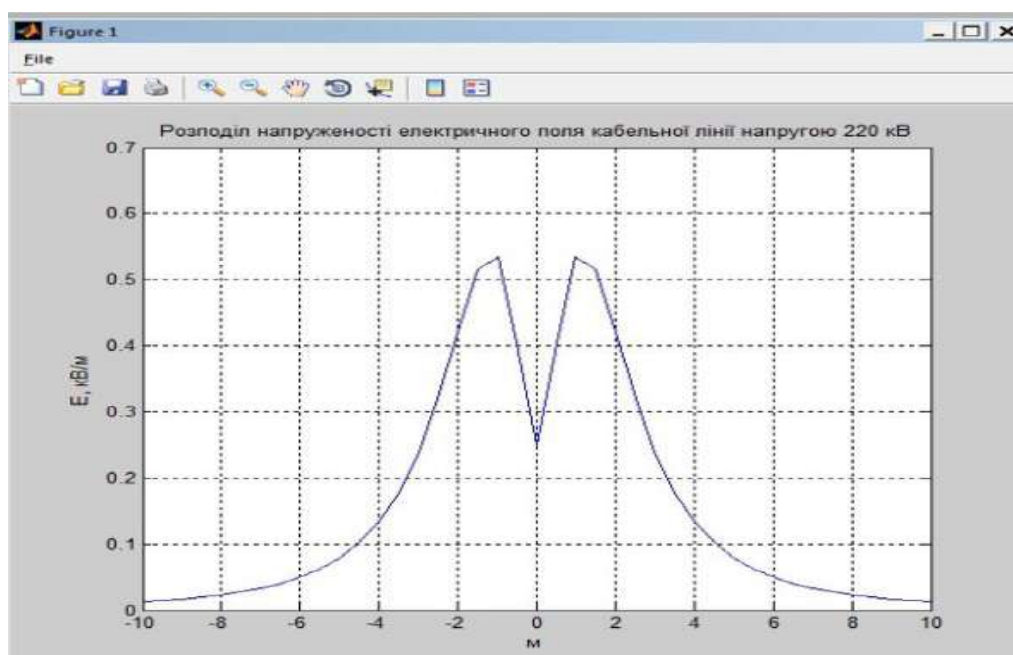


Рис. Г.8. Розподіл напруженості електричного поля КЛ напругою 220 кВ

Для отримання індукції магнітного поля КЛ 220 кВ необхідно у головному вікні (рис. Г.1) натиснути на «Розрахунок індукції магнітного поля» отримуємо вікно і вводимо дані (рис. Г.9).

Рис. Г.9. Введення даних для розрахунку індукції КЛ напругою 220 кВ  
Розрахунок, в результаті розрахованих даних отримуємо графік розподілу індукції магнітного поля КЛ 220 кВ (рис. Г.10).

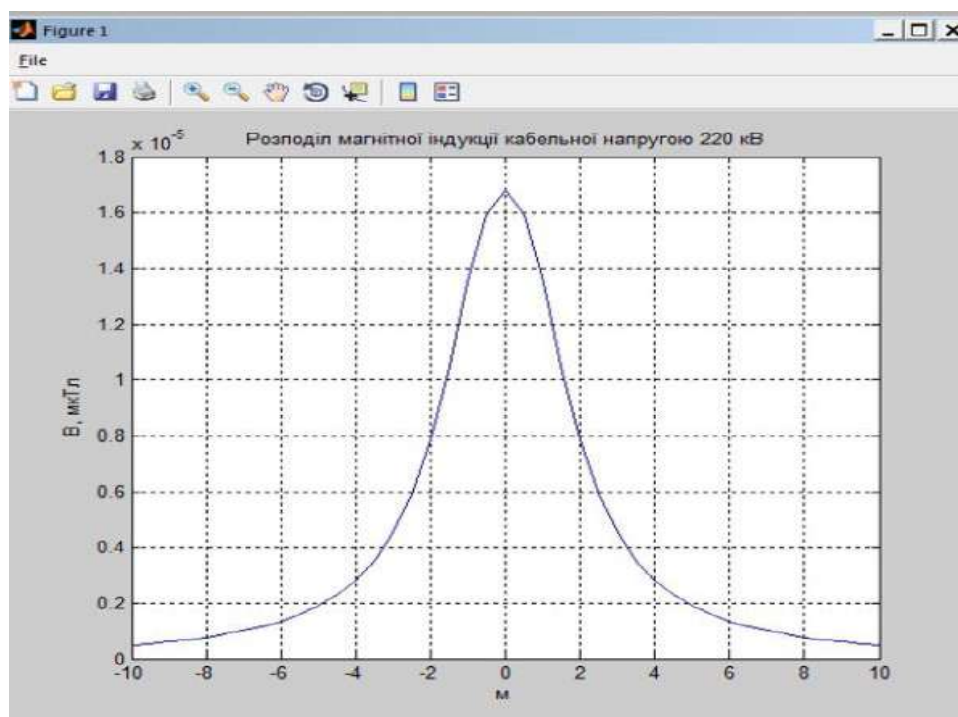


Рис. Г.10. Розподіл індукції магнітного поля КЛ 220 кВ  
По закінченні роботи у головному вікні (рис. Г.1) натискаємо кн. «Вихід»

**Додаток Д**

**Інструкція користувача щодо оцінювання електромагнітних  
випромінювань множинних джерел**

Запустити виконуваний файл SensorServer.exe серверного додатку.  
З'явиться вікно авторизації (рис. Д.1).

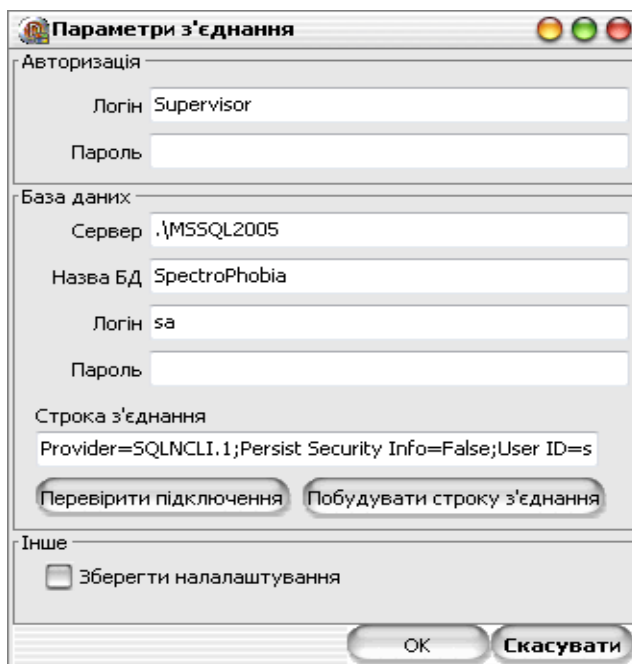


Рис. Д.1. Авторизація користувача

У разі успішної авторизації на екрані з'явиться основний екран серверного додатку (рис. Д.2).

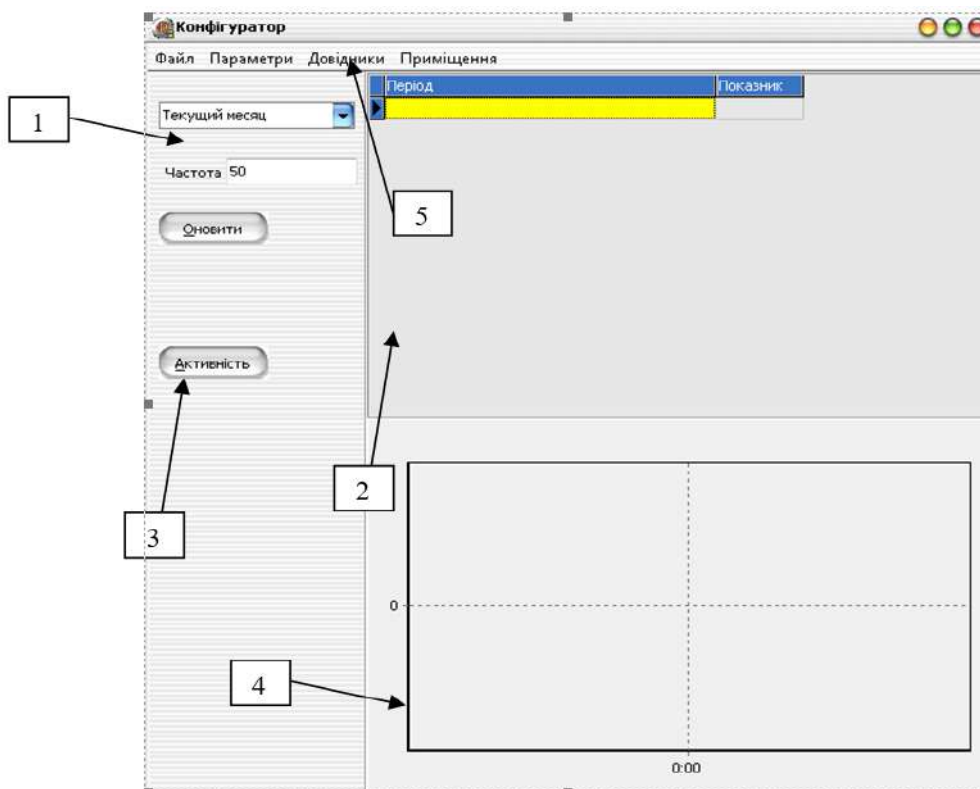


Рис. Д.2. Інтерфейс головного вікна серверного додатку

Для конфігурації електромагнітного стану в приміщенні необхідно вибрати пункт головного меню «Приміщення» (рис. Д.3). У вікні слід задати параметри приміщення (довжина, ширина), параметри розташування у приміщенні кожного джерела (X, Y) та значення індукції магнітного поля джерела ( у мкТл).

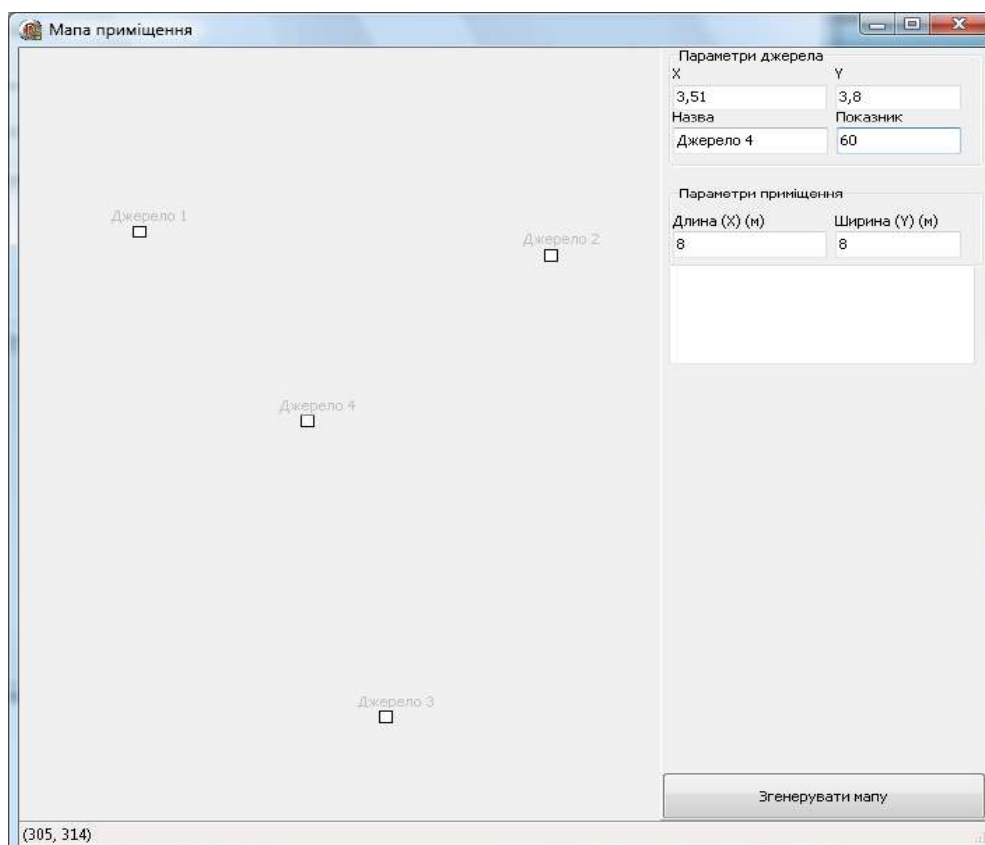


Рис. Д.4 Екран конфігуратора електромагнітної обстановки приміщення

Задавши відповідні параметри, отримуємо мапу електромагнітної обстановки приміщення (рис. Д.5).

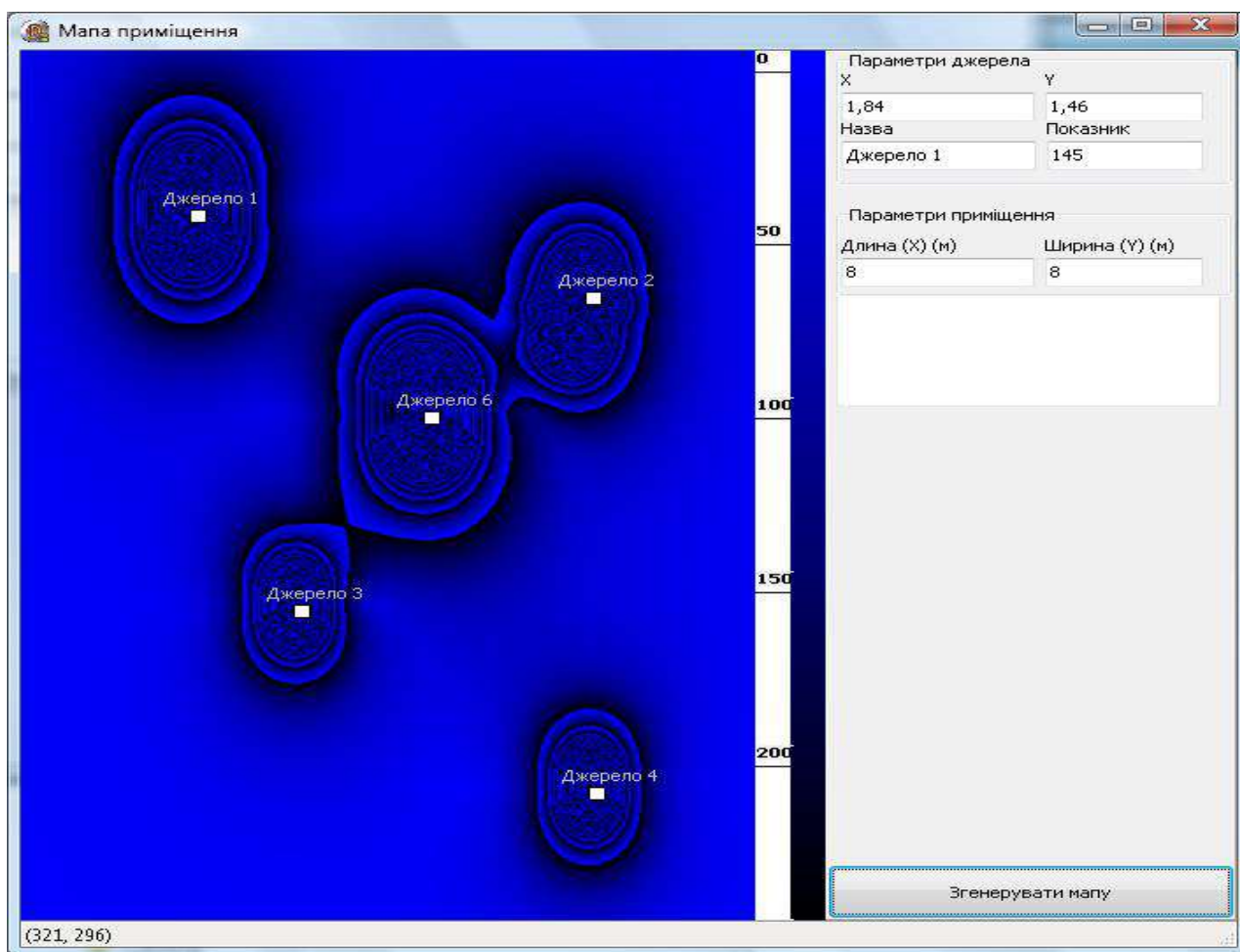


Рис. Д.5. Мапа електромагнітної обстановки приміщення