

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЛЕВЧЕНКО ЛАРИСА ОЛЕКСІЇВНА**

УДК 534.8361:537.531:656.7(043.5)

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

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі цивільної та промислової безпеки Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор  
**Запорожець Олександр Іванович**,  
Національний авіаційний університет,  
проректор з міжнародного співробітництва і освіти.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Волошкіна Олена Семенівна**,  
завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури;

доктор технічних наук, професор  
**Кучук Георгій Анатолійович**,  
професор кафедри обчислювальної техніки та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Подольцев Олександр Дмитрович**, головний науковий співробітник відділу електроживлення технологічних систем Інституту електродинаміки НАН України.

Захист дисертації відбудеться «30» червня 2020 р. об 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1, корп. 12, ауд. 211.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара 1, корп. 8 та на сайті [www.nau.edu.ua](http://www.nau.edu.ua).

Автореферат розіслано «29» травня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09, к.т.н., доцент



Л.М. Черняк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 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 ЗОЗ за умовами шуму визначаються розрахунковим шляхом, який передбачає обчислення рівнів авіаційного шуму (АШ) для поточних та прогнозних сценаріїв виконання польотів, враховуючи національні та міжнародні норми для шуму довкілля.

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 (СЗЗ) 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 експозиції 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 АШ та ЕМП 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.** Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних та держбюджетних робіт Національного авіаційного університету, а саме: договір № 770-Х14/1 від 10.11.2014 «Розроблення карт зон обмеження забудови, санітарно-захисної зони і зони громадської безпеки для аеродрому Київ/Антонов-1 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); держбюджетна робота № 990-ДБ15 «Розроблення засобів еколого-економічної оптимізації багатокритеріальної оцінки збалансованого розвитку авіаційної діяльності в Україні» (№ ДР 0115U002463); «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); держбюджетна робота № 130-ДБ17 «Перспективні матеріали з керованими віброакустичними та електромагнітними характеристиками для зниження рівнів техногенних фізичних полів» (№ ДР 0117U002370); держбюджетна робота № 181-ДБ18 «Розробка ГІС-платформи удосконалених моделей обчислення чинників впливу авіації на довкілля для моніторингу, зонування та оптимізації діяльності аеропортів» (№ ДР 0118U003368), у яких автор є співвиконавцем;

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», де автор є відповідальним виконавцем.

**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 АШ при розрахунку їх рівнів на території, прилеглий до аеродрому;
- 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 ПС-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 АШ та ЕМП, які впливають на населення і довкілля, зокрема розробити інноваційні матеріали для екранування електромагнітних полів та шуму у місцях перебування людей.

*Об'єкт дослідження* – процеси поширення та оцінювання рівнів АШ та ЕМП розосереджених і локальних джерел навколо аеропорту.

*Предмет дослідження* – методи розрахунку поширення та оцінювання АШ та ЕМП розосереджених і локальних джерел, прогнозування змін експозиції 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 АШ і ЕМП; метод сегментації для побудови моделі поширення контурів АШ; метод розрахунку рівня звуку при одиночному прольоті повітряного судна для оцінювання рівня шуму; методи оцінювання шумового навантаження, методи моделювання просторових розподілів ЕМП повітряних та кабельних ліній електропередачі; методи моделювання просторового розподілу магнітного поля дипольно-квадрупольних джерел та множинних джерел; натурні вимірювання рівнів АШ та ЕМП з використанням повіреного атестованого обладнання для верифікації результатів моделювання.

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

- *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 навантаження ЕМП на територіях і окремих об'єктах в умовах складної електромагнітної обстановки;
- *вперше* обґрунтовано і застосовано залежність «шум–режим роботи двигуна–аеродинамічна конфігурація літака–дистанція» замість залежності «шум–режим роботи двигуна–дистанція», рекомендованої чинним Керівництвом ІКАО Doc 9911 для обчислення рівнів та 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 АШ з урахуванням акустичних та неакустичних чинників його вразливості, що дозволяє регулювати реакцією роздратування населення від експозиції АШ;
- *вперше* обґрунтовано та розроблено методологічні і технологічні засади проектування та вироблення універсальних композитних металополімерних матеріалів для захисту від впливу ЕМП 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* поправку 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 АШ 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 шуму у задню напівсферу на етапах наземного руху літаків в аеропорту у вигляді запропонованих залежностей четвертого порядку від кута спрямованості для різних груп 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 ЕМП 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 ЕМП 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 АШ, 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 АШ, 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 АШ з урахуванням акустичних та неакустичних чинників дозволяє регулювати вразливість населення до роздратування від впливу авіаційного шуму;
- здійснене моделювання ЕМП 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 ЕМП 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 ЕМП та шуму придатні для виготовлення екрануючих поверхонь великих площ облицювання будівель та споруд.

Розроблений та удосконалений метод розрахунку АШ 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 електроустановці відкритого розподільчого пристрою 330 кВ ПС «Усатове», що становило 1550 А/м, а також визначити зони обмеження перебування людей поблизу електроустановки, 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 дисертації.** 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 pp.); 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 pp.); Medzinarodna Vedecka Konferencia «Narodna A Medzinarodna Bezpechost» (Братислава (Словаків), 2013 р.); Недінські читання (Київ, 2014, 2015, 2018 pp.); 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 pp.); IV Міжнародна науково-практична конференція «Людина, природа, техніка у ХХІ столітті» (Полтава, 2016 р.), XIII Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2017» (Київ, 2017 р.), International Symposium on Sustainable Aviation 2017 (Kyiv, Ukraine, 2017); VII Міжнародна науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності в ХХІ 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.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та завдання, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача; наведено відомості про апробацію, наукові публікації та впровадження результатів дослідження.

**У першому розділі** виконано аналіз наукових публікацій, проблемних завдань зниження несприятливого впливу на населення і довкілля акустичного шуму та електромагнітних полів техногенного походження (повітряні та кабельні лінії електропередачі, потужні джерела розподілу, генерації та споживання електроенергії); проведено аналіз інформаційного забезпечення процесів оцінювання, нормалізації рівнів АШ та ЕМП; досліджені методи і моделі моніторингу АШ та ЕМП; проаналізовано сучасні інформаційні системи з моделювання та оцінювання рівнів АШ та ЕМП.

Визначено, що несприятливий вплив акустичного шуму спостерігається не тільки за умов перевищення гранично допустимих його рівнів, а й за хронічного впливу шуму малої інтенсивності та переривчастого шуму. Встановлено, що головною особливістю впливу шуму на людей є значна диференціація реакції осіб на однакові рівні шуму, але в різних умовах їх експозиції.

Аналіз результатів санітарно-гігієнічних досліджень свідчить про несприятливий, а іноді шкідливий вплив електромагнітних полів широкого частотного спектра на організм людини та окремі його системи. Однак статистичні

дані щодо біологічної дії ЕМП все ще є дещо суперечливими, в тому числі також вказуючи на диференціацію результатів впливу. Тому Всесвітня організація охорони здоров'я на електромагнітні впливи поширила принцип ALARA (As Low As Reasonable – настільки низький, наскільки це розумно досяжне), який раніше стосувався тільки для іонізуючих випромінювань.

З урахуванням екологічних та економічних аспектів для регулювання авіаційного шуму документом ICAO DOC 9829 в аеропортах запропоновано застосовувати збалансований підхід. Сутність цього підходу полягає у тому, що кожний аеропорт повинен розробити програму, яка містить чотири складові регулювання експозиції шуму від літаків: зниження його утворення у джерелі; планування і організація землекористування в межах зони обмеження забудови за умовами шуму; експлуатаційні прийоми зниження шуму; обмеження щодо експлуатації повітряних суден. В Україні Державні санітарні ДСП-173-96 планування та забудови населених пунктів визначають ЗОЗ навколо аеропорту з урахуванням гігієнічної оцінки акустичного режиму (зони А, Б, В, Г), для чого застосовуються два критерії, а саме:  $L_{Amax}$  – максимальний рівень звуку і  $L_{Aeq}$  – еквівалентний рівень звуку з коригованою частотною смугою відповідно до шкали «А» стандартного вимірювача шуму. Нові авіаційні правила України АПУ-381 (2019 р.) вимагають для визначення ЗОЗ навколо аеропортів застосовувати комбінований добовий еквівалентний рівень звуку або добовий індекс шуму з поділом на день-вечір-ніч  $L_{den}$ . На відміну від ДСП-173-96 документах ICAO DOC 9911 і DOC 9829 рекомендується до використання тільки один критерій –  $L_{Aeq}$  або добовий індекс шуму з поділом на день-ніч  $L_{dn}$ .

Зниження шуму двигунів та літака в цілому шляхом удосконалення їхніх конструктивних елементів потребує від виробників великих людських, фінансових ресурсів та часу щодо їх реалізації. Тому саме для проведення постійного моніторингу авіаційного шуму з урахуванням особливостей конкретного аеропорту для виявлення реальної екологічної обстановки щодо впливу авіаційного шуму на навколишнє середовище необхідно застосування вимірювальних та обчислювальних засобів, які відповідають вимогам і рекомендаціям ICAO DOC 9911 і DOC 9829 та дозволяють мінімізувати фінансові, людські, технічні ресурси стосовно оцінювання й регулювання експозиції авіаційного шуму в районі аеропорту.

Питанням моделювання, оцінювання та нормалізації акустичної та електромагнітної обстановки присвячені наукові праці вітчизняних та зарубіжних вчених – О.І. Запорожця, В.І. Токарева, О.А. Картишева, Keith Attenborough, Andrija Vidović, О.Д. Подольцева, В.А. Гливи, О.С. Волошкіної, Г.А. Кучука, В.Ю. Розова, Д.Є. Пелевіна, В.І. Мордачева, V. Kasar та ін.

Аналіз інформаційних систем екологічного моніторингу країн Європи і США довів, що кожна країна створює власний комплекс програм для розрахунків рівнів авіаційного шуму, але з урахуванням методології ICAO DOC 9911, міжнародної бази даних акустичних та льотно-технічних характеристик АНР. Проведено порівняльний аналіз програмних засобів різних країн щодо моделювання поширення АШ, виявлено розбіжності у їх реалізації, а також встановлено недоліки у вітчизняному аналозі моделювання АШ IsoBell'a, обґрунтовано необхідність

удосконалення методології розрахунку та розроблення на їх основі інформаційної системи екологічного моніторингу АШ.

Шум, що утворюється при рулінні літаків, випробуванні двигунів, використанні допоміжних силових установок, вважався таким, що ним можна нехтувати і він не чинить суттєвий внесок в узагальнюючі контури шуму, що визначаються злітно-посадковими операціями на злітно-посадковій смузі і маршрутах прильоту-вильоту. Крім того, чинний метод ICAO DOC 9911 для розрахунків максимального рівня звуку  $L_{Amax}$  та рівня експозиції  $L_{AE}$  потребує удосконалення їх складових - поправок на ефекти впливу земної поверхні і випромінювання у задній сектор наземної операції руху з метою підвищення точності розрахунків при моделюванні рівнів авіаційного шуму одиночної події шляхом врахування їх типових відмінностей для літаків на наземних етапах злітно-посадкового циклу.

Загальновідомо, що результати обчислення одиночних подій відрізняються від фактичних вимірювань. Як правило, існуючі і відповідні вимогам ICAO DOC 9911 інтегровані моделі обчислюють до 5-10 дБА нижчі значення рівнів експозиції  $L_{AE}$  від вимірюваних (менша розбіжність спостерігається ближче до ЗПС і на етапах посадки літаків). Розбіжності в обчисленні інтегрованих моделей є результатом заниженої оцінки рівня експозиції шуму зльоту усередненого літака на  $\sim 3$  дБА та під час зниження перед посадкою на  $\sim 1,5$  дБА. Помилка інструментального вимірювання рівнів звуку одиночних авіаційних подій відповідно вимог сучасного міжнародного стандарту DIN 45643 становить  $\sim 1$  дБА, тому розбіжність обчислених та виміряних значень для окремих подій є завеликою. Дослідження причин заниженої оцінки рівня експозиції шуму при обчисленні одиночних подій випромінювання авіаційного шуму і удосконалення моделі з метою наближення до виміряних значень є однією з основних задач дисертаційного дослідження, практичним результатом якого є як удосконалення методики визначення границь ЗОЗ з умов шуму, так і запровадження системи обчислювально-інформаційного моніторингу авіаційного шуму в аеропортах.

Відсутні методологічні засади використання моделювання поширення ЕМП для розроблення і впровадження організаційно-технічних заходів зі зниження впливу цього чинника на населення і довкілля.

**У другому розділі** для досягнення поставленої мети дослідження наведено методичні засади оцінювання рівнів авіаційного шуму та ЕМП.

Для оцінювання рівнів шумового навантаження у зоні аеропорту пропонується створити інформаційну систему екологічного моніторингу авіаційного шуму з урахуванням методології Керівництва з рекомендованого методу розрахунку контурів шуму навколо аеропортів (ICAO DOC 9911), міжнародної бази даних акустичних та льотно-технічних характеристик літаків ANP, гігієнічної оцінки акустичного навантаження відповідно до державних будівельних норм та санітарних правил планування і забудови населених пунктів, які є обов'язковими до виконання, а також особливостей розміщення і експлуатації конкретного аеропорту та вимог до точності розрахунків рівнів звуку авіаційного шуму. Керівництво ICAO DOC 9911 для використання в Україні є дещо обмеженим в частині обчислення максимального рівня звуку  $L_{Amax}$  та/або рівня експозиції шуму  $L_{AE}$ , але є обов'язковим до

використання відповідно до вимог нових авіаційних правил АПУ-381 щодо просторового зонування території навколо аеропорту.

Виміряні значення рівнів авіаційного шуму досліджені в дисертаційній роботі для умов випромінювання шуму окремими двигунами (на стенді і на літаку в умовах стоянки), для зльоту і посадки літака в умовах наближених до сертифікаційних вимог (додаток 16, том 1, "Авіаційний шум" до Конвенції ІКАО), в експлуатаційних умовах. Це дозволило відокремити як джерела шуму, так і етапи (ділянки етапів) польоту, що чинять суттєвий внесок у виміряні рівні звуку. Зокрема результати дослідження шуму літаків в експлуатаційних умовах показують суттєві відмінності профілю польоту (залежність висоти польоту від відстані у вертикальній площині), швидкості польоту і режиму роботи (тяги або потужності) двигунів від значень, що отримуються при обчисленні системи рівнянь збалансованого руху літака, які є основою інтегрованих моделей типу INM (США) та IsoBella (український аналог, що розробляється в НАУ). При неточності обчислення рівнів шуму для окремих ділянок профілю польоту у 1 дБА контур шуму для нормативного значення рівня звуку  $L_{Amax}$  зміщується на 1,5-2 км у бік виконання польотів. Наприклад, для профілю зниження перед посадкою (уздовж глісади) для деяких типів літаків виявлено, що розрахована швидкість майже відповідає експлуатаційній, а експлуатаційна тяга їхніх двигунів може бути удвічі більшою від розрахованої, головним чином завдяки періодичним регулюванням тягою двигунів швидкості польоту не менше безпечного значення (рис. 1а) (система рівнянь збалансованого руху літака таких втручань в режими роботи двигунів не передбачає), в результаті обчислений рівень звуку  $L_{Amax}$  уздовж глісади збільшується до 10 дБА у порівнянні зі значенням для збалансованого руху і наближається до виміряних значень для цієї ділянки польоту літака. Для терміналів системи моніторингу шуму, розташованих в межах 2-4 км від торця ЗПС, усереднені (середнє арифметичне зі стандартним відхиленням  $\sigma_{ст}=0,3...1,0$  дБА) виміряні значення  $L_{Amax}$  виявилися більшими від розрахованих на 0,8-1,2 дБА для різних типів середньомагістральних літаків (MD 81...90, Боїнг 737-500...-800), хоча в окремих випадках відмінності для  $L_{Amax}$  спостерігались до 2...5 дБА (рис. 1 б). Аналогічно для етапу зльоту/набору висоти уздовж ділянок польоту, що чинять внесок у рівні звуку на визначених моніторах ( $\Delta L_{Amax}$  усер=0,3-0,5 дБА,  $\sigma_{ст}=0,2...0,5$  дБА) швидкість польоту, як правило, спостерігається нижчою від збалансованого значення на 20-50 м/с, а реальна експлуатаційна тяга двигунів спостерігається як більшою, так і меншою від збалансованого значення, що у цілому зумовлює відмінність рівнів звуку  $\Delta L_{Amax}$  на  $\pm 4-5$  дБА (рис. 1 б). Контур шуму для  $L_{Amax}$  75 дБА (норматив шуму для ночі за вимогами ДСП-173-96) для зльоту літака типу MD 81 збільшується уздовж вісі польоту понад 3 км в такому випадку.

В керівництвах ІКАО DOC 9911 та ЕСАС DOC 29 (том 2 – європейський аналог керівництва ІКАО) відповідно до стандарту SAE AIR 5662 M при побудові траєкторії руху літака використовується система лінеаризованих рівнянь, отриманих від системи диференційних рівнянь збалансованого руху літака.

Метод сегментації траєкторії польоту літака враховує особливості змін параметрів польоту уздовж окремих (сегментів) та їх впливу на рівні звуку для шуму поточного сегменту траєкторії.

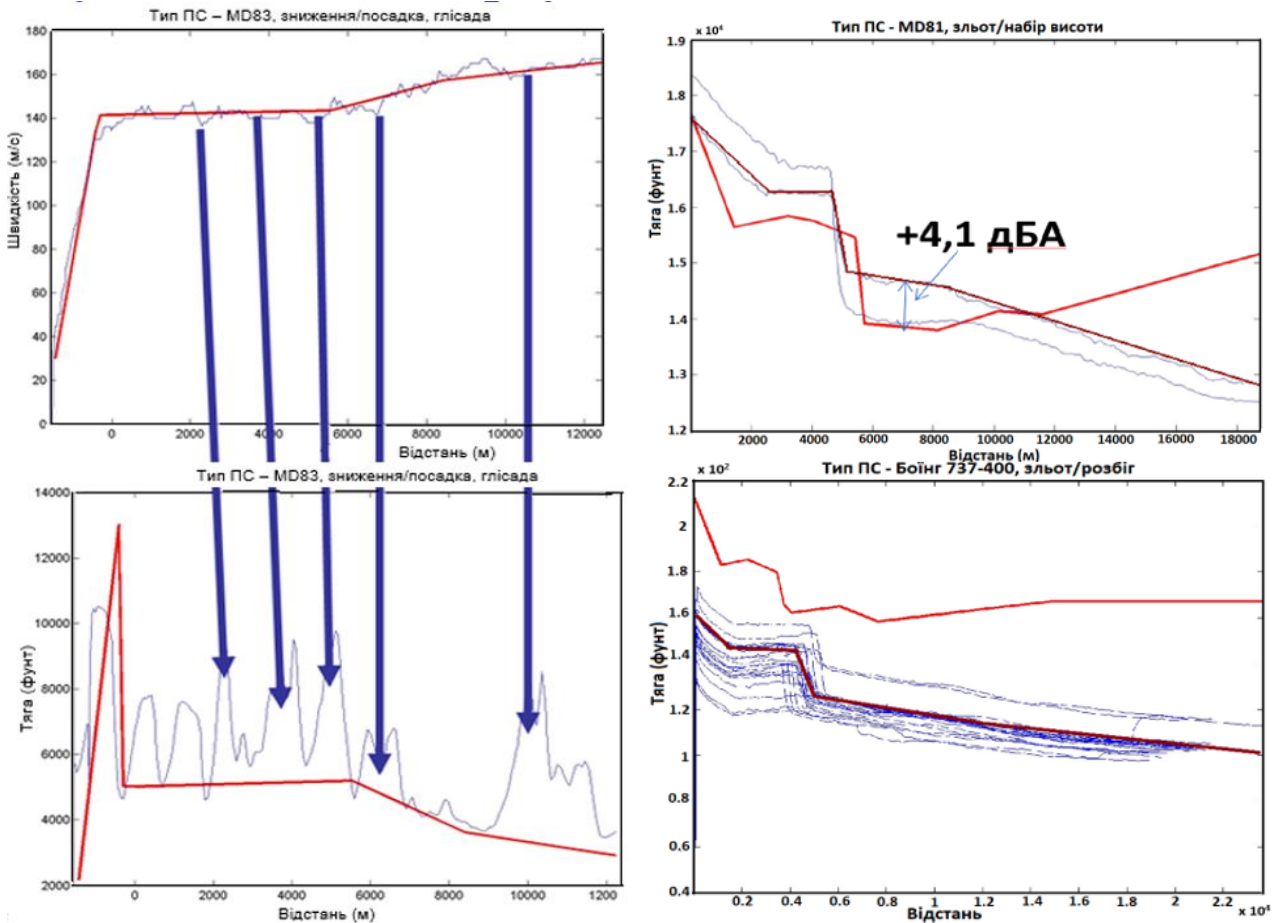


Рис. 1. Параметри профілю польоту літака:

а) зниження/посадка;

б) зліт/набір висоти

Зокрема лінеаризоване рівняння для оцінки кута набирання висоти уздовж прямолінійного відрізка траєкторії з постійною швидкістю польоту має вигляд

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

де коефіцієнт  $k=1,01$  за методологією стандарту SAE-AIR-5662M враховує збільшений градієнт підйому, зумовлений зустрічним вітром зі швидкістю  $w_B \approx 4,1$  м/с, та еквівалентною повітряною швидкістю польоту, яка притаманна набору висоти,  $v=82,3$  м/с,  $F_n/\delta_{am}$  – приведена наявна тяга двигуна,  $N$  – кількість двигунів,  $R$  – зворотня аеродинамічна якість, а саме, відношення коефіцієнту опору до коефіцієнту підйомної сили  $C_X/C_Y$  для заданого налаштування механізації крила (закрилків, предкрилків, тощо), тобто для заданої аеродинамічної конфігурації літака (включаючи шасі прибране або випущене),  $G$  – повна вага літака,  $\delta_{am}=p/p_0$ , відношення атмосферного тиску  $p$  в точці на траєкторії до стандартного значення повітряного тиску на рівні моря ( $p_0=101,325$  кПа).

В умовах реальної експлуатації значення коефіцієнта  $k$  є меншим, в проведених дослідженнях його значення для літаків типу Боїнг-737 (-400-800) змінювались в межах 0,79...0,845; літаків типу MD81-MD90 – в межах 0,93...0,985, хоча для MD81 в деяких випадках значення  $k=1,075$ . Відповідно обчислені значення рівнів звуку менші від виміряних для Боїнг-737-400 на 3 дБА (-4,1 дБА – відповідно до менших значень коефіцієнта  $k$  в рівнянні (1), +1,1 дБА – відповідно до менших значень висоти і швидкості польоту над точкою визначення рівнів звуку). Значення точності

обчислення рівнів звуку для зльоту літака MD-81  $\Delta L_{TO}=+3,5$  дБА (+4,1 дБА – відповідно до менших значень коефіцієнта  $k$  в рівнянні (1), -1,1 дБА – відповідно до більших значень висоти і +0,6 дБА – відповідно до менших значень швидкості польоту над точкою визначення рівнів звуку). Аналіз реальних умов експлуатації літака й інтегрованої моделі за стандартом SAE AIR 5662M вказує на наявність суттєвих відмінностей параметрів польоту від збалансованих значень. В результаті такого спрощення помилка обчислення рівнів звуку  $L_{Amax}$  та  $L_{Aexc}$  для окремих сегментів траєкторії може досягати  $\pm 12$  дБА, що є неприпустимим і підтверджується результатами порівняння їх обчислених та вимірених значень для одиночних прольотів літаків.

Також виявлені наступні спрощення, які також зумовлюють суттєві неточності обчислення рівнів звуку в існуючих інтегрованих моделях відповідно вимог Керівництва ICAO DOC 9911: атмосфера вважається однорідною, тобто вертикальні градієнти температури, швидкості вітру і відповідно швидкості звуку відсутні; поправка на бічне затухання звуку – ефект впливу земної поверхні – є узагальненою для усього парку літаків незалежно від їх групи і спектрального класу; поправка на спрямованість випромінювання шуму у задню напівсферу від літака також є узагальненою для усього парку літаків (в ECAC DOC 29 поправка визначена для літаків з ТРД та гвинтовими двигунами); табличні дані «шум-режим роботи двигуна-відстань» (NPD-залежностей) для всіх типів повітряних суден в базі даних ANP визначені для дійсних значень тяги (для ТРД) або потужності (для гвинтового) двигуна, не враховуючи сучасні досягнення у зниженні випромінювання шуму двигунами літаків і відповідно збільшенні внеску шуму від інших джерел – крила, шасі, і особливо механізації крила.

Моделювання просторових розподілів ЕМП здійснюється з використанням математичних функцій закономірностей зміни амплітуд електричної і магнітної складових ЕМП. Ці функції залежать від особливостей фізичної природи розосереджених джерел (повітряні та кабельні лінії електропередачі, сегменти силової мережі електроживлення тощо) та локальних джерел (трансформатори, турбогенератори, електропривод, базові станції мобільного зв'язку тощо). Крім того, виконано натурні вимірювання рівнів ЕМП з метою отримання вихідних даних для проведення моделювання (особливо це стосується локальних джерел) та перевірки адекватності отриманих моделей у реальних умовах експлуатації електротехнічного обладнання. У випадках різномірності джерел, наприклад, на територіях та окремих приміщеннях підприємств цивільної авіації, електрогенеруючих підприємств тощо враховуються різні закономірності просторових змін рівнів ЕМП за одночасного функціонування усіх радіотехнічних та електротехнічних об'єктів.

Для отримання вихідних даних щодо проведення моделювання поширення ЕМП та перевірки адекватності отриманих моделей виконувались натурні вимірювання рівнів електричних і магнітних полів промислової частоти серійним каліброваним приладом ПЗ-50. Спектральний аналіз електричного та магнітного поля реєструвався повіреним приладом Spectran NF5035.

**У третьому розділі** 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 ICAO, а й шум від потоків обтікання крила,

засобів його механізації, випущених шасі, тощо, який є домінуючим на етапах зниження перед посадкою сучасних літаків з ТРДД з надвисоким ступенем двоконтурності  $m_{об}=8...12$ , 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.

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. 2 а), а для профілю посадки 4 дБА (рис. 2 б), що також вносить похибку у розрахунок максимального рівня звуку за умов нехтування ефектом впливу земної поверхні при сертифікаційних вимірюваннях шуму.

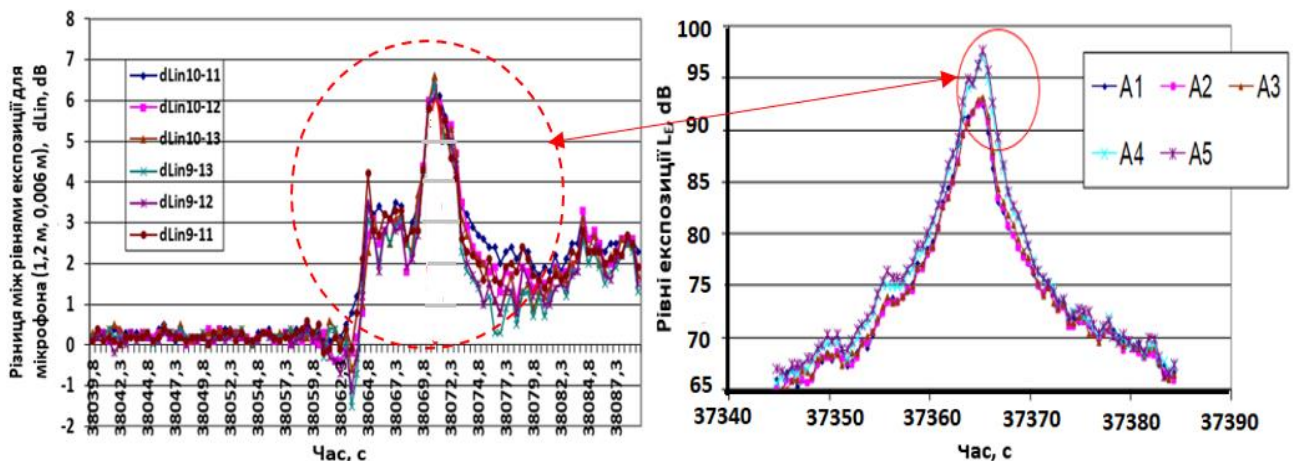


Рис. 2. Ефект інтерференції, виміряний під: а) траєкторією зльоту /набору висоти літака; б) траєкторією зниження літака перед посадкою

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-Soroка, 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 (ТF) (рис. 3 а) та гвинтовими і/або турбогвинтовими (ТP) двигунами для етапів зльоту і посадки літаків (рис. 3 б), а 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. 4 а) та для асфальтобетону (акустично жорсткої поверхні (рис. 4 б)). При цьому було виявлено суттєві відмінності від результатів стандарту SAE 1751, залежності якого побудовані для вимірюваних значень ефекту «бічного затухання 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.

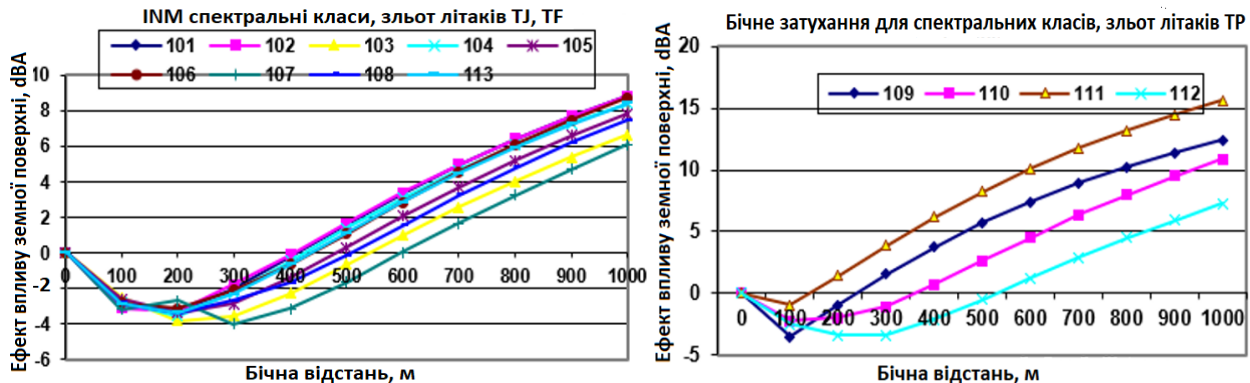


Рис. 3 Бічне затухання профілю зльоту для спектральних класів:

а) літаків з двигунами TJ та TF;

б) літаків з двигунами TP

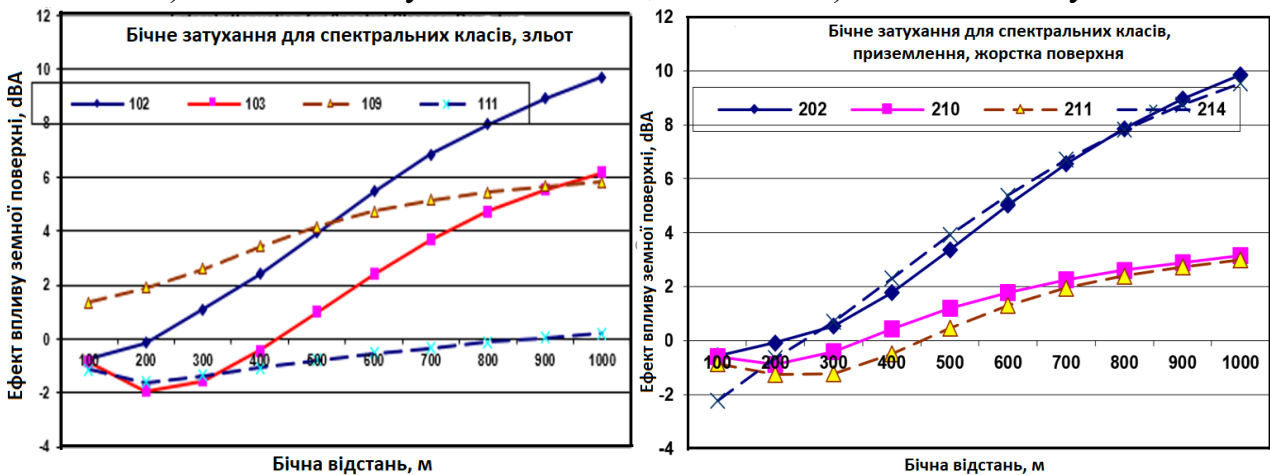


Рис. 4. Бічне затухання профілю

а) зльоту для трав'яного покрову

б) посадки для жорсткої поверхні

У сучасній методології розрахунку контурів шуму акустичні ефекти поблизу від поверхні землі за рахунок наявності вертикального градієнта швидкості звуку (чи то через вертикальні градієнти температури, або швидкості вітру, тощо) не враховуються.

Для удосконалення загальної моделі розрахунку рівнів шуму необхідно враховувати вплив ефекту рефракції при поширенні звукових хвиль. В роботі пропонується використовувати підхід трасування звукових променів у вигляді евристичної модифікації формули Вейля-Ван дер Поля, яка передбачає, що профілі (градієнти) швидкості звуку в залежності від висоти над поверхнею землі можуть бути наближені до лінійного профілю швидкості звуку.

Траєкторії прямих і відбитих променів для ідеалізованого випадку вертикального лінійного профілю швидкості звуку являють собою дуги кіл з радіусом  $R = c_0 / \left( \frac{dc}{dz} * \cos \lambda \right)$ , де  $c_0$  – швидкість звуку на висоті  $z=0$  (у земної поверхні);  $dc/dz$  – вертикальний профіль градієнта швидкості звуку, в (м/сек)/м;  $\lambda$  – кут падіння звукового променя досліджуваного акустичного джерела. В умовах негативного вертикального температурного градієнта або поширення звукової хвилі проти вітру звукові промені є вигнутими ввєрх від земної поверхні, на великих відстанях до точки приймача навіть можливе утворення акустичної тіншової зони навколо нього.

Для однорідного випадку повне звукове поле формується за рахунок прямих і відбитих променів відповідно до рівняння (з урахуванням моделі Chien-Soroka):

$$\varphi = \exp(ikl_1) / 4\pi l_1 + \{R(\lambda) + (1 - R(\lambda)F(p_e))\} * \exp(ikl_2) / 4\pi l_2,$$

де  $\exp(ikl_1) / 4\pi l_1$  – акустичне поле прямих променів,

$\{R(\lambda) + (1 - R(\lambda)F(p_e))\} * \exp(ikl_2) / 4\pi l_2$  – внесок акустичного поля відбитих променів,

$R(\lambda)$  – 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.

Коефіцієнт відбиття сферичної хвилі від поверхні обчислюється за формулою:

$R(\lambda) = R_p + (1 - R_p) * F(p_e)$ , де  $R_p$  – коефіцієнт відбиття від поверхні землі для плоскої звукової хвилі,  $R_p = (\gamma - \cos \lambda) / (\gamma + \cos \lambda)$ ,  $\gamma$  – адмітанс поверхні.

Комплексна функція, яка враховує взаємодію сферичної хвилі з поверхнею та має кінцевий імпеданс,  $F(p_e)$  обчислюється наступним чином:

$$F(p_e) = 1 + i\sqrt{p_e} * \exp(-p_e) * \exp(-ip_e); p_e = \sqrt{ikl_1/2} * [2\pi * \sqrt{1 + (\Delta f / 2f)^2} + \cos \lambda],$$

де  $\Delta f$  – ширина частотної смуги,  $f$  – центральна частота смуги. В роботі показано, що на відміну від припущення про однорідне середовище (SAE AIR-1845) прямий і відбитий промені в умовах позитивного вертикального профілю градієнта швидкості звуку є вигнутими ввєрх дугами кола, а кут падіння звуку є меншим від умов однорідної атмосфери на величину кута між прямим і вигнутим променями, – кут ковзання  $\psi_G$  (протилежний куту падіння  $\theta$  звукового променя) на рис. 5, який визначається за формулою:

$$\psi_G = \arctg \left[ \frac{aD}{2} + \frac{z_R(2 + az_R)}{2D} \right],$$

де  $a$  – градієнт швидкості звуку, який обчислюється:  $a = \frac{1}{c(0)} \frac{dc}{dz} = \frac{1}{R_C}$ ,

$R_C$  – радіус кривизни променя,  $R_C = 1 / a \cos \psi_G$ .

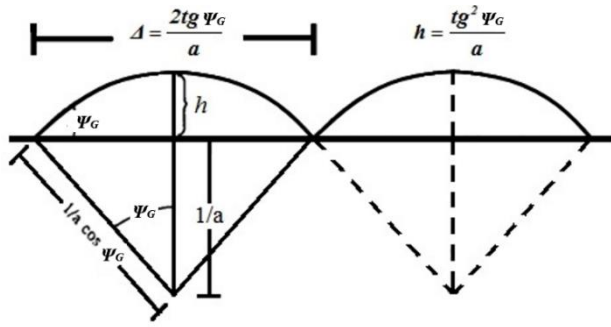


Рис. 5. Геометрія розповсюдження акустичних променів в атмосфері з лінійним градієнтом швидкості звуку, де  $h=z_R$  – висота променя,  $D$  – довжина променя упродовж земної поверхні.

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, довжина вигнутого променя  $r(z_R)$  може бути обчислена за формулою:

$$r(z_R) = (1/a \cos \psi_G) * \left[ \arcsin \left\{ (1 + az_R) \cos \psi_G \right\} - \pi/2 + \psi_G \right] \quad (2),$$

Коли звуковий промінь досягає своєї вершини (максимуму кривизни), дві точки можуть розташовуватися на тій же висоті – перед максимумом ( $z_R$ ) та після ( $z_R$ ). Відповідно для визначення довжини вигнутого променя до точки ( $z_R$ ) необхідно застосовувати формулу:  $r(z'_R) = 2r(z_m) - r(z_R)$  (3)

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. Координата першого відбиття  $x$  визначається на основі розв'язання наступного поліноміального рівняння четвертого порядку:

$$n(n+1)x^4 - (2n+1)Dx^3 + [b_R^2 + (2n^2 - 1)b_S^2 + D^2]x^2 - (2n-1)b_S^2 Dx + n(n-1)b_S^4 = 0, \quad (4)$$

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. Для кожного додаткового відбиття геометричні параметри можуть бути отримані у такий спосіб:  $r_i = 2(n-1)r(z_m) + r(z_R) + r(z_S)$ .

На рис. 6 наведено промені в умовах рефракції для градієнта швидкості звуку  $a = 0,001 \text{ м}^{-1}$  з двома точками відбиття променя від земної поверхні для висоти джерела  $h_s = 1,0 \text{ м}$  (близько до висоти вісі встановлення двигуна під крилом сучасного літака), висоти приймача  $h_r = 1,0 \text{ м}$  (~ висота встановлення мікрофона) та відстані  $R_0 = \sim 190,00 \text{ м}$  (одне з базових табличних значень відстані для визначення NPD-залежності в базі даних ANP). На рис. 7 наведено промені з однією точкою відбиття для висоти джерела  $h_s = 1,0 \text{ м}$ , висоти приймача  $h_r = 1,0 \text{ м}$  та відстані між ними  $R_0 = 160,00 \text{ м}$ , для якої умова (4) передбачає 3 відбитих промені з однією точкою відбиття. У табл. 1 наведено характерні відстані і кути падіння для заломлених променів. На рис. 8 наведені спектри інтерференції прямого та відбитих променів при поширенні звуку з рефракцією, номер променя відповідає номеру променя у табл. 1, сумарний ефект – протилежний від випадку з одиночним відбитим променем, ефект «бічного поглинання» перетворюється в ефект посилення – рівень звуку в точці вимірювання збільшується навіть для «м'якої» акустичної поверхні. Такі варіанти формування акустичного поля можливі для стаціонарних умов розміщення джерел шуму – наприклад, для гонки авіадвигуна після його обслуговування в аеропорту.

**Траєкторії розповсюдження звуку**

**з двома точками відбиття**

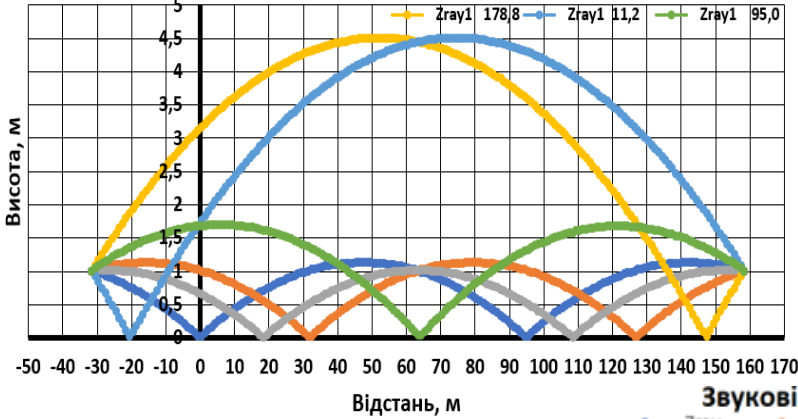
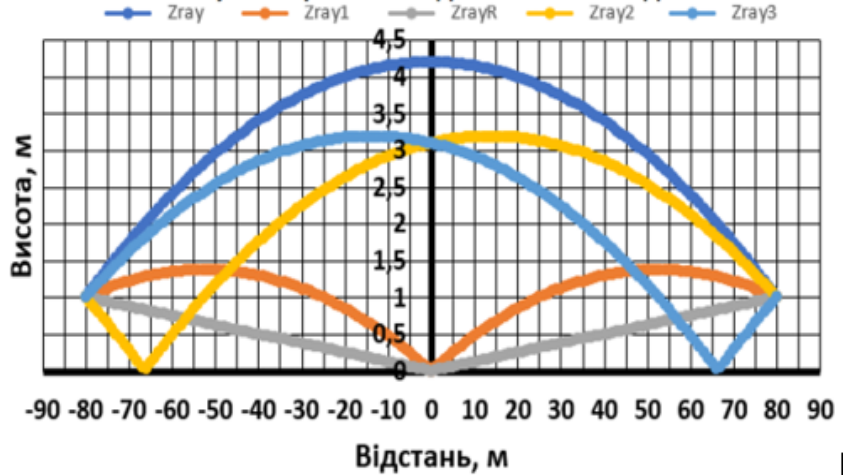


Рис. 7. Звукові промені з однією точкою відбиття: ZrayR – відбитий промінь для однорідного випадку; Zray - прямий промінь для умов рефракції, Zray1, Zray2, Zray3 - відбиті промені для випадку рефракції ( $a= 0,001 \text{ м}^{-1}$ )

Рис. 6. Звукові промені з двома точками відбиття:

ZrayR – відбитий промінь для однорідного випадку; Zray1 – відбиті промені з двома точками відбиття; Zray2 – відбиті промені з двома точками відбиття, x-координата точки визначаються в метрах від джерела (градієнт швидкості звуку  $a=0,001 \text{ м}^{-1}$ )

**Звукові промені з однією точкою відбиття**



Таблиця 1

**Характерні відстані і кути ковзання для вигнутих променів**

Номер променя	Точка відбиття, м	$R_1, \text{ м}$	$R_2, \text{ м}$	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

**Спектри інтерференції прямого та відбитих променів**

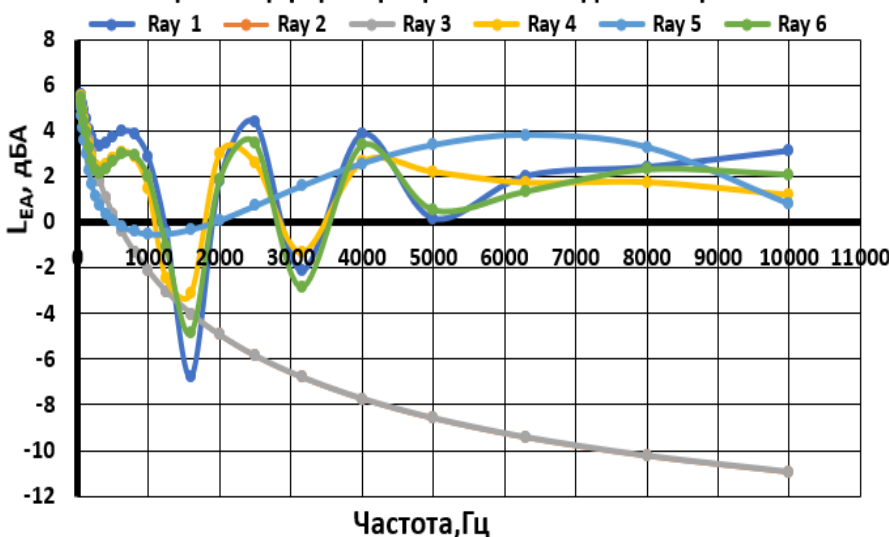


Рис. 8. Спектри інтерференції прямого та відбитих променів при поширенні звуку в атмосфері з рефракцією в результаті інтерференції прямого і відбитих променів

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. 9 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.

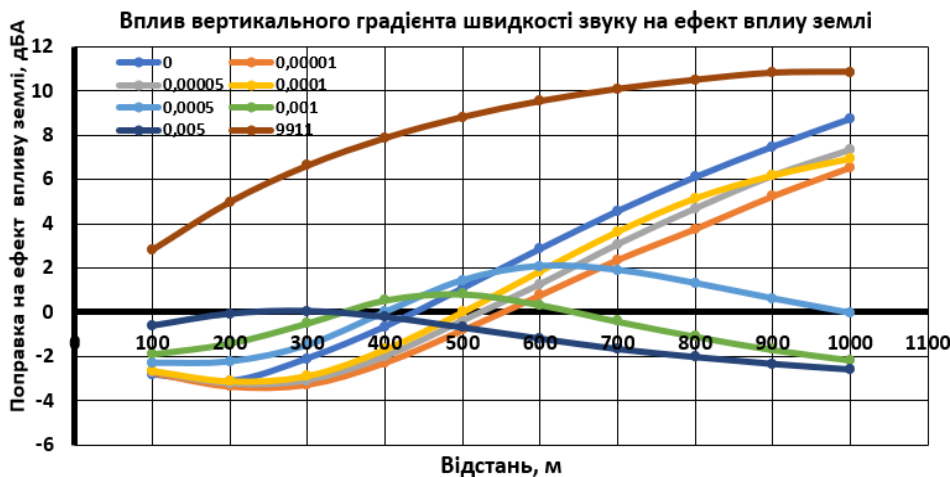


Рис. 9. Вплив вертикального градієнта швидкості звуку на ефект впливу земної поверхні (м'яка акустична поверхня – трав'яний покрив)

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. 10), 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. Залежності «шум-режим роботи двигуна-відстань» або NPD-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.

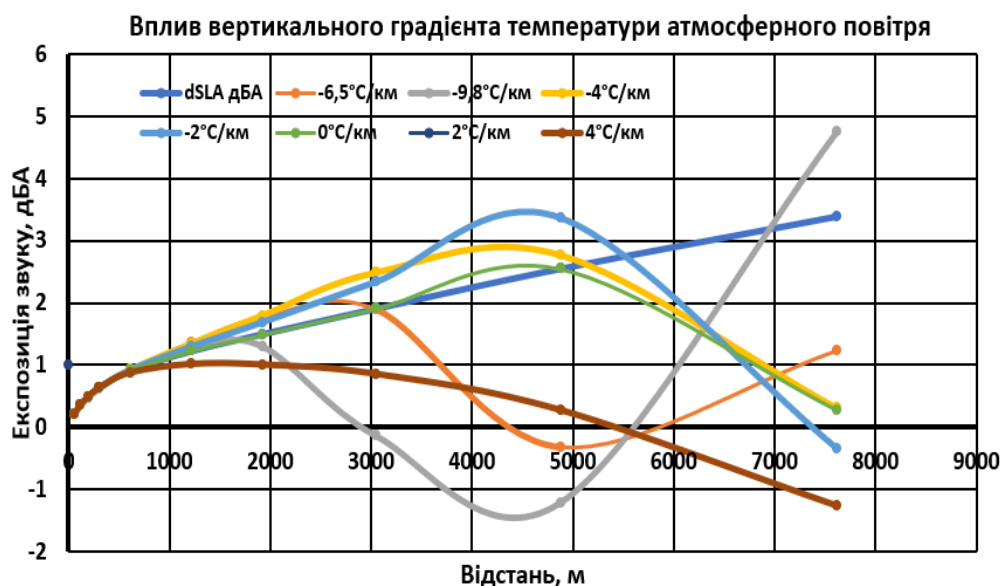


Рис. 10. Вплив вертикального градієнта температури атмосферного повітря на відмінність обчислених даних рівнів експозиції звуку від табличних значень NPD-залежності

Для літаків з ТРДД с надвисоким ступенем двоконтурності ( $m_{дв} > 10$ ) 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.

Шум реактивних літаків характеризується пелюстковою діаграмою спрямованості випромінювання у задню напівсферу, яка більшою мірою визначається шумом, що випромінюється струменем вихлопних газів. Даний ефект враховується поправкою на спрямованість випромінювання шуму  $\Delta_{SOR}$  в залежності від азимутального кута (рис. 11). Ця поправка  $\Delta_{SOR}$  в стандарті SAE AIR 5662 M є однаковою для усіх літаків і не враховує їх відмінність між собою для існуючих типів літаків. За чинною методологією 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.

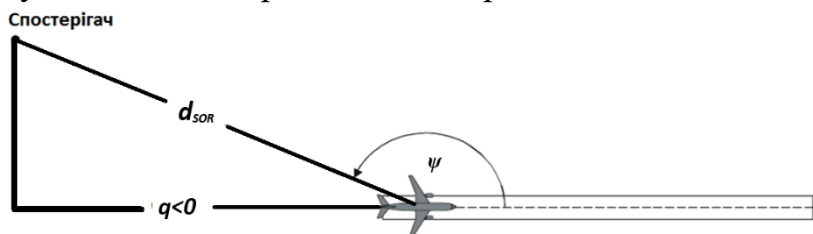


Рис. 11. Геометричні параметри «літак – спостерігач» для оцінки функції спрямованості випромінювання звуку

З метою підвищення точності розрахунків рівнів шуму пропонується в базовій моделі обчислення максимального рівня та рівня експозиції шуму передбачити декілька типів функцій спрямованості випромінювання у задню напівсферу при маневруванні літака на землі; в залежності від типу двигуна в силовій установці літака (реактивний, турбовентиляторний, турбогвинтовий); в залежності від вагової

категорії (групи) 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. Для цього розроблено програмне забезпечення, яке обчислює рівні шуму для літаків з урахуванням експериментальних значень шуму перелічених груп літаків, коли вони маневрують на поверхні землі. Вихідними даними для обчислення рівнів шуму для кожного з п'яти вагових класів літаків є наступні (рис. 12): масив кутів випромінювання, частоти третино-октавних смуг, матриця частот для кожної вагової категорії літака.

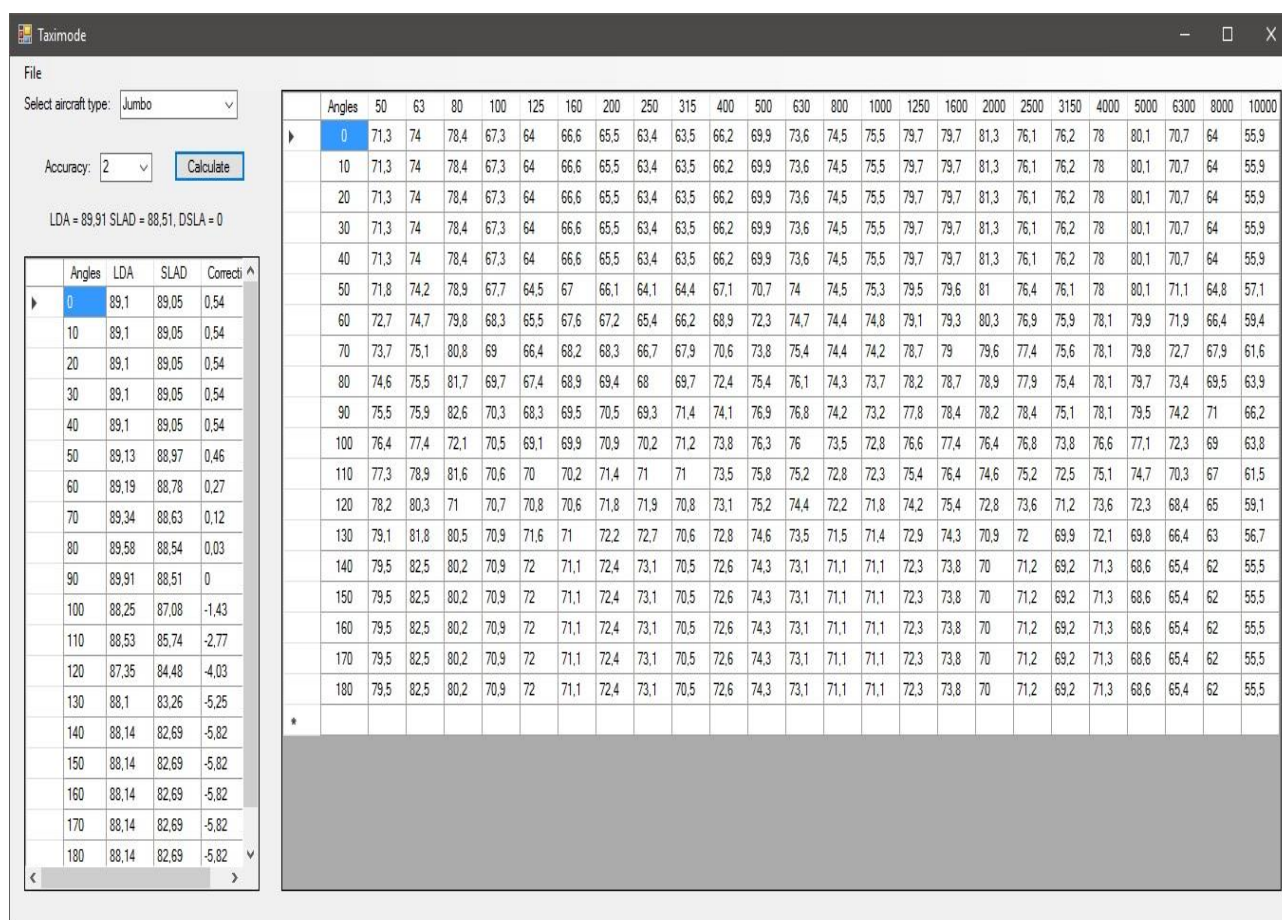


Рис. 12. Матриця рівнів шуму для літаків категорії Jumbo

На підставі отриманих даних апроксимовано функції спрямованості випромінювання у задню напівсферу ( $\Delta_{SOR}$ ) для вагових 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. 13–16). Для групи літаків Jumbo та Heavy коефіцієнт достовірності апроксимації  $\Delta_{SOR}$   $R^2=0,9984$ , для Large  $R^2=0,9981$ , для RJCJ  $R^2=0,9851$ , для Propeller  $R^2=0,9986$ . При цьому поправка  $\Delta_{SOR}$  ICAO  $R^2=0,9387$ .

Залежності поправки на спрямованість випромінювання у задню напівсферу  $\Delta_{SOR}$  для досліджених вагових категорій літаків:

$$\text{Jumbo: } \Delta_{SOR} = -4E-07 * \Psi^4 + 0,0002 * \Psi^3 - 0,0415 * \Psi^2 + 3,2498 * \Psi + 0,0238$$

$$\text{Heavy – } \Delta_{SOR} = -4E-07 * \Psi^4 + 0,0002 * \Psi^3 - 0,0415 * \Psi^2 + 3,2498 * \Psi - 1,9762$$

$$\text{Large – } \Delta_{SOR} = 2E-06 * \Psi^4 - 0,0009 * \Psi^3 + 0,1504 * \Psi^2 - 10,635 * \Psi + 342,66$$

Regional Jet –  $\Delta_{SOR} = -3E-07 * \Psi^4 + 0,0001 * \Psi^3 - 0,0216 * \Psi^2 + 1,5028 * \Psi + 43,282$   
 Propeller –  $\Delta_{SOR} = 2E-06 * \Psi^4 - 0,0009 * \Psi^3 + 0,1842 * \Psi^2 - 16,434 * \Psi + 609,11$

Поправка рівнів звуку спрямованості на випромінювання у задню напівсферу групи літаків Large (кути  $90^0 - 180^0$ )

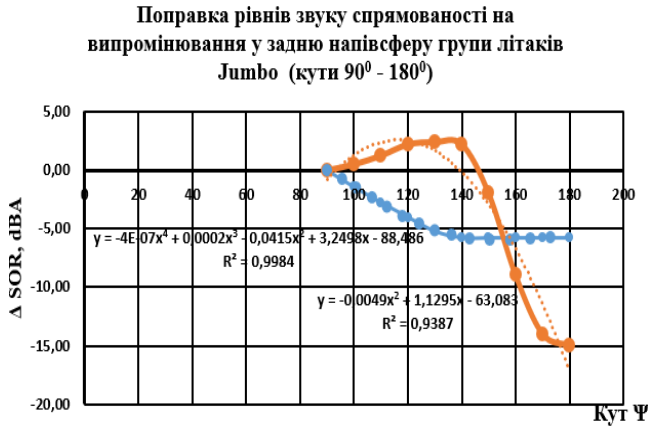


Рис. 13. Поправка  $\Delta_{SOR}$  для групи літаків Jumbo та Heavy

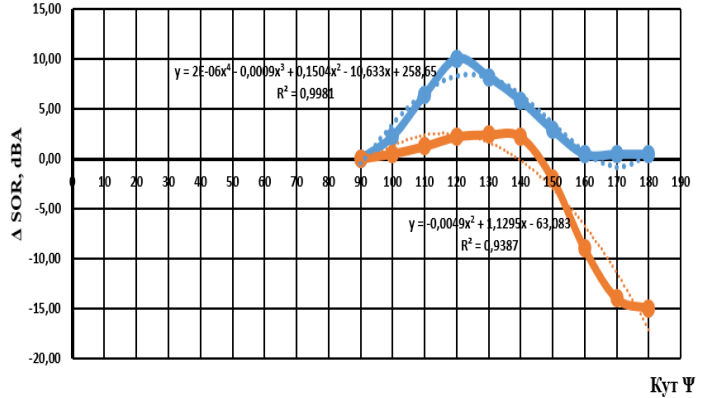


Рис. 14. Поправка  $\Delta_{SOR}$  для групи літаків Large

Поправка рівнів звуку спрямованості на випромінювання у задню напівсферу групи літаків RJCSJ (кути  $90^0 - 180^0$ )

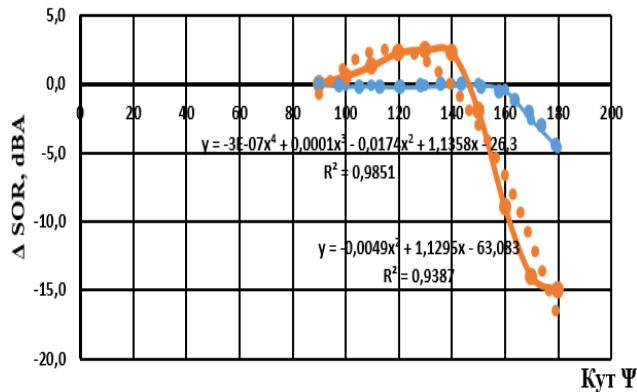


Рис. 15. Поправка  $\Delta_{SOR}$  для групи літаків RJCSJ

Поправка рівнів звуку спрямованості на випромінювання у задню напівсферу групи літаків Propeller (кути  $90^0 - 180^0$ )

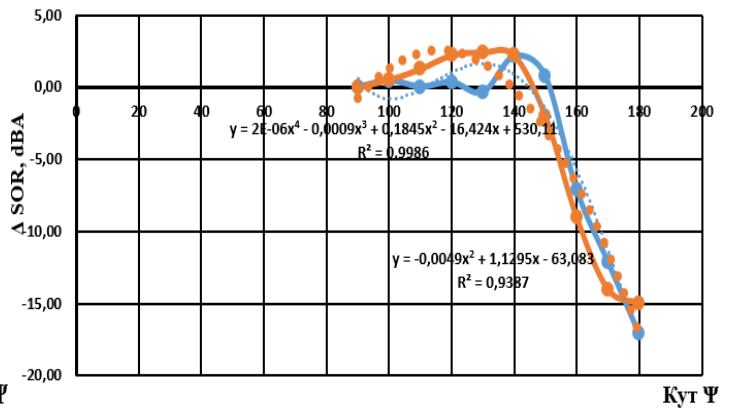


Рис. 16. Поправка  $\Delta_{SOR}$  для групи літаків Propeller

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 ( $\Delta_{SOR}$ ) 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  $L_{DEN}, L_{DN}$ .

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:

$$L_{max,seg} = L_{max}(P, A, d) + \Delta_i(\varphi) - \Lambda_s(\beta, l) + \Delta_{SORіспам} \quad (5),$$



а внесок до рівня експозиції звуку  $L_{AE}$  від кожного сегмента траєкторії польоту обчислюється як

$$L_{E,seg} = L_{E\infty}(P, A, d) + \Delta_V + \Delta_I(\varphi) - \Lambda(\beta, l) + \Delta_F + \Delta_{SOR} \quad (6),$$

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 NARD-залежностей для дійсних значень тяги або потужності двигуна  $P$ , аеродинамічної конфігурації  $A$  та відстані  $d$ . Складові у (5, 6) 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);  $\Delta_{SOR,igr}$  – поправка на спрямованість випромінювання шуму у задню напівсферу від літака окремої групи  $i_{gr}$  (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  $L_{AE}$ .

**У четвертому розділі** для визначення впливу електромагнітних полів найбільш типових джерел на населення і довкілля та прогнозування електромагнітної обстановки у конкретному місці (території) обґрунтовано і реалізовано розрахунковий апарат, за допомогою якого було створено прикладне програмне забезпечення для моделювання змін напруженостей електричного, магнітного полів розосереджених (повітряні та кабельні лінії електропередачі) та локалізованих у просторі джерел (електричні машини різного призначення тощо). Для повітряних та кабельних ліній електропередачі напруженість електричного поля розраховувалася у комплексній формі на основі густини електричного заряду з урахуванням явища віддзеркалювання, індукція магнітного поля розраховувалася також у комплексній формі на основі закону Біо-Савара. Моделювання реалізовано у програмному середовищі Microsoft Visual Studio з використанням мов програмування C# та MATLAB. Вихідними даними для розрахунку електромагнітної обстановки повітряної лінії електропередачі є: 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. Результати розподілів напруженості електричного поля та індукції магнітного поля записуються у базу даних, відображаються у вигляді графіків. Це дозволяє оцінити електромагнітне навантаження на довкілля з боку повітряних та кабельних ліній електропередачі, визначити умови, заходи і засоби нормалізації електромагнітної обстановки шляхом зменшення рівнів поля за рахунок експлуатаційних та технічних рішень, наведено нижче.

Результати розрахунків напруженості електричного поля та магнітної індукції повітряної лінії напругою 330 кВ наведені на рис. 17-18:

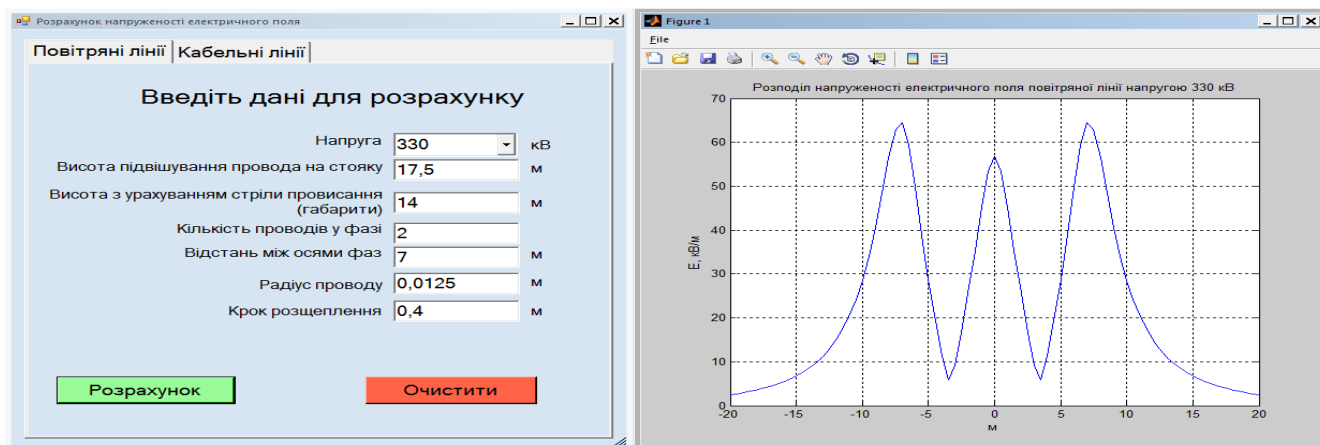


Рис. 17. Розрахунок напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 330 кВ (на висоті 1,8 м від поверхні землі)

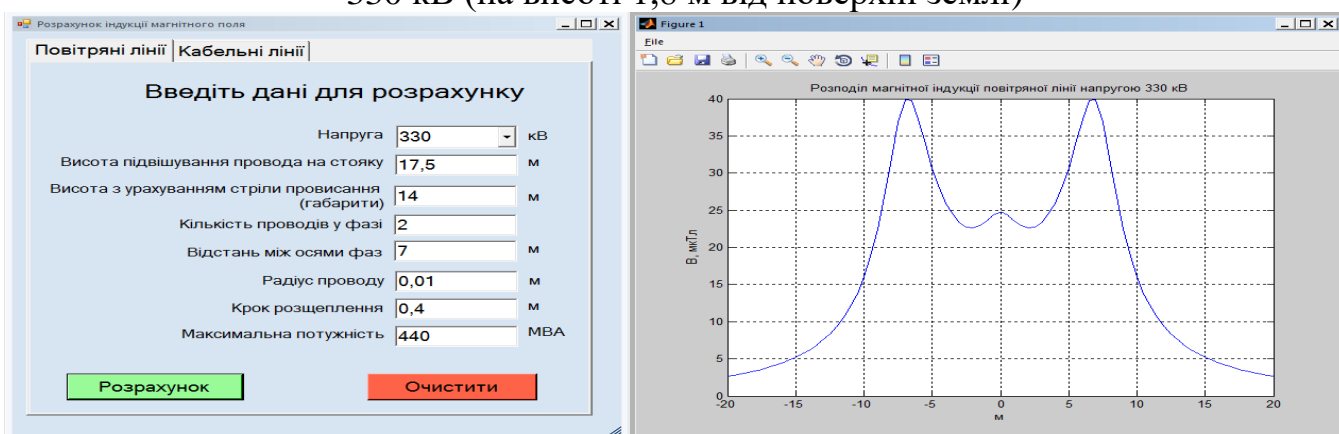
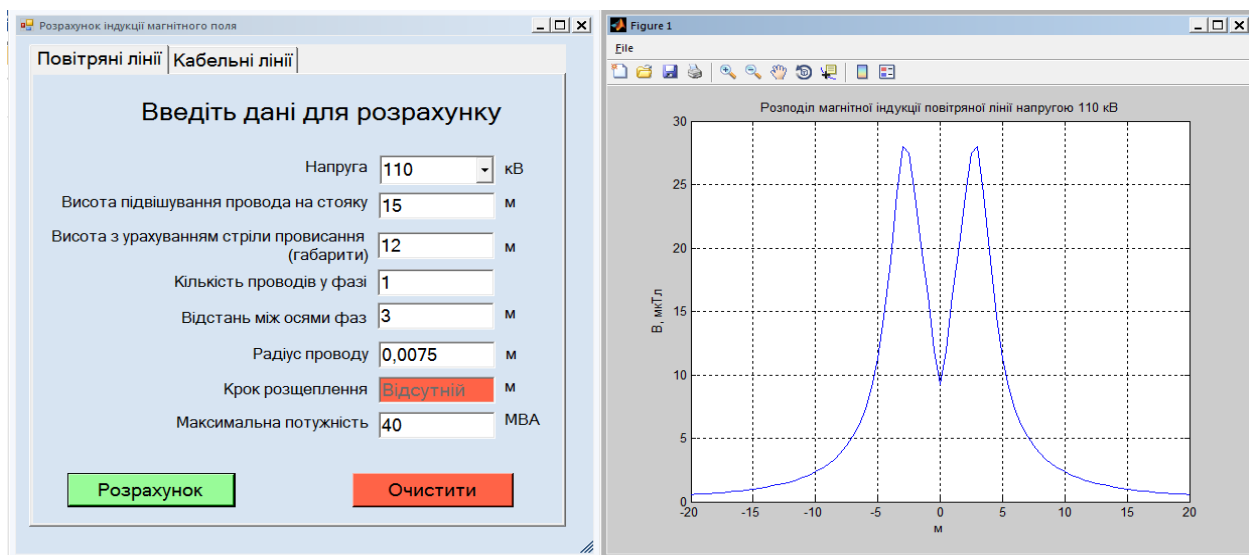


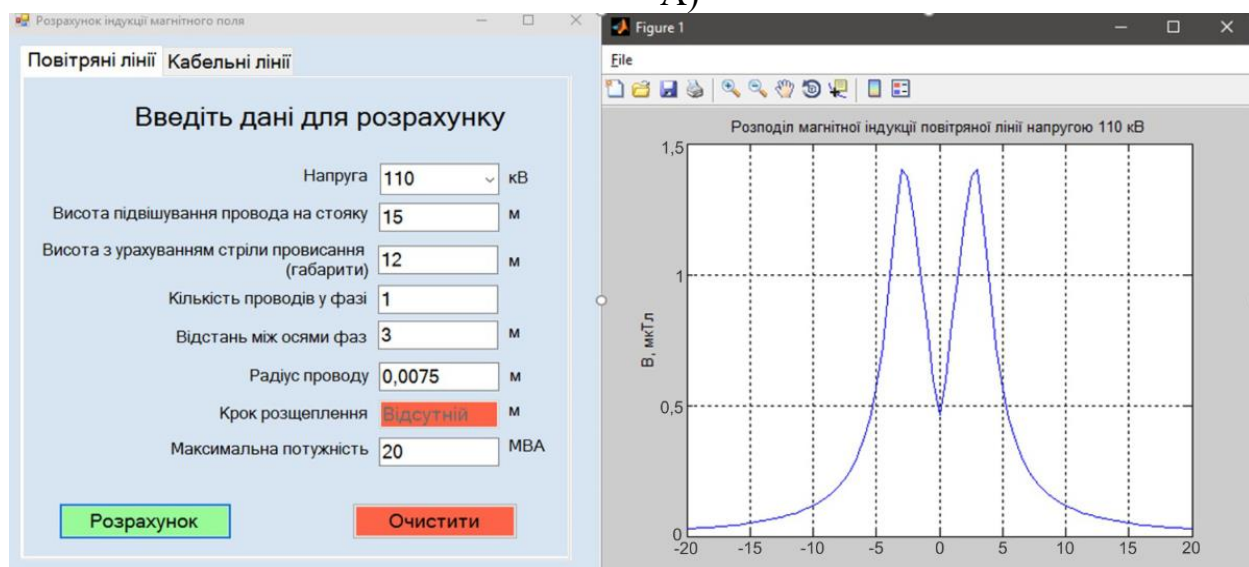
Рис. 18. Розрахунок магнітної індукції повітряної лінії напругою 330 кВ (на висоті 1,8 м від поверхні землі)

На відміну від попередніх досліджень щодо розрахунку електромагнітного навантаження пропонується варіювання технічними параметрами повітряної лінії (у тому числі і електронавантаженням). Використовуючи моделювання на стадіях проектування або модернізації повітряних ліній, є можливість 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, зниження яких тільки за рахунок варіацій наведених параметрів складає 1,7-2,4 рази. Навіть прорахувавши максимальний електричний струм у повітряній лінії, який генерує магнітне поле, що не створює небезпеки для людей згідно чинних нормативів, можна обмежити цей струм за рахунок диспетчеризації потоків електроенергії (рис. 19). На рис. 19 наведено приклад, що за рахунок зменшення максимальної потужності повітряної лінії з 40 МВА до 20 МВА отримуємо зниження індукції магнітного поля на відстані 10 м від крайнього проводу з 3 мкТл до 0,1 мкТл (ГДР - 0,5 мТл). Відстані від повітряної лінії напругою 110 кВ до житлової забудови не регламентуються.

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 електричний струм неможливо.



А)



Б)

Рис. 19. Розрахунок магнітного поля повітряної лінії напругою 110 кВ за номінальним (А) і меншим електрострумом (Б)

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, зони обмеження забудови, санітарно-захисні зони, а й розрахувати ефективність засобів її нормалізації з їх однозначним позиціонуванням. Аналогічним чином виконано моделювання поширення магнітних полів кабельних ліній електропередачі та надано рекомендації з їх нормалізації.

Було порівняно значення реальних змін рівнів полів навколо лінії електропередачі, яка експлуатується, з розрахованими в результаті моделювання. Для перевірки було обрано повітряну лінію електропередачі напругою 330 кВ з рядним розташуванням фазних дротів, яка має санітарно-захисну зону від крайнього фазного дроту 20 м. Розподіл поля оцінювався за електричною складовою електромагнітного поля, яка не залежить від миттєвого електронавантаження. Порівняльний аналіз розрахованих значень напруженості електричного поля повітряної лінії 330 кВ (рис. 17, відлік від проекції крайнього фазного дроту на землю, діапазон значень від 62 кВ/м до 4 кВ/м) та натурних вимірювань приладом ПЗ-50 тієї ж проекції крайнього дроту (рис. 20) свідчить про задовільну збіжність виміряних та розрахованих значень. При цьому джерелом розбіжності можуть бути дещо різні висоти підвісу та стріли провисання.

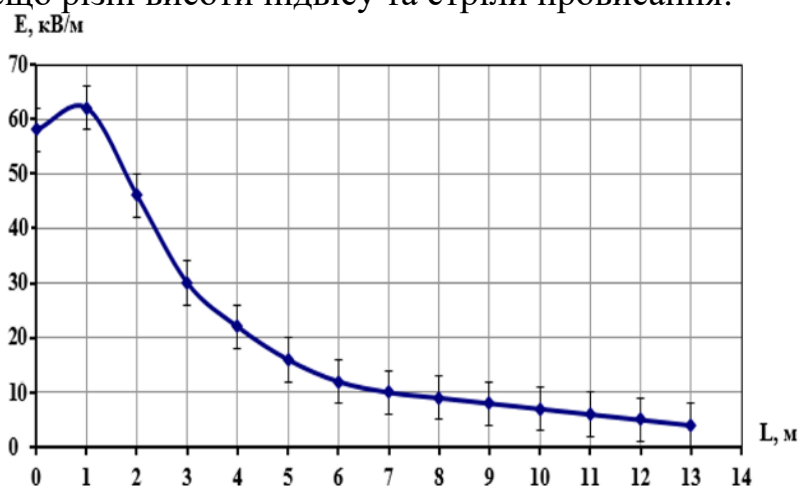


Рис. 20. Виміряна зміна напруженості електричного поля повітряної лінії напругою 330 кВ (відлік від проекції крайнього фазного дроту на землю)

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 приладу SpectranNF-5035 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. 21). Третя і п'ята гармоніки мають значні амплітуди, що потребує врахування їх у загальну електромагнітну обстановку. При цьому чинні нормативи не регламентують значення електричних і магнітних полів гармонік, але вони мають суттєві впливи на електромагнітну обстановку і повинні бути враховані, тобто фактична санітарна зона має бути збільшена з врахуванням фактичної амплітуди полів гармонік з додаванням до основної гармоніки.

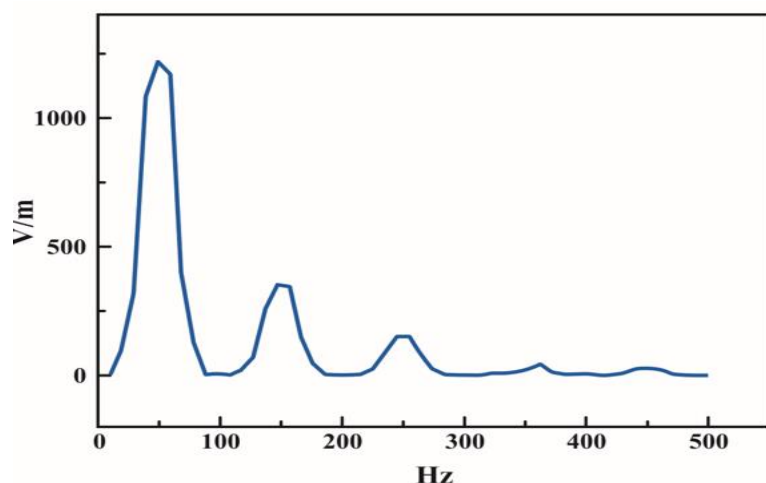


Рис. 21. Спектральний склад електричного поля поблизу повітряної лінії електропередачі напругою 220 кВ в околиці аеропорту

Це явище пов'язане зі значною часткою кінцевих споживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками, якими є радіотехнічні та електротехнічні об'єкти аеропорту. Значний внесок у електромагнітну обстановку дає електричне поле частотою 130 кГц (рис. 22). Враховуючи, що ГДР для поля цієї частоти складає 25 В/м, це поле суттєво впливає на загальний електромагнітний фон. Визначення гармонічного складу електричного поля низької частоти показало його складність (рис. 23).

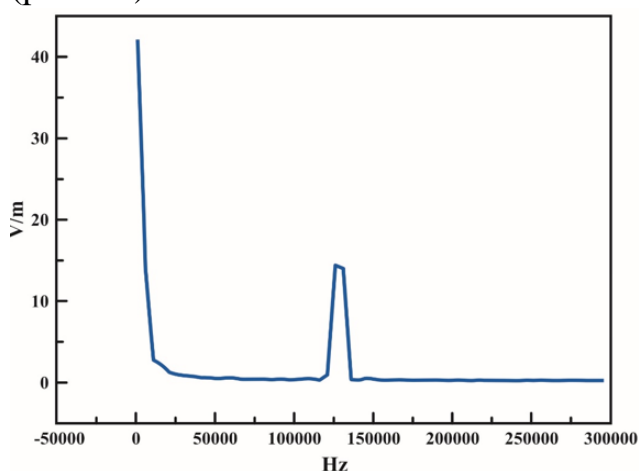


Рис. 22. Амплітуда електричного поля частотою 130 кГц

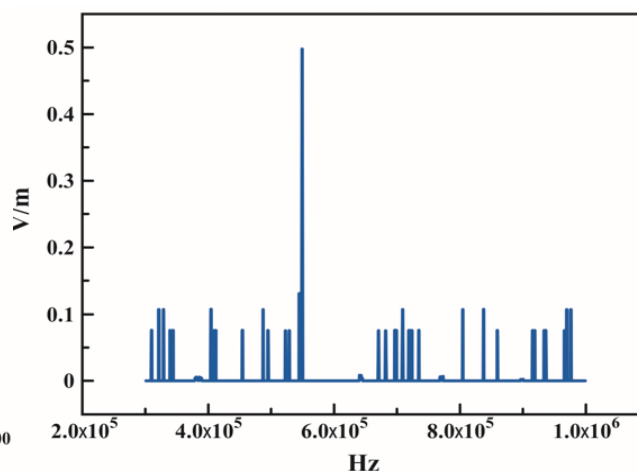


Рис. 23. Спектральний склад електричного поля низької частоти поблизу аеродрому та повітряної лінії електропередачі

Аналіз спектра показує, що не дивлячись на незначні амплітуди, він дає суттєвий внесок у електромагнітну обстановку. При цьому електричне поле частотою 530 кГц обумовлене випромінювачем дальнього приводу аеродрому «Херсон». Таким чином, вимірювання складу електромагнітного поля дає можливість визначити фактичну електромагнітну обстановку, виявити нетипові та непередбачувані джерела полів, врахувати їх напруженості при впровадженні організаційно-технічних заходів, тобто визначити санітарно-захисні зони і застосувати технічні засоби захисту.

На аеродромі використовуються чотириполюсні електричні машини, а саме: аеродромні пересувні агрегати (АПА) для запуску регіональних літаків (SAAB,

Bombardier, Fokker), електродвигуни, резервні джерела електроживлення тощо. Моделювання таких чотириполусних електричних машин здійснювалося з використанням рівняння Гауса для скалярного магнітного потенціалу. У сферичних координатах  $R, \theta, \varphi$  функція розподілу магнітного поля джерела має вигляд:

$$U = R_0 \times \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{n+1} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \cos m\varphi + b_{nm} \sin m\varphi) \times P_n^m \times \cos \varphi,$$

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:  $\mathbf{H} = \text{grad}U, \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ ;

$$H_r = \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) \times \left( \frac{R_0}{R} \right)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \times \cos m\varphi + b_{nm} \times \sin m\varphi) \times P_n^m \times \cos \theta;$$

$$H_\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \times \sin m\varphi - b_{nm} \times \cos m\varphi) \times \frac{P_n^m \times \cos \varphi}{\sin \varphi};$$

$$H_\theta = \sum_{m=1}^{\infty} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{n+2} \times \sum_{m=0}^n (a_{nm} \times \cos m\varphi + b_{nm} \times \sin m\varphi) \times$$

$$\frac{1}{\sin \varphi} \left[ (n-m+1) \times P_{n+1}^m \cos \varphi - (n+1) \times P_n^m \times \cos^2 \theta \right]$$

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 поширення магнітного поля навколо найбільш поширених чотириполусних електричних машин показало наявність зон мінімального та нульового значення магнітного поля на визначених відстанях та напрямках, що підтверджено експериментально (рис. 24). Отримані дані надають змогу обґрунтувати місце встановлення електромагнітного екрана для мінімізації розповсюдження магнітного поля та зони безпечного перебування людей.

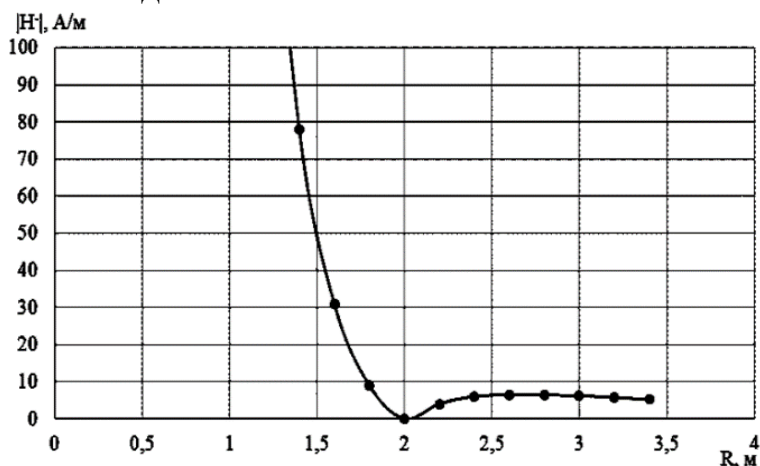


Рис. 24. Зміна напруженості магнітного поля поблизу чотириполусної електричної машини

Під час модернізації електричного обладнання або на стадії проектування енергетичних та інших об'єктів найбільш раціональним засобом прогнозування електромагнітної обстановки є моделювання поширення ЕМП від множини 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.

Практично усі локальні джерела магнітних полів є джерелами дипольного та дипольно-квадрупольного типу. На основі визначення векторного магнітного потенціалу  $\mathbf{A}$  обчислюються компоненти вектора магнітної індукції  $\mathbf{B}$ . Для точки у площині  $XZ$ , визначаючи  $\text{rot}\mathbf{A}$  та враховуючи,  $y=0$ :

$$B_x = (\nabla \times A_x); \quad B_y = (\nabla \times A_y); \quad B_z = (\nabla \times A_z)$$

У декартових координатах для диполя з магнітним моментом  $\mathbf{m}$

$$B_x = \frac{3m \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta}{r^3}, \quad B_y = 0, \quad B_z = \frac{m(3\cos^2\theta - 1)}{r^3},$$

де  $r$  – відстань від диполя до точки визначення поля,  $\theta$  – кут між диполем і напрямом визначення поля.

На основі таких функцій можна отримати достовірний розподіл магнітного поля багатьох джерел як у окремому приміщенні, так і на території. Це обумовлено залежністю значень магнітного поля від відстані до джерела. На цій основі можна визначити сумарне значення електромагнітного поля для різномірних джерел на аеродромі та прилеглий території.

Тенденцією сьогодення є виведення з експлуатації радіолокаційного обладнання аеродромів цивільної авіації з одночасним підвищенням кількості енергоспоживачів та загальним енергоспоживанням. Джерела енергоживлення систем життєзабезпечення аеропортів, на відміну від радіотехнічних об'єктів, не мають стандартних місць розташування та фіксованих санітарно-захисних зон. Санітарні паспорти на такі системи та окремі пристрої не передбачені чинними нормативами. Тому визначення зон обмеження перебування людей за рівнями електромагнітних полів та планування взаємного розташування обладнання здійснюється у кожному окремому випадку моделюванням просторового поширення поля на територіях.

Для проведення моделювання у середовищі Turbo Delphi було розроблено прикладне програмне забезпечення з використанням бази даних Microsoft SQL Server. Приклад такого моделювання наведено на рис. 25. На рисунку представлено модель дипольно-квадрупольного джерела – генератора аеродромного пересувного агрегата (джерело 2), яка за структурою повністю збігається з представленою у роботі оціночною формою такого поля чотирьохполюсної електричної машини, що підтверджує достовірність проведеного моделювання. Достатню універсальність обраної методології можна проілюструвати моделюванням суперпозиції наведеного вище поля з полем іншого джерела – силового трансформатора (джерело 3) (рис. 26). На даній моделі джерело 1 – магнітне поле відкритого розподільчого пристрою.

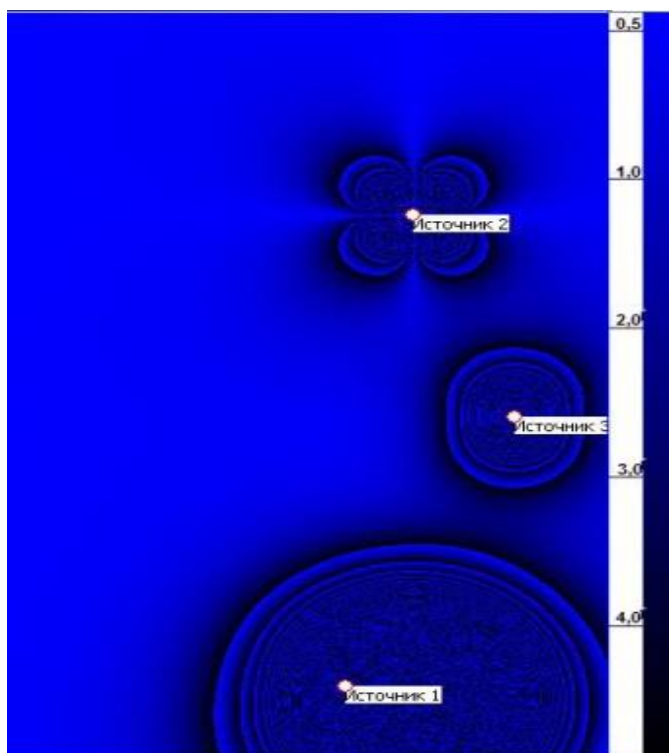


Рис. 25. Моделювання просторового розподілу магнітного поля багатьох дипольних джерел різних орієнтацій джерел (праворуч – шкала напруженості магнітного поля, яка позначається кольором в мкТл, ГДР - 3 мкТл)

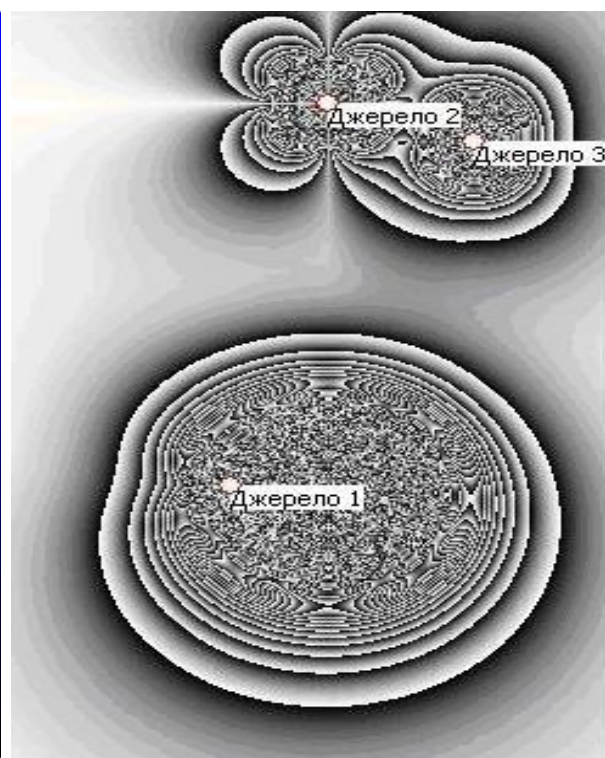


Рис. 26. Зміна конфігурації магнітного поля дипольно-квадрупольного типу за появи додаткового джерела поля

Результати моделювання можуть бути використані для встановлення санітарно-захисних зон, які саме визначаються ізолінією напруженості магнітного поля, що відповідає гранично-допустимому значенню напруженості магнітного поля для відповідної частоти або частотного діапазону.

Наведені підходи доцільно використовувати й для моделювання стаціонарних магнітних полів, зокрема, спотворення геомагнітного поля будівлями і спорудами, що шкідливо для здоров'я людей.

**У п'ятому розділі** розроблено інформаційну систему екологічного моніторингу авіаційного шуму відповідно до вимог ІСАО, 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 (рис. 27). 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.

Розглянуто неакустичні чинники роздратування населення як реакції людини на шум від будь-якого джерела, яке проживає поряд з аеропортом. Запропоновано ризик орієнтований підхід до оцінювання впливу шуму повітряного судна поблизу аеропорту, загальні засади електромагнітного моніторингу, заходи і засоби нормалізації зниження електромагнітного навантаження на населення та довкілля.



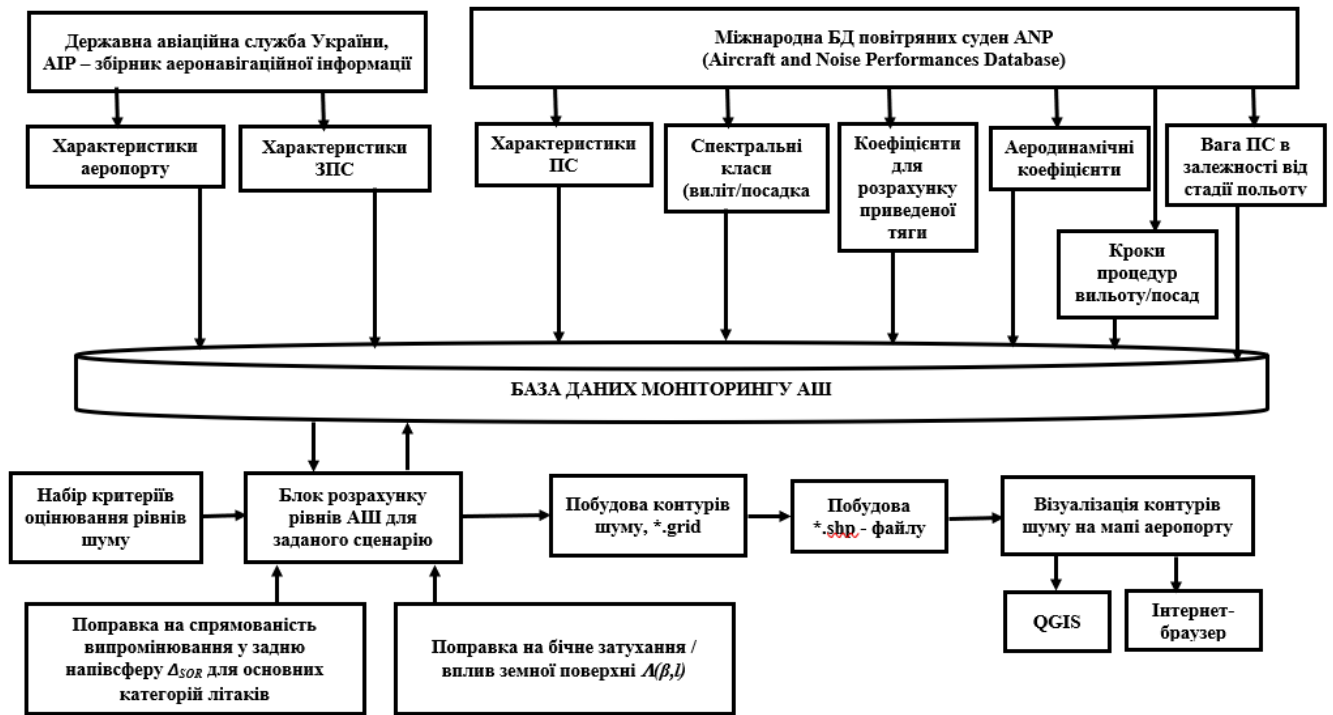


Рис. 27. Схема інформаційної системи екологічного моніторингу АШ

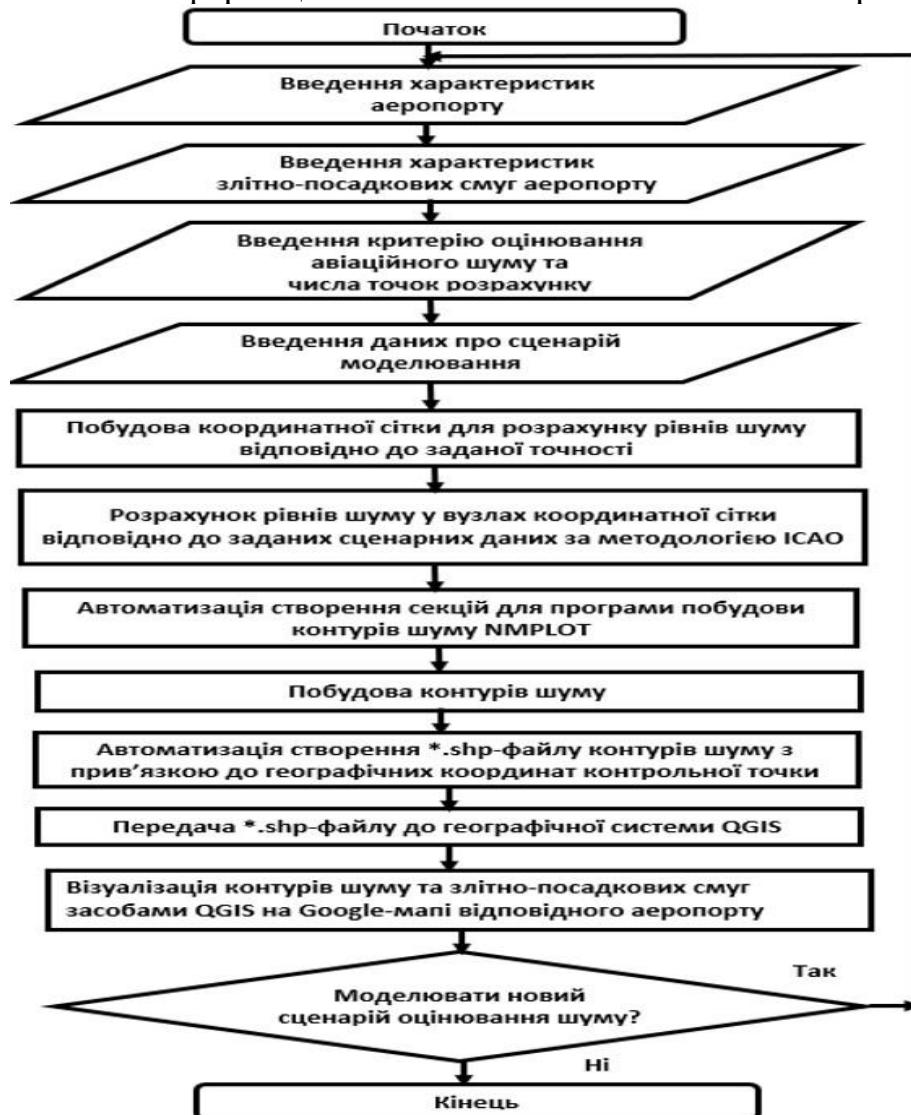


Рис. 28. Алгоритм розрахунку рівнів шуму

Розрахунковий алгоритм оцінювання шуму здійснюється відповідно до методології ICAO (рис. 28). До розрахованих та побудованих контурів шуму додається опис налаштувань на всесвітню систему геодезичних параметрів Землі WGS84 (WorldGeodeticSystem 1984). Для нанесення побудованих контурів шуму на мапу конкретного аеропорту з прив'язкою до його контрольної точки використовується середовище ГІС QGIS, яка має набір різних типів мап (GoogleMaps, Bing Maps тощо).

Змодельовані і побудовані контури рівнів шуму для вильоту літака Boeing 737-548 в аеропорту «Київ» наведені на рис. 29, для його прибуття – рис. 30. Для визначення відповідності обраної математичної моделі, вихідних умов, прийнятих допущень для моделі, обраного методу рішення моделі, отриманих результатів моделювання значень рівнів шуму у розробленій системі екологічного моніторингу були проведені натурні вимірювання рівнів шуму шумоміром-аналізатором спектру «Октава-110А» в аеропорту «Київ імені Ігоря Сікорського».

При зльоті результати вимірювань рівнів шуму наведені на рис. 31, при посадці – рис. 32. Точки вимірювання шуму показані на рис. 29-30, значення рівнів звуку подібні до обчислених інформаційною системою екологічного моніторингу АШ та відображених побудованих контурів шуму на мапі аеропорту з використанням ГІС QGIS, що в цілому підтвердило адекватність математичної моделі, запропонованого методу та розрахованих значень рівнів шуму.

Моделювання шуму із застосуванням ГІС-технології дозволяє розрахувати контури шуму, відповідно визначити зони, в яких шум перевищує певний пороговий рівень і оцінити кількість людей, що знаходяться в межах кожного контуру і потерпає від впливу шуму.

Роздратування авіаційним шумом є постійно зростаючою проблемою, особливо в міських мегаполісах, що ускладнює розвиток інфраструктури аеропорту для збільшення його потужності.

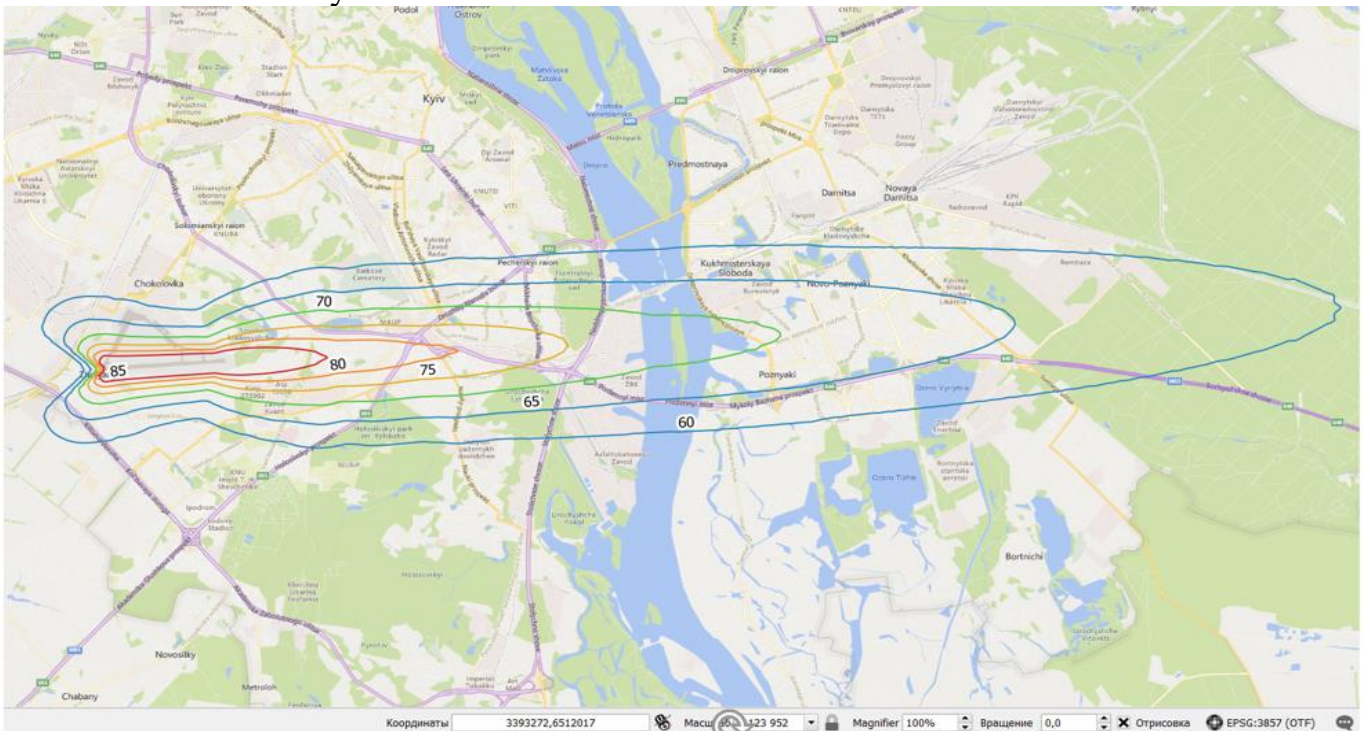


Рис. 29. Контури шуму для вильоту в аеропорту «Київ», Boeing 737-548

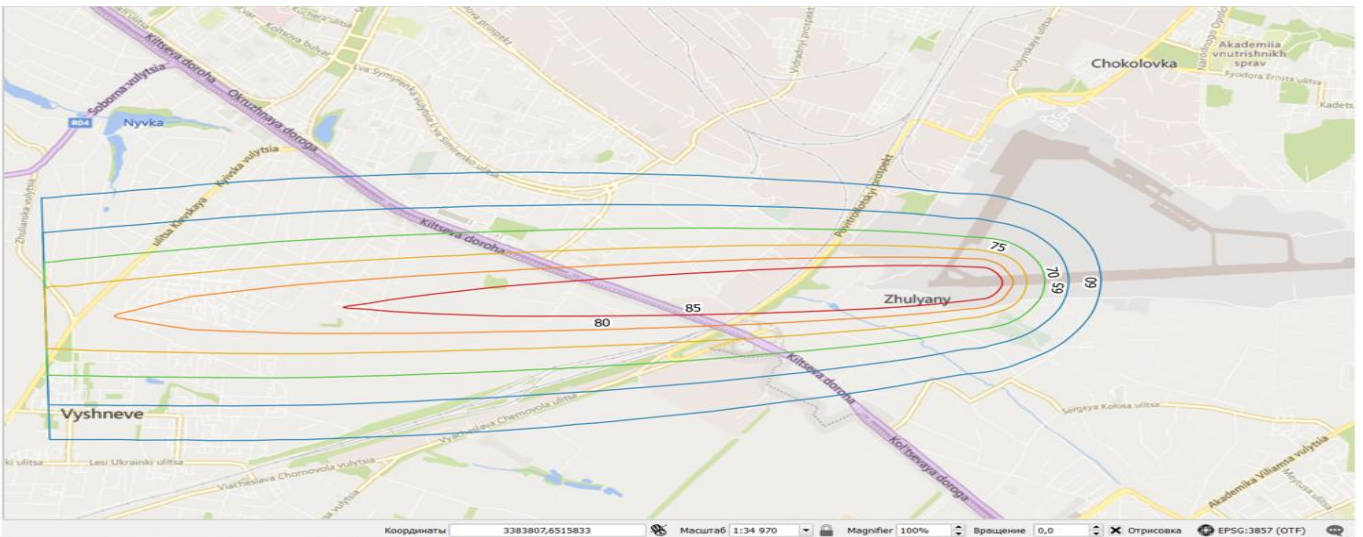


Рис. 30. Контури рівнів шуму для прибуття в аеропорту «Київ», Boeing 737-548

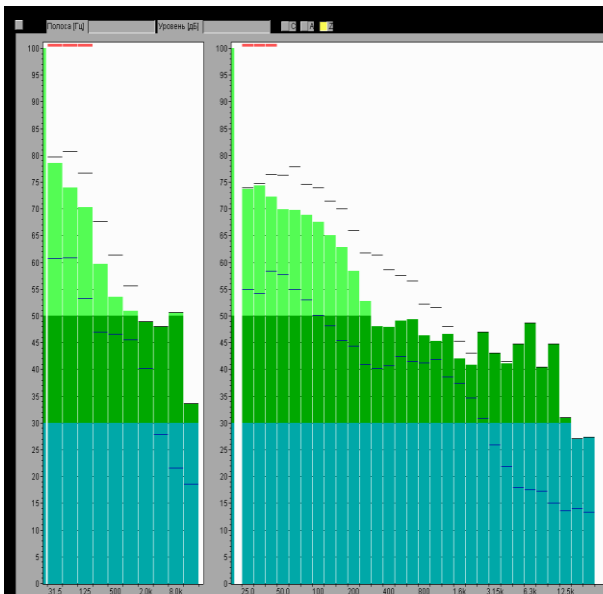


Рис. 31. Виміряні рівні шуму для зльоту літака Boeing 737-548

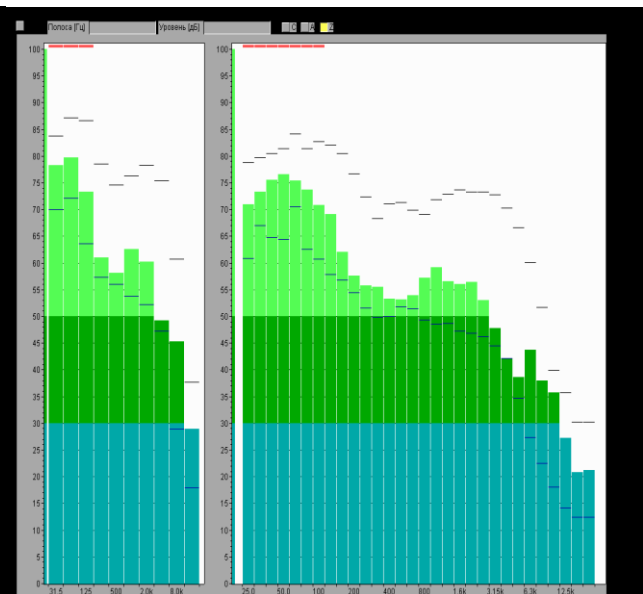


Рис. 32. Виміряні рівні шуму для приземлення літака Boeing 737-548

До таких неакустичних чинників за різними джерелами належать індивідуальна чутливість до шуму (кореляція Пірсона  $r = 0,324$  для відношення чутливості до подразнення варіюється від 0,15 до 0,48), стурбованість негативними наслідками для здоров'я від шуму та забруднення (ефект шумового роздратування дорівнює 0,59), негативні очікування щодо збільшення експозиції шуму (0,26), занепокоєність зниженням вартості нерухомості (0,08), побоювання авіакатастроф (0,2) тощо. Для шуму від літаків нічне роздратування населення перевищує денне.

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.

Математично ризик ( $R$ ) пропорційний виміру ймовірності події ( $P$ ) (частота, ймовірність) і наслідкам події ( $I$ ) (втрати, збитки):  $R=P \cdot I$ . Індивідуальний ризик визначається як:  $R=P_f \cdot P_{df}$ , де  $P_f$  - ймовірність шкідливої події (наприклад, авіаційна аварія);  $P_{df}$  - ймовірність наслідків (ефекту або збитку).

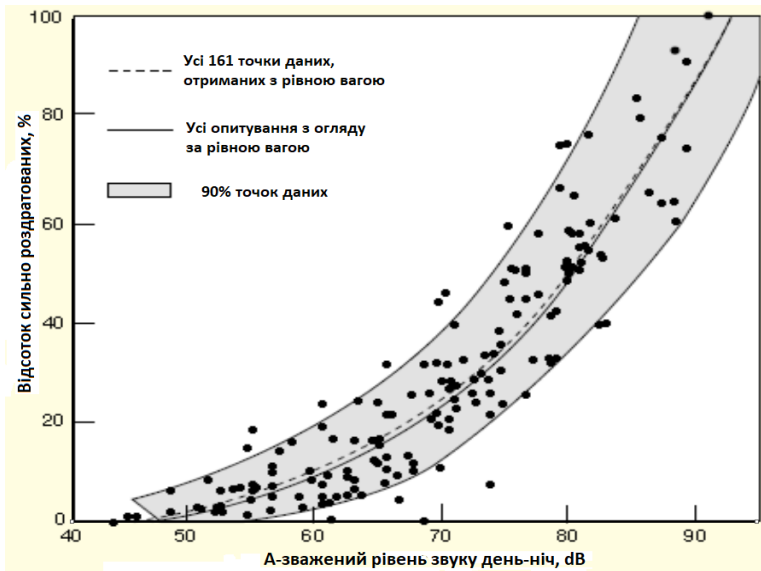
Ймовірність шкідливої події  $P_f = p_{Sc} p_{Ex}$ , де  $p_{Sc}$  - ймовірність сценарію,  $p_{Ex}$  - ймовірність впливу на небезпеку. Для авіаційного шуму будь-який політ призводить до сценарію експозиції шуму, тому вірогідність сценарію такої події  $p_{Sc} = 1$ . Вірогідність виникнення небезпеки внаслідок цього сценарію  $p_{Ex}$  залежить від конкретного розташування точки спостереження відносно траєкторії польоту.

Ймовірність наслідків  $P_{df} = k \cdot v_k$ , де  $v_k$  - оцінка вразливості  $k$ -го типу пошкодження в результаті експозиції шуму. Якщо  $k$  відповідає ефекту роздратування від шуму, то ймовірність несприятливих наслідків  $P_{df}$  в такому випадку пропонується представити як залежність відсотка роздратованого шумом населення  $HA\%$  від експозиції шуму (рис. 33), який обчислюється до добового еквівалентного рівня шуму  $L_{DEN}$ :

$$\%HA = -50.9693 + 1.0168 \times L_{den} + 0.0072 \times L_{den}^2.$$

Відсоток населення, у якого сильно порушений нічний сон HSD (highly sleep-disturbed) розраховується залежно від нічного еквівалентного рівня шуму  $L_{night}$ :

$$\%HSD = 16,79 - 0,9293 \times L_{night} + 0,0198 \times L_{night}^2.$$



Значення на кривій «доза-ефект» (рис. 33) є базовим, яке визначається з низкою 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 чинників впливу звуку.

Рис. 33. Крива «доза-ефект» для шуму – частка сильно роздратованих людей від впливу добової експозиції шуму  $L_{den}$

Зміну вразливості експонованого шумом населення стосовно джерела шуму пропонується включати у формі коригування  $\Delta L_s$ :  $L_{DN\ norm} = L_{DN\ cal/meas} + \Delta L_s$ ,

де  $L_{DN\ cal/meas}$  – прогнозований або вимірний індекс шуму, до якого треба додати коригування  $\Delta L_s$  і визначити відсоток  $HA\%$  роздратованого шумом населення з урахуванням чинника вразливості. За наявності декількох чинників вразливості необхідно враховувати сумарну поправку  $\Delta L_{si}$  і додавати до прогнозованого або виміряного індексу шуму  $L_{DN}$ :  $L_{DN\ norm} = L_{DN\ cal/meas} + \Delta L_{s\Sigma}$ .

Передумовою організації та проведення системи моніторингу шумового та електромагнітного навантаження на населення і довкілля є його технічне та методичне забезпечення у неперервному режимі та інформаційне забезпечення такого моніторингу. Останнє передбачає наявність системи передачі інформаційних потоків відповідних баз 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. Система

шумового та електромагнітного моніторингу дозволяє розв'язувати наступні завдання (рис. 34):

- виявлення джерел шумового та електромагнітного впливу на довкілля;
- контроль кількісних значень АШ та ЕМП;
- неперервне спостереження за станом довкілля і змінами, що відбуваються у ньому під впливом АШ та ЕМП;
- комплексна оцінка фактичного стану довкілля;
- прогнозування змін АШ і ЕМП та оцінка її прогнозованого стану;
- регламентація і автоматичне реагування на несприятливі зміни (тенденції) у навантаженні АШ та ЕМП на довкілля;
- впровадження організаційно-технічних заходів з нормалізації рівнів АШ та ЕМП.

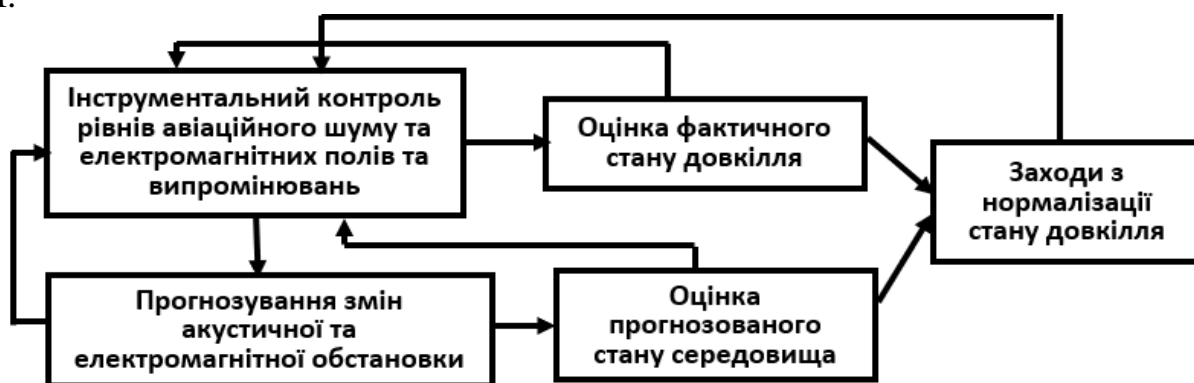


Рис. 34. Загальна схема автоматизованої системи моніторингу фізичних чинників довкілля

Найбільш складним завданням є зниження рівнів магнітних полів розосереджених джерел – повітряних ліній електропередачі, дротів живлення електричного транспорту. 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. Враховуючи наявність у середовищі електромагнітних полів усього частотного спектра, наприклад, мобільного зв'язку, захисні матеріали проектувалися як широкодіапазонні. 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. 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. 35. 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. 36. 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. З досліджених матеріалів було виготовлено геометрично замкнені конструкції для визначення ефективності екранування магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц. Результати випробувань наведено на рис. 37.

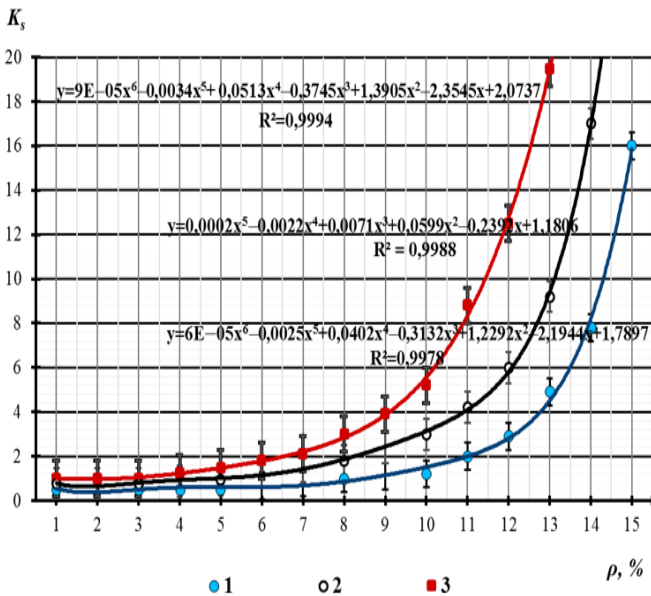


Рис. 35. Залежність коефіцієнта екранування ( $K_s$ ) металополімерного матеріалу від вмісту ( $\rho$ ) та дисперсності екрануючої субстанції:

- – 50–100 мкм, ○ – 15–25 мкм,
- – 5–10 мкм

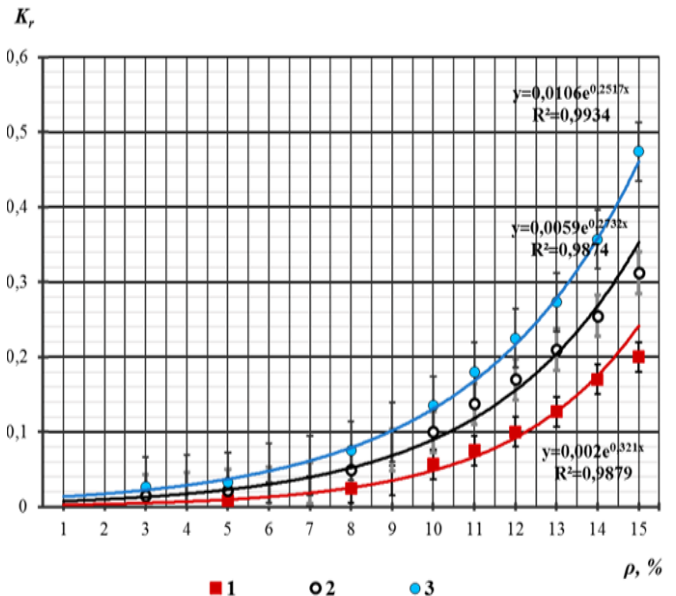


Рис. 36. Залежність коефіцієнта відбиття ( $K_r$ ) електромагнітних хвиль металополімерного матеріалу від вмісту ( $\rho$ ) та дисперсності екрануючої субстанції:

- – 50–100 мкм,
- – 15–25 мкм, ■ – 5–10 мкм

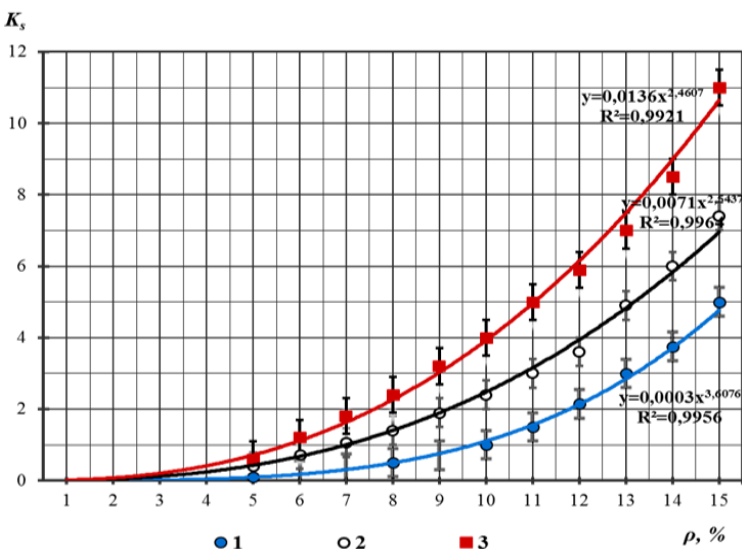


Рис. 37. Залежність коефіцієнта екранування ( $K_s$ ) магнітного поля промислової частоти 50 Гц від вмісту ( $\rho$ ) та дисперсності металевої субстанції у полімерній матриці: матриці ● – 50–100 мкм, ○ – 15–25 мкм, ■ – 5–10 мкм

Наведене свідчить, що розроблений екран дозволяє гарантовано знизити рівні магнітних полів наднизьких частот удвічі за вмісту наповнювача у 12 %. За використання екрануючих частинок нанорозмірів (магнітна рідина на основі етилового спирту) для просочення текстильного матеріалу отримано коефіцієнти екранування магнітного поля промислової частоти до 8.

Це дає змогу використовувати такий матеріал для виготовлення засобів як колективного, так і індивідуального захисту.

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. Шумозахисні властивості матеріалу визначалися у ревербераційній камері акустичної лабораторії Національного авіаційного університету за допомогою конденсаторних мікрофонів та стаціонарного каліброваного обладнання «Брюль і К'єр».

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 4G зв'язку. Досліджувалася серія екранів товщин 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. 2. Аналогічні випробування були виконані для магнітного поля промислової частоти (табл. 3).

Таблиця 2

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

Таблиця 3

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. Результати вимірювання зниження рівнів шуму у октавних смугах частот наведено на рис. 38.

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, які є найбільш вразливими людини, а гранично допустимі рівні шуму найжорсткіші.

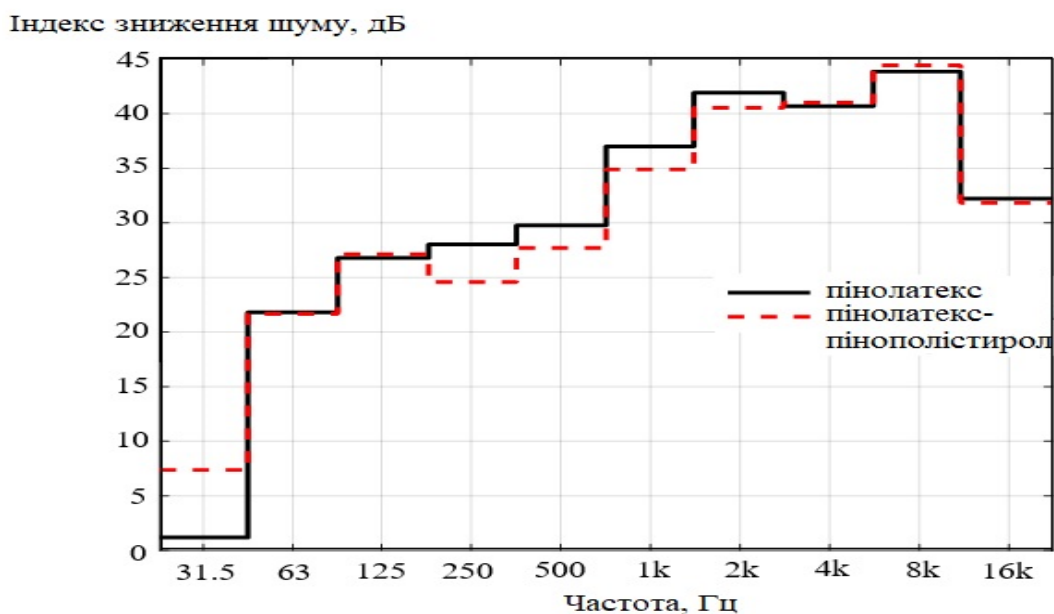


Рис. 38. Зниження рівнів шуму шумозахисними екранами з піноластексу та піноластексу з гранулами пінополістиролу

Наведені результати досліджень свідчать, що застосування універсального електромагнітного та шумозахисного екрана для одночасного зниження рівнів цих фізичних факторів можливе та ефективно. Такий екран може бути застосований для радіонавігаційних систем та систем посадки.

## 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 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 ICAO DOC 9911. Основний елемент моделі - залежність «шум-режим роботи двигуна-дистанція», яка рекомендована Керівництвом ICAO 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, ймовірні відхилення параметрів від збалансованих значень та реальні параметри стану 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 ICAO 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 ICAO 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 рульній 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 визначити 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 вразливими для 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *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*).
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: 36. наук. праць*. Дніпро: ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». 2018. Вып. 105. С. 174–179 (*Directoty of Research Journals Indexing, ResearchBib*).
15. O. Zaporozhzhets, L. Levchenko, K. Synylo. Risk and exposure control of aviation impact on environment. *Advanced Information Systems*. 2019. Vol.3. No 3. P. 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*).
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*).

#### **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 «Техновибук». 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 электромагнитного мониторинга города в условиях повышения электромагнитной нагрузки на окружающую среду. *Стратегия качества в промышленности и образовании: Сб. мат-лов XI Межд. конф., 5–12 июня 2015 г., Технический ун-т. Варна, Болгария, 2015. Том 1. С. 346–351.*
52. Левченко Л.О., Запорожець О.І., Глива 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., Глива 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 «ХП», 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., Blyukher V. 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., Блюхер Б. 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., Блюхер Б. 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. Запорожець О. І., Blykher B., 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., Подобед 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., Осадчий Д.Б., Паньків Х.В., Подобед 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.

### **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.

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

### **ABSTRACT**

***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.*