

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Бахтіяров Денис Ілшатович

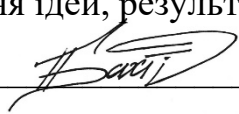
УДК 538.69:331.35

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ  
ПРИСТРОЇВ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ В  
УРБАНІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

05.12.13 «Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

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

Науковий керівник:

Козлюк Ірина Олексіївна

Доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

## АНОТАЦІЯ

**Бахтіяров Д.І. Метод підвищення ефективності використання радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки в урбанізованих середовищах. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.13 – Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій. – Національний авіаційний університет, МОН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена рішення актуальної науково-прикладної задачі, яка полягає в розробці методу визначення рівнів основних та побічних електромагнітних випромінювань в урбанізованих середовищах за рахунок удосконалення моделей їх розповсюдження. Обґрунтовано необхідність в підвищенні ефективності використання пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки на основі аналізу особливостей розповсюдження електромагнітних випромінювань в урбанізованому середовищі та недоліків існуючого математичного апарату для їх опису. Запропоновано структуру експериментальної установки та проведено дослідження особливостей розповсюдження основних та побічних електромагнітних випромінювань в урбанізованому середовищі, зроблено прогнозування характеру їх розповсюдження на прикладі моделі COST 231 MWM. Представлено модель оцінки енергетичних характеристик сигналів в точці спостереження на основі експериментальних досліджень затухання електромагнітних випромінювань в залежності від частоти, характеру перешкоди та відстані в реальних умовах експлуатації та отримано відповідні графічні й математичні залежності, що лягли в основу методу удосконалення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань.

Обґрунтовано наукові методи синтезу деталізованої структурної схеми процесів виявлення джерел небажаних електромагнітних випромінювань, що включають розробку програмного забезпечення для визначення зони електромагнітної доступності в межах приміщення. Розроблено оригінальний підхід,

алгоритм функціонування та методи синтезу засобів пошуку в умовах радіоперешкод та виявлення джерел основних та побічних електромагнітних випромінювань.

Для розв'язання проблеми у дисертації поставлено та вирішено такі задачі:

- обґрунтовано необхідність в підвищенні ефективності використання пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки на основі аналізу особливостей розповсюдження електромагнітних випромінювань в урбанізованому середовищі та недоліків існуючого математичного апарату для їх опису.

- побудовано модель оцінки енергетичних характеристик сигналів в точці спостереження на основі експериментальних досліджень затухання електромагнітних випромінювань в залежності від частоти, характеру перешкоди та відстані в реальних умовах експлуатації, отримати графічні та математичні залежності. Розроблено метод удосконалення моделей розповсюдження радіохвиль (на прикладі моделі COST 231 MWM)

- розроблення методу виявлення джерел побічних електромагнітних випромінювань в умовах складної заводої та електромагнітної обстановки всередині приміщення та розроблення деталізованої структури цього процесу.

- розроблення програмного забезпечення, що дозволить визначити периметр зони електромагнітної доступності на базі отриманого математичного апарату для потреб моніторингу електромагнітної обстановки всередині приміщень.

- проведення експериментальної верифікації отриманих результатів для оцінки особливостей розповсюдження основних та побічних електромагнітних випромінювань в урбанізованому середовищі, проведення прогнозування характеру їх розповсюдження на прикладі моделі COST 231 MWM, на основі отриманих результатів оцінено можливості перехоплення та відтворення семантичної інформації за рахунок ПЕМВН.

Результати дисертації використані у НДР № 874-ДБ13 “Створення та дослідження нових систем захищеного авіаційного радіозв'язку в рамках концепції CNS/ATM ICAO” (№ держ. реєстрації 0113U000093), в яких автор був виконавцем та які виконувались на кафедрі телекомунікаційних систем Національного авіаційного університету. Результати роботи впроваджено у навчальний процес Національного

авіаційного університету, діяльність Навчально-науково-виробничого комплексу «Інформаційно-комунікаційні системи» та у секторах інформаційних технологій і охорони державної таємниці, технічного та криптографічного захисту інформації Сумської митниці ДФС.

**Ключові слова:** побічні електромагнітні випромінювання, зона електромагнітної доступності, розповсюдження радіохвиль, модель Хата, модель COST 231 MWM, моніторинг електромагнітної обстановки, коефіцієнт затухання.

## ABSTRACT

**Bakhtiarov D. I. A method of increasing the efficiency of using radio devices for monitoring the electromagnetic situation in urban environments. – Manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.12.13 - Radio engineering devices and means of telecommunications. - National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the decision of the actual scientific and applied problem that consists in development of a method of definition of levels of the basic and side electromagnetic radiations in the urban environments at the expense of perfection of models of their distribution. The necessity in the increased efficiency of use of devices of monitoring of an electromagnetic situation based on the analysis of features of distribution of electromagnetic radiations in the urban environment and lacks of the existing mathematical approach for their description is proved. The structure of the experimental setup is proposed and the peculiarities of propagation of main and side electromagnetic radiation in urban environment are studied, predicted the nature of their propagation on the example of COST 231 Multi-Wall-Model. Introduced the model for estimating the energy characteristics of signals in the accuracy of observation based on experimental studies of electromagnetic radiation depending on the frequency, nature of interference and distance in real conditions of use and the answers of graphical and mathematical dependences, which formed the basis of improving methods of electromagnetic radiation propagation.

Scientific methods of synthesis of the detailed structural scheme of processes of detection and localization of technical channels of information leakage, including development of the software for definition of the controlled zone of the room (Zone 2) are substantiated.

To solve the problem in the dissertation the following tasks have been set and solved:

- the necessity in the increased efficiency of use of devices of monitoring of an electromagnetic situation on the basis of the analysis of features of distribution of electromagnetic radiations in the urban environment and lacks of the existing mathematical approach for their description is proved.

- has been created the model for estimating the energy characteristics of signals at the observation point based on experimental studies of electromagnetic radiation attenuation depending on the frequency, nature of interference and distance in real operating conditions, for obtaining graphical and mathematical dependences. Has been developed method for improving radio wave propagation models (on the example of the Hata model COST 231).

- development of a method for detection and localization of devices for covert recording of information (radio microphones) in a complex interfering and electromagnetic environment inside a dedicated room of the controlled area and development of a detailed structure of this process.

- development of software that will determine the perimeter of the electromagnetic availability zone on the basis of the obtained mathematical apparatus for the purposes of monitoring the electromagnetic environment indoors and information security.

- conducting experimental verification of the obtained results to assess the peculiarities of the propagation of main and secondary electromagnetic radiation in the urban environment, predicting the nature of their distribution in applied models of COST 231, based on the results, evaluated by viewing and creating semantic information about side electromagnetic radiation and pickup.

The results of the dissertation were used in R&D № 874-DB13 “Creation and research of new protected aviation radio communication systems within the concept of CNS / ATM ICAO” (№ state registration 0113U000093), in which the author was the executor and performed at the Department of Telecommunication Systems of the National Aviation

university. The results of the work were implemented in the educational process of the National Aviation University, activity of the Educational-scientific-production complex «Information-communication systems» and in the sectors of information technologies and protection of state secrets, technical and cryptographic information protection of Sumy Customs SFS.

**Key words:** side electromagnetic radiation, electromagnetic availability zone, radio wave propagation, Hata model, COST 231 Multi-Wall-Model, electromagnetic environment monitoring, attenuation coefficient.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бахтіяров Д. І. Методи вимірювань побічних електромагнітних випромінювань. *Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики*: матеріали II Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ, 23–24 жов. 2013 р., редкол. М. С. Кулик та ін., 2013. – С. 26.
2. Бахтіяров Д. І., Андрухович П. О. Аналіз нормативної бази в області захисту інформації. *Проблеми навігації і управління рухом*: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф., м. Київ 18–20 лис. 2013 р., 2013. – С. 96.
3. Бахтіяров Д. І. GPS Spoofing як засіб перехоплення керування безпілотним літальним апаратом. *Політ. Сучасні проблеми науки*: матеріали XIV Міжн. наук.-практ. конф., м. Київ, 2–3 квіт. 2014 р., 2014. – С. 279
4. Бахтіяров Д. І. Козлюк І. О. Аналіз ефективності комплексного застосування заходів завадозахищеності для підвищення стійкості функціонування засобів керування БПЛА. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: матеріали наук.-техн. конф., м. Київ, 17–19 лис. 2014 р., 2014. – С. 50.
5. Бахтіяров Д. І. Луцький М. В. Аналіз існуючих систем завадостійкого кодування та їх порівняльна характеристика за часом затримки сигналу. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM*: матеріали наук.-техн. конф., м. Київ, 17–19 лис. 2014 р., 2014. – С. 53.
6. Бахтіяров Д. І. Дослідження методів побудови захищених каналів управління БПЛА. *AVIA 2015*: матеріали XII міжн. наук.-техн. конф. м. Київ, 2015 р., 2015. – С. 972 – 975.
7. Бахтіяров Д. І., Конахович Г. Ф., Козлюк І. О. Луцький М. В. Моделювання захищеного каналу керування безпілотним літальним апаратом. *Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах*: матеріали XVI Міжн. наук.-практ. конф., м. Київ, 26–28 трав. 2015 р., 2015. – С. 45–48.
8. Бахтіяров Д. І., Коханович Г. Ф., Муранов О. С., Красносільський О. М. Завадостійка захищена система керування повітряним рухом. *Безпека інформації в*

*інформаційно-телекомунікаційних системах*: матеріали XVI Міжн. наук.-практ. конф., м. Київ, 26–28 трав. 2015 р., 2015. – С. 45–48.

9. Бахтіяров Д. І., Луцький М. В. Моделювання захищеного каналу керування безпілотним літальним апаратом. *Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем*: матеріали наук.-практ. конф., м. Київ, 2 – 4 чер. 2015 р., 2015. ТОВ «Центр учбової літератури», 2015. – С. 112–113.

10. Бахтіяров Д. І., Конахович Г. Ф., Лавриненко О. Ю., Давлет'янц О. І. Порівняльний аналіз перетворення Фур'є, косинусного перетворення та Вейвлет-перетворення як спектрального аналізу цифрових мовних сигналів *Наукоємні технології*. 2015. Т. 27. №. 3. – С. 210–220.

11. Бахтіяров Д. І., Конахович Г. Ф., Лавриненко О. Ю. Комп'ютерне моделювання захищеного каналу керування безпілотним літальним апаратом. *Наукоємні технології*. 2015. Т. 28. №. 4. – С. 283–290.

12. Бахтіяров Д. І. Дослідження мультиплексованого сигналу керування безпілотними літальними апаратами. *Collection" Information technology and security"*. 2015. Т. 3. №. 2. – С. 152–159.

13. Bakhtiiarov D. I., Konakhovych G. F., Lavrynenko O. Y. Antonov V. V. A Digital Speech Signal Compression Algorithm Based on Wavelet Transform. *Electronics and control systems*. 2016. №. 2. – С. 30–36.

14. Bakhtiiarov D. I., Kozliuk I. O., Lavrynenko O. Y. Tretiak I. V. Problems of unauthorized interference to the work of UAV and methods of its solving. *Science-based technologies*. 2016. Т. 30. №. 2. – Р. 206–211.

15. Бахтіяров Д. И., Лавриненко А. Ю., Одарченко Р. С., Конахович Г.Ф. Алгоритм сжатия сигналов речевых команд управления функциями беспилотного летательного аппарата. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. №3 (130). – С. 57–67.

16. Бахтіяров Д. І. оцінка енергетичної доступності засобів зв'язку з БПЛА в умовах радіоелектронної протидії з боку противника. *Collection" Information technology and security"*. 2016. Т. 4. №. 1. – С. 118–130.



17. Bakhtiiarov D., Lavrynenko O., Konakhovych G. Method of Voice Control Functions of the UAV. *IEEE 4th Conference "Methods and Systems of Navigation and Motion Control"*: materials Intern. sc. conf., Kyiv, Oct. 18–20 2016. 2016. – P. 47–50.

18. Bakhtiiarov D., Lavrynenko O., Konakhovych G. Protected System of Radio Control of Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE 4th Conference "Methods and Systems of Navigation and Motion Control"*: materials Intern. sc. conf., Kyiv, Oct. 18–20 2016. 2016. – P. 196–199.

19. Конахович Г. Ф., Бахтіяров Д. І., Муранов А. С. Безпека інформаційних мереж та систем: навч. посіб. / ред. Г. Ф. Конахович. Київ: НАУ, 2016. 46 с.

20. Бахтіяров Д. І., Мензюк О. С., Федотов М. М., Якименко М. В. Дослідження методів реалізації захисту Wi-Fi мережі на підприємстві. *Політ 2018. Сучасні проблеми науки: матеріали XVIII Міжн. наук.-практ. конф., м. Київ, 3–6 квіт. 2018 р.* 2018. – С. 47–48.

21. Бахтіяров Д. І., Бережко С. О. Методика визначення контрольованої зони за допомогою модернізованої моделі Хата. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: матеріали наук.-техн. конф., м. Київ 21–23 листопада 2018 р.* 2018. – С. 24.

22. Бахтіяров Д. І., Слюсаренко В. С., Слюсаренко Н. А. Вплив ефекту багатопроменевості на вихідні дані супутникових радіонавігаційних систем. *Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: матеріали наук.-техн. конф., м. Київ 21–23 лис. 2018 р.* 2018. – С. 31.

23. Bakhtiiarov D., Lavrynenko O., Konakhovych G. An approach to modernization of the Hat and COST 231 model for improvement of electromagnetic compatibility in premises for navigation and motion control equipment. *IEEE 5th International Conference "Methods and Systems of Navigation and Motion Control"*: materials sc. conf., Kyiv, Oct. 16–18, 2018. 2018. – P. 271–274.

24. Bakhtiiarov D., Lavrynenko O., Konakhovych G. Compression algorithm of voice control commands of UAV based on wavelet transform. *Electronics and control systems.* 2018. №. 1. – С. 17–22.

25. Бахтіяров Д. І. Дослідження побічних електромагнітних випромінювань. *Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем: матеріали наук.-практ. конф. м. Київ, 6–7 чер. 2018 р.* 2018. – С. 7–8.

26. Бахтіяров Д. І., Козлюк І. О. Методика модернізації моделі розповсюдження радіохвиль в середині приміщення для побудови контрольованої зони корпоративної мережі. *Наукоємні технології*. 2019. Т. 43. №. 3. – С. 349–356.

27. Бахтіяров Д. І. Особливості вибору моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщення. *Наукоємні технології*. 2019. Т. 44. №. 4. – С. 457-467.

28. Bakhtiiarov D. Konakhovych G., Lavrynenko O., Taranenko A. Protected Voice Control System of UAV. IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments: materials sc. conf., Kyiv, Oct. 22–24, 2019. 2019. – P. 295–299.

29. Бахтіяров Д. І. Оцінка можливості перехоплення семантичної інформації за рахунок побічних електромагнітних випромінювань у відеосистемі персонального комп'ютера. *Colloquium-journal*. 2020. №26. – С. 40–46.

30. Бахтіяров Д. І., Ліщиновська Н. О., Лавриненко О. Ю., Комарницький О. О. Методи оцінювання та прогнозування рівнів електромагнітних випромінювань в урбанізованих середовищах [Електронний ресурс]//European Scientific e-Journal. Режим доступу: DOI: 10.47451/inn2020–12–001 (дата звернення 12.02.2021). Назва з екрану.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	14
ВСТУП .....	15
РОЗДІЛ 1. Дослідження методів та моделей оцінки характеру розповсюдження електромагнітних випромінювань в урбанізованих середовищах .....	23
1.1. Загальні питання розповсюдження радіохвиль в приміщеннях .....	23
1.2. Вплив обмеженості простору на розповсюдження радіохвиль .....	27
1.3. Електромагнітні хвилі у вільному просторі .....	30
1.4. Електромагнітні хвилі всередині приміщення .....	32
1.4.1. Множник загасання радіосигналу при розповсюдженні радіохвиль над межею поділу двох середовищ. Залежність від поляризації радіохвиль .....	33
1.4.2. Віддзеркалення і заломлення радіохвиль на кордоні розділу діелектрик / діелектрик .....	37
1.4.3. Аналіз коефіцієнтів відбиття електромагнітних випромінювань .....	39
1.4.4. Затінення електромагнітних випромінювань фіксованими об'єктами .....	40
1.4.5. Затінення електромагнітних випромінювань людьми .....	40
1.4.6. Перехід сигналу з відкритого простору в приміщення і навпаки .....	40
1.5. Рекомендації щодо вибору моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень .....	42
1.6. Класифікація моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень .....	44
1.6.1. Емпіричні багатопробневі моделі .....	47
1.6.2. Стохастичні (ймовірні, статистичні) моделі .....	49
1.6.3. Метод кінцевих різниць у часовій області (FDTD Finite-Difference Time-Domain) .....	52
1.6.4. Порівняння моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань .....	53
1.7. Висновки і постановка задачі .....	54
РОЗДІЛ 2. Метод уточнення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань .....	64
2.1. Затухання при розповсюдженні електромагнітних випромінювань та критерії якості радіосистем всередині приміщень .....	64
2.1.1. Вплив поляризації і діаграми спрямованості антени .....	64
2.1.2. Перешкоди на трасі .....	66
2.1.3. Орієнтація рухомого терміналу .....	66
2.2. Вплив будівельних матеріалів, обладнання та меблів .....	67

2.3. Аналіз можливих підходів до моделювання розповсюдження електромагнітних випромінювань в закритих приміщеннях .....	72
2.4. Вихідні дані для уточнення моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань .....	73
2.5. Порівняння чисельних методів обробки результатів досліджень .....	88
2.6. Метод уточнення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань на прикладі моделі COST 231 MWM .....	96
Висновки до розділу 2 .....	105
РОЗДІЛ 3. Методи оцінювання та прогнозування рівнів електромагнітних випромінювань в урбанізованих середовищах .....	109
3.1. Основи використання апаратно-програмних засобів пошуку та виявлення джерел електромагнітних випромінювань .....	109
3.1.1. Характеристика пристроїв контролю акустичної інформації з можливістю передачі по радіоканалу .....	110
3.2. Особливості сигналів, що породжують побічні електромагнітні випромінювання в офісному устаткуванні .....	112
3.2.1. Аналіз можливості виникнення ПЕМВН у клавіатурі .....	114
3.2.2. Аналіз можливості виникнення ПЕМВН у принтері .....	115
3.3. Процес виявлення джерел електромагнітних випромінювань в умовах складної електромагнітної обстановки .....	116
3.4. Розробка програмного забезпечення для визначення зони електромагнітної доступності / контрольованої зони на основі отриманого математичного апарату .....	121
3.5. Пошук і виявлення джерел електромагнітних випромінювань в робочій зоні на основі апаратно-програмних засобів обробки даних .....	125
3.6. Оцінка ефективності використання радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки .....	132
Висновки до розділу 3 .....	138
РОЗДІЛ 4. Експериментальні дослідження методів виявлення електромагнітних випромінювань приладами моніторингу електромагнітної обстановки .....	143
4.1. Експериментальне дослідження рівнів основних електромагнітних випромінювань. Методи і апаратура моніторингу електромагнітної обстановки .....	143
4.1.1. Схема проведення експериментальних досліджень по вимірюванню рівня сигналу в межах прямої видимості всередині будівлі при різній висоті розташування антен .....	144
4.1.2. Схема проведення експериментальних досліджень по вимірюванню рівня сигналу на різних поверхах .....	145

4.1.3. Експерименти з дослідження впливу людей на розповсюдження електромагнітних випромінювань в приміщенні .....	146
4.1.4. Прилади та антени для проведення експериментальних досліджень .....	148
4.2. Методика проведення вимірювань рівнів основних та побічних електромагнітних випромінювань .....	149
4.2.1. Оцінка можливості перехоплення ПЕМВН у відеосистемі ПК .....	151
4.3. Експериментальна оцінка можливості перехоплення ПЕМВН .....	155
4.4. Порівняння результатів експериментального визначення зони електромагнітної доступності за допомогою пристроїв МЕО та розрахункових методів .....	160
Висновки до розділу 4 .....	172
Основні результати та висновки .....	176
ДОДАТОК А. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи .....	179
ДОДАТОК Б. Моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань .....	182
ДОДАТОК В. Лістинг програми для розрахунку контрольованої зони .....	194

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DVI	Цифровий відеоінтерфейс (англ. Digital Visual Interface)
HDMI	Інтерфейс та кабель для передачі цифрових мультимедійних даних високої роздільної здатності (англ. High Definition Multimedia Interface)
ITU	Міжнародний союз електрозв'язку (англ. International Telecommunication Union)
LOS	Розповсюдження сигналу в межах прямої видимості (англ. Line-of-sight)
NLOS	Розповсюдження сигналу в відсутності прямої видимості (англ. Non Line-of- sight)
MWM	Багатосінна модель розповсюдження електромагнітних випромінювань (англ. Multi-Wall Model)
OLOS	Розповсюдження сигналу в умовах затінення (англ. Obstructed Line-of-sight)
SDR	Програмно-обумовлене радіо (англ. Software-defined Radio)
VGA	Компонентний відеоінтерфейс (англ. Video Graphics Array)
ЕМВ	Електромагнітні випромінювання
ЕПТ	Електронно-променева трубка
МЕО	Моніторинг електромагнітної обстановки
ОТЗС	Основні технічні засоби та системи
ПЕМВН	Побічні електромагнітні випромінювання
ПК	Персональний комп'ютер
ПНЗІ	Пристрої негласного знімання інформації
ТЗПІ	Технічні засоби передавання інформації
ТТХ	Тактико-технічні характеристики
УКХ	Ультракороткі хвилі
ШПФ	Швидке перетворення Фур'є

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Комплекси радіомоніторингу електромагнітної обстановки широко використовуються як інструмент для вирішення проблем у різних сферах - від управління використанням радіочастотних ресурсів до визначення областей енергетичного покриття при оцінці якості радіозв'язку. Обладнання радіомоніторингу еволюціонувало з такою ж швидкістю, як і системи передачі даних по радіоканалах.

Перелік завдань, що вирішуються системою радіомоніторингу, включає ідентифікацію електромагнітних випромінювань для виявлення джерел та перешкод сигналу, вимірювання параметрів сигналів та завад, оцінку ризику для користувача, вимірювання рівнів електромагнітного випромінювання або щільність потоку енергії, визначення положення джерела електромагнітного випромінювання та перешкод.

Основні функції моніторингу електромагнітних випромінювань або періодичне спостереження за ефіром в широкому діапазоні частот, виявлення та придушення каналів витоку інформації за рахунок електромагнітних випромінювань, організація інших заходів для запобігання витоку конфіденційної інформації з контрольованих зон різних відділів та суб'єктів господарювання шляхом, вимірювання площ енергетичного покриття при оцінці якості радіозв'язку. Зокрема, пристрої моніторингу дозволяють перевірити радіотехнічні пристрої та комп'ютери на наявність побічних електромагнітних випромінювань та наведень.

Оперативне рішення завдань, покладених на системи моніторингу електромагнітних випромінювань, навіть при дуже широкому діапазоні автоматизації на всіх рівнях, стає дуже складним через ризик дефектів і нестабільності реальних параметрів цих систем. Іншими порушеннями, що сприяють зниженню продуктивності та потужності цих систем, є поширення затримок, спричинене відбиттям електромагнітних випромінювань від конструкцій, наприклад, будівель та рухомих користувачів.

У цих умовах чинники ускладнення електромагнітної обстановки і високий ступінь залежності параметрів засобів прийому та демодуляції сигналів від параметрів сигналів на приймальній стороні призводять до істотного зниження одного з найважливіших технічних показників системи радіомоніторингу - електромагнітної доступності. Це пов'язано зі значним збільшенням втрат енергії при звичайному способі забезпечення електромагнітної доступності до контрольованих джерел радіовипромінювання. Тому в сучасних умовах радіомоніторингу існує розбіжність між постійною потребою у збільшенні електромагнітної доступності та технічними можливостями засобів радіомоніторингу для її забезпечення. Після аналізу досвіду створення технічних рішень для радіомоніторингу, слід зазначити, що методи проектування розроблялись протягом тривалого періоду часу, але технічні особливості їх системної структури були недостатньо розвиненими. Вирішенням даної проблеми полягає у розвитку методологічних основ синтезу технічних засобів забезпечення електромагнітної доступності, які є складовою частиною комплексу моніторингу електромагнітних випромінювань, на базі розвитку методів розрахунку (прогнозування) енергетичних втрат і оптимального перерозподілу ресурсів в додатку до завдань прийому електромагнітних випромінювань. У світлі такої заяви постає розробка аналітичних та інтегрованих підходів для забезпечення електромагнітної доступності, що забезпечують підвищену повноту та надійність доступу до джерел електромагнітних випромінювань з достатнім рівнем ефективності для всього обладнання радіомоніторингу. На додаток до конкретних завдань радіомоніторингу використання вищезазначених методів знаходить свої застосування для потреб електрозв'язку. Це, в свою чергу, призводить до необхідності розрахунків зони «покриття», або зони електромагнітної доступності, та інтеграцію радіочастотних систем, найбільш доцільних з точки зору вимог ефективності використання радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки.

Прикладна частина, яка використовується для вирішення даної проблеми, включає перевірку аналітичних підходів та розробку методів забезпечення моніторингу електромагнітних випромінювань, оцінку операційної ефективності для



забезпечення електромагнітної доступності з урахуванням впливу урбанізованого середовища на характер розповсюдження електромагнітних випромінювань.

Проблема підвищення ефективності пристроїв моніторингу електромагнітних випромінювань стала актуальною внаслідок збільшення кількості міжнародних контактів та лібералізації ринку засобів радіозв'язку, а також загроз з боку зловмисників, які збирають інформацію про промислові та економічні таємниці державних та комерційних установ.

Відповідно до цього було запропоновано розробити метод розрахунків рівнів основних та побічних електромагнітних випромінювань для потреб радіомоніторингу, що здатен враховувати втрати потужності радіосигналу на подолання різних типів перешкод всередині приміщень. Передбачається створення методів визначення зони електромагнітної доступності в межах приміщення на базі отриманого в ході дисертаційного дослідження математичного апарату.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Відповідно до наказу Національної академії наук України про затвердження основних наукових напрямків та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук на 2019-2023 роки, одним із переліку галузей дисциплін є дослідження у сфері радіофізики та електроніки, якій відповідають дослідження проведені у ході дисертаційної роботи. Результати дисертації використані у НДР № 874-ДБ13 “Створення та дослідження нових систем захищеного авіаційного радіозв'язку в рамках концепції CNS/ATM ICAO” (№ держ. реєстрації 0113U000093), в яких автор був виконавцем та які виконувались на кафедрі телекомунікаційних систем Національного авіаційного університету.

**Мета і завдання дослідження.** Мета дисертаційної роботи - підвищення ефективності використання приладів радіомоніторингу в умовах складного характеру розповсюдження радіохвиль всередині приміщень.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі наукові **завдання**:

1. Обґрунтувати необхідність в підвищенні ефективності використання пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки на основі аналізу особливостей

розповсюдження електромагнітних випромінювань в урбанізованому середовищі та недоліків існуючого математичного апарату для їх опису.

2. Побудувати модель оцінки енергетичних характеристик сигналів в точці спостереження на основі експериментальних досліджень згасання електромагнітних випромінювань в залежності від частоти, характеру перешкоди та відстані в реальних умовах експлуатації, отримати графічні та математичні залежності. Розробити метод уточнення моделей розповсюдження радіохвиль (на прикладі моделі COST 231 MWM).

3. Розробити метод виявлення джерел електромагнітних випромінювань в умовах складної заводової та електромагнітної обстановки всередині приміщення в рамках зони електромагнітної доступності та розробити деталізовану структуру цього процесу.

4. Розробити програмне забезпечення, що дозволить визначити периметр зони електромагнітної доступності / надійного прийому радіосигналу телекомунікаційними пристроями малого радіусу покриття на базі отриманого математичного апарату для потреб моніторингу електромагнітної обстановки всередині приміщень.

5. Провести експериментальну верифікацію отриманих результатів для оцінки особливостей розповсюдження основних та побічних електромагнітних випромінювань в урбанізованому середовищі на прикладі запропонованої уточненої моделі та на основі отриманих результатів оцінити можливості перехоплення й відтворення семантичної інформації за рахунок ПЕМВН.

**Об'єкт дослідження** – процес розповсюдження електромагнітних випромінювань в урбанізованому середовищі.

**Предмет дослідження** – згасання електромагнітних випромінювань при подоланні суміжних поверхонь всередині приміщення в залежності від частоти і відстані.

**Методи дослідження.** Всі представлені в дисертаційній роботі аналітичні результати отримані з використанням наступних математичних апаратів: методи теорії розповсюдження електромагнітних випромінювань – для аналізу згасання електромагнітного поля в залежності від частоти та відстані в реальних умовах

експлуатації; методи математичного моделювання – для перевірки адекватності розроблених моделей та алгоритмів; методи обробки експериментальних даних – для удосконалення моделі розповсюдження радіохвиль (модель COST 231 MWM). Розрахунки і математичні дослідження виконані методом моделювання з використанням програмного пакету MathCad і середовища програмування JavaScript. Для експериментальної частини використовувалося обладнання фірми Rohde & Schwarz та RTL-SDR V3.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Отримано такі наукові результати, що виносяться на захист:

1. Вперше розроблено метод підвищення ефективності використання пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки у системах радіотехніки малого радіусу покриття за рахунок удосконалення структури системи моніторингу та використання нових структурних закономірностей розподілу поля всередині приміщення, що дозволило уточнити існуючі моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань.

2. Набули подальшого розвитку розрахункові методи визначення зони електромагнітної доступності з урахуванням особливостей розповсюдження радіосигналів всередині приміщень на етапі проектування будівлі, що дозволило визначати периметр території, за межами якої унеможлиблюється перехоплення радіосигналу.

3. Вперше розроблено метод оцінювання рівнів електромагнітних випромінювань радіотехнічними засобами моніторингу електромагнітної обстановки, що полягає в синтезі чотирьохетапного процесу виявлення їх джерел в урбанізованому середовищі в умовах складної структури електромагнітного поля, що дозволяє зменшити тривалість пошукового процесу та підвищити достовірність одержаної інформації.

4. Удосконалено принципи оптимального проектування радіотехнічних вузлів та пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки через врахування детермінованих та випадкових відхилень параметрів електромагнітного поля всередині приміщень, що дозволило підвищити інтегральну чутливість засобів

моніторингу електромагнітної обстановки та точність прогнозування електромагнітного поля з урахуванням особливостей джерел випромінювань.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати дисертаційної роботи дають можливість скорегувати параметри та структуру пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки з метою підвищення ефективності їх використання. Виведені розрахунково-графічні залежності коефіцієнту затухання електромагнітних випромінювань дають можливість уточнити існуючі моделі їх розповсюдження всередині приміщень. Запропоновані програмні рішення в середовищі MathCad і JavaScript спрощують проведення розрахунків розробленими методами та дозволяють визначати периметр зони електромагнітної доступності. Запропонована структура системи моніторингу електромагнітної обстановки, що включає чотирьохетапний процес визначення місцезнаходження джерел основних та побічних електромагнітних випромінювань та оцінки їх рівнів, що забезпечує підвищення швидкодії їх виявлення в умовах складної електромагнітної обстановки. Запропоновано структуру та надані рекомендації по проектуванню вузлів пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки в умовах завод. Результати роботи впроваджено у навчальний процес Національного авіаційного університету [19], діяльність Навчально-науково-виробничого комплексу «Інформаційно-комунікаційні системи» та у секторах інформаційних технологій і охорони державної таємниці, технічного та криптографічного захисту інформації Сумської митниці ДФС.

Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами впровадження (Додаток А).

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися на Всеукраїнських та Міжнародних науково-технічних конференціях: науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики» (м. Київ, 2013, 2014), науково-практичній конференції «Захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах» (м. Київ, 2013), науково-практичній конференції «Політ. Сучасні проблеми науки: XIV" (м. Київ, 2014, 2016), науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації

повітряного руху CNS/ATM», (м. Київ, 2014, 2018), науково-технічній конференції «ABIA-2015», «ABIA-2017» (м. Київ, 2015, 2017), науково-практичній конференції "Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах" (м. Київ, 2015), науково-практичній конференції "Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем" (м. Київ, 2015, 2020), всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених і студентів «Проблеми навігації і управління рухом» (м. Київ, 2015), науково-технічній конференції "Methods and Systems of Navigation and Motion Control" (м. Київ, 2016, 2018), науково-технічній конференції "Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments" (м. Київ, 2019).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано у 30 наукових працях, зокрема 10 статтях у фахових виданнях України, 4 статті входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, дві статті у періодичних наукових виданнях держав, що входять до Організації економічного співробітництва та розвитку та Європейського Союзу, а також 15 тезах доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків, що містять основні отримані результати. Загальний обсяг роботи становить 205 сторінок. Робота містить 32 таблиці, 75 рисунків та список використаних джерел, що складається зі 111 найменувань, включаючи список опублікованих здобувачем наукових праць. У додатках наведено лістинг коду програмного модуля для розрахунків рівнів прямих та побічних електромагнітних випромінювань та розрахунку зони електромагнітної доступності всередині приміщень; акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення і результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно. Роботи [1, 3, 6, 12, 16, 25, 27, 29] виконані без співавторів. Деякі роботи виконані у співавторстві з науковим керівником та іншими вченими. Зокрема, здобувачу належать: у роботі [2] – аналіз НД ТЗІ України; у роботах [4, 5, 8] – дослідження особливостей виділення корисного сигналу в умовах підвищеної заводової обстановки; у роботах [7, 9, 11, 18] – модель захищеної системи радіоуправління функціями БПЛА; у роботах [10, 13, 15, 17, 24, 28] – аналіз алгоритмів виділення семантичної інформації з прийнятого радіосигналу;

у роботах [14, 20] – дослідження методів несанкціонованого отримання інформації за рахунок побічних електромагнітних випромінювань; у роботі [21] – метод визначення контрольованої зони приміщення за рахунок уточнення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань; у роботі [22] – дослідження впливу ефекту багатопроменевості на характер розповсюдження електромагнітних випромінювань; у роботі [23] – програмне забезпечення для визначення периметру контрольованої зони приміщення; у роботі [26] – метод уточнення існуючих моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань на основі отриманої формульної залежності коефіцієнту затухання від частоти, відстані та характеру перешкоди; у роботі [30] – чотирьохетапний процес виявлення джерел електромагнітних випромінювань в урбанізованому середовищі в умовах складної структури електромагнітного поля.

# РОЗДІЛ 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ В УРБАНІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

### 1.1. Загальні питання розповсюдження радіохвиль в приміщеннях

Умови розповсюдження радіохвиль в приміщеннях істотно відрізняються від умов поза приміщеннями, «на природі». У літературі розрізняють (рис. 1.1):

- розповсюдження сигналу в межах прямої видимості (*LOS, line-of-sight*);
- розповсюдження сигналу в умовах затінення (*OLOS, obstructed line-of-sight*);
- розповсюдження сигналу в відсутності прямої видимості (*NLOS, non line-of-sight*).

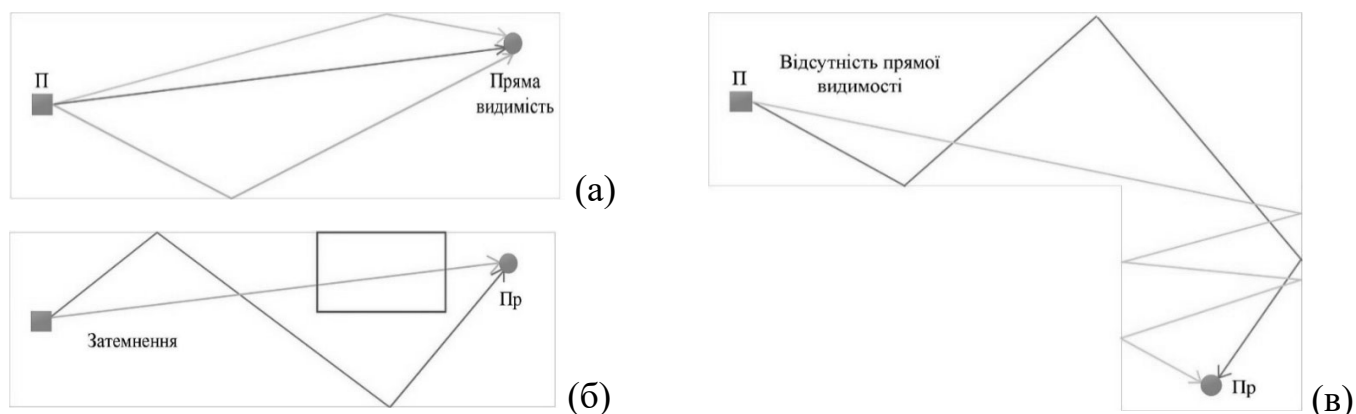


Рис. 1.1. Умови розповсюдження радіосигналів всередині приміщення:  
а) в умовах прямої видимості; б) при наявності затінення; в) в умовах  
відсутності прямої видимості

У табл. 1.1 [3-7] наведені властивості деяких приміщень, в яких використовуються бездротові мережі зв'язку.

Через те, що багатоповерхові офісні будівлі відрізняються наявністю «дуже пересічених» просторів складної форми з перегородками з різних матеріалів, наскрізних обсягів між поверхами (шахти ліфта, сходові отвори), великою кількістю затінюючих рухомих об'єктів (персонал), вони представляють найбільшу складність для моделювання особливостей розповсюдження радіохвиль.

Таблиця 1.1.

## Характеристики деяких приміщень

№ п/п	Приміщення	Характер розповсюдження радіохвиль	Розмір, м	Затінення предметами	Люди
1	Офісна будівля	Відсутність прямої видимості, затінення <i>NLOS, OLOS</i>	100	Фіксоване	Рухоме
2	Аудиторія	Затінення <i>OLOS</i>	15	Фіксоване	Фіксоване
3	Коридор	Затінення <i>OLOS</i>	60	Фіксоване	Рухоме
4	Зал аеропорту	Відсутність прямої видимості, затінення <i>NLOS, OLOS</i>	300	Фіксоване	Рухоме
5	Літак	Затінення <i>OLOS</i>	50	Фіксоване	Фіксоване / Рухоме

Для опису та моделювання розповсюдження радіохвиль має сенс звести різноманітні конфігурації приміщень до наступного обмеженого набору завдань:

А) на одному поверсі:

- обмеженість об'єму, подову тунелю, відбиття від поверхонь, матеріал різний;
- складна конфігурація об'єму, виступи, повороти, отвори;
- затінення меблями, перегородками, обладнанням (фіксоване);
- затінення людьми (рухоме);

Б) багатоповерховість:

- проникнення сигналу через перекриття;
- однорідні конструкції поверхів;
- наявність наскрізних отворів (сходи), шахти ліфтів;

В) поза / всередині приміщень:

- перехід сигналу ззовні всередину приміщення;
- перехід сигналу зсередини приміщення назовні.

Істотними відмінностями приміщень, як середовища розповсюдження радіохвиль, є також такі чинники:

- відстань між передавачем і приймачем є значно меншою, ніж при розповсюдженні поза приміщеннями;



- мінливість навколишнього оточення (середовища) значно більша, ніж поза приміщеннями, особливо щодо відстані передавач-приймач.

Процеси змінення потужності передавача (загасання радіосигналів) у міру переміщення до приймача, і в приміщеннях, і поза ними - нестационарні, тому поряд з усталеними параметрами потужності сигналу в кожній точці досліджуваного простору намагаються передбачити (табл. 1.2) такі імпульсні характеристики (часто - статистично усереднені) сигналу, як середня затримка, його розсіювання і т. д. [8-15]. На рис. 1.2 і 1.3 показані типові характеристики зміни потужності сигналу в приміщеннях.

Таблиця 1.2.

## Типові набори параметрів і характеристик

Змінні параметри	Статичні характеристики при безперервному випромінюванні	Імпульсні характеристики
Частота, розміри приміщення, висота антен, поляризація хвилі, матеріали стін, конфігурація приміщень, об'єкти затінення	Загасання (втрати) потужності, логарифмічні, середньоквадратичне відхилення, середня затримка променів	Розподіл (дисперсія) затримок при багатопроменевості, максимальна надлишкова затримка, багатопроменеві компоненти сигналу «прибувають» в приймач кластерами (розподіл Пуассона), розподіл затримок і амплітуд всередині кластера

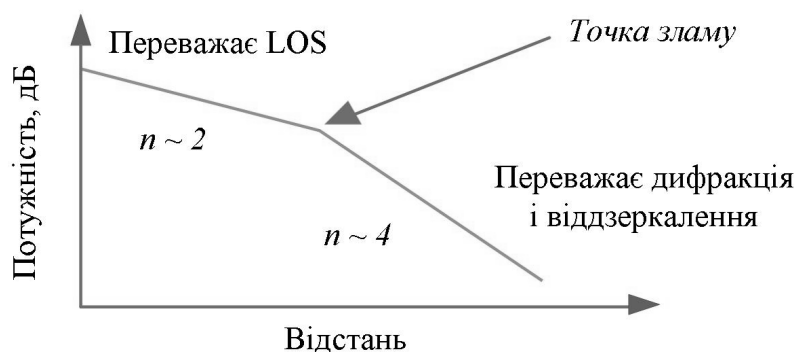


Рис. 1.2. Характеристики для різних механізмів загасання.

Тут  $n$  - показник ступеня загасання

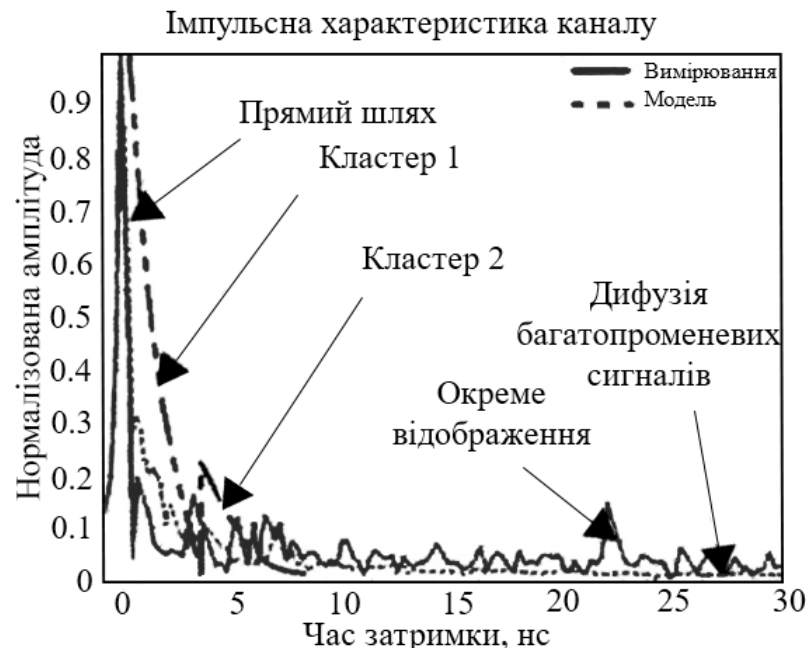


Рис. 1.3. Часозмінні характеристики типового бездротового каналу

Відповідно до характерних розмірів приміщень в них, як правило, розгорнуті в даний час телекомунікаційні мережі локального і / або персонального рівня (з типовими відстанями між передавачем і приймачем 10 - 100 м). Однак ці мережі повинні, наприклад, з'єднуватися з стільниковими (розмірами до декількох км) і сенсорними (особливості яких - дуже низько розташовані антени) мережами, системами глобального позиціонування, які призначені для зв'язку поза приміщеннями. Тому вимоги до систем моделювання особливостей розповсюдження телекомунікаційних сигналів істотно і безперервно зростають.

З точки зору додатків в локальних мережах найбільш важливими є наступні характеристики [16-18]:

- покриття;
- надійність зв'язків;
- продуктивність (як функція абонентського трафіку);
- скритність (як функція абонентського трафіку);
- оцінка якості передачі мови (як функція абонентського трафіку).

Всі ці характеристики пов'язані з втратами потужності.

## 1.2. Вплив обмеженості простору на розповсюдження радіохвиль

Моделі для опису розповсюдження радіохвиль усередині приміщень, як правило, є значно складнішими за моделі для сигналів у відкритому просторі (поза приміщеннями). Це обумовлено такими обставинами, як обмеженість простору між передавачем і приймачем, його складною конфігурацією (коридори, повороти, переходи, багатоповерхові будівлі), а також необхідністю врахування ефектів багатопроменевості (сигнали в приймач надходять як в результаті відбиття від поверхонь, так і за рахунок дифракції, а також проникнення крізь перегородки, стіни). Результати вимірювань загасання електромагнітного поля при розповсюдженні між поверхами залежать навіть від кількості відкритих дверей на поверхах [19-27].

Параметри розповсюдження в даному випадку залежать від:

- типу будівлі;
- конфігурації внутрішніх приміщень;
- матеріалів перекриттів підлоги і стелі;
- наявності затінюючих об'єктів (фіксованих і рухомих).

Багатопроменевість в приміщенні (на відміну від середовища поза приміщенням) відрізняється тим, що в багатьох випадках вихідний сигнал може «повернутися» в передавач. Має місце ефект інтерференції (рис. 1.4).

Основними механізмами розповсюдження радіохвиль в приміщеннях (рис. 1.5) є [8, 28-29]: відбиття від поверхонь, дифракція на краях затінюючих об'єктів, розсіювання на шорсткуватих площинах і проникнення через затінюючі перешкоди.

Відбиття - основний механізм розповсюдження поза прямої видимості, що визначає багатопроменеву природу розповсюдження сигналу всередині приміщення. Відбиття виникає, коли електромагнітна хвиля зустрічає на своєму шляху середовище з різними параметрами (діелектрична проникність і магнітна сприйнятливність, а також електропровідність). Амплітуди компонентних променів в обмеженому обсязі визначаються значеннями коефіцієнтів відбиття, які, в свою чергу, залежать від частоти сигналу, його поляризації, кута падіння і властивостей матеріалу, що відбиває.

Дифракційний компонент сигналу зазвичай малий у порівнянні з відбитими складовими. Механізм дифракції має місце, коли радіохвиля «натикається» на край «затінюючого» об'єкта, через що виникає вторинне випромінювання на всі боки. Дифракційні компоненти відрізняються за амплітудою і формою від багатопроменевих компонентів, відбитих від гладких поверхонь, і також визначаються коефіцієнтами дифракції. Останні залежать як від типу об'єкта затінення, так і від кутів падіння і «заломлення».

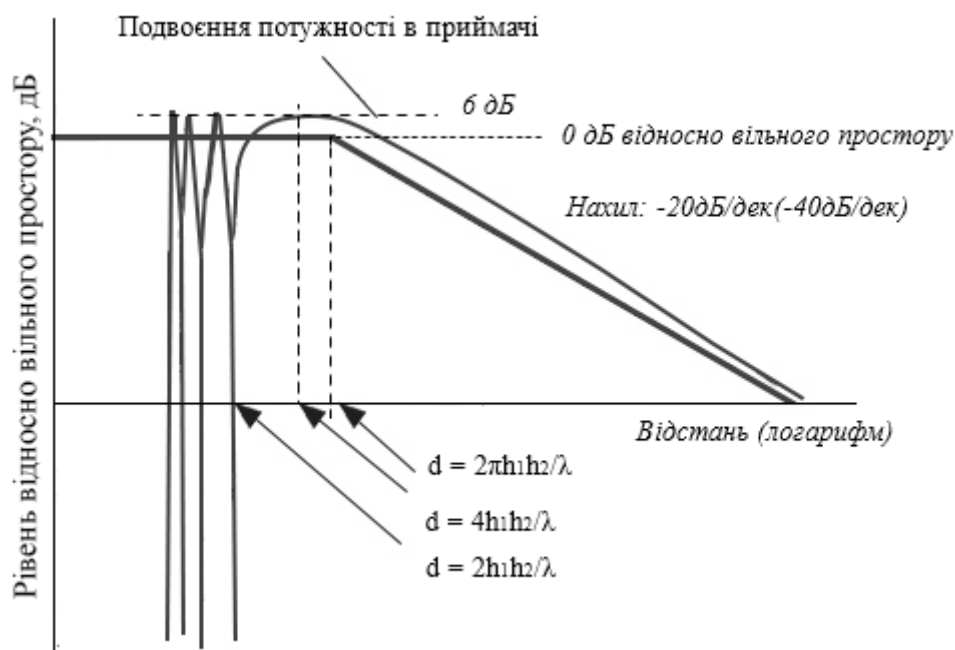


Рис. 1.4. Типові характеристики загасання в приміщеннях

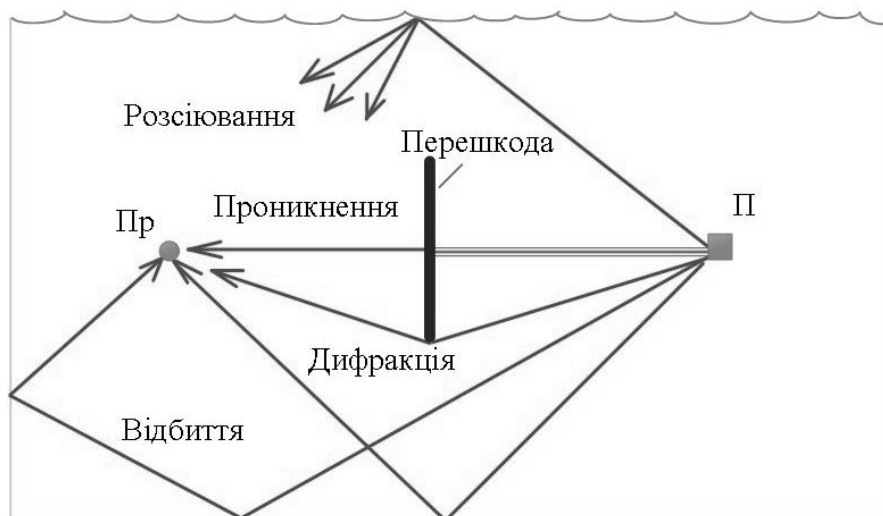


Рис. 1.5. Приклад розповсюдження радіосигналів всередині приміщення

Для «негладких» поверхонь (характерні розміри на них зазвичай можна порівняти з довжиною хвилі) вступає в дію механізм розсіювання, який із достатнім ступенем точності визначається геометричними розмірами взаємного розміщення передавача і приймача, а також параметрами розсіювання поверхні і її електромагнітними властивостями.

Таблиця 1.3.

Літературні дані для різних приміщень [30-32]

<b>Конфігурація приміщень</b>	<b>Степеневий показник загасання</b>	<b>Механізм розповсюдження</b>
Коридори	1,4-1,9	Хвилеводний
Великі відкриті кімнати	2	Вільний простір
Мебльовані кімнати	3	Вільний простір + багатопроменевість
Щільно заставлені кімнати	4	Поза прямої видимості (дифракція, розсіювання та ін.)
Між різними поверхами	5	Втрати через проникнення через підлоги, стелі, стіни

Іншими словами, на практиці слід враховувати втрати розповсюдження і відбиття від стін і стель, втрати розповсюдження в будівлі, дифракцію від перегородок і інших перешкод, затінення при переміщенні абонента, розбіжність поляризації до і після відображення, розподіл затримок, висоту розміщення антен передавача і приймача і ін. Для коректного опису сигналу в приймачі в умовах багатопроменевості та інших перешкод через обмеженість об'єму важливо вміти моделювати основні складові такого сигналу (див. рис. 1.6) [33].

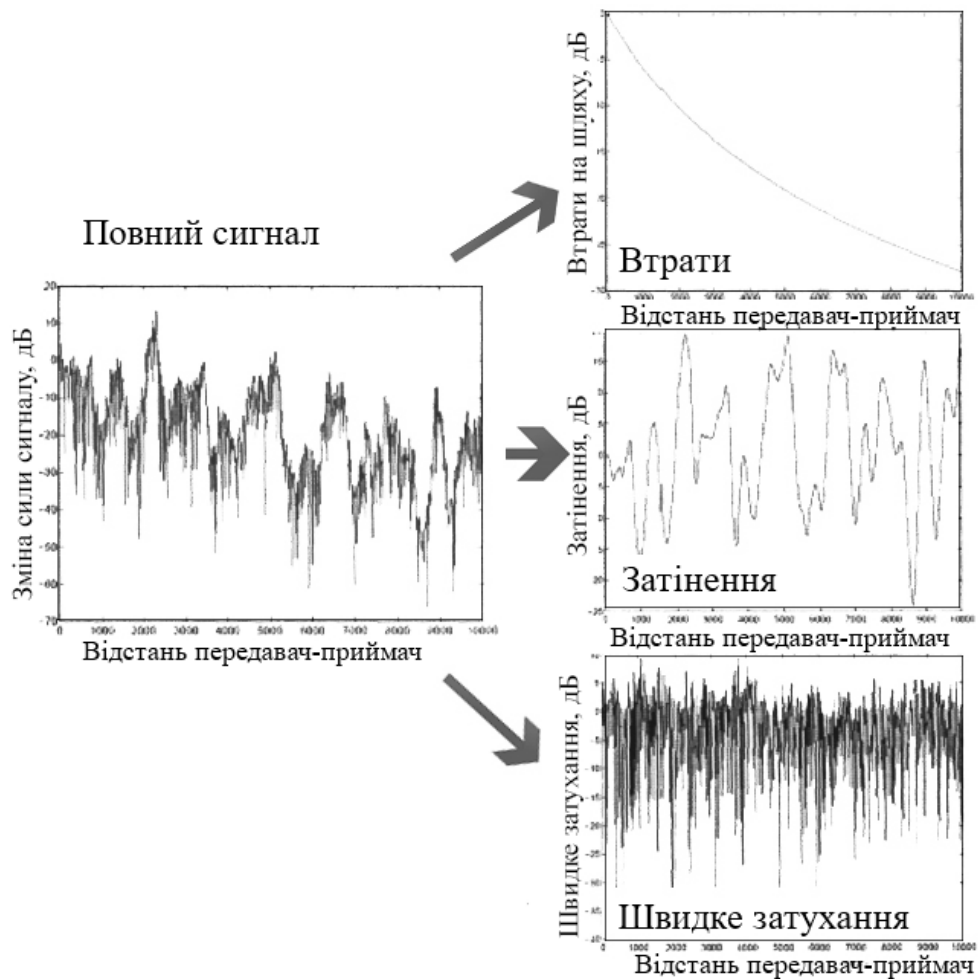


Рис. 1.6. Вплив основних фізичних механізмів, які деформують сигнал

### 1.3. Електромагнітні хвилі у вільному просторі

Класичний підхід [34] до розрахунку розподілу електромагнітного поля в присутності відбиття і поглинання полягає в розрахунку напруженості поля в однорідному ізотропному просторі на основі законів відбиття, дифракції та розсіювання. Однак, специфічні умови розподілу електромагнітного поля всередині приміщень виключають можливість безпосереднього застосування такої методики. Мінливість розташування приймачів та передавачів радіозв'язку, переміщення передавачів, величезна кількість фіксованих перешкод складної форми унеможливають точний розрахунок розподілу електромагнітного поля. Труднощі опису реального планування приміщень і розташування перешкод, що виникають при таких розрахунках, збільшують необхідний обсяг обчислень. Тому точний

розрахунок розподілу поля використовується тільки у виняткових, найпростіших випадках, наприклад, при розрахунку тіньової зони за великою перешкодою при точно відомому розташуванні передавача.

В даний час прийнято розділяти всі моделі [33] розподілу електромагнітного поля на дві категорії: модель великої відстані і модель малої відстані. Модель великої відстані застосовується для розрахунків поля поза приміщеннями, а модель малої відстані - всередині приміщень.

У моделі великої відстані розглядається вплив на електромагнітне поле макроефекту, обумовленого перешкодами великого розміру (в порівнянні з довжиною хвилі). Відповідно до цієї моделі, електромагнітне поле в міських умовах описується тими ж самими рівняннями, що і для вільного простору, але з іншими параметрами розповсюдження, а також певною ймовірністю відхилення реальних значень розподілу електромагнітного поля від розрахункових. Передбачається, що наявність перешкод, в середньому, не впливає на структуру електромагнітного поля, яке залишається таким же, як і у вільному просторі, - а саме стаціонарним, монотонним і гладким. Стаціонарність означає незмінність структури поля в часі, монотонність - безперервне спадання величини поля зі збільшенням відстані від приймача до передавача, гладкість - відповідність незначних змін відстані незначним змінам напруженості поля.

Модель незначної відстані відображає інтерференційну структуру електромагнітного поля, що виникає внаслідок взаємодії когерентних хвиль, що випромінювались передавачем. Сумарна величина електромагнітного поля в кожній точці простору визначається амплітудами і фазами декількох хвиль, які за рахунок багаторазового відбиття пройшли шлях різної довжини від передавача; амплітуди і фази хвиль статистично незалежні, і в результаті виходить інтерференційна картина поля у вигляді випадкового чергування максимумів (додавання в фазі) і мінімумів (додавання в протифазі) поля (див. рис. 1.4). Оскільки відстань між мінімумами і максимумами інтерференційної картини поля дорівнює чверті довжини хвилі, то й істотні зміни величини напруженості поля також відбуваються на дуже малих відстанях, порядку декількох сантиметрів в діапазоні УКХ. Очевидно, що структура

поля на малих відстанях є не гладкою, не є монотонною і стаціонарною. Збільшення або зменшення напруженості поля не пов'язане з відстанню до передавача, так як визначається випадковим станом радіоканалу (взаємним розташуванням і пересуванням приймача, передавача і перешкод) в поточний момент часу. В результаті можливі дуже сильні зміни величини електромагнітного поля на невеликих відстанях і в короткі проміжки часу. З точки зору теорії сигналів нестаціонарна інтерференційна структура поля відповідає прийому декількох копій одного і того ж сигналу. Ідеальний сигнал передавача досягає приймача у вигляді декількох копій сигналу, кожна з яких має власний час розповсюдження. Одна на одну копії сигналу накладаються, викликаючи спотворення форми сигналу, які характеризуються як швидкі завмирання величини сигналу на антені приймача (див. Рис. 1.6). Величина швидких завмирань сигналу визначається миттєвим станом багатопробеневого каналу поширення, тобто переміщенням передавача, приймача і перешкод між ними, а також швидкістю цих переміщень. Практично величина поправки на швидкі завмирання визначає відсоток часу, протягом якого величина напруженості поля перевищує задану величину.

#### **1.4. Електромагнітні хвилі всередині приміщення**

Аналіз розповсюдження радіохвиль всередині будівлі є відносно новою сферою досліджень, яка виникла внаслідок бурхливого розвитку систем персонального радіозв'язку [35-37]. Характерною особливістю структури електромагнітного поля в приміщенні на відміну від поля у вільному просторі або міських умовах є складність у визначенні усередненої величини втрат. Параметри середовища розповсюдження істотно змінюються на дуже невеликих відстанях, як, наприклад, при розповсюдженні між поверхами будівлі.

В даний час експериментальні результати вимірювань дальності радіозв'язку всередині будівлі є основним джерелом інформації при проектуванні систем зв'язку. Багато фірм, що випускають обладнання персонального радіозв'язку, призводять і публікують результати вимірювань загасання поля в радіоканалі в порівнянні з



розрахунковим значенням поля у вільному просторі. При цьому відмінність в інформації, що публікується, дуже велика [8-10, 38-40]. Наприклад, результати вимірювання загасання радіохвиль у великому універсамі, за різними джерелами, можуть відрізнятись на 10 дБ і більше просто через те, що вони проводилися в різних універсамах або при різній щільності покупців.

Зрозуміло, цінність таких вимірів, як підстава для загальних висновків, досить невелика. Однак реально - це єдине надійне джерело інформації для хоча б приблизної оцінки необхідної потужності передавачів в системі зв'язку.

#### ***1.4.1. Множник загасання радіосигналу при розповсюдженні радіохвиль над межею поділу двох середовищ. Залежність від поляризації радіохвиль***

На рис. 1.7 і 1.8 показані схеми падіння плоскої електромагнітної хвилі на плоску межу розділу двох середовищ. Хвиля розповсюджується в середовищі 1 і змінюється в часі за гармонійним законом  $\exp(j\omega t)$ . При цьому на кордоні розділу виникають ще дві хвилі: відбита - розповсюджується в середовищі 1, і заломлена - розповсюджується в середовищі 2. З цих хвиль заданою є падаюча хвиля з напруженістю електромагнітного поля  $E_1$  і магнітного поля  $H_1$ . Відбита хвиля з відповідними напруженостями  $E_2$ ,  $H_2$  і заломлена, з напруженостями  $E_3$ ,  $H_3$ , повинні бути визначені через задані напруженості  $E_1$  і  $H_1$ .

При переході через кордон розділу двох середовищ тангенціальні (дотичні до поверхні) складові полів повинні бути безперервні [34], що призводить до необхідності виконання наступних рівностей, які відомі як суворі граничні умови:

$$\begin{aligned}(E_3 - E_1 - E_2) \times n^0 &= 0 \\ (H_3 - H_1 - H_2) \times n^0 &= 0\end{aligned}\tag{1.1}$$

де:  $n^0$ - нормаль до поверхні в точці відбиття.

Аналіз системи рівнянь (1.1), проведений в літературі, показує, що вектори Умова-Пойнтінга, що характеризують напрям розповсюдження падаючої, відбитої і заломленої хвиль, знаходяться в одній площині, і при цьому виконується закон

заломлення Снеліуса і закон відбиття, при якому кут падіння дорівнює куту відбиття. Обидва кути відраховуються від вектора  $n^0$ , тобто від вертикалі до площини  $S$ . (В теорії розповсюдження застосовується також поняття наближених граничних умов, які називаються ще часто умовами Ван-Дер-Поля-Леонтовича).

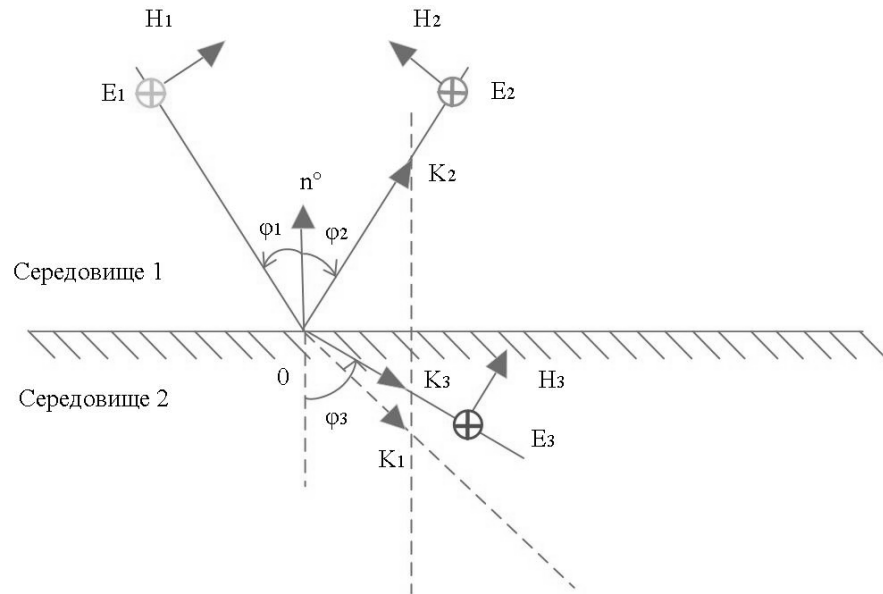


Рис. 1.7. Падіння горизонтально поляризованої хвилі на плоску межу розділу двох середовищ

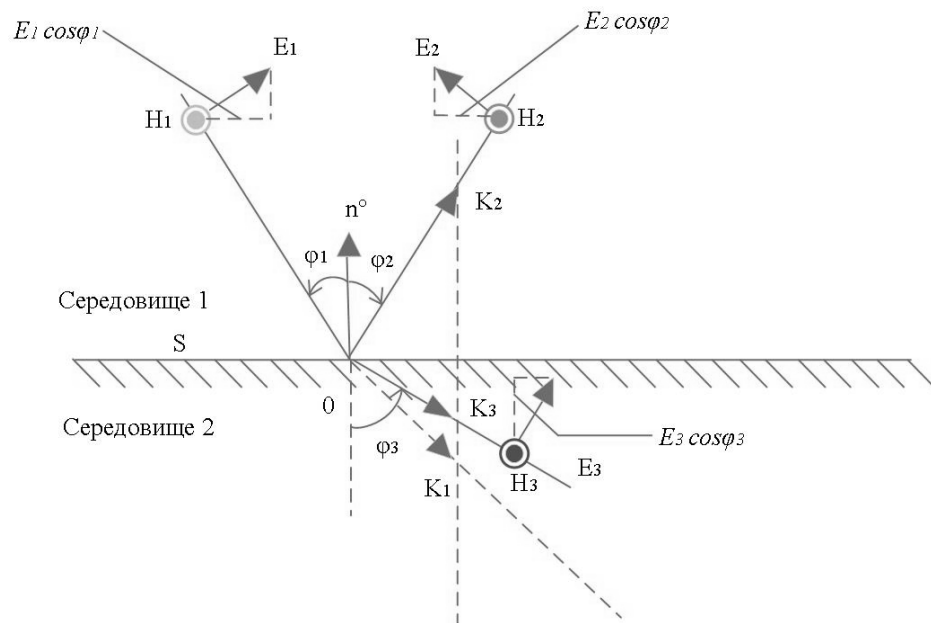


Рис. 1.8. Падіння нормально поляризованої хвилі на плоску межу двох середовищ

На рис. 1.7 і 1.8 представлено розташування всіх векторів при падінні на плоску межу розділу двох середовищ лінійно поляризованих хвиль з горизонтальною і нормальною поляризацією.

У разі, коли суміжні середовища є ідеальними діелектриками, фазові швидкості розповсюдження всіх трьох хвиль уздовж кордону розділу рівні, і за умови (1.1) і додаткової рівності, що пов'язує вектори  $E$  і  $H$  рівняннями Максвелла, маємо

$$\begin{aligned} E &= E \exp j(\omega t - k) \\ H &= \frac{k}{\omega \mu} (E \times S_0) \end{aligned} \quad , \quad (1.2)$$

де:  $E$  - напруженість електричного поля;

$H$  - напруженість магнітного поля;

$k$  - модуль хвильового вектора;

$\omega$  - кругова частота сигналу;

$\mu$  - магнітна проникність;

$S_0$  - одиничний вектор, який визначає напрями розповсюдження падаючої хвилі для горизонтально поляризованої хвилі, тобто такої хвилі, у якій вектор  $E$  перпендикулярний площині падіння (рис. 1.10).

Коефіцієнти відбиття і заломлення виходять в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{\cos \varphi_1 - \frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1 + \frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_2} \\ f_1 &= \frac{2 \cos \varphi_1}{\cos \varphi_1 + \frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_2} \end{aligned}$$

горизонтальна поляризація хвиль (1.3)

де  $F_1 = \frac{E_2}{E_1}$  - коефіцієнт відбиття;

$f_1 = \frac{E_3}{E_1}$  - коефіцієнт заломлення;

$E_1, E_2, E_3$  - горизонтально поляризовані складові хвиль, для нормально поляризованої хвилі, у якій вектор  $E$  лежить в площині падіння хвилі (рис. 1.7), відповідні коефіцієнти рівні:

$$F_2 = \frac{\frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_1 - \cos \varphi_2}{\frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2}$$

$$f_2 = \frac{2 \cos \varphi_1}{\frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2}$$

нормальна поляризація хвиль (1.4)

де  $F_1 = \frac{E_2}{E_1}$  - коефіцієнт відбиття;

$f_1 = \frac{E_3}{E_1}$  - коефіцієнт заломлення;

$E_1, E_2, E_3$  - нормально поляризовані складові хвиль.

У виразах 1.3, 1.4,  $k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1}, k_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2}$  постійні поширення в середовищах 1.1 і 1.2,  $\lambda_1, \lambda_2$  - довжини хвиль в середовищах 1.1 і 1.2.

У загальному випадку, коли обидва середовища є поглинаючими (тобто в середовищах з кінцевою провідністю), постійна розповсюдження (в деякій літературі - коефіцієнт розповсюдження) є комплексною величиною, рівною:

$$k = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - j \omega \mu \sigma} \quad , \quad (1.5)$$

Вираз (1.5) можна привести до іншого виду, ввівши діелектричну проникність в комплексній формі  $\varepsilon' = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega}$  і представивши  $k = \beta - j \alpha$ , де  $\beta$  - фазова постійна,  $\alpha$  - коефіцієнт поглинання на одиницю довжини.

Фазова постійна  $\beta$  і коефіцієнт загасання  $\alpha$  визначаються за формулами:

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_{\alpha} \mu_{\alpha}}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\varepsilon_{\alpha} \omega} \right)^2} + 1 \right)},$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_{\alpha} \mu_{\alpha}}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\varepsilon_{\alpha} \omega} \right)^2} + 1 \right)},$$
(1.6)

У комплексній формі коефіцієнт розповсюдження можна також записати у вигляді:

$$k = |k| e^{-j\psi}$$

$$|k| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \omega \sqrt{\frac{\varepsilon_{\alpha} \mu_{\alpha}}{2} \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\varepsilon_{\alpha} \omega} \right)^2}}$$

$$\psi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\gamma}{\varepsilon_{\alpha} \omega}$$
(1.7)

#### ***1.4.2. Віддзеркалення і заломлення радіохвиль на кордоні розділу діелектрик / діелектрик***

При розповсюдженні радіохвиль в закритих приміщеннях наближено можна вважати, що елементи, від яких відбувається відбиття хвиль - діелектрики. Це характерно для коридорів, офісних приміщень з малою кількістю обладнання в металевих корпусах, тобто для всіх таких приміщень, де відбиття і заломлення в основному походить від непровідящих поверхонь або поверхонь з дуже малою провідністю. Також можна вважати, що вище сказане відповідає розповсюдженню радіохвиль на відкритому просторі поблизу поверхні Землі при малій провідності ґрунту, тобто при  $60\sigma\lambda \ll 1$ , де  $\sigma$  - провідність поверхні, що відбиває [34, 41-43].

У разі діелектричних поверхонь, що відбивають, постійна розповсюдження є дійсною величиною, рівною  $k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu}$ .

Відповідно до теорії електродинаміки, коефіцієнти відбиття і заломлення  $F_1 = \frac{E_2}{E_1}$ ,  $f_1 = \frac{E_3}{E_1}$ ,  $F_2 = \frac{E_2}{E_1}$ ,  $f_2 = \frac{E_3}{E_1}$ , наведені раніше для будь-яких середовищ,

$$F_1 = \frac{\cos \varphi_1 - \frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_2}{\cos \varphi_1 + \frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_2}$$

$$f_1 = \frac{2 \cos \varphi_1}{\cos \varphi_1 + \frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_2}$$

горизонтальна поляризація хвиль (1.8)

$$F_2 = \frac{\frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_1 - \cos \varphi_2}{\frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2}$$

$$f_2 = \frac{2 \cos \varphi_1}{\frac{k_2}{k_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \cos \varphi_1 + \cos \varphi_2}$$

нормальна поляризація хвиль (1.9)

Оскільки далі розглядають тільки випадки розповсюдження електромагнітних випромінювань в повітряному середовищі при відбитті від людей, стелі і стін коридорів (або від елементів конструкцій приміщень), то можна вважати, що  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = \sqrt{\varepsilon}$ .

Тоді вирази для коефіцієнтів відбиття будуть записані в наступному вигляді [44]:

$$F_1 = \frac{\cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_1}}$$

горизонтальна поляризація (1.10)

$$F_2 = \frac{\varepsilon \times \cos \varphi_1 - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_1}}{\varepsilon \times \cos \varphi_1 + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \varphi_1}}$$

нормальна поляризація (1.11)

### 1.4.3. Аналіз коефіцієнтів відбиття електромагнітних випромінювань

Коефіцієнт відбиття являє собою відношення комплексних амплітуд напруженості електричного поля падаючої і відбитої хвиль, і сам є величиною комплексною. Модуль і фаза коефіцієнта відбиття залежать від електричних параметрів середовищ (від діелектричної проникності і питомої електропровідності), від кута ковзання  $\gamma$ , а також від поляризації падаючої радіохвилі.

Коефіцієнти відбиття виходять безпосередньо з рівнянь Максвелла при обліку граничних умов при відбитті, і в загальному випадку, коли поверхня, що відбиває є напівпровідною, тобто в ній виникають струми зміщення і струми провідності; вони виражаються наступними формулами [44]:

$$F_1 = \frac{\cos \varphi - \sqrt{\varepsilon - ig - \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi + \sqrt{\varepsilon - ig - \sin^2 \varphi}} = |F|e^{-i\varphi}$$

$$F_1 = \frac{(\varepsilon - ig) \times \cos \varphi - \sqrt{\varepsilon - ig - \sin^2 \varphi}}{(\varepsilon - ig) \times \cos \varphi + \sqrt{\varepsilon - ig - \sin^2 \varphi}} = |F|e^{-i\varphi}$$
(1.12)

де:  $g = 60\lambda\sigma$ ,  $\sigma$  - провідність середовища,  $\lambda$  - довжина хвилі випромінювання.

На рис. 1.9 представлені залежності модуля і фази коефіцієнта відбиття при нормальній поляризації електромагнітного поля від кута ковзання при різних значеннях  $\varepsilon$  [44].

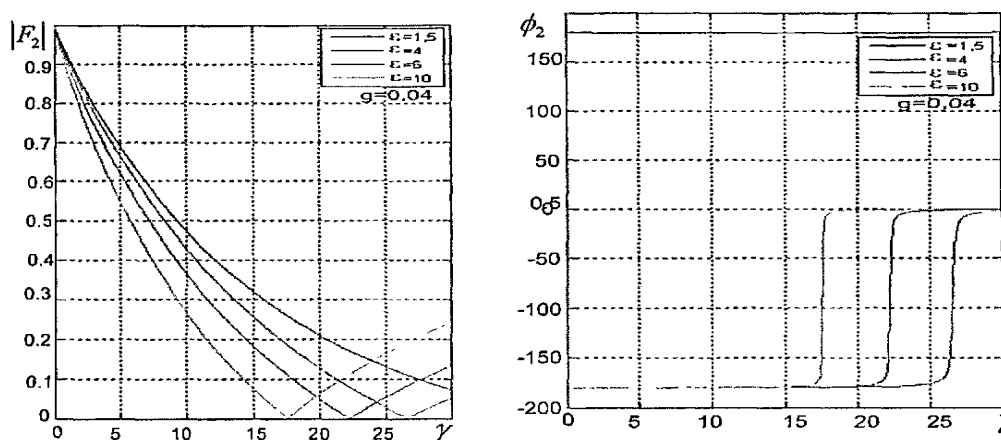


Рис. 1.9. Залежність модуля і фази коефіцієнта відбиття при нормальній поляризації електромагнітного поля від кута ковзання

#### 1.4.4. Затінення електромагнітних випромінювань фіксованими об'єктами

У моделі логарифмічного загасання з урахуванням затінення додатковий параметр, що враховує затінення фіксованими об'єктами всередині приміщень, носить імовірнісний характер. Показано [45-47], що статистичний опис цього параметра залежить від типу досліджуваного приміщення (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Характеристики для опису затінення для різних середовищ

Тип приміщення	Статистичний опис
Житловий будинок (передмістя)	Лог-нормальне
Житловий будинок (місто)	-
Офіс (передмістя)	Сузукі ( $\sigma = 7$ дБ)
Офіс (місто)	Лог-нормальне ( $\sigma = 4-10$ дБ)
Промислова будівля	Лог-нормальне ( $\sigma = 7$ дБ)

Інші моделі, наприклад, по *ITU-R P.1238-1*, рекомендують використовувати цілочисельні поправочні коефіцієнти.

#### 1.4.5. Затінення електромагнітних випромінювань людьми

Переміщення людей і об'єктів усередині приміщень призводить до тимчасової зміни параметрів розповсюдження радіохвиль в цих приміщеннях. Вимірювання [46; 47], показали, що на частоті 1.7 ГГц поява окремої людини в зоні прямої видимості променя призводить до додаткових втрат потужності на 6-8 дБ. Вимірювання на частоті 900 МГц свідчать, що втрати складають 4-7 дБ, якщо сигнал проходить на рівні пояса, і 1-2 дБ - при сигналі на рівні шиї. А вже на частоті 37 ГГц в коридорі втрати можуть досягати 10-15 дБ.

#### 1.4.6. Перехід сигналу з відкритого простору в приміщення і навпаки

Сучасні системи зв'язку вже відносять до категорії «всепроникаючих», особливістю яких називають здійснення зв'язку «в будь-якому місці і в будь-який



час». Для систем подібного роду попереду стоїть завдання дослідження загасання сигналу одночасно поза і всередині приміщень. Розглянемо найпростіший випадок - передавач знаходиться у дворі, а мобільний абонент - всередині приміщення. При моделюванні дуже важливо вміти передбачати додаткові втрати сигналу, обумовлені переходом радіохвилі зовні всередину приміщення і навпаки.

В роботі [20] викладено підхід до моделювання такого роду завдань, який зводиться до рівняння виду

$$P_L[\text{дБ}] = k_1 + G_a + k_2 \times \lg f + k_3 \times \lg R + n_w(k_4 P_1 + k_5 P_2) + k_6 m_f, \quad (1.13)$$

Де:  $f$  - частота сигналу;

$G_a$  - підсилення антени;

$R$  - радіус розповсюдження сигналу;

$P_1, P_2$  - кути падіння на стіни;

$n_w, m_f$  - число стін і стель між передавачем і приймачем;

$k_1 \dots k_6$  - коефіцієнти, які визначаються регресійними методами.

Зокрема, в табл. 1.5 приведені експериментальні значення коефіцієнтів додаткових втрат для різних будівельних матеріалів.

Таблиця 1.5

Вплив будівельних матеріалів на величину загасання

Матеріал	Втрати, дБ	Частота, ГГц
Бетонний блок	13-20	1,3
Фанера (3/4 дюйма)	2	9,6
Фанера (2 листа)	4	9,6
Фанера (2 листа)	6	28,8
Алюмінієвий сайдинг	20	0,8
Листовий камінь (3/4 дюйма)	2	9,6
Листовий камінь (3/4 дюйма)	5	57,6
Поворот коридору за ріг	10-15	1,3

В якості корисної моделі для опису загасання сигналу між приміщенням і відкритим простором (поза-всередині приміщень) варто розглянути (рис. 1.10) відомий підхід [20], схожий з урахуванням кутів ковзання, але для дверних і віконних прорізів будівель.

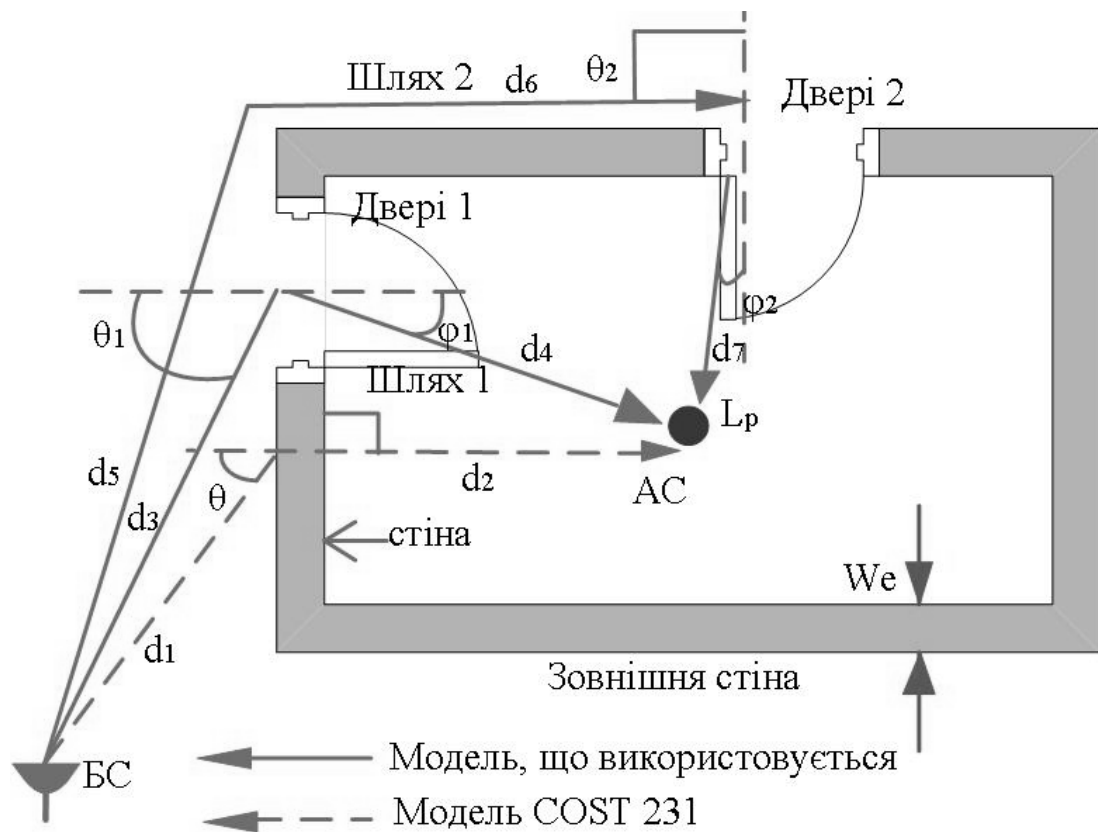


Рис. 1.10. Геометрична модель розповсюдження сигналів між приміщенням і відкритим простором

### 1.5. Рекомендації щодо вибору моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень

Складність вибору адекватної моделі розповсюдження радіохвиль і структури поля посилюється труднощами практичного визначення параметрів моделі і порівнянням якості роботи систем зв'язку, заснованих на різних спрощених моделях взаємодії електромагнітного поля з середовищем. Переважна більшість відомих моделей - емпіричні або напівемпіричні [13, 33, 41-43, 48, 49]. Вони засновані на великій кількості експериментів з виявленням характерних особливостей у вигляді

поправочних коефіцієнтів або показників ступеня загасання. Вимірювання параметрів таких моделей вимагає проведення величезного числа випробувань в самих різних умовах і розрахунку статистичної помилки. Чим більше відхилення, тим в меншій мірі точна модель.

Незважаючи на схожість підходів, оцінки за різними моделями можуть значною мірою відрізнятися. Це обумовлено різноманітністю конструкцій приміщень, в яких проводилися експерименти, складністю опису численних фізичних процесів при багатопроменевому розповсюдженні сигналів в замкнених об'ємах, рухливостю (часозмінністю розташування) затінюючих об'єктів. Як результат, ускладнюється аналіз і прогноз сигналу в системах зв'язку при довільному розміщенні випромінювачів електромагнітних хвиль та абонентів в приміщеннях складної форми.

Зазвичай моделі для приміщень ділять на дві великі групи: емпіричні і ті, що враховують конфігурацію приміщень. Далі, розрізняють стаціонарні (статичні) моделі (описують усереднені параметри загасання сигналу в будь-якій точці простору в залежності від відстані від передавача) і імпульсні (стохастичні) моделі (які вивчають динаміку зміни-сигналу, затримки при багатопроменевості, так звані «кути прибуття» сигналу в приймач). Перші набули найбільшого поширення, зручні як для оцінок потужності сигналу в приміщенні, так і для прогнозування мінімальних і максимальних рівнів потужності при побудові систем зв'язку. Другі зазвичай використовують у вигляді пакетів прикладних програм для вивчення параметрів залежних від часу.

Міжнародний союз електров'язку (ITU) сформулював рекомендації (табл. 1.6) з побудови стаціонарних моделей для аналізу розповсюдження радіохвиль всередині приміщень; серед рекомендованих назовемо матеріали *ITU-R P.1238* (в приміщеннях - indoor) і *COST 231* (в приміщеннях - indoor), а також *ITU-R P.1411* (поза приміщеннями - outdoor) [50-53]. Обидва рекомендованих для приміщень підходи засновані на моделі Зейделя-Раппопорта [54-56] і відносяться до групи емпіричних моделей, коли облік конфігурації приміщення, кількості поверхонь, що відбивають (і матеріалу цих поверхонь), поверховості і т.д. здійснюється за допомогою численних

коефіцієнтів, визначених експериментально. Ключовою характеристикою таких моделей є опис загасання потужності від дальності при довільному розміщенні передавача і приймача. Точність таких моделей залежить не тільки від точності бази даних використовуваних коефіцієнтів, але й від грамотності застосування емпіричних коефіцієнтів до конфігурації реального приміщення (будівлі) [57-58].

Таблиця 1.6

## Властивості рекомендованих моделей

Модель	Застосування	Тип	Вихід	Частоти	Відстань	Висота антени	Вхідні дані
Рекомендації <i>ITU-R P.1238</i>	Мобільні ЛОМ	Поширення всередині приміщень	Втрати Розподіл затримок	900 МГц- 100 ГГц	Всередині приміщень	База: 2-3 м Абонент: 0,5-3 м	Частота Відстань Параметри підлоги і стін
Рекомендації <i>ITU-R P.1411</i>	Мобільні	На коротких відстанях	Втрати Розподіл затримок	300 МГц – 100 ГГц	Поза будинками < 1 км	База: 4-50 м Абонент: 0,5-3 м	Частота Відстань Розміри вулиць зміна висот

### 1.6. Класифікація моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень

Останні два десятиліття розповсюдження сигналів стало нагальним завданням для бурхливого розвитку систем радіозв'язку, тому число публікацій з цієї тематики давно переступило за 1000. Чіткої і універсальної класифікації існуючих моделей немає [59-63].

Як зазначалося вище, з точки зору конфігурації приміщень, моделі в літературі зазвичай ділять на дві групи: що враховують (*site-specific*) і не враховують (*empirical*) реальну конфігурацію кімнат і будинків. З точки зору характеру досліджуваних характеристик - теж на дві: усталені (стаціонарні, усереднені) і імпульсні (часозмінні,

стохастичні). В роботі [64] робиться спроба більш детальної класифікації відомих моделей (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Варіант класифікації моделей розповсюдження радіохвиль

В роботі [65] запропоновано виділити 4 класу моделей:

- з розрахунком імпульсної функції відгуку (channel impulse response functions, CIRs);
- на основі моделей оптичних променів (ray optical methods);
- стохастичні моделі, в яких імпульсна функція відгуку розглядається як реалізація;
- параметричні стохастичні моделі.

При такій класифікації, на жаль, поза увагою залишаються традиційні емпіричні моделі загасання сигналу по трасі і багаточисельні методи.

На практиці найбільшого поширення набули моделі, засновані на великому експериментальному матеріалі, в яких приміщення поділяються на ряд категорій: офіс, готель, госпіталь, стару будівлю і т.д. Для кожної категорії пропонується деяке значення (діапазон значень) коефіцієнтів загасання  $i$  / або показників ступеня загасання (див., наприклад, табл. 1.7). Основний параметр  $n$  дуже чутливий до середовища розповсюдження, тобто до типу будівельних матеріалів, типу інтер'єру, розташування будівлі і т.д. Також значення  $n$  може варіюватися від 1,2 (хвилеводний ефект) до 6 і може залежати від способу отримання та обробки даних [3-4, 8-10, 31].

Таблиця. 1.7.

Залежність показників ступеня загасання від типу приміщення

Приміщення	Частота, МГц	Показник ступені $n$	Відхилення, дБ
Магазин	914	2,2	8,7
Лавка	914	1,8	5,2 1
Офіс, багато перегородок	1500	3,0	7,0
Офіс, мало перегородок	900	2,4	9,6
Офіс, мало перегородок	1900	2,6	14,1
Виробництво (текстиль / хімія)	1300	2,0	3,0
Виробництво (текстиль / хімія)	4000	2,1	7,0
Виробництво (папір / крупа)	1300	1,8	6,0
Виробництво (металургія)	1300	1,6	5,8
Приватний будинок (зсередини на вулицю)	900	3,0	7,0

Оцінка втрат потужності при використанні подібних моделей здійснюється дуже швидко, дає прийнятну помилку, але не враховує таких особливостей, як геометрія приміщень, висота розташування антен і т. д.

Серед моделей, що враховують той чи інший спосіб форму і розміри приміщень виділяють: емпіричні моделі прямого шляху, емпіричні багатопроменеві моделі, моделі оптичних променів і ін.

Найпростіша аналітична оцінка функції загасання поля в приміщенні описується співвідношення виду  $PL(d) = PL(d_0) + 10n \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$ , таким же, як і для поля в міських умовах. Тут  $PL(d)$  - втрати на шляху в дБ на відстані  $d$ ,  $PL(d_0)$  - відомі втрати на відстані  $d_0$  (зазвичай  $d_0 = 1$  м),  $n$  - показник ступеня (множник - якщо представляти в децибелах), визначає експонентну залежність загасання в середовищі розповсюдження, а  $X_\sigma$  - коригуючий коефіцієнт моделі. Однак величина дисперсії  $\sigma$  випадкового відхилення потужності сигналу від середнього значення при

розрахунках розподілу поля в приміщенні істотно перевищує аналогічну величину для поля в міських умовах. Деяке підвищення точності розрахунків може бути досягнуто введенням додаткових доданків.

### ***1.6.1. Емпіричні багатопроменеві моделі***

Багатопроменеве розповсюдження дуже важливо у внутрішньому середовищі, і модель з прогнозом повинна розглядати багатопроменеві параметри для отримання точних результатів. Тому була розроблена модель домінантного променя (Dominant Path Model) [66]. Вона дає можливість розраховувати переважаючі шляхи (домінантні промені) між передавачем і приймачем, розглядаючи діюче багатопроменеве розповсюдження і знижуючи час обчислення майже до рівня емпіричних однопроменевих моделей.

Розраховується дерево багатокімнатної структури, що ґрунтується на відношенні сусідства кімнат, і відображує їх схему і розстановку. Промені від передавача до приймача і кімнати, пройдені цими променями, визначаються по дереву кімнат. Подальша інформація про дерево кімнат і знаходженні променів представлена в [67-69].

Ця модель дуже мало залежить від точності бази даних, тому що не розглядає точного розташування стін, а тільки інформація про кімнату і сусідні кімнати впливає на розрахунок променів.

Найбільш популярні емпіричні моделі розповсюдження радіохвиль [70-77] в приміщеннях зведені в табл. 1.8.

Фірма «Ерікссон», наприклад, в своїх розрахунках використовує також графічне представлення величини загасання в залежності від відстані від передавача для різних типів приміщень (рис. 1.12). Відповідно до цієї моделі величина втрат потужності  $PL(d_0)$  (на відстані 1 м від передавача) приймається постійною і рівною - 30 дБ від номінальної потужності передавача  $P_t$ . У графічному вигляді вказуються нижня і верхня межі для очікуваної величини втрат в залежності від відстані між передавачем і приймачем.

## Найбільш популярні емпіричні моделі для приміщень

Найменування	Основне рівняння для розрахунку затухання сигналу
Модель логарифмічного затухання	$\overline{PL}[\text{дБ}] = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$
Модель логарифмічного затухання з урахуванням затінення	$PL(d)[\text{дБ}] = \overline{PL}(d) + X_\sigma = 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$
Модель логарифмічного затухання з відбиттям від стін	$\overline{PL}(d)[\text{дБ}] = \overline{PL}(d_0) + 10n_{sf} \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + PAF + \sum_i^{N_p} PAF_i$
Модель багатьох променів	$P_r(d) = P_t + G_t + G_r - L_p(d)$ $L_p(d) = 68 + 20 \log\left(\left \frac{1}{d_0} + \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{d_i} e^{j\Delta\phi_1} + \sum_{j=1}^M \frac{R_{ja} \times R_{jb}}{d_j} e^{j\Delta\phi_1}\right \right)$
Моделювання відбиття від стін в COST 231 (indoor)	$L = L_{FS} + L_c + \sum_{i=1}^l k_{wi} l_{wi} + k_f \left[\frac{k_f+2}{k_f+1} b\right] L_f$

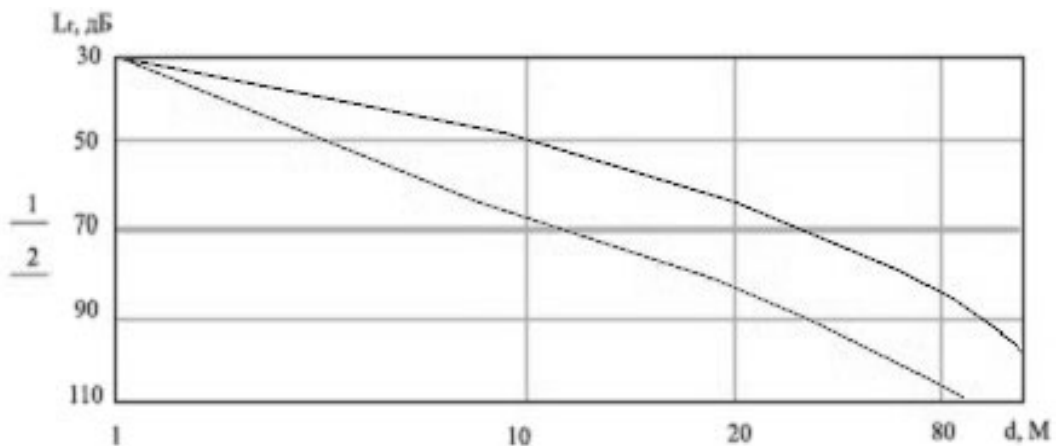


Рис. 1.12. Графічна модель фірми «Ерікссон» для загасання поля всередині будівлі: 1 - верхня межа; 2 - нижня межа



Для аналізу загасання сигналу в багатоповерхових будівлях, зазвичай, вводять поправочні коефіцієнти. Типові значення становлять: 15 дБ для першого поверху; 6-10 дБ на кожен поверх від 2-го до 5-го; 1-2 дБ на поверх вище 5-го поверху.

У рекомендаціях *ITU-R P.1238-1* [50] для багатоповерхових будівель наводяться відповідні поправочні коефіцієнти, які зведені в табл. 1.9.

Таблиця 1.9

Поправочні коефіцієнти загасання (дБ) по *ITU-R P.1238-1*

Характеристика	Житловий будинок	Офісна будова	Комерційна будова
Показник ступеня затухання	2.8	3.0	2.2
Втрати при проникненні через $g$ поверхів	$4g$	$15+4(g-1)$	$6+3(g-1)$
Фактор затінення	8	10	10

### 1.6.2. Стохастичні (ймовірні, статистичні) моделі

Метою аналізу поля по моделі малої відстані є визначення впливу на параметри сигналу нестаціонарної інтерференційної картини поля, яка є наслідком взаємодії хвиль (променів), що поширюються від передавача до приймача різними шляхами в умовах численних відбиттів від будівель і / або складок місцевості. В результаті одночасного існування в точці прийому декількох копій сигналу з довільними амплітудами і фазами, залежними від локального розташування відбиваючих і поглинаючих об'єктів, тимчасова форма і спектр сумарного сигналу можуть істотно відрізнятися від вихідних, на виході передавача. При аналізі локальної структури поля слід також враховувати його нестаціонарність, викликану постійними змінами взаємного розташування приймача, передавача і перешкод між ними.

Як вже зазначалося вище, взаємодія когерентних радіохвиль розглядається в термінах теорії сигналів як взаємодія декількох копій сигналу, що передається, кожна

з яких характеризується власними амплітудою, фазою і часом поширення. Розрізняють 3 найбільш істотних ефекти, до яких призводить багатопробене розповсюдження в радіоканалі:

- швидкі випадкові зміни форми сигналів на невеликій відстані або протягом короткого часу. Невелика зміна взаємного розташування приймача, передавача і перешкод на величину всього лише близько чверті довжини хвилі призводить до суттєвих змін амплітуди і фази копій сигналу в точці прийому. Вимірювання в міських умовах показують, що різниця між максимальним і мінімальним значеннями рівня сигналу досягає 30 дБ;

- випадкові зміни частоти сигналу. Постійний рух приймача, передавача і перешкод приводить до появи змінного в часі доплерівського зсуву частот. Незважаючи на те, що максимальна величина доплерівського зсуву частот в діапазоні УКХ всього лише близько 100 Гц, його вплив на працездатність приймача може бути значним;

- тимчасова дисперсія. Різний час поширення копій сигналу від передавача до приймача призводить до взаємного накладання копій різних сигналів, що з точки зору обробки інформації означає виникнення міжсимвольних спотворень. Модель багатопробеневого каналу описує спотворення ідеального модульованого сигналу  $s(t)$ , який присутній на виході передавача, внаслідок нестационарної взаємодії декількох копій спотвореного ідеального сигналу в точці прийому. Запишемо вираз для ідеального сигналу передавача в загальноприйнятому вигляді:

$$s(t) = \text{Re}\{g(t)\exp(j\omega_c t)\} \quad (1.14)$$

Сигнал від передавача поширюється по декількох паралельних каналах, так що на вхід приймача приходять кілька копій переданого сигналу і кожна до  $k$ -а копія може бути представлена в наступному вигляді:

$$r_k(t) = \text{Re}\{a_k g_k(t - \tau_k)\exp(j\omega_c t + \phi_k)\} \quad (1.15)$$

де  $a_k$  - модуль коефіцієнта передачі  $k$  - го каналу;  $g_k(t)$  - комплексна обвідна модульованого сигналу на виході  $k$  - го радіоканалу,  $\tau_k$  - час поширення копії сигналу по  $k$ - му каналу від передавача до приймача,  $\phi_k$  - фаза коефіцієнта передачі  $k$ -го каналу.

З формули (1.14) випливає, що кожен приватний  $k$ -й канал, через який поширюється сигнал від передавача до приймача, можна розглядати як певний смуговий фільтр з комплексним коефіцієнтом передачі до  $a_k e^{j\phi_k}$ , затримкою поширення  $\tau_k$  і центральною частотою пропускання  $\omega_c$ , рівної номінальній робочій частоті передавача. Багатопроменевий канал, по якому поширюються  $N$  копій вихідного сигналу (1.13), можна відповідно представити набором еквівалентних смугових фільтрів, кожний з яких характеризується власними параметрами передачі  $a_k, \phi_k, \tau_k$ . Сумарний сигнал, що приймається  $r(t)$  в багатопроменевому каналі відповідно до формули (1.14) і еквівалентною схемою багатопроменевого каналу визначається наступним виразом:

$$r(t) = \text{Re}\{g_\Sigma \exp(j\omega_c t)\}, \quad (1.16)$$

де  $g_\Sigma = \sum_{k=1}^N a_k \exp(j\phi_k) g_k(t - \tau_k)$  - сумарна комплексна обвідна прийнятого модульованого високочастотного сигналу.

Серед найбільш популярних стохастичних моделей відзначають:

- модель *Clarke* (плоского загасання);
- двопробенева модель релеївського загасання;
- статистичну модель для приміщень *Saleh* і *Valenzuela* [24, 88] і безліч її модифікацій;
- статистичні моделі, реалізовані у вигляді пакетів прикладних програм *SIRCIM* (*Simulation of Indoor Radio Channel Impulse response Model*) and *SMRCIM* (*Simulation of Mobile Radio Channel Impulse response Model*) для розрахунку параметрів сигналів усередині і поза приміщеннями [33, 67].

Вельми популярна модель [11] передбачає, що багатопроменеві сигнали при розповсюдженні в приміщенні групуються в кластери. Амплітуди прийнятих складових є незалежними релеївськими випадковими змінними, згасаючими експоненціально як в кластерах, так і між сусідніми кластерами. Відповідні фазові кути є незалежними змінними. Кластери та компоненти багатопроменевого сигналу формують пуассонівський процес в приймачі з різними швидкостями.

### ***1.6.3. Метод кінцевих різниць у часовій області (FDTD Finite-Difference Time-Domain)***

Характеристики розповсюдження радіосигналів можуть бути отримані розв'язанням рівнянь Максвелла. Метод *FDTD*, напевно, найпопулярніший метод чисельного розв'язання цих рівнянь. У цьому методі рівняння Максвелла представлені у вигляді системи кінцево-різницевих рівнянь. Метод *FDTD* є універсальним - він може бути з успіхом застосований практично у всіх завданнях електродинаміки, що вимагають чисельного рішення. Це і внутрішні завдання, включаючи аналіз структур складної форми з неоднорідностями, хвилеводних, мікросмужкових, і моделювання випромінюючих структур, антен, і аналіз активних приладів НВЧ, і багато іншого. Особливо ефективним є застосування методу *FDTD* в тих завданнях, в яких наявні традиційні підходи, зокрема, де важлива можливість аналізу нестационарних процесів.

Частотні характеристики досліджуваного об'єкта можуть бути отримані за допомогою дискретного перетворення Фур'є або умовно, при не дуже високій добротності, шляхом завдання квазігармонічного джерела і виконання розрахунків до виходу на усталений режим. Крім простоти постановки, метод *FDTD* має безсумнівні переваги в плані моделювання електродинамічних об'єктів з неоднорідними, анізотропними і нелінійними середовищами з довільними формами кордонів.

У своїй класичній постановці метод *FDTD* заснований на простій і елегантній дискретизації рівнянь Максвелла, записаних в диференціальному просторово-часовому формулюванні. Сітки для електричного і магнітного полів зміщені по відношенню один до одного в часі і просторі на половину кроку дискретизації по кожній із змінних. Звичайно, різницеві рівняння дозволяють визначити електричне та магнітне поля в даний момент часу на підставі відомих значень полів в попередній момент часу, і при заданих початкових умовах обчислювальна процедура розгортає розв'язання в часі від початку відліку з заданим кроком.

Особливо вигідним є використання методу *FDTD* при дослідженні нестационарних процесів - наприклад, електромагнітного поля антен при порушенні

їх короткими імпульсами. *FDTD* моделі застосовні в основному для маленьких територій. Для великих територій більше підходять моделі трасування променя.

#### **1.6.4. Порівняння моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань**

Для порівняння найпоширеніших моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань, детальний опис яких представлено в додатку Б, використовувалось спеціалізоване програмне забезпечення фірми Altair Feko™ Applications WinProp Radio Coverage and Planning. В якості обчислювальних потужностей використовувався ноутбук з процесором фірми Intel™ Core i5 – 8250U (восьме покоління) з чотирма обчислювальними та чотирма логічними ядрами, 8 Гб ОЗП DDR4 з частотою 2400 МГц.

Порівняння моделей проводилось за критеріями: **час розрахунку** при повному завантаженні обчислювальних ресурсів, **гнучкість конфігурації** для подальшої можливості уточнення за рахунок додаткових коефіцієнтів. Результати порівняння зображені в таблиці 1.10.

Таблиця 1.10

Порівняння моделей

Модель	Час розрахунку	Гнучкість конфігурації
Модель запуску променів	4 хвилини 55 секунд	–
Модель трасування променів	4 хвилини 27 секунд	–
Подієва TLM	5 хвилин 13 секунд	–
FDTD	4 години 32 хвилини 22 секунди	–
Г-подібна модель	3 хвилини 36 секунд	–
Модель Окамури	2 хвилини 17 секунд	+
Модель Хата	2 хвилини 30 секунд	+

Модель COST 231 MWM	1 хвилина 07 секунд	+
Модель Лі	5 хвилин 39 секунд	–
Модель Кся-Бертолі	6 хвилин 12 секунд	+
Модель з одним нахилом	3 хвилини 45 секунд	–
Модель лінійного ослаблення	3 хвилини 38 секунд	–
Модель логарифмічного затухання з урахуванням затінення	3 хвилини 12 секунд	–
Модель Мотлі-Кінана	3 хвилини 06 секунд	–
Модель, заснована на методі КРЧО	5 хвилин 16 секунд	–

### 1.7. Висновки і постановка задачі

1. Моделі для опису, розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень, як: правило, значно складніші за моделі для сигналів у відкритому просторі (поза приміщеннями), що обумовлено такими обставинами, як обмеженість простору між передавачем і приймачем і його складна конфігурація (коридори, повороти, переходи, багатоповерхові будівлі) та необхідність розрахунку ефектів багатопроменевості (сигнали в приймач надходять як в результаті відбиття від поверхонь, так і за рахунок дифракції, а також проникнення крізь перегородки, стіни).

2. Розглянуті в даному розділі моделі ділять на дві великі групи: емпіричні, детерміновані (враховують конфігурацію приміщень), стохастичні (статистичні). Слід зазначити, що статистичні моделі не дозволяють в повній мірі врахувати особливості трас розповсюдження електромагнітних випромінювань. У зв'язку з цим в деяких випадках можуть використовуватися детерміновані моделі. Такі моделі дуже

трудомісткі в плані побудови трас розповсюдження і проведення розрахунків та вимагають безліч вихідних даних, які не завжди відомі. Розрізняють стаціонарні (статичні) моделі (описують усереднені параметри загасання сигналу в будь-якій точці простору в залежності від відстані від передавача) та імпульсні моделі (які вивчають динаміку зміни; сигналу, затримки при багатопрореневості, так звані «кути прибуття» сигналу в приймач). Перші набули найбільшого поширення, зручні, як для оцінок потужності сигналу в приміщенні, так і для прогнозування мінімальних і максимальних рівнів потужності при моніторингу електромагнітного стану. Другі зазвичай використовують, у вигляді пакетів прикладних програм для вивчення параметрів електромагнітних випромінювань, що залежать від часу.

3. Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) сформулював рекомендації з побудови стаціонарних моделей для аналізу розповсюдження радіохвиль усередині приміщень, що зосереджені на матеріалах *ITU-R P.1238 (indoor)* і *COST 231 MWM (indoor)*. Обидва рекомендовані підходи засновані в тій чи іншій мірі на моделі Зейделя-Раппопорта (і Кінана-Мотлі) і відносяться до групи емпіричних моделей, коли розрахунок конфігурації приміщення, кількості поверхонь, що відбивають випромінювання (і матеріалу цих поверхонь), поверховості будівлі здійснюється за допомогою численних коефіцієнтів, визначених експериментально. Точність таких моделей залежить як від точності бази даних використовуваних коефіцієнтів, так і від грамотності застосування емпіричних коефіцієнтів до конфігурації реального приміщення (будівлі).

4. На практиці широке застосування знайшли моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень, отримані на основі обробки результатів експериментальних досліджень. Зазначені моделі розроблялися для певних частотних діапазонів, що використовуються в різних системах моніторингу електромагнітного стану і системах забезпечення електромагнітної доступності (СЗЕД). Разом з тим становить інтерес дослідження ослаблення радіохвиль на трасі розповсюдження всередині будівлі на частотах 30 - 6000 МГц. На практиці результати досліджень можуть використовуватися при організації моніторингу електромагнітного стану, придушенні професійного радіозв'язку, оцінці рівнів

побічних електромагнітних випромінювань офісної техніки, оцінці впливу потужних надкоротких імпульсів на функціонування радіоелектронної апаратури.

5. Науково-технічне підґрунтя для методу підвищення ефективності використання пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки базується, насамперед, на використанні нових системоутворюючих факторів - складних розрахунків втрат енергії під час розповсюдження електромагнітного випромінювання. Це, в свою чергу, ставить завдання по дослідженню математичних моделей каналу розповсюдження електромагнітних випромінювань та розробці комплексних математичних моделей електромагнітного простору в системі моніторингу електромагнітної обстановки і дослідженню їх впливу на системи забезпечення електромагнітної доступності.

Таким чином, актуальною є розробка нових та удосконалення існуючих методів підвищення ефективності використання радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій для потреб радіомоніторингу та захисту інформації від несанкціонованого отримання.

Відповідно до визначеної наукової задачі необхідно провести 4 етапи дослідження, основний зміст яких зображено на рис. 1.13.

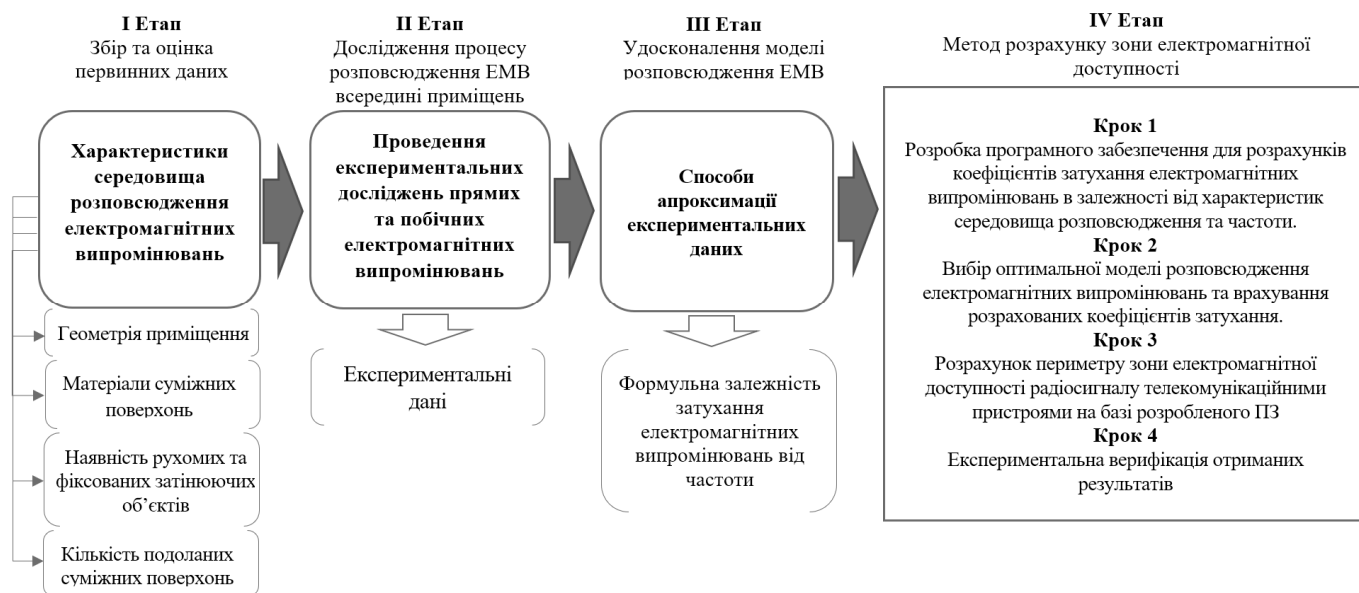


Рис. 1.13. Основні етапи виконання завдання дисертаційної роботи



## Список використаних джерел у першому розділі

1. Pinho, Pedro, ed. *Antennas and Wave Propagation*. BoD—Books on Demand, 2018.
2. Бахтіяров Д. І., Козлюк І. О. Методика модернізації моделі розповсюдження радіохвиль всередині приміщення для побудови контрольованої зони корпоративної мережі. *Наукоємні технології*. 2019. №3. Т.43. С. 349–356. DOI: 10.18372/2310-5461.43.13987.
3. Ishii T., "RF propagation in buildings," *RFDesign Magazine*, pp. 45-49, Jul. 1989.
4. Sarkar T. et al., "A survey of various propagation models for mobile communication," *IEEE Ant. Prop. Magazine*, Vol. 45, No.3, pp. 51-82, Jun. 2003.
5. Iskander M. F. and Yun Z, "Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems," (Invited paper) *IEEE Trans, on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 50, pp. 662-673 (March 2002).
6. Porrat D. and Cox D. C, "UHF Propagation in Indoor Hallways," *IEEE Trans, on Wireless Comm.*, vol. 3, pp. 1188-1198 (July 2004).
7. G.L. James, "Geometrical Theory of Diffraction for Electromagnetic Waves," *IEE Electromagnetic Wave Series I*, Exeter, 1986.
8. Struzak R, *Radio-wave Propagation Basics*.- ICTP, Trieste, Italy, 2006.
9. Molkar D, "Review on radio propagation into and within buildings," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, pt. H, vol. 138, pp. 61-73, Feb. 1991
10. Hashemi. H, "The indoor radio propagation channel," *Proc. IEEE*, vol. 81, pp. 943-968, July 1993.
11. Saleh A. A. M and Valenzuela R. A, "A statistical model for indoor multipath propagation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-5, pp. 128-137, Feb. 1987.
12. Lewis Girod, *Radio Propagation // Конспект лекцій - CSCI 694* . -24 September 1999
13. Seybold, John S., *Introduction to RF propagation / 2005* by John Wiley & Sons, Inc
14. Dobkin D., *Indoor propagation issues for wireless LANs*, *RF Design Hifagazme*, September 2002, pp. 406.
15. Vaughan R.G., "Signals in Mobile Communications: A Review", *IEEE Trans, on Veh. Tech.*, Vol VT-35, No. 4, Nov. 1986, pp. 133-144.

16. Lee W.C.Y., "Mobile communications design fundamentals", Howard W. Sams & Co., Indianapolis, 1986.
17. Andersen J. B., Rappaport T. S., and Yoshida S., "Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels," IEEE Communications Magazine, vol. 33, pp. 42-49, January 1995
18. Akerberg D., "Properties of a TDMA Pico Cellular Office Communication System," Proc. 1989 IEEE Vehicular Tech. Con./., pp. 186-191.
19. Yun Z, Iskander M. F, and Zhang Z, "A fast indoor/outdoor ray tracing procedure using combined uniform rectangular and unstructured triangular grids," in Proc. IEEE AP-SInte. Symp. Dig., July 2000, pp. 1134-1137
20. Iskander M. F., Yun Z., and Zhang Z, "Outdoor/indoor propagation modeling for wireless communications systems," in IEEE APS Int. Symp. Dig., USNC/ZJRSI Nat. Radio Sci. Meeting, vol. 2, July 8-13, 2001, pp. 150-153.
21. Fenton L.F., "The sum of log-normal probability distributions in scatter transmission systems", IRE Trans. Comm. Sys., Vol. CS-8, March 1960,1 pp. 57-67.
22. Schwartz S.C. and Yeh Y.S., "On the distribution function and moments of power sums with log-normal components", Bell Sys. Tech. Journal, Vol. 61, No. 7, Sep. 1982, pp. 1441-1462.
23. Marsan M.J., Hess G.C. and Gilbert S.S., "Shadowing variability in an urban land mobile environment at 900 MHz", Electron. Lett., Vol. 26 No. 10, 10th May 1990, pp. 646-648.
24. Howard S. & Pahlavan K., "Doppler Spread Measurements of the Indoor Radio Channel", Electronics Letters, Vol. 26, No. 2, 1990, pp. 107-109.
25. Rappaport Theodore S., "Characterization of UHF Multipath Radio Channels in Factory Buildings", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 37, No. 8, August 1989, pp. 1058 - 1069.
26. Akerberg D., "Properties of a TDMA Pico Cellular Office Communication System," Proc. 1988 IEEE GlobeCom Con./., pp. 1343-1349.
27. Bultitude R. J. C, "Measurement, Characterization and Modeling of Indoor 800/900 MHz Radio Channels for Digital Communications," IEEE Communications Magazine, June 1987, pp. 5-12.

28. Lee H. et al., "Multipath Characteristics of Impulse Radio Channels," Proc. IEEE VTC 2000, pp. 2487-2491.
29. Rappaport T. S. and Sandhu S., "Radio-Wave Propagation for Emerging Wireless Personal-Communication Systems," IEEE Ant. and Propag. Magazine, October 1994, pp. 14-24.
30. W. Honcharenko, H. Bertoni, "Transmission and Reflection Characteristics at Concrete Block Walls in the UHF Bands Proposed for Future PCS," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.42, no.2, pp.232-239, February 1994
31. T. S. Rappaport, Wireless Communications : Principles and Practice, 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002
32. Tingley R. D. and Pahlavan K., "Space-Time Measurement of Indoor Radio Propagation," IEEE Trans, on Instrumentation and Measurement, vol. 50, pp. 22-31 (February 2001).
33. Martin Klepal. "Channel Parameters Prediction in the Simulator of Ubiquitous Computing", Centre for Adaptive Wireless Systems 15th April 2005, Seminar .
34. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М., «СВЯЗЬ», 1972. - 336 с.
35. Adana de F. S, Blonco O. G, Diego I. G, Arriaga. J. P, and Catedra. M. F, "Propagation model based on ray tracing for the design of personal communication systems in indoor environments," IEEE Trans. Veh. Technol, vol. 49, pp. 2105-2112, Nov. 2000.
36. Estes D., et al., "Shipboard Radio Frequency Propagation Measurements for Wireless Networks," Proc. 2001 IEEE MILCOM
37. Hassanzadeh S. and Hashemi H, "A Propagation Model for Microcellular Mobile and Personal Radio Communications," Proc. PIMRC '95, pp 392-396.
38. Hills A., et al., "Estimating Signal Strengths in the Design of an Indoor Wireless Network," IEEE Trans. Wireless Comm., vol. 3, pp. 17-19 (January 2004).
39. Kivinen J., et al.5 "Empirical Characterization of Wideband Indoor Radio Channel at 5.3 GHz," IEEE Trans. Ant. and Prop., vol. 49, 1192-1203 (August 2001).
40. Cichon D. J. and Wiesbeck W., "Indoor and Outdoor Propagation Modeling in Pico Cells," Proc. 1994 PIMRC, pp. 491-495.

41. Узагальнена модель поширення радіосигналів [Електронний ресурс] // АрхівІнфо. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://arhivinfo.ru/1-33908.html>.
42. Распространение радиоволн: Учебник / Под ред. О.И.Яковлева. - М.: ЛЕНАНД,2009.-496с.
43. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: Учебник для вузов / Г. А. Ерохин, О. В. Чернышев, Н. Д. Козырев, В. Г. Кочержевский; Под. Ред. Г. А. Ерохина. - 2-е изд., испр. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004.
44. Бахтіяров Д. І. Особливості вибору моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщення. Наукоємні технології. 2019. №4. Т.44. С. 457–467. DOI: 10.18372/2310-5461.44.14322.
45. Hashemi H., et al., "Measurements and Modeling of Temporal Variations of the Indoor Radio Propagation Channel," IEEE Trans, on Vehicular Technology, vol. 43, pp. 733-737 (August 1994).
46. Hassan-Ali and Pahlaven "A new statistical model for site-specific indoor radio propagation prediction based on geometric optics and geometric probability" IEEE Trans Wireless Comms, Vol.1, No. 1,2002
48. MOLISCH, A. Modeling of directional wireless propagation channels, Radio Science Bulletin, Anais... v. 307, 16-26, set. 2002.
49. Hassanzadeh S. and Hashemi H., "A Propagation Model for Microcellular Mobile and Personal Radio Communications," Proc. PIMRC '95, pp 392-396.
50. ITU-R, \_Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Indoor Radiocommunication Systems and Radial Local Area Networks in the Frequency Range 900 MHz to 100 GHz,\_ Recommendation ITU-R P.1238-3, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2003.
51. Damosso E., ed., Digital Mobile Radio: COST 231 View on the Evolution towards 3rd Generation Systems. Bruxelles: Final Report of the COST 231 Project, published by the European Comission, 1998.
52. Recommendation ITU-R P. 1238-4 "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz" 2005

53. Degli-Esposti V., Carciofi C, Frullone M., and Riva G., "Sensitivity of Ray-Tracing Indoor Field Strength Prediction to Environment Modelling," in European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (COST), COST 259 TD(97)049, (Lisbon), Sept. 1997
54. Rappaport T. S., Seidel S. Y, and Takamizawa K., "Statistical Channel Impulse Response Models for Factory and Open Plan Building Radio Communication System Design," IEEE Trans, on Commun., vol. 39, pp. 794-807 (May 1991).
55. Seidel S. Y. and Rappaport T. S., "A Ray Tracing Technique to Predict Path Loss and Delay Spread Inside Buildings," Proc. 1992 IEEE GlobeCom, pp. 649-653.
56. Seidel S. Y. and Rappaport T. S., "A Ray Tracing Technique to Predict Path Loss and Delay Spread Inside Buildings," Proc. 1992 IEEE GlobeCom, pp. 649-653.
57. Cheon C, Liang G, and Bertoni H. L., "Simulating Radio Channel Statistics for Different Building Environments," IEEE J. on Selected Areas in Communications, vol .19, pp. 2191-2200 (November 2001).
58. Cavilla A. L., et al., "Simplified Simulation Models for Indoor MANET Evaluation Are Not Robust," Proc. SECON2004.
59. Kivinen J., Zhou X., and Vainikainen P., Empirical characterization of wideband indoor radio channel at 5.3GHz, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 49, No. 8, August 2001, pp. 1192-1203.
60. Cichon D. J. and Wiesbeck W., "Indoor and Outdoor Propagation Modeling in Pico Cells," Proc. 1994 PIMRC, pp. 491-495
61. Pahlavan K., et al., "Wideband radio propagation modeling for indoor geolocation applications," IEEE Communications Magazine, April 1998, pp. 60-65.
62. Patwari N., et al., "The Importance of the Multipoint-to-Multipoint Indoor Radio Channel in Ad Hoc Networks" [measurements at 925 MHz] Proc. IEEE WCNC 2002.
63. Van Loon L.J.W., "Mobile in-home UHF radio propagation for short-range devices," IEEE Ant. Prop. Magazine, Vol. 41, No. 2, pp. 37-40, Apr. 1999.
64. Przemyslaw Madej. - 3D Wireless Networks Simulator - visualization of Radio Frequency propagation for WLANs . A dissertation submitted to the University of Dublin, Trinity College, for the degree of Master of Science in Computer Science . May 2006

65. Andreas F. Molisch, Henrik Asplund, Ralf Heddergott, Martin Steinbauer, , and Thomas Zwick, The COST259 Directional Channel Model-Part I: Overview and Methodology . - IEEE TRANSACTIONS ON WIRELESS COMMUNICATIONS, VOL. 5, NO. 12, DECEMBER 2006 p.3421

66. Wolfle G., Landstorfer F. M, Gahleitner R., and Bonek E., "Extensions to the Field Strength Prediction Technique based on Dominant Paths between Transmitter and Receiver in Indoor Wireless Communications," in 2nd European Personal and Mobile Communications Conference (EPMCC), (Bonn), pp. 29 - 36, Nov. 1997.

67. Huschka T., "Ray Tracing Models for Indoor Environments and their Computational Complexity," in IEEE 5th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 486 - 490, Sept. 1994.

68. Wolfle G. and Landstorfer F. Mi, "Dominant Paths for the Field\* Strength Prediction," in 48th IEEE International Conference on Vehicular Technology (VTG), (Ottawa), pp: 552-556, May 19981

69. Gahleitner R., Radiowave Propagation in and into Urban Buildings; Phdithesis, Technical: University of Vienna; Institute fur Nachrichtentechnik undi Hochfrequenztechnik, May 1994

70. Andrusenko J., Burbank J., Ward J. Modeling and Simulation for RF Propagation, t - APL, The Johns Hopkins University, 2009.

71. Wireless Personal Communications : Channel Modeling and Systems Engineering by William H. Tranter, Brian D. Woerner, Theodore S. Rappaport, Jeffrey H. Reed (Editors) .- The Kluwer International Series in Engineering and-Computer Science, 1999.

72. Y.M. Le Roux , L. Bertel., P. Lassudrie Duchesne, " Requirements for future models and simulators of the HF transmission channels ", HF radio systems and techniques, Conference IEE n°474, 2000.

73. S. Salous, L. Bertel, "Analysis of propagation effects on UHF mobile radio signals", Proceedings of PSIP.99 conference, Paris, January 1999.

74. Tingley R. D. and Pahlavan K., "Space-Time Measurement of Indoor Radio Propagation," IEEE Trans, on Instrumentation and Measurement, vol. 50, pp. 22-31 (February 2001).

75. A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication/ T.K.Sarkar, etc.. - IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, v.45, No.3, p.51.

76. Prasad A. R. et al., "Indoor Wireless LANs Deployment," Proc. IEEE 2000 Vehicular Tech. Conf, pp. 1562-1566.

77. Neskovic A., Neskovic N., and Paunovic G, "Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment," IEEE Communications Surveys, Third Quarter 2000, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>.

78. Геометрическая модель распространения радиоволн в; помещениях Г-образной конфигурации / Аунг Мьинт Эй; ЧжоЧжоНьянЛин^ Кондратов А.В.; Лужнов М.С. // Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция для студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика». Тезисы докладов. М.: МИЭТ, 2008. С. 223.

79. Phani Teja Kuruganti and James Nutaro. A Comparative Study of Wireless Propagation Simulation Methodologies: Ray Tracing, FDTD, and Event Based TLM. - Computational Sciences and Engineering Division. Oak Ridge National Laboratory.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОД УТОЧНЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

#### **2.1. Затухання при розповсюдженні електромагнітних випромінювань та критерії якості радіосистем всередині приміщень**

Погіршення характеристик розповсюдження в радіоканалі всередині приміщення обумовлено в основному:

- відбиттям від предметів і дифракцією над предметами (включаючи стіни і підлоги) всередині приміщень;
- втратами передачі при проходженні сигналу через стіни, підлоги та інші перешкоди;
- каналізуванням енергії сигналу на високих частотах, особливо в коридорах.

Переміщення людей і предметів в приміщенні викликає такі погіршення як:

- втрати на трасі - тобто не тільки втрати у вільному просторі, але й додаткові втрати за рахунок перешкод і проходження сигналу через матеріали, з яких побудовано будівлю, а також можливе зменшення втрат у вільному просторі за рахунок каналізування;
- зміна величини втрат на трасі в часі і просторі;
- багатопроменеві ефекти, викликані відбиттям і дифракцією компонентів радіохвилі;
- неузгодженість поляризацій через випадкову юстировку рухомого терміналу.

##### ***2.1.1. Вплив поляризації і діаграми спрямованості антени***

В умовах прийому всередині приміщень існує не тільки пряма траса розповсюдження між передавачем і приймачем, але також і траси відображених і дифрагованих променів. Відбивні властивості будівельних матеріалів залежать від поляризації, кута падіння хвилі і комплексної діелектричної проникності матеріалів,



що відображено у формулі відображення Френеля. Кути приходу багатопроменевих складових розподіляються залежно від ширини променя антени, структури будівлі і місць розташування передавача і приймача. Тому вид поляризації та ефективна діаграма спрямованості антени можуть істотно впливати на характеристики розповсюдження всередині приміщення.

Прийнято вважати, що для каналів прямої видимості (LoS) спрямовані антени зменшують середньоквадратичне значення розкиду затримки в порівнянні з всеспрямованими і що кругова поляризація (CP) також зменшує їх в порівнянні з лінійною поляризацією (LP). Отже, в даному випадку направлена антена з круговою поляризацією може служити ефективним засобом зменшення розкиду затримки.

Основний механізм залежності затримки від поляризації, може бути пов'язаний з тим фактом, що коли сигнал з круговою поляризацією падає на поверхню, що відбиває під кутом, меншим кута Брюстера, звичайний напрямок відбитого променя кругової поляризації змінюється на протилежний. Зміна напрямку променя з круговою поляризацією на зворотну при кожному відбитті означає, що приходять після однократного відображення багатопроменеві складові ортогонально поляризовані по відношенню до компоненти LoS; це дозволяє виключити значну частину перешкод, зумовлених багатопроміневістю. Дане явище не залежить від частоти, що було передбачено теоретично і підтверджено експериментами з розповсюдження, проведеними усередині приміщень в частотному діапазоні 1,3-60 ГГц. Дане твердження справедливе як для систем зв'язку усередині приміщення, так і для зовнішніх систем. Оскільки для всіх існуючих будівельних матеріалів кут Брюстера перевищує  $45^\circ$ , багатопроменеві за рахунок одноразового відбиття (тобто основне джерело багатопроменевих складових) ефективно пригнічується в більшості приміщень, незалежно від характеру інтер'єру та конструктивних матеріалів приміщення. Можливе виключення складають приміщення, такі як довгі коридори, в яких дуже великі кути падіння домінують над багатопроміневістю. Зміна середньоквадратичного значення розкиду затримки на лініях рухомого зв'язку також зменшується, коли використовуються антени з круговою поляризацією [1].

Оскільки багатопроменеві складові розповсюдження розподілені в залежності від кута приходу, ці складові за межами ширини променя антени піддаються просторовій фільтрації за рахунок використання спрямованої антени, так що розкид затримки може бути зменшений. Вимірювання параметрів розповсюдження всередині приміщення, а також імітація траєкторій променя на частоті 60 ГГц при використанні всеспрямованої передавальної антени і прийомних антен чотирьох різних типів (всенаправлена, з широким променем, стандартна рупорна і з вузьким променем), спрямованих у бік передавальної антени, показують, що придушення складових із затримкою ефективніше здійснюється за допомогою більш вузьких значень ширини променя.

### ***2.1.2. Перешкоди на трасі***

Якщо на прямій трасі маються перешкоди, залежність розкиду затримок від поляризації та спрямованості антени може виявитися складнішою, ніж для трас прямої видимості. Є нечисленні результати експериментів на трасах з перешкодами. Разом з тим, експериментальний результат, отриманий на частоті 2,4 ГГц [2], дозволяє припустити, що залежність розкиду затримок від поляризації та спрямованості антени для трас з перешкодами має більш складний характер, ніж для трас прямої видимості. Наприклад, поєднання всеспрямованої горизонтально поляризованої антени передавача і спрямованої антени приймача з круговою поляризацією дає найменше значення середньоквадратичного розкиду затримок і найменше максимальне значення надлишкової затримки на трасі з перешкодами.

### ***2.1.3. Орієнтація рухомого терміналу***

У середовищі прийому на портативні радіопристрої основними механізмами розповсюдження сигналу є його відбиття і розсіювання. Поляризація переданого сигналу в результаті розсіювання енергії часто перетворюється в ортогональне. У цих умовах виникнення зв'язку за рахунок крос-поляризації збільшує ймовірність того, що рівні прийнятих сигналів з портативних радіостанцій, орієнтованих випадковим чином, виявляться однаковими. Моніторинг електромагнітного поля за рахунок крос-

поляризації, проведений на частоті 816 МГц [2], показав високу стабільність такого зв'язку.

## 2.2. Вплив будівельних матеріалів, обладнання та меблів

Характеристики розповсюдження всередині приміщення залежать від відбиття від будівельних матеріалів і проникнення сигналу крізь них. Відбивні властивості і пропускну здатність матеріалів залежать від комплексної діелектричної проникності матеріалів. Природно, що в моделях прогнозування розповсюдження, що враховують специфіку місця, в якості основної вихідної інформації можуть знадобитися дані про значення комплексної діелектричної проникності будівельних матеріалів, а також про структуру будівлі.

Значення комплексної діелектричної проникності типових будівельних матеріалів, отримані експериментальним шляхом на частотах 1, 57.5, 78.5 і 95.9 ГГц, представлені в таблиці 2.1. Ці показники в значній мірі змінюються в залежності від виду матеріалу, але зате мало залежать від частоти в діапазоні 60-100 ГГц, за винятком настилу, показники по якому коливалися в межах 10%.

Значення для скла отримані з рівнянь (2.1) - (2.3). Емпірична формула комплексної діелектричної проникності  $\eta$  скла для діапазону частот від 0,9 ГГц до 100 ГГц визначається наступним чином [1]:

$$\eta = (n_{cr} - jn_{ci})^2, \quad (2.1)$$

$$\text{де: } n_{cr} = 2,60 ; n_{ci} = 10^{-1,773+0,153x-0,027x^2-0,011x^3+0,014x^4}$$

$$x = \log_{10} f, \quad 0,9 \text{ ГГц} < f < 100 \text{ ГГц}, \quad (2.2)$$

Характеристики відбиття і передачі можуть оцінюватися за допомогою коефіцієнтів відбиття і передачі, які визначаються як [1]:

$$R_N = \frac{E_N^r}{E_N^i}, \quad R_P = \frac{E_P^r}{E_P^i}, \quad T_N = \frac{E_N^t}{E_N^i}, \quad T_P = \frac{E_P^t}{E_P^i}, \quad (2.3)$$

де  $E$  - це комплексне значення амплітуди  $E$ -полів, а верхні індекси  $i$ ,  $r$  і  $t$  означають падаючу, відображену і передану складові  $E$ -полів, відповідно. Нижні індекси  $N$  і  $P$  означають складові  $E$ -поля, нормальні або паралельні площини відбиття, де площина відображення є площиною, в якій розташовані як падаючий, так і відбитий промені. Падаючі та відбиті  $E$ -поля визначаються на поверхні, що відбиває, в той час як передане  $E$ -поле визначається на протилежній поверхні. Опорні напрямки для  $E_P$ ,  $E_N$  і напрямок розповсюдження завжди утворюють локальну правосторонню ортогональну координатну систему в цьому порядку. Опорні напрямки  $E_N$  для падаючих відображених і переданих  $E$ -полів вважаються однаковими.

Таблиця. 2.1

Комплексна діелектрична проникність внутрішніх будівельних матеріалів

Матеріал	1 ГГц	57,5 ГГц	70 ГГц	78,5 ГГц	95,9 ГГц
Бетон	7-j0,85	6,5-j0,43	—	—	6,2-j0,34
Легкий бетон	2-j0,5	—	—	—	—
Підлоговий настил (синтетична смола)	—	3,91-j0,33	—	3,64-j0,37	3,16-j0,39
Штукатурна плита	—	2,25-j0,03	2,43-j0,04	2,37-j0,1	2,25-j0,06
Стельовий настил (мінеральна вата)	1,2-j0,01	1,59-j0,01	—	1,56-j0,02	1,56-j0,04
Скло	6,76-j0,09	6,76-j0,16	6,76-j0,17	6,76-j0,18	6,76-j0,19
Скловолокно	1,2-j0,1	—	—	—	—

Коефіцієнт відбиття для комплексної діелектричної проникності  $\eta$  визначається наступним чином:

$$R_N = \frac{\cos\theta - \sqrt{\eta - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\eta - \sin^2\theta}}, \quad (2.4)$$

якщо складова  $E$ -поля, перпендикулярна площині відбиття;

$$R_P = \frac{\cos\theta - \sqrt{(\eta - \sin^2\theta)/\eta^2}}{\cos\theta + \sqrt{(\eta - \sin^2\theta)/\eta^2}}, \quad (2.5)$$

якщо складова  $E$ -поля, паралельна площині відбиття.

У формулах (2.2)  $\theta$  - кут між поверхнею, що відбиває і падаючим на неї променем, як показано на рис. 2.1.

Для особливого випадку, коли падаюче  $E$ -поле має кругову поляризацію, зміни в амплітуді і фазі прийнятого сигналу з відбитого  $E$ -поля можуть бути представлені за допомогою коефіцієнта відбиття  $R_C$  для кругової поляризації, що визначається як:

$$R_C = \frac{R_N + R_P}{2}, \quad (2.6)$$

Вищевказані формули застосовні, коли втрати при проникненні в будівельний матеріал настільки великі, що ніяка помітна хвиля не відбивається назад на поверхню, що відбиває. Якщо це не так, необхідно враховувати вплив безлічі внутрішніх відображень в будівельному матеріалі.

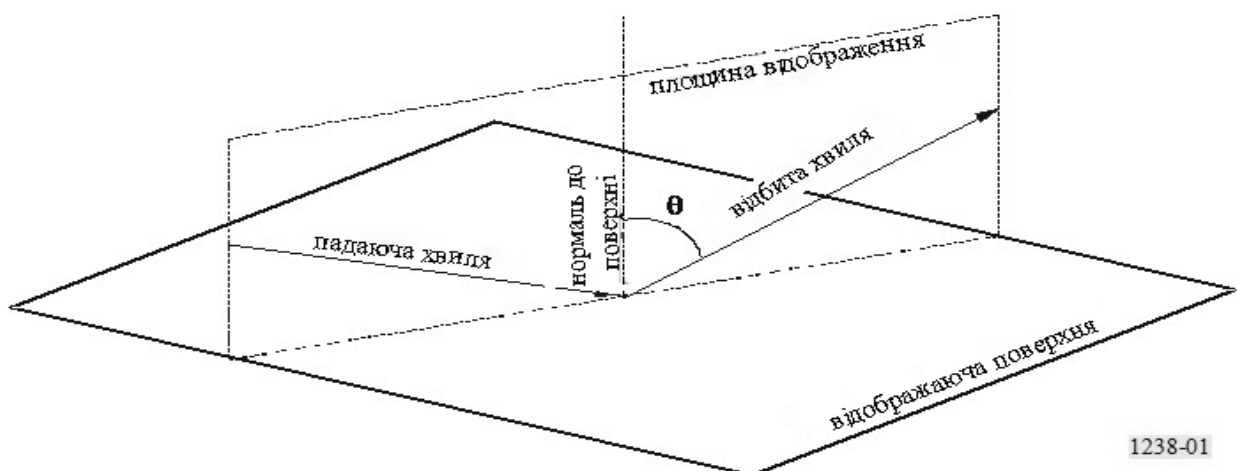


Рис. 2.1. Геометрія для розрахунку характеристик відбиття

Якщо будівельний матеріал складається з  $N$  діелектричних плит, а товщина і комплексна діелектрична проникність  $m$ -го шару ( $m = 1, 2, \dots, N$ ) задаються як  $d_m$  і  $\eta_m$ , відповідно, то коефіцієнти відбиття і передачі визначаються як:

$$R_N = \frac{B_0}{A_0}, \quad R_P = \frac{G_0}{F_0}, \quad T_N = \frac{1}{A_0}, \quad T_P = \frac{1}{F_0}$$

Тут  $A_0, B_0, F_0$  і  $G_0$  визначаються з рекурентних формул у такий спосіб:

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{\exp(\delta_m)}{2} [A_{m+1}(1 + Y_{m+1}) + B_{m+1}(1 - Y_{m+1})], \\ B_m &= \frac{\exp(-\delta_m)}{2} [A_{m+1}(1 - Y_{m+1}) + B_{m+1}(1 + Y_{m+1})], \\ F_m &= \frac{\exp(\delta_m)}{2} [F_{m+1}(1 + W_{m+1}) + G_{m+1}(1 - W_{m+1})], \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$G_m = \frac{\exp(-\delta_m)}{2} [F_{m+1}(1 - W_{m+1}) + G_{m+1}(1 + W_{m+1})], \quad (2.8)$$

$$A_{N+1} = 1, \quad B_{N+1} = 0, \quad F_{N+1} = 1, \quad G_{N+1} = 0, \quad (2.9)$$

$$W_{m+1} = \frac{\cos \theta_{m+1}}{\cos \theta_m} \sqrt{\frac{\eta_m}{\eta_{m+1}}}, \quad Y_{m+1} = \frac{\cos \theta_{m+1}}{\cos \theta_m} \sqrt{\frac{\eta_{m+1}}{\eta_m}}, \quad \eta_0 = \eta_{N+1} = 1, \quad (2.10)$$

$$\delta_m = jk_m d_m \cos \theta_m, \quad k_m = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\eta_m}, \quad k_0 = k_{N+1} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.11)$$

де:

$\lambda$  : довжина хвилі у вільному просторі;

$\theta_m$  : кут рефракції в  $m$ -м шарі;

$\theta_{N+1}$  : кут рефракції в повітрі праворуч від останньої межі площини.

Для особливого випадку, коли є лише один шар, формулу (2.7) можна спростити наступним чином:

для коефіцієнту відбиття

$$R = \frac{1 - \exp(-j2\delta)}{1 - R'^2 \exp(-j2\delta)} R', \quad (2.12 \text{ а})$$

для коефіцієнту передачі

$$T = \frac{(1-R'^2) \exp(-j\delta)}{1-R'^2 \exp(-j2\delta)}, \quad (2.12 \text{ б})$$

де

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\eta - \sin^2 \theta}, \quad (2.13)$$

а  $d$  – це товщина будівельного матеріалу. У рівняннях (2.12 а) и (2.12 б)  $R'$  задається у вигляді  $R_N$  чи  $R_P$ , в залежності від поляризації падаючого  $E$ -поля.

$R_N$  і  $R_P$  можуть використовуватися в якості коефіцієнтів відбиття  $\Gamma_{ni}$ , тоді як  $T_N$  і  $T_P$  можуть використовуватися в якості коефіцієнтів проникнення  $P_{ni}$ , якщо всі площини відбиття, певні вздовж траси променя, ідентичні, оскільки в разі двухрозової детермінованої моделі  $RC$  може використовуватися як  $\Gamma_{ni}$  тільки для першого відбиття на трасі, оскільки хвиля з круговою поляризацією в основному перетвориться після відображення в еліптично поляризовану хвилю. У загальному випадку падаюче  $E$ -поле розщеплюється на складові, які нормальні або паралельні площини відбиття, а  $R_N$  і  $T_N$  або  $R_P$  і  $T_P$  застосовуються до кожної відповідної складової для визначення відбитого і переданого  $E$ -поля.

У міліметрових діапазонах хвиль обробка поверхні, як наприклад, фарбування, повинна розглядатися як один з діелектричних шарів.

Дзеркальне відображення від різних матеріалів, з яких зроблена підлога, таких як дошка і бетонні плити, в міліметровому діапазоні істотно зменшується, якщо підлога має килимове покриття з грубою поверхнею. Аналогічного зменшення можна домогтися, якщо закрити вікна шторами. Тому можна очікувати, що конкретний вплив будівельних матеріалів буде зростати при збільшенні частоти [2].

Крім структури самої будівлі, предмети обстановки також сильно впливають на характеристики розповсюдження всередині приміщення. Ці предмети можна розглядати як перешкоди, а їх вплив враховано для уточнення моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень (розділ 3).

### **2.3. Аналіз можливих підходів до моделювання розповсюдження електромагнітних випромінювань в закритих приміщеннях**

Характерною особливістю всіх аналізованих технічних засобів є те, що вони розташовуються всередині приміщень, обмежених поверхнями (стінами приміщення), що володіють у найзагальнішому випадку різними електрофізичними параметрами. Наявність стін, безумовно, робить істотний вплив на структуру і рівні електромагнітного поля в усіх частотних діапазонах. Науково-прикладне завдання підвищення ефективності використання пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки (МЕО) в приміщенні не може вважатися закінченим, якщо в результаті його вирішення немає можливості обліку стін з різними електрофізичними параметрами.

У першому наближенні для аналізу поля джерел, розташованих в обмеженому обсязі, можна застосувати підхід, заснований на підсумовуванні первинного поля і вторинних полів розсіяння, утворених струмами на нескінченних напівпровідних поверхнях. При цьому вторинне поле можна визначити або методом дзеркального зображення [3], або шляхом суворого рішення задачі Зоммерфельда [4]. Використання для вирішення поставленого завдання методу дзеркального зображення представляється малоперспективним з огляду на те, що наявність хоча б двох поверхонь, що утворюють кут відмінний від  $90^\circ$ , призведе до необхідності введення значної кількості додаткових дзеркальних відображень [4]. В результаті шукане поле розсіювання буде виражатися у вигляді нескінченного ряду, загальний член якого визначається досить громіздким виразом, що утрудняє апостеріорну оцінку збіжності, яка, в свою чергу, в значній мірі визначиться електрофізичними параметрами стін. Ситуацію ускладнює неминуче зростання числа додаткових дзеркальних відображень при моделюванні приміщень, стіни яких утворюють кути, відмінні від  $90^\circ$ .

Метод Зоммерфельда (Зоммерфельда-Нортон), стосовно до нашої проблеми так само видається не дуже зручним, тому що при цьому сумарне поле аналітично



представлено у вигляді інтегралів, чисельне рішення яких у разі наявності декількох стін, очевидно, виявиться досить складним.

Стосовно до проблеми, що розглядається в дисертаційній роботі, найбільш перспективним представляється підхід, заснований на суворому вирішенні задачі розсіяння електромагнітного поля на подолання суміжних поверхонь експериментально-розрахунковими методами. Результати досліджень відображають структурні закономірності розподілу електромагнітного поля всередині приміщень і можуть бути апроксимованими відповідними алгоритмами та слугують вихідними даними для уточнення існуючих моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень (Рис. 2.2).

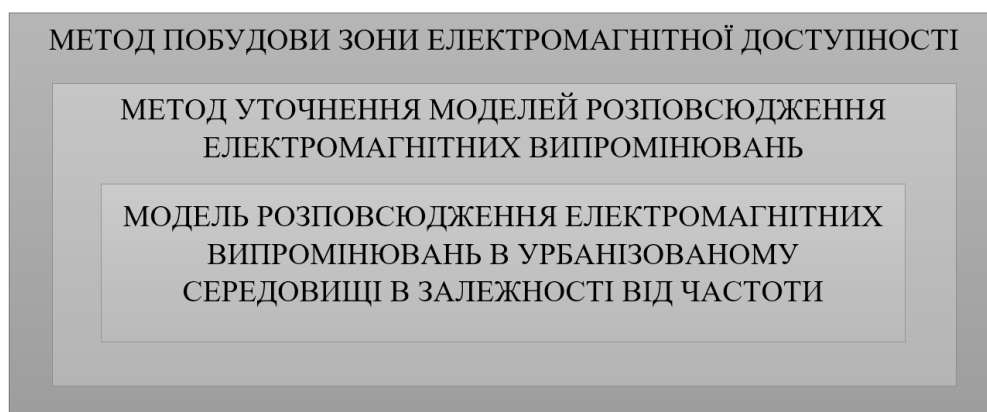


Рис. 2.2. Основні компоненти науково-прикладного завдання в рамках другого розділу дисертаційної роботи

#### **2.4. Вихідні дані для уточнення моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань**

Після проведення детального аналізу моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань в першому розділі дисертаційної роботи було визначено, що модель COST 231 Multi-Wall-Model є найбільш універсальною і може бути використана для розкриття мети роботи та поставлених завдань.

Стандартна формула для розрахунку середніх втрат на трасі у міському середовищі відповідно до моделі Хата має вигляд [5]:

$$L_{\text{місто}} = 69,55 + 26,16 \lg(f_c) - 13,82 \log(h_{\text{БС}}) - a(h_{\text{АС}}) - [44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}})] \lg(d), \quad (2.14)$$

де  $d$  — відстань між передавачем і приймачем;  $a(h_{\text{АС}})$  - поправочний коефіцієнт для висоти антени мобільної станції;  $f_c$  - частота сигналу. Внесено певні зміни в модель розповсюдження сигналів у приміських і сільських районах:

$$\begin{aligned} L_{\text{приміський}} &= L_{\text{місто}} - 2[\log(f_c/28)]^2 - 5,4 \\ L_{\text{село}} &= L_{\text{місто}} - 4,78[\lg(f_c)]^2 + 18,33[\lg(f_c)] - 40,94 \end{aligned}, \quad (2.15)$$

Модель Хата була розширена до 2 ГГц у такий спосіб [5]:

$$L_{\text{місто}} = 46,3 + 33,9 \lg(f_c) - 13,82 \lg(h_{\text{БС}}) - a(h_{\text{АС}}) - [44,9 - 6,55 \lg(h_{\text{БС}})] \lg(d) - C_M, \quad (2.16)$$

де  $a(h_{\text{АС}})$  - поправочний коефіцієнт для висоти антени мобільної станції;  $C_M = 0$  дБ для міст середнього розміру, пригородів і 3 дБ для великих міст. Ця модель називається модифікованою моделлю Хата та на її основі розроблена COST 231 MWM

Оскільки характер розповсюдження електромагнітних випромінювань неоднорідний і може виходити за межі приміщення, для підвищення ефективності використання приладів МЕО за рахунок уточнення моделі розповсюдження ЕМВ слід створити наступні сценарії:

- *зовнішньо – зовнішній;*
- *внутрішньо – зовнішній;*
- *внутрішньо – внутрішній.*

Опишемо дані сценарії розповсюдження електромагнітних хвиль за допомогою моделі COST 231 MWM.

**Зовнішньо-зовнішній сценарій (приймач і передавач знаходяться поза будівлею):**

$$L(\text{зовнішньо – зовнішнє}) = L_{\text{hata}}(\text{зовнішньо – зовнішнє}), \quad (2.17)$$

Розподілення дійсне,  $\delta(\text{зовнішньо} - \text{зовнішне}) = \delta$

Розрахунок втрат  $L$  наведено у таблиці 2.2, де використані позначення:  $f$  - частота, МГц;  $H_m = \min(h_b, h_m)$ , м;  $H_b = \max(h_b, h_m)$ , м;  $d$  - відстань, км.

Таблиця 2.2

Розрахункові співвідношення, використовувані у моделі COST 231 MWM [6]

Умови розповсюдження	Формули для розрахунку затухання, дБ	Діапазон частот, МГц	Відстань, км
Близька зона	$L_1 = 32.4 + 20 \lg f + 10 \lg \left[ d^2 + \frac{(H_b - H_m)^2}{10^6} \right]$	Від 30 до 3000	$d \leq 0.04$
Проміжна зона	$L = L_1(0.04) + \frac{\lg(d) - \lg(0.04)}{\lg(0.1) - \lg(0.04)} [L_1(0.1) - L_1(0.04)]$		$0.04 < d < 0.1$
Місто	Допоміжні величини $a(H_m) = (1.1 \lg f - 0.7) \min\{10; H_m\} - (1.56 \lg f - 0.8) + \max\{0; 20 \lg \left( \frac{H_m}{10} \right)\}$ $b(H_b) = \min \left\{ 0; 20 \lg \left( \frac{H_b}{30} \right) \right\}$ $\alpha = \begin{cases} 1, & d \leq 20 \text{ км} \\ 1 + (0.14 + 1.87 * 10^4 f + 1.07 * 10^{-3} H_b) * \left( \lg \left( \frac{d}{20} \right) \right)^{0.8} \end{cases}$		Від 30 до 150
	$L = 69.6 + 26.2 \lg(150) - 20 \lg \left( \frac{150}{f} \right) - 13.8 \lg(\max\{30; H_b\}) + (44.9 - 6.55 \lg(\max\{30; H_b\}) * (\lg(d))^\alpha - a(H_m) - b(H_b))$		
	$L = 69.6 + 26.2 \lg f - 13.82 \lg(\max\{30; H_b\}) + (44.9 - 6.55 \lg(\max\{30; H_b\}) * \lg(d)^\alpha - a(H_m) - b(H_b))$		
	$L = 46.3 + 33.9 \lg f - 13.82 \lg(\max\{30; H_b\}) + (44.9 - 6.55 \lg(\max\{30; H_b\}) * \lg(d)^\alpha - a(H_m) - b(H_b))$	Від 150 до 1500	$d \geq 0.1$
	$L = 46.3 + 33.9 \lg(2000) + 10 \lg(2000) - 13.82 \lg(\max\{30; H_b\}) + (44.9 - 6.55 \lg(\max\{30; H_b\}) * \lg(d)^\alpha - a(H_m) - b(H_b))$	Від 2000 до 3000	
Приміська зона	$L = L_{\text{місто}} - 2 \left( \frac{\lg(\min\{\max\{150; f\}; 2000\})}{28} \right)^2 - 5.4$	Відповідно до діапазона обчислення для $L_{\text{місто}}$	$d \geq 0.1$
Відкрита місцевість	$L = L_{\text{місто}} - 4.78 \left( \frac{\lg(\min\{\max\{150; f\}; 2000\})}{28} \right)^2 + 18.33 \lg(\min\{\max\{150; f\}; 2000\}) - 40.94$		

Як видно з таблиці 2.2 модель доповнена оцінкою втрат в зоні, близькій до радіопередавача, межа якої визначена відстанню менше 40 м, і оцінкою втрат в проміжній зоні, яка простягається від 40 м до 100 м. У близькій зоні втрати

розповсюдження оцінюються значенням втрат у вільному просторі. У проміжній зоні - лінійною інтерполяцією втрат у вільному просторі між точками 40 м і 100 м [6, 7].

Так як втрати  $L$  на трасі розповсюдження є випадковою величиною, яка вважається розподіленою по нормальному закону (якщо  $L$  виражено в дБ), то в таблиці 2.3 представлені очікувані значення середньоквадратичного відхилення втрат розповсюдження, які залежать тільки від відстані і положення антени базової станції і не залежать від частоти.

**Внутрішньо-зовнішній або зовнішньо-внутрішній сценарій (приймач знаходиться у приміщенні, а передавач зовні або навпаки):**

$$L(\text{внутрішньо} - \text{зовнішне}) = L_{hata}(\text{зовнішньо} - \text{зовнішне}) + L_{wi}, \quad (2.18)$$

де  $L_{wi}$  – втрати в стінах.

Розподілення:  $\delta_{hata}^2(\text{внутрішньо} - \text{внутрішне}) = \sqrt{\delta_{hata}^2 + \delta_{add}^2}$ ,

де  $\delta_{add}$  - додаткова стандартна девіація сигналу.

**Внутрішньо-внутрішній сценарій (приймач і передавач знаходяться в одному або різних приміщеннях однієї будівлі):**

$$L(\text{внутрішньо} - \text{внутрішне}) = L_{FS} + L_c + \sum_{i=1}^l k_{wi} L_{wi} + k_f \left(\frac{n_f+2}{n_f+1}\right)^b L_f, \quad (2.19)$$

де  $L_{FS}$  - втрати у вільному просторі між передавачем і приймачем, дБ;

$L_c$  - постійні втрати, дБ;

$L_{wi}$  - втрати на проникнення стін  $i$ -го типу, дБ;

$n_{wi}$  - число пройдених стін  $i$ -го типу;

$l$  - число типів стін;

$L_f$  – втрати між суміжними поверхами, дБ;

$n_f$  - кількість поверхів;

$b$  – емпіричний параметр.

Значення втрат сигналу у стінах та підлозі [8]

Категорія втрат	Опис перешкоди	Значення втрат
$L_f$	Звичайна структура поверхів (офіси): - пустотіла цегла; - залізобетон; - товщина зразку 30 см;	18,3 дБ
$L_{\omega 1}$	Легкі внутрішні стіни: - дошка із штукатуркою; - стіни з великою кількістю отворів (наприклад вікон).	3,4 дБ
$L_{\omega 2}$	Внутрішні стіни: - бетон, цегла; - мінімальна кількість отворів;	6,9 дБ

Таким чином, враховуючи вищенаведений матеріал у таблиці 2.3, можемо побудувати модель втрат розповсюдження для офісного приміщення.

Досліджувана модель розподілення знаходиться усередині приміщення, тобто приймач і передавач знаходяться в одному приміщенні.

Отже, маємо:

$$L(\text{внутрішньо} - \text{внутрішнє}) = L_{FS} + L_c + \sum_{i=1}^l k_{wi} L_{wi} + k_f \left(\frac{n_f+2}{n_f+1}\right)^b L_f, \quad (2.20)$$

Відомо, що у вільному просторі потужність електромагнітних випромінювань зменшується як відстань у квадраті між передавачем і приймачем або  $1/d^2$ . У лінійній формі, загасання у вільному просторі описується формулою:

$$L_{fc} = \frac{\lambda^2}{4\pi d^2}, \quad (2.21)$$

Рівняння може бути також записано у логарифмічній формі:

$$L_{fc} = -32,4 - 20 \log(d) - 20 \lg(f) , \quad (2.22)$$

Де  $L_{fc}$  – втрати у вільному просторі;

$d$  – відстань між передавачем і приймачем;

$f$  – частота сигналу, в МГц,

Для більшості випадків з урахуванням усіх параметрів  $L(d, L_{fc}, L_c, L_{oi}, n)$  можемо усереднити, що значення  $L_c = 35 - 37$  дБ.  $L_f = 18.3$  дБ для більшості офісних приміщень,  $L_{oi} = 3.4$  дБ для легких внутрішніх стін (вікна, дошка, гіпсокартон) і  $L_{oi} = 6.9$  дБ (для бетону, цегли).

З урахуванням усіх факторів можемо зазначити, що модель втрат розповсюдження ЕМВ для приміщення може бути представлена у наступному вигляді:

$$L(d) = 37 + 20 \lg d + 10 \lg f + 18.3 \cdot n^{\left(\frac{n+2}{n+1} - 0.46\right)} , \quad (2.23)$$

Дана модель (3.10) втрат розповсюдження у межах будівлі дає змогу визначити втрати сигналу на шляху розповсюдження без використання поправочних коефіцієнтів залежно від конкретної траси, що значно спрощує розрахунок цього параметру.

Як було зазначено у другому розділі дисертаційної роботи, в числі можливих каналів витоку інформації, що підлягають захисту, окреме місце займає канал витоку за рахунок побічних електромагнітних випромінювань. Це визначається тим фактом, що практично кожен електротехнічний пристрій в процесі роботи випромінює в простір ЕМВ, так або інакше пов'язані з його функціонуванням. Джерелами випромінювання сигналу можуть бути різні елементи виробів, що здійснюють обробку інформації.

Приведемо у вигляді таблиці можливі варіанти джерел ПЕМВ комп'ютера.

## Джерела ПЕМВ комп'ютера

Елемент	Метод передачі (обробки) інформації	Джерело випромінювання	Частота сигналу, МГц
Системна плата	Паралельно	Шини	10...1000
CD/DVD-ROM	Паралельно, Послідовно	Голівка зчитування/ запису	0.3...800
Відеомонітор	Відеосигнал	Відеопідсилювач; матриця; кабель	0.1...1000
Клавіатура	Послідовно	кабель	1...20
Принтер	Послідовно	Друкуюча голівка; кабель; внутрішні схеми	0.2...30

Згідно з оцінками даними по каналу побічних електромагнітних випромінювань і наведень може бути перехоплено не більше 2% відсотків даних, що обробляються на персональних комп'ютерах і інших технічних засобах передачі інформації. На перший погляд може здатися, що цей канал менш небезпечний у порівнянні, наприклад, з акустичним, по якому із приміщення може бути перехоплена мовна інформація в повному обсязі. Але необхідно пам'ятати, що на сьогоднішній день найбільш важлива інформація, що містить державну таємницю або технологічні секрети, обробляється на персональних комп'ютерах. Специфіка каналу ПЕМВН така, що ті самі два відсотки інформації, уразливі для технічних засобів перехоплення - це дані, що вводяться із клавіатури комп'ютера або ті, що відображаються на моніторі.

Комп'ютери породжують електромагнітні випромінювання, які не тільки створюють перешкоди для радіоприйому, але також створюють технічні канали витоку інформації. З'єднувальні кабелі (лінії зв'язку), що володіють індуктивністю і ємністю, утворюють резонансні контури, що випромінюють високочастотні електромагнітні хвилі, модульованими сигналами даних.

Для ПК високочастотні випромінювання перебувають у діапазоні до 1 ГГц із максимумом у смузі 50 ... 300 МГц. Широкий спектр обумовлений наявністю як основної, так і вищих гармонік послідовностей коротких прямокутних інформаційних

імпульсів. До появи додаткових складових у побічному електромагнітному випромінюванні приводить також застосування в обчислювальних засобах високочастотної комутації.

Моніторинг електромагнітної обстановки в даному випадку значно ускладнюється тим, що діаграму спрямованості електромагнітних випромінювань ПК визначити неможливо, тому що розташування його складових частин має багато комбінацій в межах одного приміщення. ПК має лінійну поляризацію, що визначається розташуванням сполучних кабелів які є основними джерелами випромінювань у ПК із металевим кожухом на системному блоці.

Рівні побічних електромагнітних випромінювань регламентовані за умовами електромагнітної сумісності цілим рядом закордонних і вітчизняних стандартів. Так, наприклад, відповідно до публікації N22 CISPR [9] (спеціальний міжнародний комітет із радіоперешкод), для діапазону 230... 1000 МГц рівень напруженості електромагнітного поля, випромінюваного устаткуванням, на відстані 10 м не повинен перевищувати 37 дБ. Однак випромінювання такого рівня можуть бути перехоплені для виділення семантичної інформації на значних відстанях.

Отже, відповідність ЕМВ нормам на електромагнітну сумісність не забезпечує збереження конфіденційності оброблюваної в них інформації, а їх моніторинг приладами МЕО досить ускладнений.

У п. 2.4 встановлено, не всі складові спектра ПЕМВН персональних комп'ютерів є небезпечними з погляду витоку інформації.

Спектр ПЕМВН сучасного електронного устаткування містить гармоніки в діапазоні частот до декількох ГГц. Умовно весь спектр випромінювань можна розбити на потенційно інформативні й неінформативні випромінювання.

Складові спектра ПЕМВН, що породжуються протіканням струмів у ланцюгах, по яких передаються утримуючі конфіденційну інформацію сигнали, називають потенційно інформативними ПЕМВН.

Для ПК потенційно інформативними ПЕМВН є випромінювання, сформовані наступними ланцюгами:



- ланцюгом передачі сигналів від контролера клавіатури до порту уведення-виводу на материнській платі; - ланцюгами передачі відеосигналу від відеоадаптера до матриці монітора;
- ланцюгами формування шини даних системної шини комп'ютера;
- ланцюгами формування шини даних усередині мікропроцесора.

У більшості цифрових пристроїв існують ланцюги, що виконують допоміжні функції, що містять конфіденційну інформацію. Випромінювання в таких ланцюгах є безпечними з погляду витоку інформації. Для таких випромінювань підходить термін «неінформативні ПЕМВН». Неінформативні випромінювання можуть зіграти позитивну роль, тому що можуть служити перешкодою для прийому інформативних ПЕМВН при збігу діапазону частот.

До безпечних інформативних випромінювань ПК можна віднести випромінювання ланцюгів формування шини даних системної шини й внутрішню шину даних мікропроцесора, а також випромінювання інших ланцюгів передачі інформації в багаторазрядному паралельному коді [10, 11].

Для підвищення ефективності використання приладів МЕО було проведено дослідження електромагнітного поля на основі практичного експерименту. Як джерело випромінювання досліджувався комп'ютер типу IBM PC. Він розташовувався на другому поверсі будівлі, план якої приведений на рис.2.3.

Будівля типової конструкції має у своєму складі два корпуси, сполучених переходом. Досліджуваний об'єкт розташовувався в першому корпусі. Корпус триповерховий, блоково-панельний, висота кожного поверху з урахуванням міжповерхових перекриттів - 4 м. У приміщеннях будівлі розташовані письмові столи, а також контрольньо-вимірвальна апаратура. У якості інформації, яка оброблялась на комп'ютері, використовувалася тестова програма (Soft Tempest), в ході роботи якої були задіяні в циклічному режимі системний блок і монітор. Комп'ютер розташовувався робочому столі на відстані 1 м від вікна. На рисунку 2.3 місце розташування досліджуваного джерела випромінювання позначено літерою «Д».

Було проведено вимірювання напруженості електромагнітного поля [12, 13] на різних відстанях від джерела випромінювання (точки Т<sub>1</sub>-Т<sub>4</sub> на рис. 2.3) та на різних частотах, що позначені літерами К<sub>1</sub>-К<sub>12</sub> відповідно.

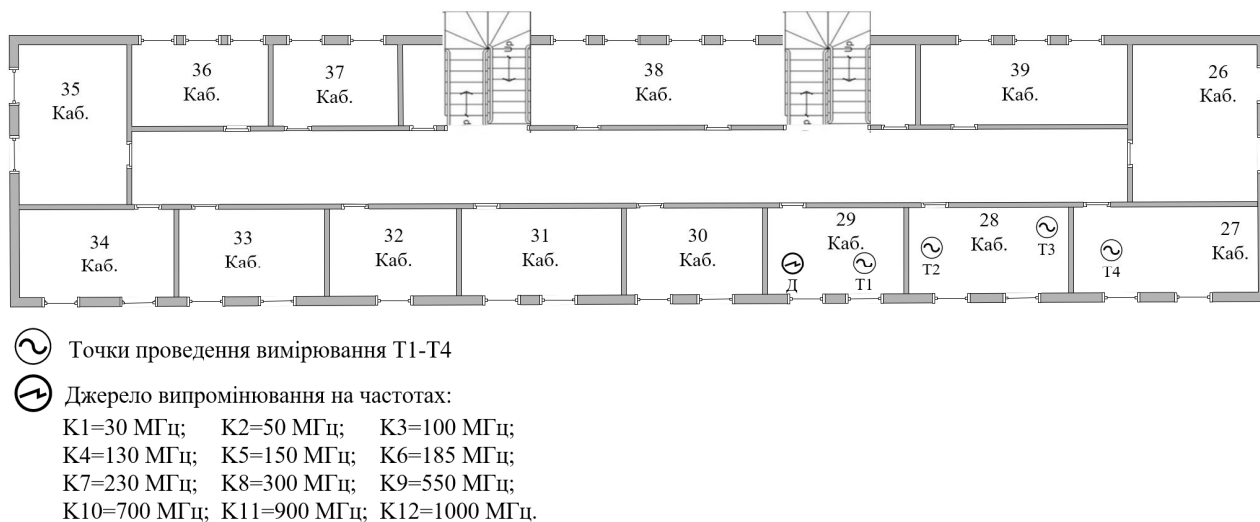


Рис. 2.3. План будівлі де проводились вимірювання (другий поверх)

Напруженість електромагнітного поля, створюваного досліджуваним джерелом, фіксувалася за допомогою набору відкаліброваних антен підключених до входу вимірювального приймача. У якості вимірювального приймача використовувалось обладнання Rohde & Schwarz, опис якого наведено в четвертому розділі дисертаційної роботи.

У результаті вимірювань було отримано експериментальне значення коефіцієнту затухання поля у різних напрямках.

Коефіцієнт затухання електромагнітного поля розраховувався за формулою:

$$K = 20 \cdot \lg(E_d / E_0), \quad (2.24)$$

де  $K$  – коефіцієнт затухання електромагнітного поля, що створюється досліджуваним джерелом випромінювання;

$E_0$  – напруженість електромагнітного поля, виміряна на відстані 0,5 м від джерела;

$E_d$  – напруженість електромагнітного поля, виміряна на відстані  $d$  від джерела випромінювання.

За результатами дослідження було побудовано графічні залежності коефіцієнту затухання поля від відстані [14].

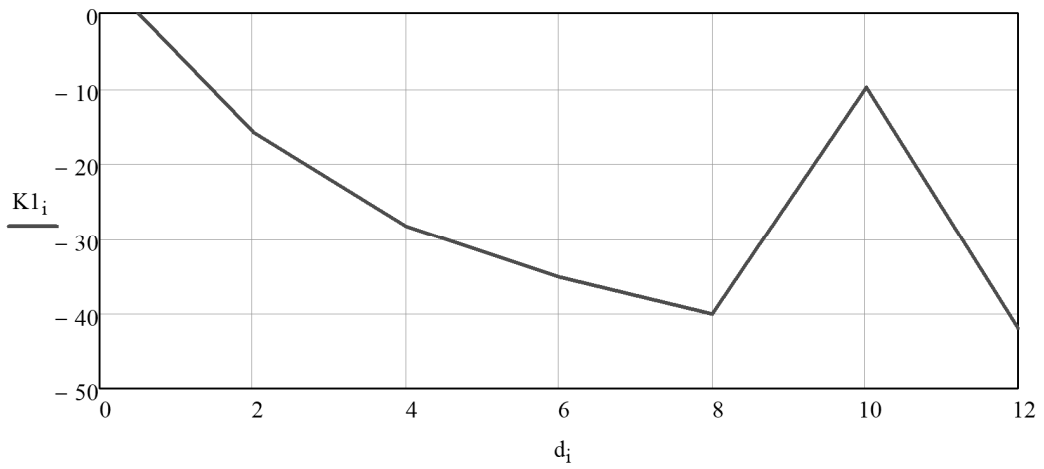


Рис. 2.4. Залежність коефіцієнта ПЕМВН від відстані на частоті  $K_1$

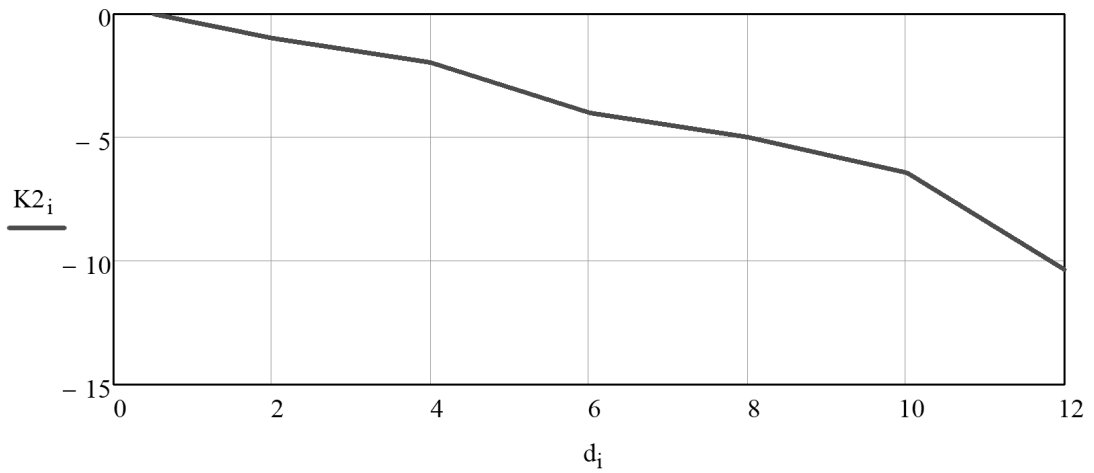


Рис. 2.5. Залежність коефіцієнта ПЕМВН від відстані на частоті  $K_2$

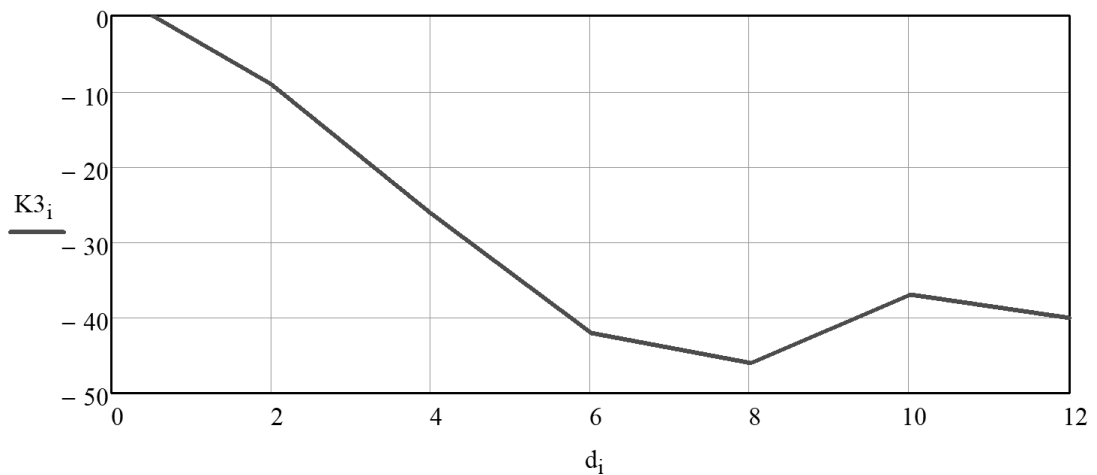


Рис. 2.6. Залежність коефіцієнта затухання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_3$

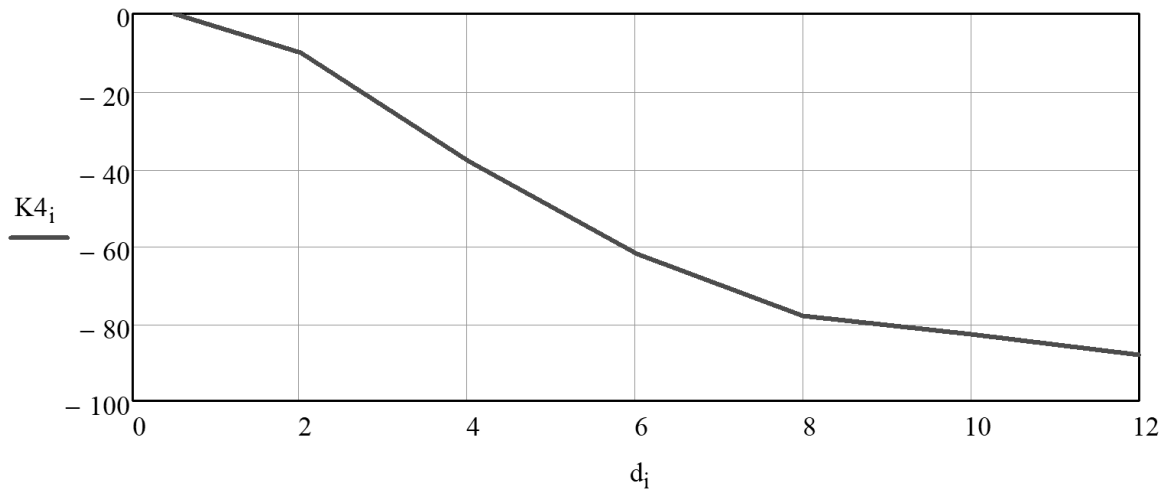


Рис. 2.7. Залежність коефіцієнта затухання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_4$

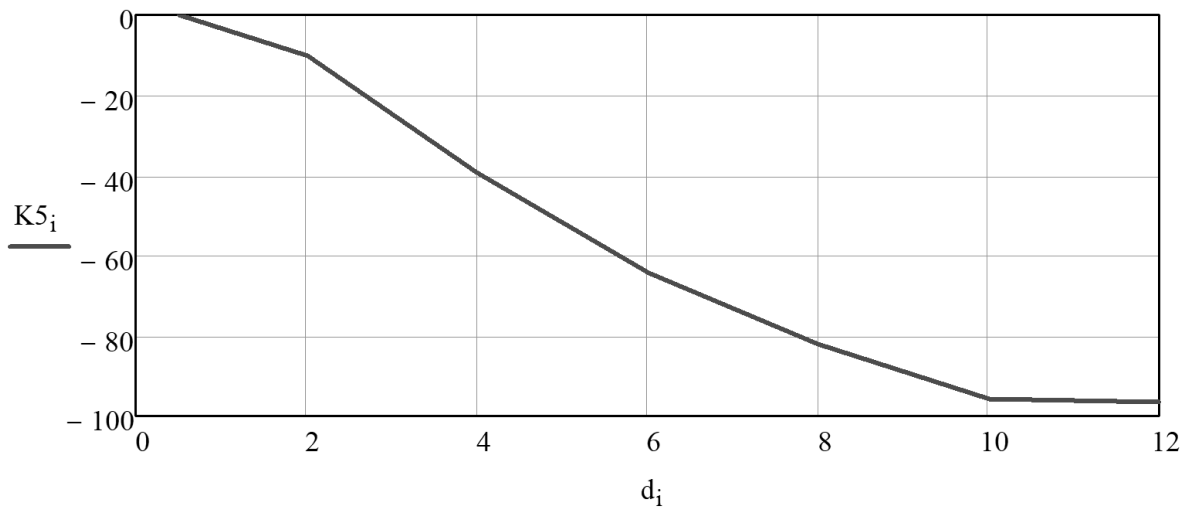


Рис. 2.8. Залежність коефіцієнта затухання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_5$

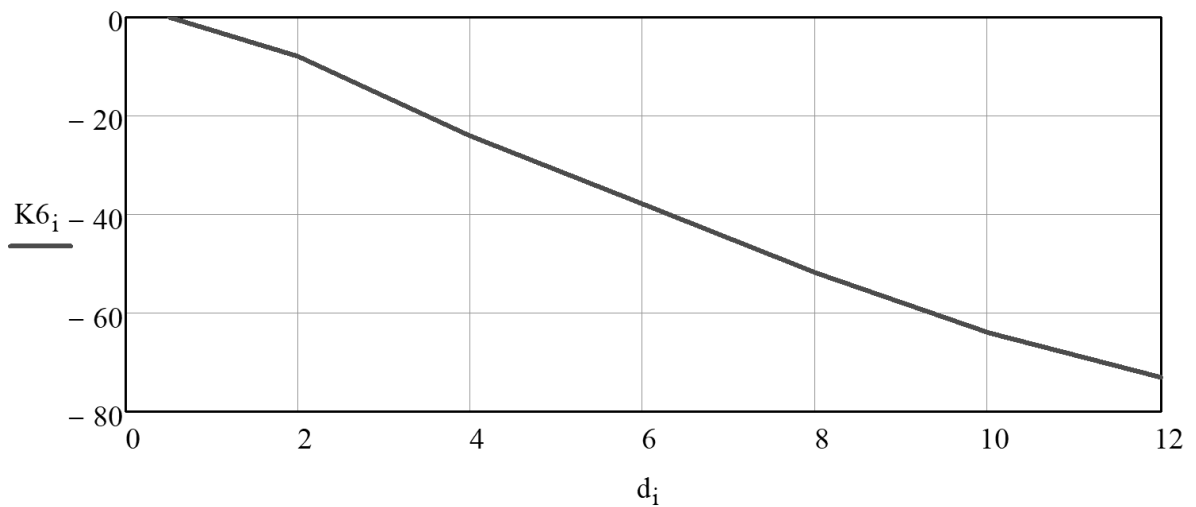


Рис. 2.9. Залежність коефіцієнта затухання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_6$

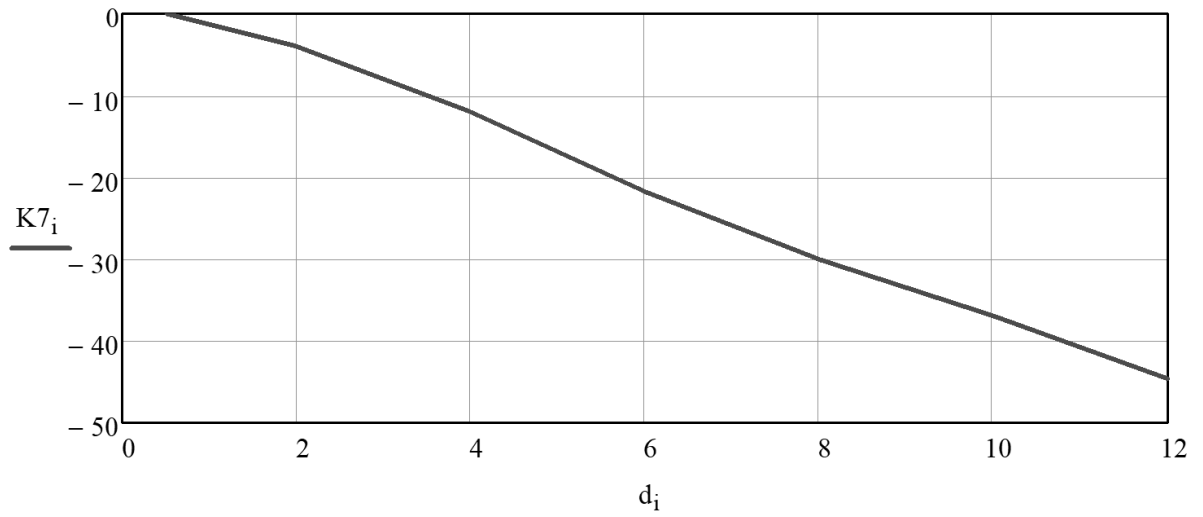


Рис. 2.10. Залежність коефіцієнта згасання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_7$

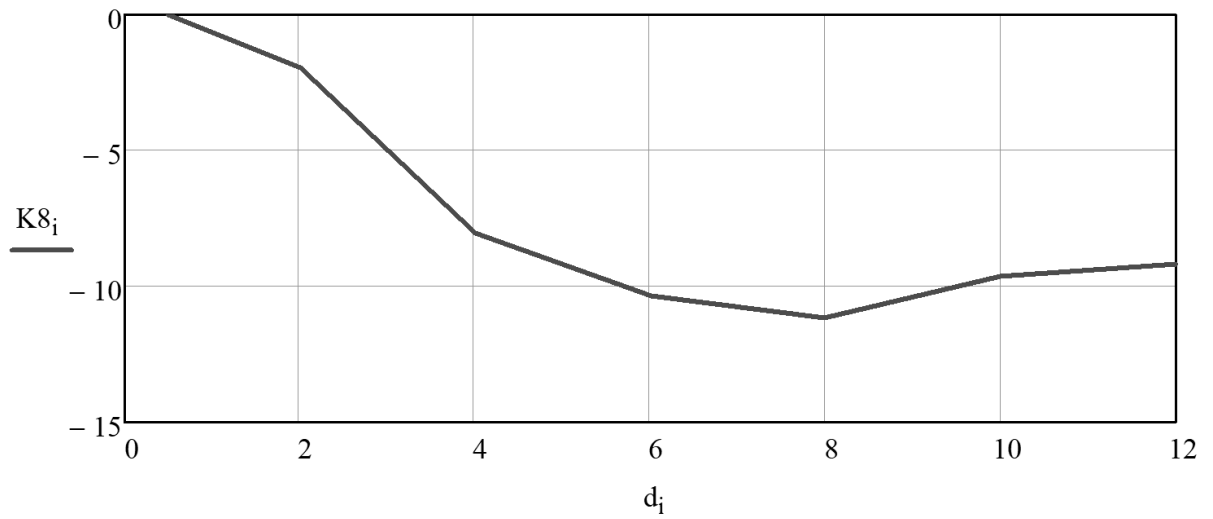


Рис. 2.11. Залежність коефіцієнта згасання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_8$

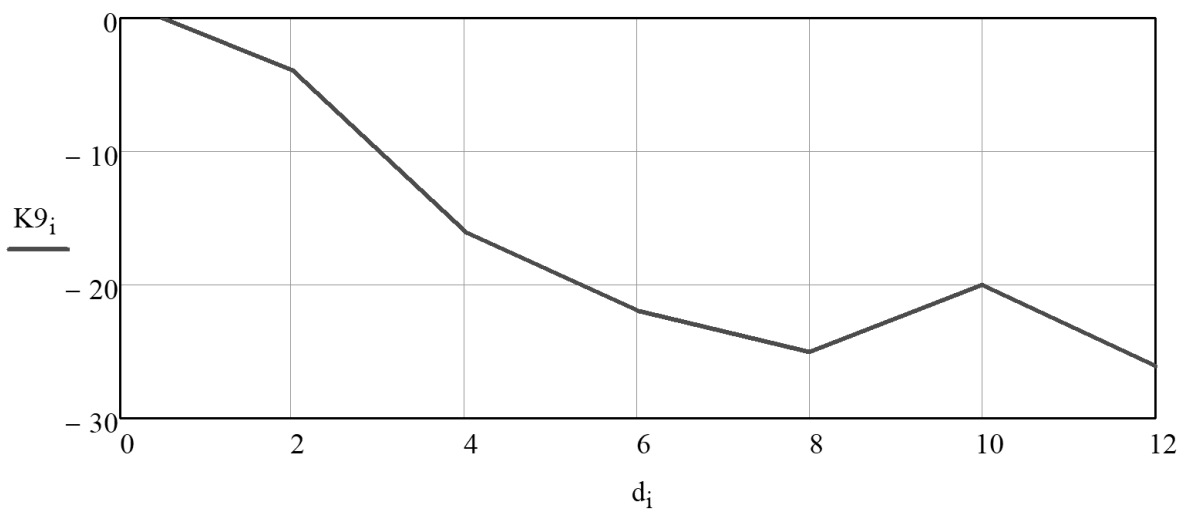


Рис. 2.12. Залежність коефіцієнта згасання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_9$

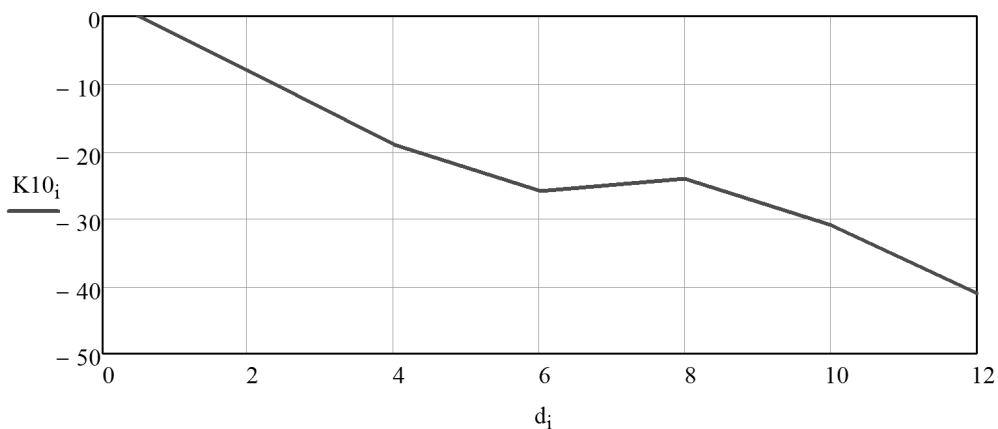


Рис. 2.13. Залежність коефіцієнта затухання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_{10}$

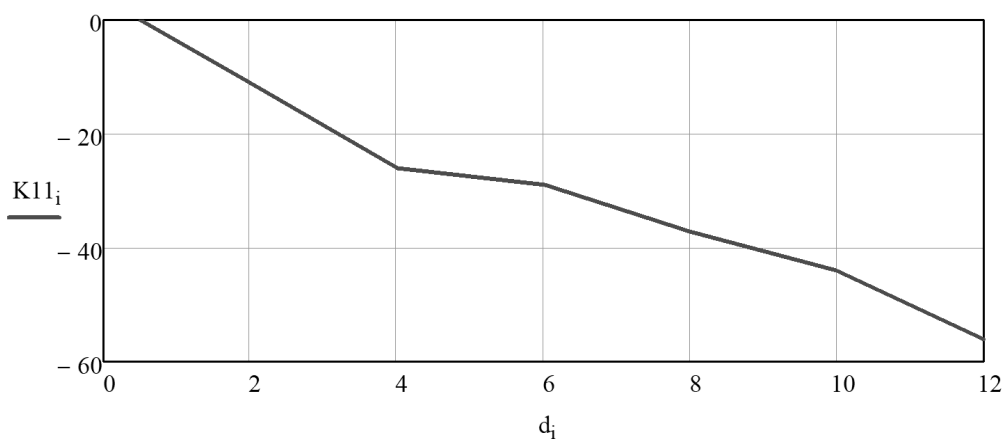


Рис. 2.14. Залежність коефіцієнта затухання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_{11}$

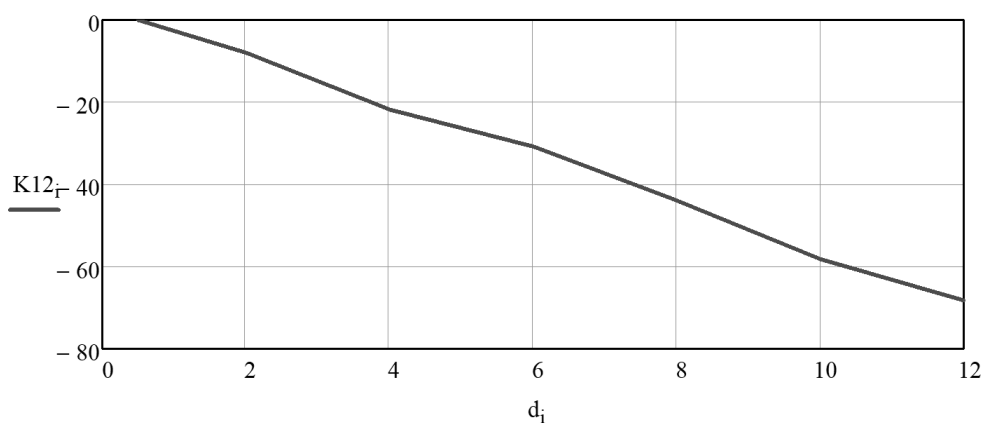


Рис. 3.15. Залежність коефіцієнта затухання ПЕМВН від відстані на частоті  $K_{12}$

Приведемо узагальнюючий рисунок на якому зобразимо всі залежності коефіцієнта затухання поля ПЕМВН від відстані на різних частотах [14].

На основі приведених вимірів можна зробити висновок, що закон згасання електромагнітного поля в просторі залежить від ряду зовнішніх чинників. Це ми

можемо побачити на графіках у випадках збільшення коефіцієнта затухання поля ПЕМВН зі збільшенням частоти. Наявність в просторі, що оточує джерело випромінювання, сторонніх тіл обумовлює прояв таких явищ, як: екранування, перевипромінювання, дифракція, що призводить до несподіваних сплесків електромагнітного поля, які можемо побачити на попередніх графіках.

Після аналізу отриманих даних було встановлено, що закономірності розподілу поля всередині приміщень залежить від частоти випромінювання. Тому було вирішено провести дослідження залежності коефіцієнта затухання електромагнітного поля від частоти. Подальші розрахунки були проведені за вимірами зробленими у точці  $T_2$  (8метрів від джерела) [14].

Приведемо результати експериментальних досліджень по визначенню значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля від частоти у вигляді таблиці 2.5.

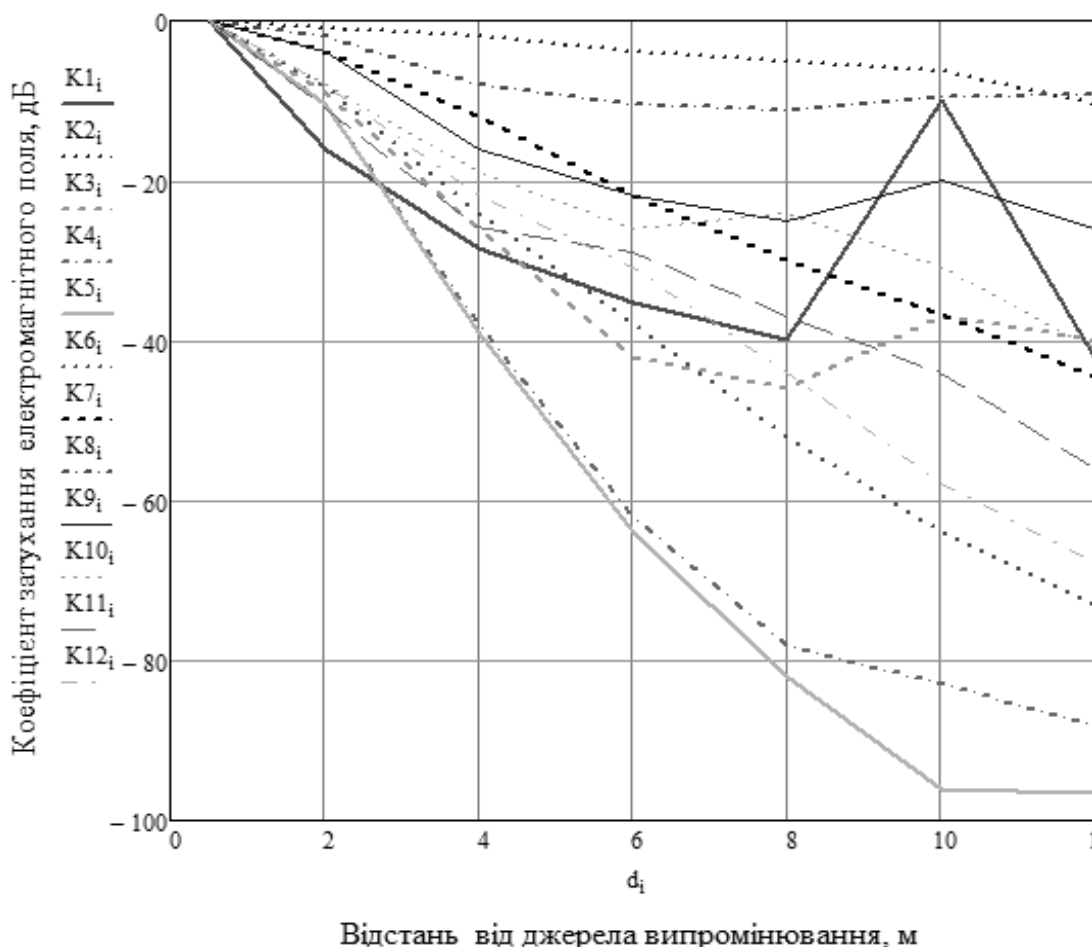


Рис. 2.16. Залежності коефіцієнта затухання поля ПЕМВ від відстані на частотах від  $K1$  по  $K12$

Таблиця 2.5

Значення коефіцієнта згасання електромагнітного поля у точці  $T_2$

Частота випромінювання джерела, МГц	Значення коефіцієнта згасання електромагнітного поля у точці $T_2$ , дБ
30	-40
50	-5
100	-46
130	-78
150	-82
185	-52
230	-30
300	-11.2
500	-25
700	-24
900	-37
1000	-44

Подальша обробка результатів проводилася за допомогою апроксимації та інтерполяції. Інтерполяція використовувалася як спосіб, за допомогою якого за таблицею, що містить деякі числові дані, можна знайти проміжні результати, яких нема безпосередньо в таблиці. Наприклад, визначення функції  $f(x)$  для аргументів  $x$ , які знаходяться між значеннями  $x, \dots, x_i, \dots, x_n$ , за відомими значеннями  $f(x_i)$  [14].

## 2.5. Порівняння чисельних методів обробки результатів досліджень

В ході дослідження було проаналізовано і порівняно два методи апроксимації: сплайн-апроксимація та апроксимація поліномами вищих степенів.

Суть апроксимації поліномами вищих степенів полягає в тому, що здійснюється спеціальний підбір лінійної комбінації степеневих виразів і конструювання з них степеневого полінома, який щонайкраще наближає (апроксимує) ( $X$ - $Y$  дані) таблично-задану функцію. Слова «щонайкраще наближає» означають, що до процедури такої апроксимації додатково пред'являються певні вимоги по точності. У математиці погрішність апроксимації часто оцінюють по методу найменших квадратів. Тому



часто поліноміальну апроксимацію часто називають апроксимацією по методу найменших квадратів. Згідно методу найменших квадратів потрібно побудувати такий апроксимуючий поліном, щоб алгебраїчна сума квадратів відхилень (погрешностей) між табличними значеннями функції і її реальними, обчисленими за допомогою полінома, що наближає, була мінімальною. Відмітимо, що часто такий штучно підібраний поліном називають функцією, що наближає або апроксимуючою функцією.

Для побудови апроксимуючих поліномів табличних функцій є спеціальна математична функція *linfit* ( $vx, vy, f$ ) – лінійна регресивна функція поліноміальної апроксимації. Ця функція містить три аргументи:

$vx$  – вектор, що містить табличні значення аргументу;

$vy$  – вектор, що містить табличні значення функції, що апроксимується;

$f$  – це вектор, що містить лінійну комбінацію степеневих виразів, які є основою для побудови апроксимуючого степеневого полінома. Цей вектор користувач повинен сформулювати сам.

Функція *linfit* ( $vx, vy, f$ ) повертає вектор, який містить коефіцієнти апроксимуючого полінома (степеневий поліном, в загальному вигляді має таку форму запису:  $a + bx + cx^2 + \dots + mx^n$ ).

Маючи в наявності вектор коефіцієнтів полінома, що наближає, який побудований на базі степеневих виразів вектора  $f$ , користувач легко може побудувати сам апроксимуючий поліном.

Приведемо практичні результати обробки отриманих даних за допомогою лінійної регресивної апроксимації поліномами вищих степенів.

На першому етапі необхідно задати масив значень частоти та масив значень коефіцієнта затухання поля.

	30		-40
	50		-5
	100		-46
	130		-78
	150		-82
$\nu A =$	185	$\text{МГц}$	$\nu B =$ -52
	230		-30
	300		-11,2
	500		-25
	700		-24
	900		-37
	1000		-44

Визначимо коефіцієнти поліномів вищих степенів за допомогою функції *linfit* у прикладному пакеті MathCad.

$$C = \text{linfit}(\nu A, \nu B, F), \quad (2.25)$$

де  $C$  – коефіцієнти поліномів вищих степенів,  $\nu A$  - це масив значень частоти випромінювання,  $\nu B$  - це масив значень коефіцієнта затухання поля,  $F$  – поліном вищих степенів (в результаті попередніх досліджень було встановлено, що для вирішення поставлених завдань дисертаційної роботи необхідно використовувати поліном третьої степені).

$$C = \begin{pmatrix} 9.662 \cdot 10^{-8} \\ -0.124 \\ -49.658 \end{pmatrix}.$$

Визначення функції апроксимації проводиться шляхом перемноження полінома третьої степені  $F$  на отримані коефіцієнти поліномів вищих степенів  $C$ :

$$L(r) = F(r) * C, \quad (2.26)$$

де  $L(r)$  - функція апроксимації поліномами вищих степенів,  $r$  - ранжована змінна, що визначає межі апроксимації.

В результаті обчислень ми отримали функцію  $L(r)$ , яка може визначити значення коефіцієнта згасання поля для будь-якого значення частоти, а не лише для визначених у таблиці 2.5. Приведемо графічне зображення даної функції.

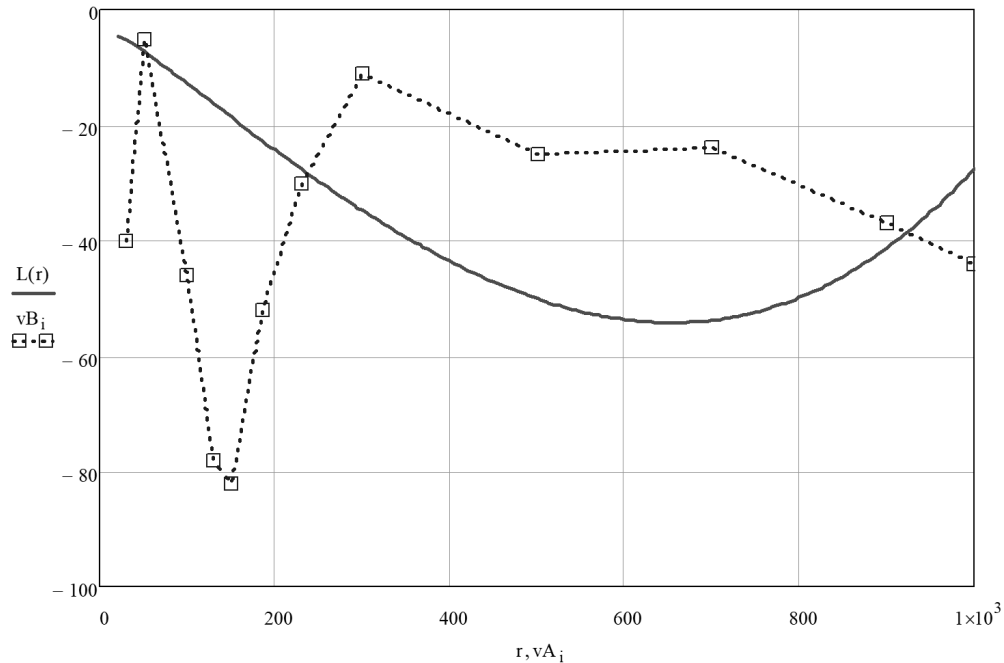


Рис. 2.17. Графічне зображення функції апроксимації поліномами вищих степенів

На рис. 2.17 зображено квадратними позначками, з'єднаними пунктирною лінією, замірйані (реальні) значення коефіцієнта згасання електромагнітного поля. Суцільна товста лінія зображає залежність виведену за допомогою апроксимації поліномами вищих степенів.

Порівняємо значення отримані за допомогою даного методу апроксимації із реальними номіналами коефіцієнта згасання поля. Результати приведемо у вигляді таблиці.

Після аналізу отриманих даних було встановлено, що даний метод апроксимації дає похибку визначення коефіцієнта згасання більше 50%, що є неприпустимим. Тому було вирішено використати інший метод апроксимації.

Точність поліноміальної апроксимації катастрофічно падає при збільшенні степені апроксимуючих поліномів. Від цього недоліку можна позбавитися використовуючи для апроксимації відрізки поліномів невисокої степені, які

використовуються для представлення частини вузлових точок. Найвідомішим методом такої апроксимації є *spline*-апроксимація.

Таблиця 2.6

Порівняння реальних та обрахованих значень коефіцієнта затухання поля

Частота випромінювання джерела, МГц	Значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля у точці T <sub>2</sub> , дБ	Значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля у точці T <sub>2</sub> , отримані за допомогою апроксимації, дБ
30	-40	-5.146
50	-5	-7.097
100	-46	-12.784
130	-78	-16.285
150	-82	-18.604
185	-52	-22.602
230	-30	-27.571
300	-11.2	-34.774
500	-25	-50.054
700	-24	-53.776
900	-37	-41.28
1000	-44	-27.498

Наочно *spline* -функцію можна представити у вигляді гнучкої сталеві лінійки, що закріплена у вузлових точках і плавно згинається. Завдяки вказаним властивостям сплайнів вони непогано описують функції, представлені як невеликим числом вузлових точок (завдяки плавності *spline* -кривих), так і функції, що представляються дуже великим числом вузлових точок (оскільки порядок поліномів від цього числа вже не залежить). Недоліком *spline* -апроксимації є відсутність загального вираження для всієї кривої. Фактично доводиться використовувати набір *spline* -функцій для різних інтервалів між вузловими точками.

Приведемо практичні результати обробки отриманих даних за допомогою *spline* -апроксимації.

На першому етапі нам знову знадобляться масиви значень частоти  $\nu_A$  та значень коефіцієнта затухання поля  $\nu_B$ .

	30	-40
	50	-5
	100	-46
	130	-78
	150	-82
$v_A =$	185 МГц	$v_B =$ -52 дБ
	230	-30
	300	-11,2
	500	-25
	700	-24
	900	-37
	1000	-44

Далі використаємо функцію *cspline* у прикладному пакеті MathCad за допомогою якої реалізується *spline* -апроксимація.

$$b = cspline(vA, vB), \quad (2.27)$$

де  $b$  - функція *spline* -апроксимації.

Для того щоб отримати можливість визначення коефіцієнта затухання поля на будь-якій частоті необхідно застосувати інтерполяцію до попередньої функції.

$$spline(r) = interp(b, vA, vB, r), \quad (2.28)$$

де  $spline(r)$  – функція сплай-апроксимації;  $interp(x)$  – стандартна функція прикладного пакету MathCad, що реалізує інтерполяцію на проміжку діапазону, який визначений функцією  $x$ ;  $vA$  - це масив значень частоти випромінювання;  $vB$  - це масив значень коефіцієнта затухання поля;  $r$  - ранжованна змінна, що визначає межі апроксимації.

Отримана функція *spline* ( $r$ ) дає змогу визначити значення коефіцієнта затухання поля для будь-якого значення частоти, як і функція  $L(r)$ . Приведемо графічне зображення функції *spline* - апроксимації у порівнянні з реальними значеннями коефіцієнта затухання поля.

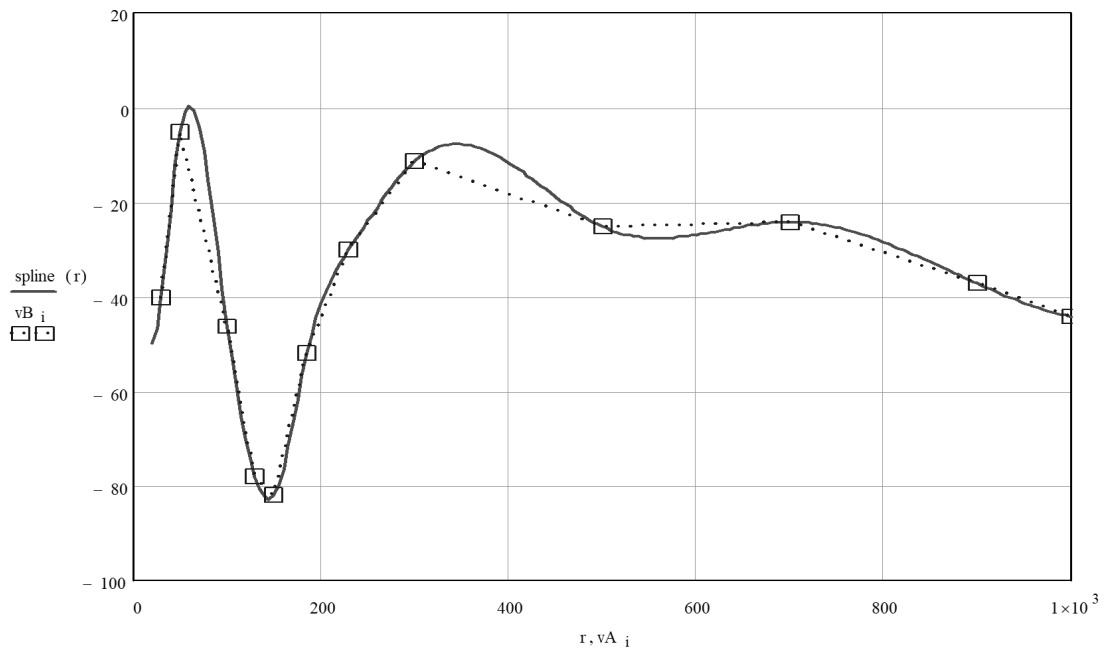


Рис. 2.18. Графічне зображення функції *spline*-апроксимації

На рис. 2.18 зображено квадратними позначками заміряні (реальні) значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля. Суцільна товста лінія зображає залежність виведену за допомогою *spline* -апроксимації.

Порівняємо значення отримані за допомогою даного методу апроксимації із реальними номіналами коефіцієнта затухання поля. Результати приведемо у вигляді таблиці.

Таблиця 2.7

Порівняння реальних та обчислених (*spline* - апроксимація) значень коефіцієнта затухання ЕМВ

Частота випромінювання джерела, МГц	Значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля у точці T <sub>2</sub> , дБ	Значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля у точці T <sub>2</sub> , отримані за допомогою <i>spline</i> - апроксимації, дБ
30	-40	-40
50	-5	-5
100	-46	-46
130	-78	-78
150	-82	-83
185	-52	-52

230	-30	-30
300	-11.2	-11.2
500	-25	-25
700	-24	-24
900	-37	-37
1000	-44	-44

Після аналізу отриманих даних було встановлено, що даний метод апроксимації дає похибку визначення коефіцієнта затухання у межах 0.5% [14-15].

Порівняємо приведені методи апроксимації для визначення оптимального.

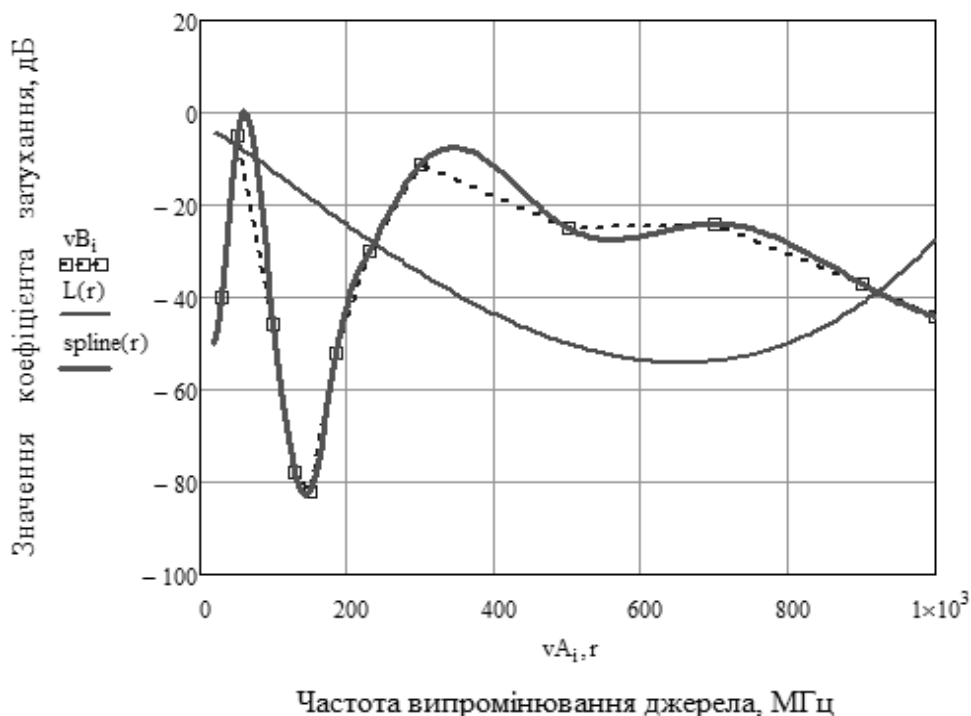


Рис. 2.19. Графічне порівняння методів апроксимації

Як видно з рис.2.19. функція *spline*-апроксимації є більш наближена до реальних значень, ніж апроксимація поліномами вищих степенів. Приведемо у вигляді таблиці порівняльні значення коефіцієнтів затухання поля отриманих за допомогою різних методів апроксимації. Завдяки використанню функції інтерполяції *spline* -апроксимація може передбачити будь-яке значення коефіцієнта затухання поля від частоти та відстані у визначеному діапазоні, що дає можливість оцінити структурні

закономірності розподілу електромагнітного поля всередині приміщень та є підґрунтям для подальшого уточнення моделей розповсюдження ЕМВ. Подальші розрахунки будуть проводитись за допомогою *spline*-апроксимації поліномами 3-го ступеня.

Таблиця 2.8

Порівняння значень коефіцієнта затухання поля отриманих за допомогою різних методів апроксимації [14]

Частота випромінювання джерела, МГц	Значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля у точці T <sub>2</sub> , дБ	Значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля у точці T <sub>2</sub> , отримані за допомогою апроксимації поліномами вищих степенів, дБ	Значення коефіцієнта затухання електромагнітного поля у точці T <sub>2</sub> , отримані за допомогою <i>spline</i> - апроксимації, дБ
30	-40	-5.146	-40
50	-5	-7.097	-5
100	-46	-12.784	-46
130	-78	-16.285	-78
150	-82	-18.604	-83
185	-52	-22.602	-52
230	-30	-27.571	-30
300	-11.2	-34.774	-11.2
500	-25	-50.054	-25
700	-24	-53.776	-24
900	-37	-41.28	-37
1000	-44	-27.498	-44

## 2.6. Метод уточнення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань на прикладі моделі COST 231 MWM

Як вже зазначалось в дисертаційній роботі, в моделі COST 231 MWM при визначенні затухання електромагнітного випромінювання на подолання суміжних поверхонь використовується фіксоване значення для всього діапазону частот.



Після проведення дослідження було встановлено, що затухання поля сильно залежить від частоти. Дані експериментально-розрахункові результати будемо використовувати для уточнення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщення, що в рамках даного розділу дисертаційної роботи показано на прикладі моделі COST 231 MWM. Як видно з попередніх залежностей значення втрат між суміжними поверхами  $L_f$  завжди не змінне для всіх значень частоти і дорівнює 18,3 дБ. Значення втрат у стіні  $L_{\omega i}$  має два значення 3,4 та 6,9, що залежать лише від типу стіни, а не від частоти, що не є дійсним для обох цих параметрів. Тому на основі отриманих даних запропоновано створення методу модернізації моделі COST 231 MWM, розробивши функцію для розрахунку цих параметрів, яка залежить від частоти.

За допомогою практичного досліду було визначено затухання електромагнітного поля між суміжними поверхами на різних частотах в діапазоні від 30 до 1000 МГц. Отримані результати приведемо у вигляді таблиці.

Виведення функції для уточнення було розроблено на основі *spline* - апроксимації та програмного пакету MathCad.

Таблиця 2.9

## Значення втрат сигналу між суміжними поверхами

Частота випромінювання джерела, МГц	Значення втрат сигналу між суміжними поверхами, дБ
30	22
50	3
100	33
130	50
150	57
185	32
230	18
300	7
500	15
700	17
900	28
1000	39

Для того щоб створити шукану функцію використовувався поліном третього степеня [16]:

$$y = a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4, \quad (2.29)$$

Діапазон від 30 до 1000 МГц розділяється на три частини для отримання більш точних результатів, тому що кожний з піддіапазонів буде описаний власною функцією:

1. Від 30 до 130 МГц
2. Від 130,1 до 300 МГц
3. Від 300,1 до 1000 МГц

Для того щоб знайти коефіцієнти  $a_1, a_2, a_3, a_4$  було використано дані отримані в ході досліджень, які підставлялися до наведеного вище поліному 2.29. Після підстановки утворилася система з чотирьох рівнянь [16]:

$$\begin{cases} f(a_1, a_2, a_3, a_4) = 30^3 a_1 + 30^2 a_2 + 30 a_3 + a_4 + 22 \\ g(a_1, a_2, a_3, a_4) = 50^3 a_1 + 50^2 a_2 + 50 a_3 + a_4 + 3 \\ h(a_1, a_2, a_3, a_4) = 100^3 a_1 + 100^2 a_2 + 100 a_3 + a_4 + 33, \\ j(a_1, a_2, a_3, a_4) = 130^3 a_1 + 130^2 a_2 + 130 a_3 + a_4 + 50 \end{cases} \quad (2.30)$$

В результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь 2.30 було отримано значення коефіцієнтів  $a_1, a_2, a_3, a_4$  для першого піддіапазону:

$$V = \begin{pmatrix} 2,256 \cdot 10^{-4} \\ -0,063 \\ 4,865 \\ -117,554 \end{pmatrix}.$$

Підставивши дані коефіцієнти була визначена залежність втрат між суміжними поверхами для першого діапазону частот:

$$L_f = 2,256 \cdot 10^{-4} f^3 - 0,063 f^2 + 4,865 f - 117,554, \quad (2.31)$$

Проведемо аналогічні розрахунки для другого піддіапазону [16]:

$$\begin{cases} q(a_1, a_2, a_3, a_4) = 150^3 a_1 + 150^2 a_2 + 150 a_3 + a_4 + 57 \\ w(a_1, a_2, a_3, a_4) = 185^3 a_1 + 185^2 a_2 + 185 a_3 + a_4 + 32 \\ l(a_1, a_2, a_3, a_4) = 230^3 a_1 + 230^2 a_2 + 230 a_3 + a_4 + 18 \\ p(a_1, a_2, a_3, a_4) = 300^3 a_1 + 300^2 a_2 + 300 a_3 + a_4 + 7 \end{cases}, \quad (2.32)$$

В результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь 2.32 було отримано значення коефіцієнтів  $a_1, a_2, a_3, a_4$  для другого піддіапазону:

$$R = \begin{matrix} 2,467 \cdot 10^{-5} \\ -0,019 \\ 4,988 \\ -461,464 \end{matrix}.$$

Підставивши дані коефіцієнти отримано залежність втрат між суміжними поверхами для другого піддіапазону частот [16-17]:

$$L_f = 2,467 \cdot 10^{-5} f^3 - 0,019 f^2 + 4,988 f - 461,464, \quad (2.33)$$

Проведемо аналогічні розрахунки для третього піддіапазону [14]:

$$\begin{cases} z(a_1, a_2, a_3, a_4) = 500^3 a_1 + 500^2 a_2 + 500 a_3 + a_4 + 15 \\ x(a_1, a_2, a_3, a_4) = 700^3 a_1 + 700^2 a_2 + 700 a_3 + a_4 + 17 \\ n(a_1, a_2, a_3, a_4) = 900^3 a_1 + 900^2 a_2 + 900 a_3 + a_4 + 28 \\ m(a_1, a_2, a_3, a_4) = 1000^3 a_1 + 1000^2 a_2 + 1000 a_3 + a_4 + 39 \end{cases}, \quad (2.34)$$

В результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь 2.34 було отримано значення коефіцієнтів  $a_1, a_2, a_3, a_4$  для третього піддіапазону:

$$B = \begin{matrix} -1,417 \cdot 10^{-7} \\ 1,85 \cdot 10^{-4} \\ -0,078 \\ -4,75 \end{matrix}.$$

Підставивши дані коефіцієнти отримав залежність втрат між суміжними поверхами для третього діапазону частот [14-15]:

$$L_f = -1,417 \cdot 10^{-7} f^3 + 1,85 \cdot 10^{-4} f^2 - 0,078 f - 4,75, \quad (2.35)$$

В результаті об'єднавши всі три розв'язки 2.31, 2.33, 2.35 від кожного з під діапазонів в систему рівнянь знайдено шуканий розв'язок для всього діапазону [16]:

$L_f =$

$$\begin{cases} 2,256 \cdot 10^{-4} f^3 - 0,063 f^2 + 4,865 f - 117,554 & 30\text{МГц} \leq f < 130\text{МГц} \\ 2,467 \cdot 10^{-5} f^3 - 0,019 f^2 + 4,988 f - 461,464 & 130\text{МГц} \leq f < 300\text{МГц} \\ -1,417 \cdot 10^{-7} f^3 + 1,85 \cdot 10^{-4} f^2 - 0,078 f - 4,75 & 300\text{МГц} \leq f \leq 1000\text{МГц} \end{cases} \quad (2.36)$$

На основі даної формульної залежності  $L_f$  від частоти побудуємо графік – рис. 2.20. Приведемо в таблиці 2.10 порівняльні значення затухання електромагнітного поля отримані експериментальним шляхом та отримані за допомогою використання виведеної формули.

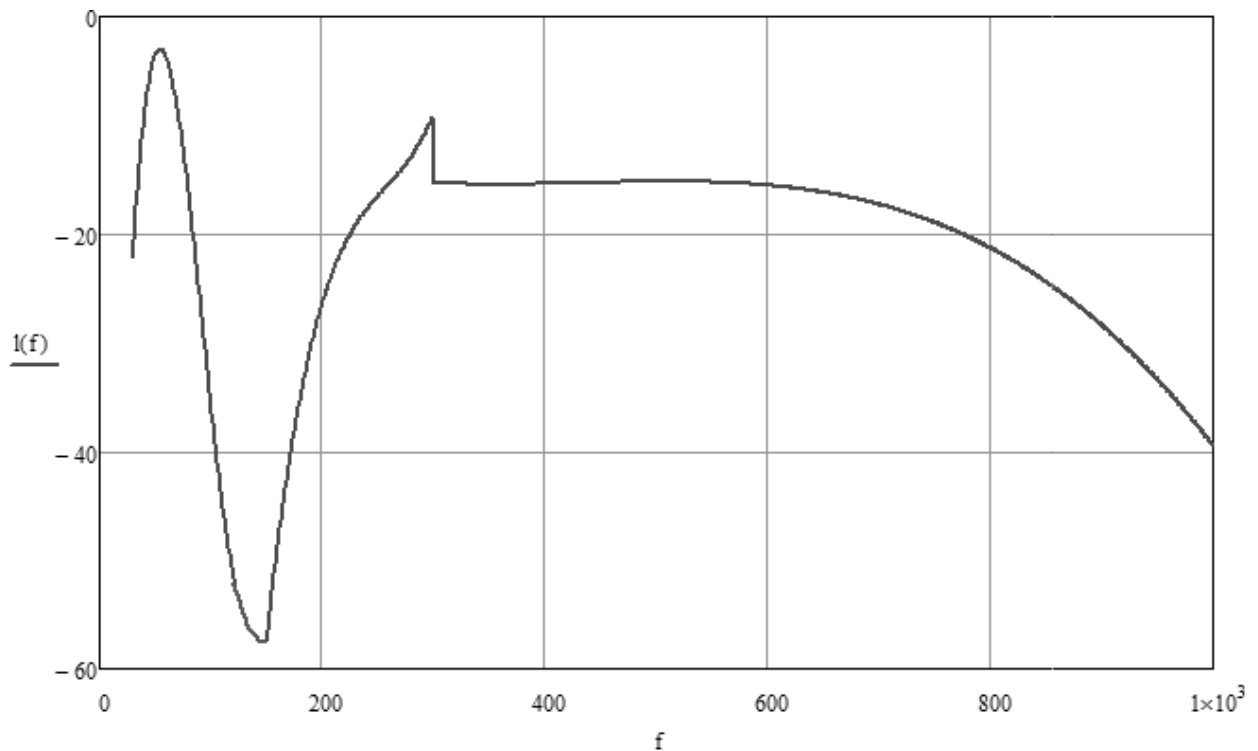


Рис. 2.20. Залежність втрат між суміжними поверхнями від частоти розрахована за отриманою формулою

Таблиця 2.10

## Порівняння значень втрат сигналу між суміжними поверхами

Частота випромінювання джерела, МГц	Значення втрат сигналу між суміжними поверхами, дБ	Значення втрат сигналу між суміжними поверхами отримані за допомогою виведеної формули, дБ
30	22	22,213
50	3	3,6
100	33	35,454
130	50	54,161
150	57	57,503
185	32	32,758
230	18	19,161
300	7	8,974
500	15	15.212
700	17	17.303
900	28	28.399
1000	39	39.45

Із значень приведених у таблиці 2.10 можемо зробити висновок, що створена уточнена модель дає можливість досить точно визначити значення затухання ЕМВ між суміжними поверхами. Загальна похибка формули не перевищує 8%.

Проведемо аналогічні розрахунки для визначення формульної залежності затухання у стіні від частоти. За допомогою практичного досліду було визначено затухання електромагнітного поля у стіні на різних частотах в діапазоні від 30 до 1000 МГц. Отримані результати приведемо у вигляді таблиці.

Таблиця 2.11

## Значення втрат сигналу між суміжними поверхами

Частота випромінювання джерела, МГц	Значення втрат сигналу у стіні, дБ
30	40
50	5
100	46
130	78
150	82

185	52
230	30
300	11,2
500	25
700	24
900	37
1000	44

Виведення даної функції було проведено аналогічним методом до алгоритму створення залежності затухання між суміжними поверхами від частоти.

Створення шуканої формули виконується на основі поліному третього ступеня.

Аналогічно до попереднього випадку діапазон від 30 до 1000 МГц розділяється на три частини для отримання більш точних результатів, тому що кожний з піддіапазонів буде описаний власною функцією:

1. Від 30 до 130 МГц
2. Від 130,1 до 300 МГц
3. Від 300,1 до 1000 МГц

Для того щоб знайти коефіцієнти  $a_1, a_2, a_3, a_4$  було використано дані отримані в ході досліджень, які підставлялися до наведеного вище поліному 3.16. Після підстановки утворилася система з чотирьох рівнянь [16]:

$$\begin{cases} f_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 30^3 a_1 + 30^2 a_2 + 30 a_3 + a_4 + 40 \\ g_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 50^3 a_1 + 50^2 a_2 + 50 a_3 + a_4 + 5 \\ h_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 100^3 a_1 + 100^2 a_2 + 100 a_3 + a_4 + 46, \\ j_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 130^3 a_1 + 130^2 a_2 + 130 a_3 + a_4 + 78 \end{cases} \quad (2.37)$$

В результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь 2.37 було отримано значення коефіцієнтів  $a_1, a_2, a_3, a_4$  для першого піддіапазону:

$$V_2 = \begin{pmatrix} 3,363 \cdot 10^{-4} \\ -0,097 \\ 7,882 \\ -198,018 \end{pmatrix} .$$

Підставивши дані коефіцієнти була визначена залежність втрат у стіні для першого діапазону частот [16-17]:

$$L_{\omega} = 3,363 \cdot 10^{-4} f^3 - 0,097 f^2 + 7,882 f - 198,018, \quad (2.38)$$

Проведемо аналогічні розрахунки для другого піддіапазону [14]:

$$\begin{cases} q_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 150^3 a_1 + 150^2 a_2 + 150 a_3 + a_4 + 82 \\ w_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 185^3 a_1 + 185^2 a_2 + 185 a_3 + a_4 + 52 \\ l_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 230^3 a_1 + 230^2 a_2 + 230 a_3 + a_4 + 30 \\ p_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 300^3 a_1 + 300^2 a_2 + 300 a_3 + a_4 + 11,2 \end{cases}, \quad (2.38)$$

В результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь 2.38 було отримано значення коефіцієнтів  $a_1, a_2, a_3, a_4$  для другого піддіапазону:

$$R_2 = \begin{matrix} 1,792 \cdot 10^{-5} \\ -0,015 \\ 4,277 \\ -452,657 \end{matrix}.$$

Підставивши дані коефіцієнти отримано залежність втрат у стіні для другого діапазону частот [16-17]:

$$L_{\omega} = 1,792 \cdot 10^{-5} f^3 - 0,015 f^2 + 4,277 f - 452,657, \quad (2.39)$$

Проведемо аналогічні розрахунки для третього піддіапазону [14]:

$$\begin{cases} z_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 500^3 a_1 + 500^2 a_2 + 500 a_3 + a_4 + 25 \\ x_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 700^3 a_1 + 700^2 a_2 + 700 a_3 + a_4 + 24 \\ n_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 900^3 a_1 + 900^2 a_2 + 900 a_3 + a_4 + 37 \\ m_2(a_1, a_2, a_3, a_4) = 1000^3 a_1 + 1000^2 a_2 + 1000 a_3 + a_4 + 44 \end{cases}, \quad (2.40)$$

В результаті розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь було отримано значення коефіцієнтів  $a_1, a_2, a_3, a_4$  для третього піддіапазону:

$$B_2 = \begin{pmatrix} 3,167 \cdot 10^{-7} \\ -8,4 \cdot 10^{-4} \\ 0,668 \\ -188,5 \end{pmatrix}.$$

Підставивши дані коефіцієнти отримав залежність втрат у стіні для третього діапазону частот [16-17]:

$$L_\omega = 3,167 \cdot 10^{-7} f^3 - 8,4 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,668 f - 188,5, \quad (2.41)$$

В результаті об'єднавши всі три розв'язки 2.38, 2.39, 2.41 від кожного з піддіапазонів в систему рівнянь знайдено шукану формульну залежність втрат у стіні від частоти для всього діапазону [14]:

$$L_\omega = \begin{cases} 3,363 \cdot 10^{-4} f^3 - 0,097 f^2 + 7,882 f - 198,018 & 30 \text{ МГц} \leq f < 130 \text{ МГц} \\ 1,792 \cdot 10^{-5} f^3 - 0,015 f^2 + 4,277 f - 452,657 & 130 \text{ МГц} \leq f < 300 \text{ МГц} \\ 3,167 \cdot 10^{-7} f^3 - 8,4 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,668 f - 188,5 & 300 \text{ МГц} \leq f \leq 1000 \text{ МГц} \end{cases} \quad (2.42)$$

На основі даної формульної залежності 3.20  $L_\omega$  від частоти побудуємо графік:

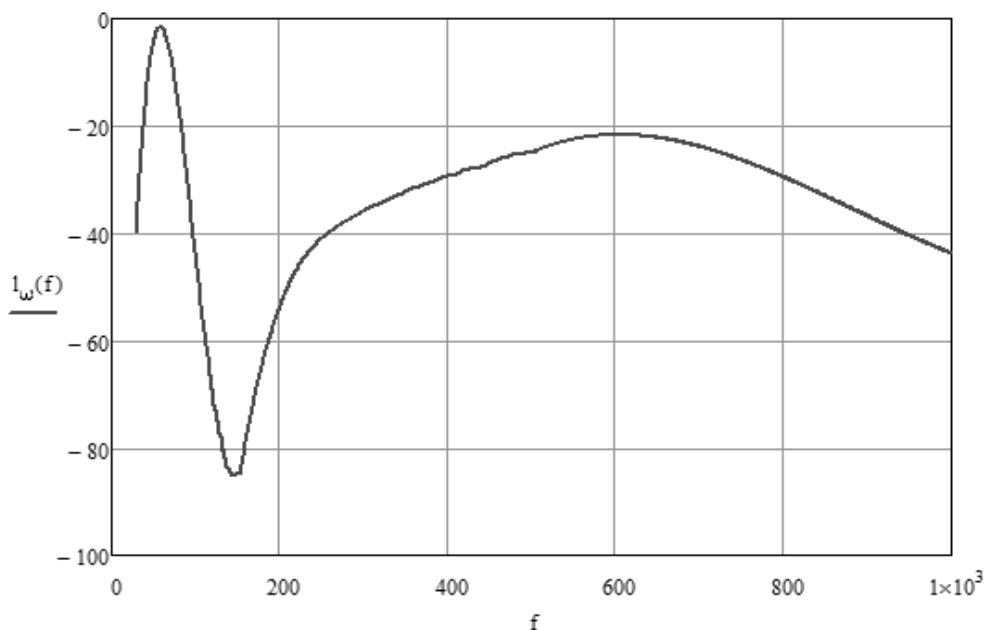


Рис. 2.21. Залежність втрат у стіні від частоти розрахована за отриманою формулою



Приведемо в таблиці порівняльні значення затухання електромагнітного поля у стіні отримані експериментальним шляхом та отримані за допомогою використання виведеної формули  $L_{\omega}$ .

Таблиця 2.12

## Порівняння значень втрат сигналу у стіні

Частота випромінювання джерела, МГц	Значення втрат сигналу у стіні, дБ	Значення втрат сигналу у стіні отримані за допомогою виведеної формули, дБ
30	40	39,778
50	5	4,381
100	46	43,518
130	78	73,807
150	82	88,127
185	52	61,324
230	30	44,414
300	11,2	35,717
500	25	24,912
700	24	23,872
900	37	36,826
1000	44	43,8

Із значень приведених у таблиці 2.12 можемо зробити висновок, що створена функція дає можливість визначити значення затухання сигналу у стіні із загальною похибкою, що не перевищує 12 % [17].

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У даному розділі представлено дослідження структурних закономірностей розподілу електромагнітного поля всередині приміщень. На основі експериментальних досліджень було проведено виміри напруженості електромагнітного поля на різних віддаленнях від джерела випромінювання та на різних частотах в діапазоні від 30 МГц до 1000 МГц. На основі отриманих результатів

було побудовано ряд залежностей коефіцієнту затухання електромагнітного поля від відстані та частоти.

1. В ході дослідження було проаналізовано і порівняно два методи апроксимації: *spline*-апроксимації та лінійної регресивної поліноміальної апроксимації поліномами вищих степенів, за допомогою яких проводилася обробка отриманих результатів. *Spline* -апроксимація більш наближена до реальних значень, ніж апроксимація поліномів вищих степенів, що засвідчує похибка у межах 1%. Даний метод апроксимації дає можливість більш чітко визначити значення коефіцієнта затухання поля в залежності від значення частоти випромінювання.

2. За рахунок виявлених структурних закономірностей розподілу ЕМВ всередині приміщень було запропоновано метод уточнення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань. Результатом уточнення стала функція для розрахунку затухання ЕМВ між суміжними поверхами та функція для розрахунку затухання у стіні, які залежить від частоти. Загальна похибка результатів обрахованих за допомогою отриманої моделі  $L_f$  не перевищує 8 %, а  $L_w$  – 12 %. Дані науково-прикладні результати дають підґрунтя для підвищення ефективності використання приладів моніторингу електромагнітної обстановки з використанням апаратного та розрахункового методів виявлення ЕМВ всередині приміщень.

## Список використаних джерел у другому розділі

1. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks [Електронний ресурс] // ITU Recommendation. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238>.
2. Бахтіяров Д.І. Методи вимірювань побічних електромагнітних випромінювань /Д.І. Бахтіяров.// Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики: тези доповідей II Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих учених, м. Київ, 23-24 жовтня 2013р./редкол. М.С. Кулик та ін. – К. : НАУ, 2013. – С. 26.
3. Никольский В.В., Никольская Т.Н. Электродинамика и распространение радиоволн. 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Наука, 2008. - 610 с.
4. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. –Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009. – 198 с.
5. Кусочно-лінійна апроксимація втрат на трасі поширення радіохвиль [Електронний ресурс] // АрхівІнфо. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://arhivinfo.ru/1-33908.html>.
6. Meiling Luo. Indoor radio propagation modeling for system performance prediction : дис. докт. наук : STIC Sant'e / Meiling Luo. – Lyon, 2013. – 128 с.
7. Електродинаміка та пристрої надвисоких частот: навч. посіб. / В. О. Іванов, Є. І. Габрусенко, Л. В. Сібрук; за ред. В. О. Іванова. - К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту "НАУ-друк", 2009. - 312 с.
8. Digital mobile radio towards future generation systems – Brussels: European Commission, 1999. – 443 с. – (COST 231 Final Report).
9. Information technology equipment. Radio disturbance characteristics. Limits and methods of measurement (N22 CISPR) [Електронний ресурс] // European EMC standards. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: <https://goo.su/2mw2>.
10. Андрухович П. О. Аналіз нормативної бази в області захисту інформації / П. О. Андрухович, Д. І. Бахтіяров. // Проблеми навігації і управління рухом: тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів; м. Київ 18-20 листопада. – 2013. – С. 96.

11. Бахтіяров Д. І. Аналіз ефективності комплексного застосування заходів заводозахисності для підвищення стійкості функціонування засобів керування БПЛА / Д. І. Бахтіяров, І. О. Козлюк. // Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: тези доповідей науково-технічної конференції; м. Київ, 17-19 листопада. – 2014. – С. 50.

12. Бахтіяров Д.І. Методи вимірювань побічних електромагнітних випромінювань /Д.І. Бахтіяров.// Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики: тези доповідей II Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих учених, м. Київ, 23-24 жовтня 2013р./редкол. М.С. Кулик та ін. – К. : НАУ, 2013. – С. 26.

13. Дослідження методів реалізації захисту Wi-Fi мережі на підприємстві / Д. І.Бахтіяров, О. С. Мензюк, М. М. Федотов, М. В. Якименко. // Політ 2018. Сучасні проблеми науки: XVIII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів, 3-6 квітня 2018 р.: тези доп. – К., 2018. – С. 47-48.

14. Бахтіяров Д. І. Дослідження побічних електромагнітних випромінювань / Д. І. Бахтіяров. // Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем» 6 – 7 червня 2018 Р., Національний авіаційний університет, м. Київ. – 2018. – С. 7–8.

15. Бахтіяров Д. І. Вплив ефекту багатопроменевості на вихідні дані супутникових радіонавігаційних систем / Д. І. Бахтіяров, В. С. Слюсаренко, Н. А. Слюсаренко. // Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: Науково-технічна конференція, 21-23 листопада 2018 р.: тези доп. – К., 2018. – С. 31.

16. Бахтіяров Д. І., Козлюк І.О. Методика модернізації моделі розповсюдження радіохвиль в середині приміщення для побудови контрольованої зони корпоративної мережі // Наукоємні технології. – 2019. – Т. 43. – №. 3. – С. 349-356.

17. Bakhtiiarov D. An approach to modernization of the Hat and COST 231 model for improvement of electromagnetic compatibility in premises for navigation and motion control equipment / D. Bakhtiiarov, O. Lavrynenko, G. Konakhovych. // 2018 IEEE 5th International Conference “Methods and Systems of Navigation and Motion Control” Proceeding October 16-18, 2018. – К., 2018. – С. 271-274.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ В УРБАНІЗОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

#### **3.1. Основи використання апаратно-програмних засобів пошуку та виявлення джерел електромагнітних випромінювань**

Однією з характерних особливостей останнього десятиліття стала фактична лібералізація використання радіочастотного спектру, яка проявилася, зокрема, в появі великої кількості неконтрольованих і неліцензованих засобів передачі інформації по радіоканалах. Після певного періоду в Україні були прийняті відповідні законодавчі акти, які, проте, мають обмежену ефективність.

Головне місце серед великої різноманітності пристроїв займають вироби, які здійснюють контроль акустичної інформації за допомогою мікрофонів (тобто прослуховування приміщень) та передачу на відстань акустичної інформації по радіоканалу або по провідним мережам для запису і / або негайного прослуховування. Проведення заходів з пошуку таких пристроїв дає відповідь на головне і найбільш актуальне питання - про інформаційну безпеку виділеного приміщення.

Завдання виявлення неліцензованих засобів передачі інформації повинне вирішуватися в умовах триваючого інтенсивного зростання завантаження діапазону, обумовленого:

- введенням нових систем рухомого радіозв'язку відомчого та загального призначення з динамічним розподілом частот;
- збільшенням числа стаціонарних і мобільних радіостанцій і передавачів з фіксованим розподілом частот;
- зростанням числа і інтенсивності перешкод промислового походження.

Всі ці фактори призвели до того, що в більшості великих промислових центрів ефір виявився перенасиченим і процес збільшення завантаження триває.

### *3.1.1. Характеристика пристроїв контролю акустичної інформації з можливістю передачі по радіоканалу*

Несанкціоноване використання пристроїв контролю акустичної інформації для добування компромату на конкурентів і забезпечення промислового шпигунства посилено продовжується, незважаючи на введення Закону України «Про оперативно-розшукову діяльність», що регламентує порядок розробки, виробництва і застосування спеціальних технічних засобів, призначених для негласного отримання інформації. Істотно зростає асортимент спеціальних засобів знімання інформації, покращилися їх тактико-технічних характеристик (ТТХ).

Робочий діапазон даних пристроїв, практично використовуваний для передачі по радіоканалах, становить від одиниць мегагерц до 2-6 ГГц. На частотах нижче 30 МГц сильно зростають розміри антени, що ускладнює їх маскування. Як було доведено в попередньому розділі дисертаційної роботи з підвищенням частоти сильно зростає загасання радіосигналу, а розповсюдження електромагнітних випромінювань все більшою мірою підпорядковується законам геометричної оптики, що ускладнює використання подібних пристроїв [1].

Удосконалюються методи використання засобів контролю акустичної інформації, в тому числі [2]:

- подальше застосування отримують ПНЗІ з дистанційним управлінням і складними, в тому числі широкосмуговими видами модуляції, з динамічним частотно-часовим розподілом випромінювань, з накопиченням і прискореним періодичним скиданням накопиченої інформації;

- ПНЗІ цільового призначення виготовляють і встановлюють з урахуванням реальної електромагнітної обстановки в місці передбачуваного використання, що практично виключає їх виявлення простими засобами;

- ПНЗІ приховуються в предмети побутового призначення.

Всі ці фактори ускладнюють виявлення і закриття каналів витоку акустичної інформації та вимагають використання найсучаснішої методики виявлення джерел електромагнітних випромінювань та засобів контршпигунства. Повна і

систематизована інформація по ТТХ ПНЗІ зі зрозумілих причин відсутня в широкому друці.

Характеристики деяких типів пристроїв, що випускаються для негласного знімання інформації наведені в таблиці 3.1 [3].

Таблиця 3.1

№ п/п	Найменування	Частота, МГц	Вид модуляції	Вихідна потужність, мВт	Розміри, мм	Джерело живлення, В
1.	PK 1945-SS	UHF	DTMF (ЧМН)	50	46x37x17	DC 9
2.	PK1370	UHF	ШСС (BF = 4 МГц)	10/100	70x47x9	DC 6-9
3.	SIM-A-13TL	200-250 136-174	FM ( $\pm 15$ кГц)	5-20	45x31x9	DC5-12,5
4.	SIM-A-70	150-170	AFC	50	30x20x10	DC 9
5.	SIM-DSS-5000	96-120	ШСС (BPSK)	2.3-300	94x57x11	DC 6
6.	SIM-PR-9000T	350-450	ШСС (BPSK) (DF = 5 МГц)	100	70x39x5	DC 6-10
7.	COF-335	890-980	ШСС (BPSK) (DF = 8 МГц)	10/100	78x48x11	DC 9
8.	SS-500	435 355-500	ШСС (BPSK) (DF = 8 МГц)	10/100	70x47x10	DC 9
9.	Unitel-800/850	806-821 902-928	ШСС (BPSK) (DF = 1.4 МГц)	100/750	110x52x14	4xAAA
10.	SIM DSS-2000	850-950	ШСС (BPSK) (DF = 20 МГц)	10/20/50/ 100/400		DC 6

Як бачимо, ТТХ відомих ПНЗІ і їх масогабаритні показники - найрізноманітніші. Ширина смуги частот формується випромінювання змінної від 30 кілогерц до десятків мегагерц, характер випромінюванні - від моночастотного до псевдовипадкової перебудови робочої частоти, тип модуляції - аналогова і цифрова,

діапазон випромінюваних потужностей - від 5 мВт до 750 мВт, вид випромінювання - безперервні і дистанційно-керовані і т.д.

### 3.2. Особливості сигналів, що породжують побічні електромагнітні випромінювання в офісному устаткуванні

Джерелами ПЕМВ технічних засобів можуть бути, наприклад, кабелі, шини, провідники друкованих плат і особливо роз'єми, в яких протікають електричні струми під впливом інформативних сигналів.

Типовий і реальний вид часової діаграми моделі імпульсу інформаційної шини представлені на рис. 3.1.

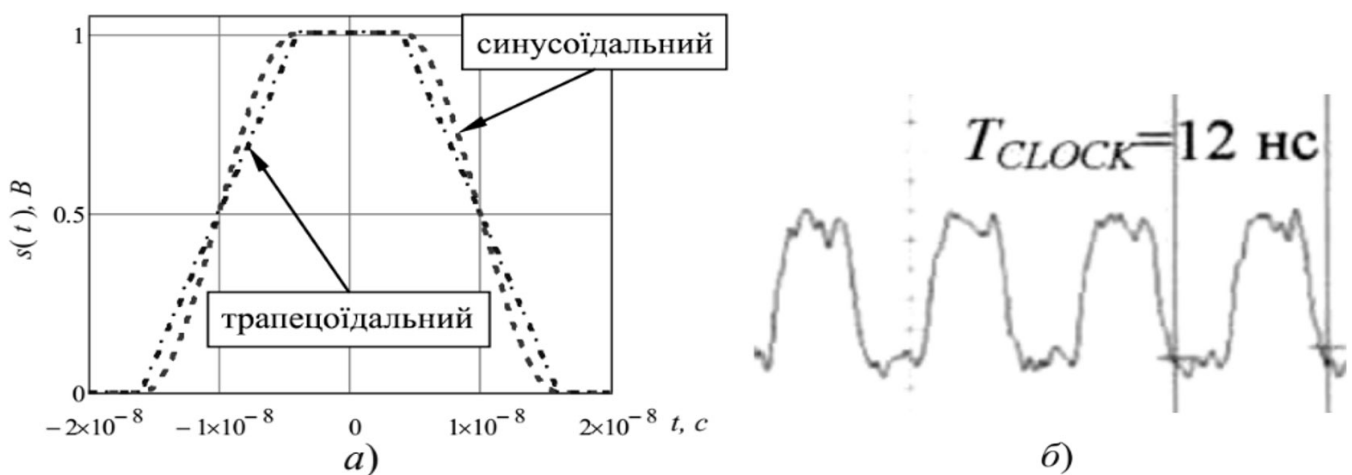


Рис. 3.1. Часова діаграма прямокутних імпульсів ТЗ:

а) математична модель, б) діаграма для інтерфейсу DVI (1280x800x60)

Сигнали, що формуються, генеруються з гладкими фронтами для звуження їх частотних спектрів. Згладжування фронтів імпульсів призводить до зменшення вищих гармонік в їх спектрі.

В діапазоні високих і надвисоких частот спектральні складові прямокутного імпульсу значно інтенсивніше (на 20 ... 30 дБ) складових трапецеїдальних імпульсів [4]. Крім того, спектральні складові імпульсу з синусоїдальними (більш гладкими) фронтами значно слабші (на 15 ... 20 дБ) спектральних складових імпульсу з лінійними фронтами.



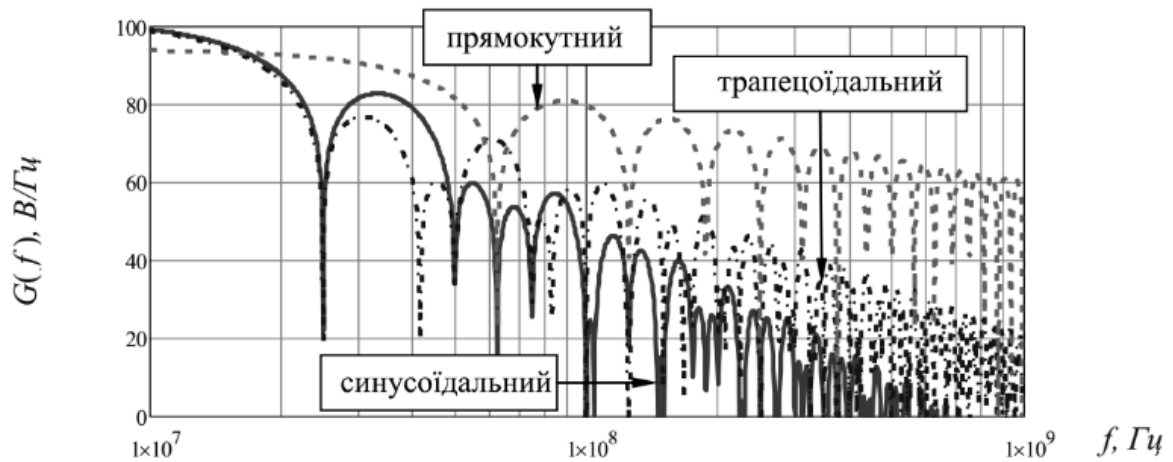


Рис. 3.2. Нормовані спектральні щільності імпульсних сигналів

Спектральні характеристики ПЕМВН можуть істотно відрізнятися не тільки у межах різних вузлів і блоків технічного засобу, але і для різних реалізацій цих вузлів. На рис. 3.3 представлена спрощена схема персонального комп'ютера (ПК) [5].

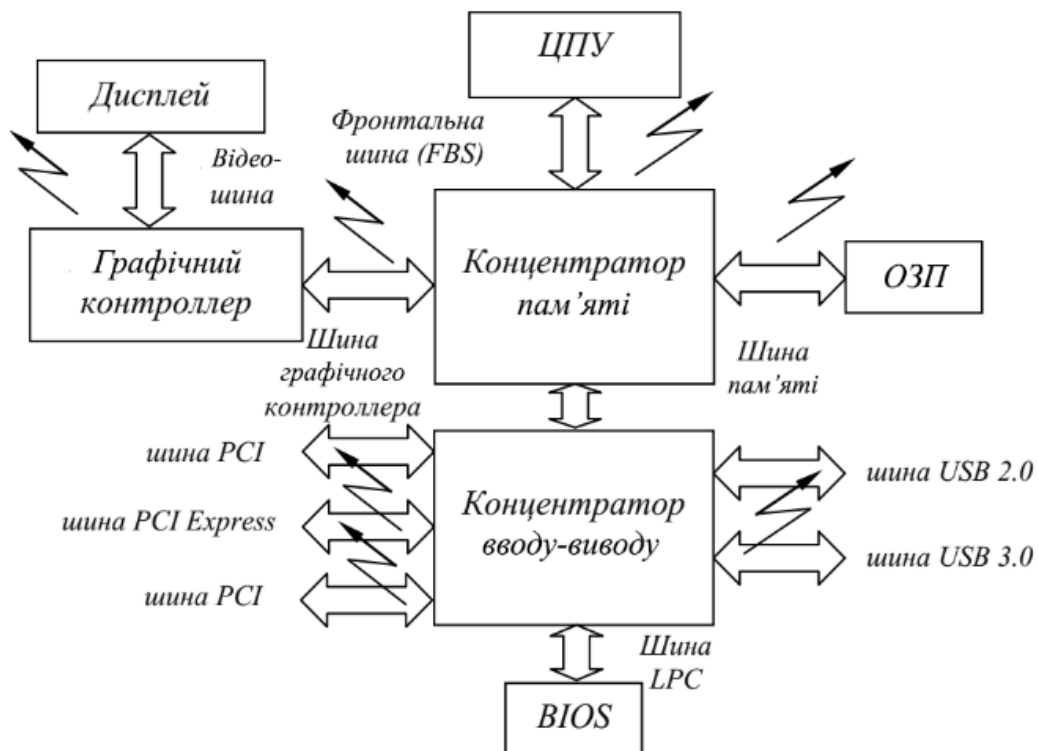


Рис. 3.3. Структурна схема комп'ютера

Кожна з шин, які відображені в таблиці 3.2, може мати певні особливості функціонування, які впливають на ПЕМВН.

## Фактори, що впливають на ПЕМВН

Особливість	Вплив
Паралельна шина	Зменшення відношення сигнал / шум за рахунок суперпозиції випромінювань різних каналів
Диференціальна пара	Зниження рівня випромінювання
Періодичність сигналів	Багатократне повторення одного інформаційного повідомлення

Сигнали в сучасних технічних системах можна розділити на два типи: службові та інформаційні сигнали. Службові сигнали не несуть інформації, але є демаскуючими ознаками роботи ТЗП. Інформаційні сигнали в робочому режимі, як правило, не мають чіткої періодичності та породжують випромінювання, що несуть інформацію. В окремих випадках вони можуть бути періодичними. Такі режими називають тестовими. Спектр сигналів в тестовому режимі дискретний. В робочому режимі спектр інформаційних сигналів є безперервним.

Отже, кожна з шин технічного засобу може мати різні особливості функціонування, що впливають на рівень ПЕМВН.

### ***3.2.1. Аналіз можливості виникнення ПЕМВН у клавіатурі***

Механічні контакти, кнопки на основі провідних матеріалів, а також ємнісні датчики застосовуються як датчики натискання клавіш. У клавіатурі коди символів, зображених на клавішах, формує контролер, який послідовно опитує всі клавіші. Скан-код - це однобайтове число, молодші 7 біт якого представляють ідентифікаційний номер, присвоєний кожній клавіші. Вид інформативного сигналу в тракці клавіатури залежить від її інтерфейсу.

Клавіші клавіатури функціонально можна розбити на три групи:

До першої групи належать алфавітно-цифрові клавіші. Вони призначені для введення символічної інформації і команд, що набираються по буквах.

До другої групи належать функціональні клавіші. Цих клавіш дванадцять (від F1 до F12), і розміщені вони у верхній частині клавіатури.

До третьої групи належать службові клавіші.

Провідні клавіатури можуть мати інтерфейс USB або PS/2.

Інтерфейс PS/2 використовується в роз'ємі Mini-Din. Цей роз'єм складається з шести контактів, з яких задаються тільки чотири [6]:

1. Data (дані, що передаються)
2. Not Implemented (не використовується)
3. Not Implemented (не використовується)
4. Ground (Земля)
5. VCC (+5V) (Живлення)
6. Clock (сигнал синхронізації даних, що передаються)
7. Not Implemented

Для клавіатури характерна нестабільність тактової частоти задаючого генератора, тому вона схильна до паразитної високочастотної генерації. Таким чином, рівень випромінювань від клавіатури спостерігається до частот 10 - 15 МГц, вище – рідко. Спектр випромінювання клавіатури лінійний, зосереджений в основному на частотах від одиниці до сотень кГц, з кроком 5 - 20 кГц. Моніторинг і вимірювання можливих небезпечних випромінювань сильно ускладнені неінформативними ПЕМВН імпульсними блоками живлення системного блоку (В діапазоні від одиниць кГц до першого десятка МГц). [6-7]

### ***3.2.2. Аналіз можливості виникнення ПЕМВН у принтері***

Останнім часом найбільшого поширення набули: матричні, струменеві та лазерні принтери. Сучасні принтери вимагають високошвидкісної передачі даних по зовнішньому інтерфейсу. На сьогоднішній день найпоширенішим інтерфейсом, що використовується в принтерах, є USB.

Якщо використовується порт по протоколу USB 2.0, то взаємообмін проводиться на довільній частоті, яка може виявитися в діапазоні до 400 МГц. Цю частоту доводиться визначати безпосередніми вимірами в кабелях інтерфейсу, так як проведення спеціальних досліджень і подальших розрахунків без цього значення неможливо [5].

У лазерних принтерах сигнал на вузол друку (лазерний діод) надходить в послідовному кодi. Відповідно ланцюг, що з'єднує внутрішній контролер з лазером, - це найбільш вразливе місце. Також небезпеку становить собою процес передачі сигналу від комп'ютера по USB інтерфейсу на контролер.

У струменевих принтерах сигнал від внутрішнього контролера на друкувальну голівку надходить в паралельному кодi, розрядність якого відповідає кількості сопел, число яких в сучасних принтерах може досягати кілька сотень. Єдиним вразливим місцем є інтерфейсний кабель.

### **3.3. Процес виявлення джерел електромагнітних випромінювань в умовах складної електромагнітної обстановки**

Одним з напрямків моніторингу електромагнітної обстановки є пошук і виявлення джерел електромагнітних випромінювань, а також спеціально організованих і потенційних радіоканалів витоку інформації. Даний напрям являє собою складний багатоетапний процес, який в спрощеному вигляді може бути представлений у вигляді сукупності ряду етапів, представлених на рис. 3.4 [8].

Поточний контроль завантаження діапазону (**I Етап**) передбачає аналіз поточного завантаження діапазону і накопичення даних про частоти, рівні і характер електромагнітних випромінювань в робочому діапазоні частот з прив'язкою даних до місця прийому. Під «відомими» випромінюваннями розуміється сукупність накопичених за певний інтервал часу даних про завантаження діапазону, отриманих за результатами проведення поточного контролю. При цьому передбачається, що небезпечні сигнали відсутні, що досягається, наприклад, поступовим накопиченням «відомих» випромінювань з ретельною перевіркою кожного з випромінювань.

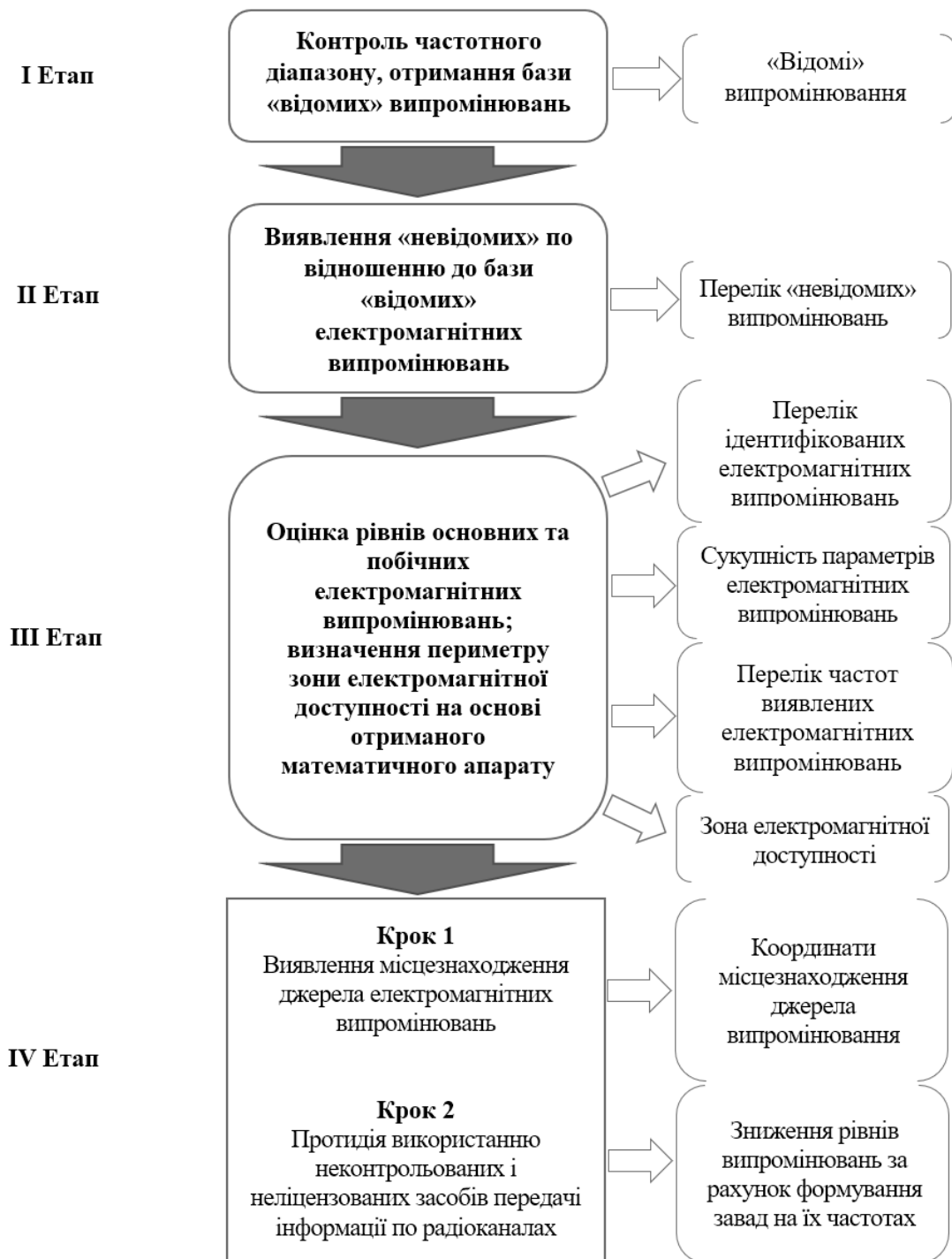


Рис. 3.4. Основні етапи процесу виявлення технічних каналів витoku інформації

До переліку «невдомих» (II Етап) включаються дані про випромінювання, сукупності параметрів яких задовольняють заданим критеріям пошуку. Використання «опорної» антени передбачає наявність у складі пошукової системи антенного комутатора, що забезпечує по чергове підключення однієї з прийомних (в виділеному приміщенні) антен та «опорної» антени, що знаходиться поза зоною ЕМД приміщення, але забезпечує надійний прийом всіх зовнішніх сигналів. Пошукова система з «опорним»

каналом передбачає наявність багатоканального (як мінімум, двоканального) радіоприймального пристрою з ідентичними характеристиками, підключених до входів приймальної і опорної антен і працює по обох каналах синхронно в часі і по частоті.

Проведення тестування на **III Етапі** дає певний ефект як при виявленні радіомікрофонів без закриття (випромінювання в виділеному приміщенні спеціально синтезованих акустичних сигналів), так і при проведенні спецдосліджень на ПЕМВН шляхом відповідної модуляції інформативних параметрів випромінювань.

Проведення даних етапів ґрунтується на результатах виконання ряду стандартних функцій, виконання яких має забезпечувати апаратура МЕО при виявленні неконтрольованих та неліцензованих джерел ЕМВ. Від повноти вирішення завдань пошуковим обладнанням залежить тривалість процесу пошуку і достовірність одержуваної інформації. Більшість існуючих засобів, в тій чи іншій мірі, забезпечують проведення даних етапів або їх різновидів. Повнота і швидкість їх проведення, інтегральна чутливість пошукової системи і вірогідність прийняття рішення залежать від структури пошукової системи і ТТХ використовуваних в ній засобів.

Одним із можливих способів використання результатів **III Етапу** є виявлення джерел електромагнітних випромінювань та визначення периметру зони електромагнітної доступності / контрольованої зони.

Під **зоною електромагнітної доступності** будемо розуміти сукупність точок простору, перебуваючи в яких еталонне РЕМ з заданими параметрами радіовипромінювання забезпечує на вході приймача рівень потужності сигналу необхідний для виявлення радіовипромінювання, вимірювання його технічних параметрів і пеленгування РЕМ по радіовипромінюванню.

**Контрольована зона (КЗ)** – територія (простір) навколо об'єкта інформаційної діяльності, на якій (у межах якого) виключено несанкціоноване розташування технічних і транспортних засобів та неконтрольоване перебування сторонніх осіб. КЗ в свою чергу можна поділити на дві зони:

**Зона 1** – територія (сфера) навколо основних технічних засобів, в межах якої здійснюється наведення небезпечних сигналів на інші технічні засоби, системи та їх комунікації, характеризується радіусом  $R_1$ , що визначає граничну відстань від

основних технічних засобів до межі, за якою вважається неможливим наведення небезпечних сигналів на технічні засоби.

**Зона 2** – територія (сфера) навколо технічних засобів обробки інформації, за межами якої вважається неможливим перехоплення небезпечного сигналу засобами технічної розвідки (ЗТР) з метою відтворення семантичної інформації, характеризується радіусом  $R_2$ , що визначає найбільшу відстань від технічних засобів обробки інформації до межі, за якою напруженості електричного та магнітного полів небезпечного сигналу відносно шумових завад не перевищують нормованого значення. В Зоні 2 можливе перехоплення інформації, а за її межами ні.

Зона 1 та Зона 2 є фізичними характеристиками (показниками) основних технічних засобів та систем (ОТЗС) та визначаються експериментально-розрахунковим методом при спеціальних дослідженнях ОТЗС [9-10].

Як правило, радіус Зони 1 менший ніж радіус Зони 2. Для неможливості перехоплення небезпечного сигналу у вигляді електромагнітних випромінювань необхідно навколо об'єкта інформаційної діяльності організаційно створити і забезпечити контрольовану зону, найменша відстань до межі якої від ОТЗС має дорівнювати радіусу Зони 2 ( $R_2$ ) [10].

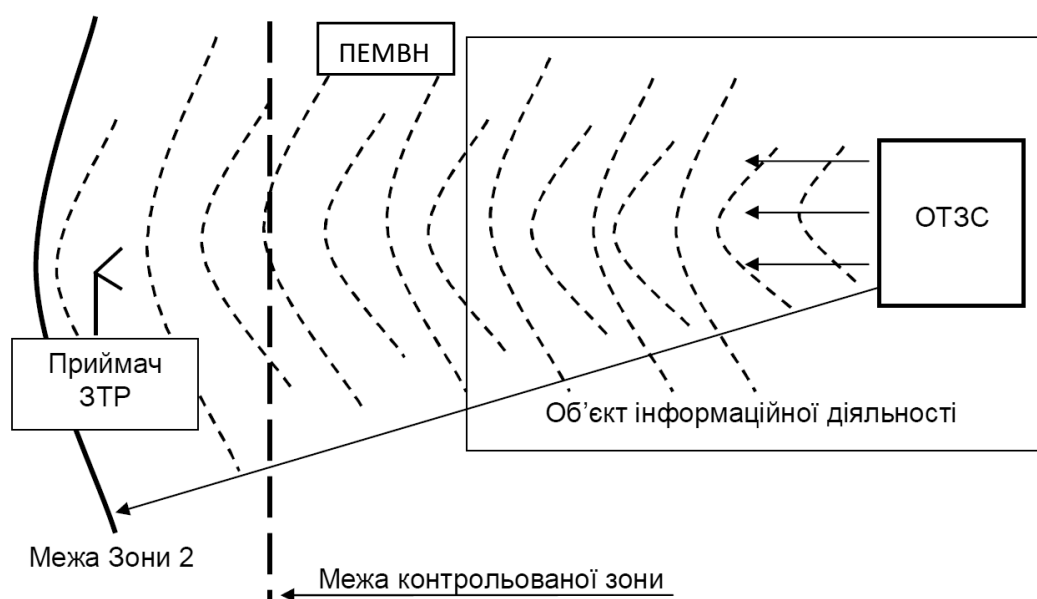


Рис. 3.5. Канал побічних електромагнітних випромінювань ОТЗС в межах контрольованої зони

Головна складність для оператора апаратури МЕО полягає у виборі апаратних та програмних засобів, здатних забезпечити виконання зазначених функцій з високою якістю відповідно до адекватних алгоритмів вирішення кожного із завдань. Саме поєднання якісної апаратури з вдалимими методами обробки дозволяє найбільшою мірою автоматизувати виконання пошукових заходів, мінімізувати час виконання завдання і участь в ній оператора. Отримані у розділі 2 дисертаційної роботи закономірності розподілу поля всередині приміщення та внаслідку уточнені існуючі моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань дали необхідний математичний апарат для розробки програмного забезпечення з метою визначення меж зони електромагнітної доступності, що в свою чергу можна інтерпретувати як робочу зону для проведення процедури радіомоніторингу та контрольовану зону (для потреб інформаційної безпеки), а також дозволило підвищити ефективність використання апаратури МЕО при пошуку «невідомих» електромагнітних випромінювань.

Поряд з процесом виявлення джерел електромагнітних випромінювань за участю оператора апаратури МЕО для більшості практичних застосувань не менше актуальною є складна проблема швидкого автоматизованого (за мінімальної участі оператора) виявлення неконтрольованих і неліцензованих засобів передачі інформації по радіоканалах в рамках контрольованої зони. Її складність зумовлена тим, що виявлення здійснюється в умовах складної електромагнітної обстановки при можливому впливу різних радіоперешкод, в тому числі, від радіомовних і телевізійних станцій. До того ж з відомих причин повністю відсутні апріорні дані про будь-які параметри випромінювання джерела.

Викладені в наступних підрозділах 3.4-3.5 дисертаційної роботи результати досліджень по визначенню периметру зони електромагнітної доступності / контрольованої зони на базі розробленого програмного забезпечення та синтезу способів пошуку «невідомих» випромінювань апаратними засобами націлені на вирішення даної проблеми. До початку досліджень значущі результати щодо її вирішення у відкритій літературі були відсутні.



### **3.4. Розробка програмного забезпечення для визначення зони електромагнітної доступності / контрольованої зони на основі отриманого математичного апарату**

Для того, щоб змоделювати особливості розповсюдження електромагнітних випромінювань, існує спеціальне програмне забезпечення, наприклад, програма «ПЭМИН-2005» дозволяє розрахувати зону ЕМД, але для розрахунку необхідне додаткове обладнання, наприклад, аналізатор спектру, підсилювач тощо [11]. Слід зазначити, що програма не є безкоштовною, а також неможливо знайти посібник з використання для того, щоб ознайомитись з можливостями програми перед її придбанням.

Існують також програмні пакети для моделювання розповсюдження електромагнітних випромінювань, але вони не розраховані на моделювання в приміщенні та мають узагальнені поправочні коефіцієнти затухання електромагнітного випромінювання. Окрім того, вони усі відсутні у вільному доступі, а також не мають у своєму складі україномовної локалізації. Наприклад, за допомогою програми WinProp можна змоделювати розповсюдження радіохвиль за різними моделями, але вона потребує додаткових розрахунків зі сторони користувача [12].

Таким чином, було вирішено розробити власне програмне забезпечення на базі отриманого в 2 розділі дисертаційної роботи математичного апарату, яке, по-перше, враховує отриманий метод уточнення моделі розповсюдження електромагнітних випромінювань на прикладі COST-231 MWM, а також працює за різними сценаріями їх розповсюдження – внутрішньо-внутрішній, внутрішньо-зовнішній. Програмний код алгоритму наведено в додатку В дисертаційної роботи.

#### **Алгоритм програмного забезпечення наступний:**

1. Після заповнення користувачем необхідних для обчислення вихідних даних, програмне забезпечення починає процес обрання моделі розповсюдження

електромагнітних випромінювань та формульної залежності для розрахунку коефіцієнту затухання ЕМВ при подоланні суміжних поверхонь, відповідно до належності частоти певному діапазону.

2. Проводиться обчислення за обраною формульною залежністю затухання електромагнітного випромінювання в суміжних поверхнях, в залежності від напрямку розповсюдження ЕМВ (внутрішньо-внутрішній чи внутрішньо-зовнішній).

3. Проводиться обчислення меж зони ЕМД. Підбір відбувається таким чином: послідовно підбирається значення відстані  $i$ , в ході обчислення загальних втрат під час проходження шляху сигналом та обчислення напруженості поля на даній відстані, порівнюється значення ЕРС що наводиться на антену приймача зі значенням чутливості приймального пристрою. Якщо значення ЕРС менше, то приймається рішення, що відстань яка була обрана останньою  $i$  є межею зони в даному напрямку, на якій вже неможливо зафіксувати, а отже, перехопити сигнал.

Далі цей алгоритм повторюється з деякими змінами, відповідно до напрямку обчислення. В кінцевому результаті ми отримуємо значення периметру для 6 різних напрямків.

Блок схема наведена на рисунку 3.6 відображає логіку виконання процесу обчислень, що виконує програмне забезпечення [13].

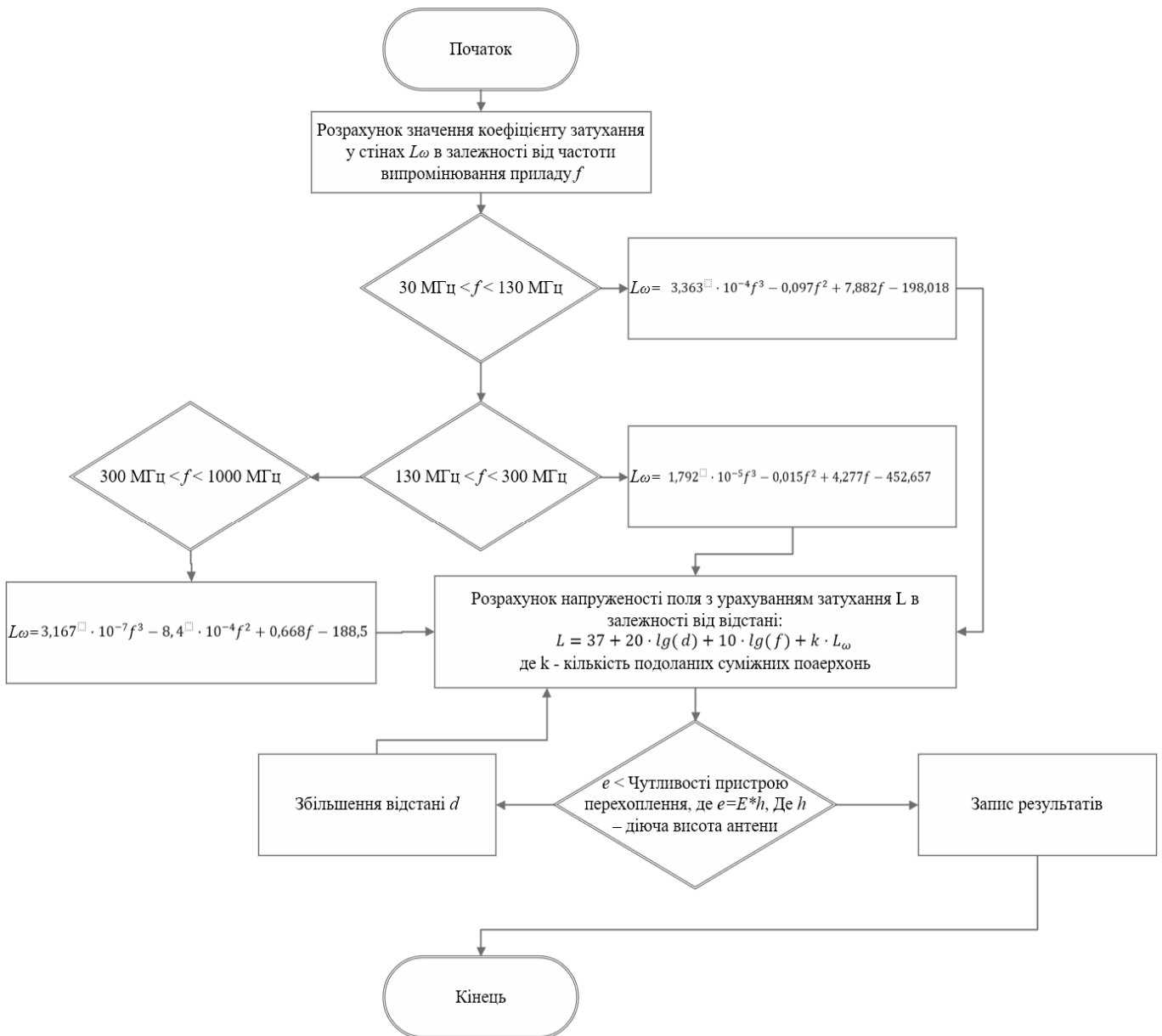
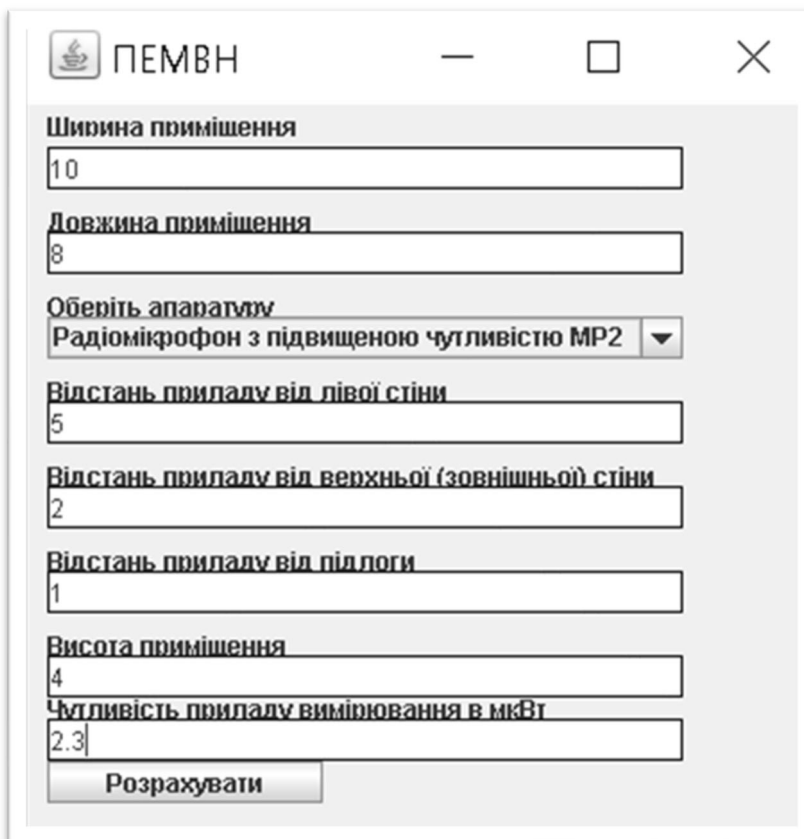


Рис. 3.6. Блок-схема програмного забезпечення для розрахунку контрольованої зони

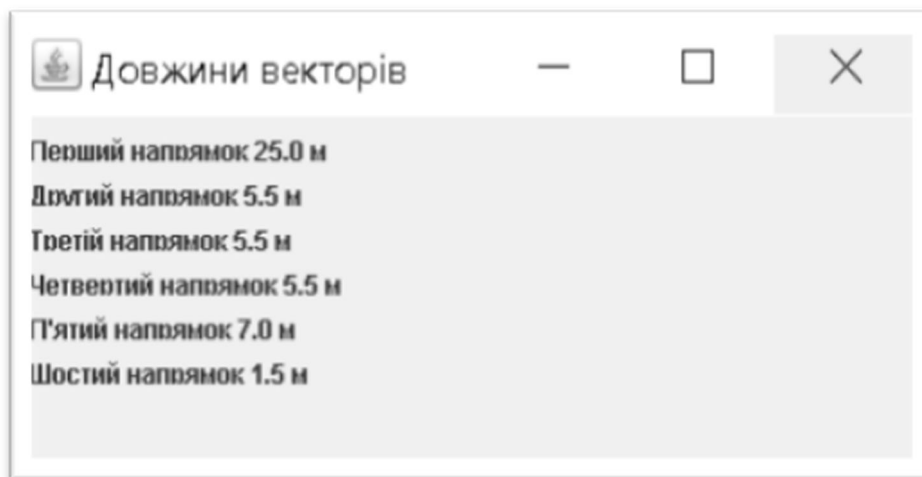
Ці результати програма використовує в механізмі побудови і графічного відображення макету відстані на якій можна зафіксувати сигнал за заданих, на початку користувачем, умов. Приклад виконання роботи програмою наведено нижче.



The screenshot shows a window titled 'ПЕМВН' with a standard Windows interface. It contains several input fields and a dropdown menu for entering room parameters. At the bottom, there is a 'Розрахувати' (Calculate) button.

Parameter	Value
Ширина приміщення	10
Довжина приміщення	8
Оберіть апарат	Радіомікрофон з підвищеною чутливістю MP2
Відстань приладу від лівої стіни	5
Відстань приладу від верхньої (зовнішньої) стіни	2
Відстань приладу від підлоги	1
Висота приміщення	4
Чутливість приладу вимірювання в мкВТ	2.3

Рис.3.7. Вікно введення початкових даних для розрахунку рекомендованої зони електромагнітної доступності / контрольованої зони



The screenshot shows a window titled 'Довжини векторів' displaying the results of the calculations. It lists six vector lengths in meters.

Order	Length (m)
Перший	25.0
Другий	5.5
Третій	5.5
Четвертий	5.5
П'ятий	7.0
Шостий	1.5

Рис.3.8. Результати розрахунків рекомендованої зони електромагнітної доступності / контрольованої зони

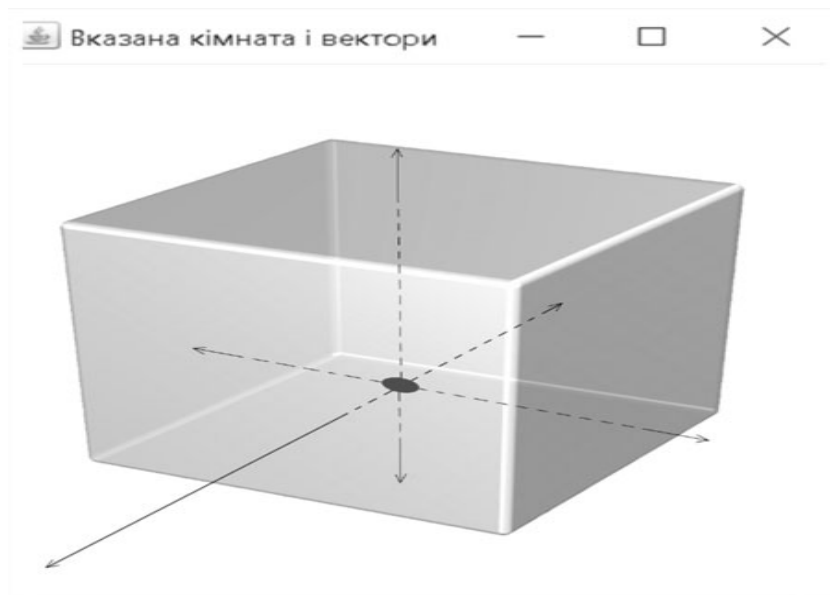


Рис.3.9. Графічне представлення розповсюдження небезпечного сигналу в межах рекомендованої зони електромагнітної доступності / контрольованої зони

### **3.5. Пошук і виявлення джерел електромагнітних випромінювань в робочій зоні на основі апаратно-програмних засобів обробки даних**

Для вирішення поставленого в дослідженні завдання виявлення неконтрольованих і неліцензованих засобів передачі інформації по радіоканалах, обґрунтовано такі алгоритми пошуку (**IV Етап**).

Алгоритм 1 передбачає проведення наступних операцій [2]:

- оцінка завантаженості електромагнітної обстановки за межами зони ЕМД на основі панорамного аналізу в робочому діапазоні частот (з виходу «опорної» антени за межами контрольованого приміщення);

- панорамний аналіз в декількох точках зони ЕМД;

- порівняння компонент (з однаковими номерами), відповідних радіочастотним сигналам в двох точках робочої зони між собою і виділення складових з максимальною інтенсивністю відносно один одного і щодо рівня помилкової тривоги обмеженого простору;

- порівняння для кожної радіочастоти спектральних складових з максимальною інтенсивністю, отриманих для радіочастотного сигналу для двох точок робочої зони

з спектральними складовими радіочастотного сигналу за межами зони обмеженого простору відносно один одного і рівня помилкової тривоги;

- остаточне виділення тих спектральних складових, які для двох точок робочої зони обмеженого простору мають велику або рівну інтенсивність в порівнянні з інтенсивністю спектральних складових радіочастотного сигналу за межами робочої зони;

- прийом тільки тих радіочастотних сигналів, які відповідають остаточно виділеним спектральним складовим.

В іншому варіанті пошукова система здійснює порівняння максимальних (з виходів антен в зоні ЕМД) компонент спектра з рівнями відповідних компонент попередньо накопичених у виділеному приміщенні «відомих» електромагнітних випромінювань (при явній відсутності випромінювань від інших джерел) і граничним рівнем для відповідної частоти, а потім за результатами порівняння приймається рішення про наявність (відсутність) «невдомих» випромінювань в робочій зоні. У разі, якщо «невідоме» випромінювання не є навмисним, а обумовлено перевіреними джерелами електромагнітних випромінювань, що не представляють небезпеки всередині або за межами приміщення, його параметри заносяться в базу даних «відомих» випромінювань для використання при подальшій обробці.

Як можна побачити координати при моніторингу електромагнітної обстановки обрані з сукупності спектральних відліків  $X_R(j, n)$  усереднених по  $R$  реалізацій енергетичного спектра на виході одноканального спектр-аналізатора, що складається з радіоприймального тракту і процесора швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [14-15], що здійснює обробку радіосигналів в смузі одночасного аналізу частот шириною  $\Delta F$  на фоні нормального адитивного білого шуму  $\zeta(t)$  невідомої інтенсивності.

$$X_R(j, n) = \frac{1}{R} \times \sum_{r=1}^R |c_{(r)}(n)|^2, \quad (3.1)$$

де  $j$  - номер антени, підключеної до входу апаратури МЕО.

Середня потужність випадкового процесу  $U_m(t)$ , представленого в частотній області сукупністю значень  $X_R(j, n)$  номерами від  $n_{min}$  до  $n_{max}$ , пропорційна сумі цих відліків:

$$\hat{P}_{j,m} = 10 \lg \left( \sum_{n=n_{min}}^{n_{max}} X_R(j, n) \right) + \mu, \text{ дБ}, \quad (3.2)$$

де  $\mu$  - поправочний коефіцієнт, який визначається калібруванням антени і апаратури використовуваного каналу моніторингу електромагнітної обстановки.

На основі роботи [16] встановлено, що структура пошукової системи, яка реалізує даний алгоритм і забезпечує при цьому підвищену інтегральну чутливість і максимальну швидкодію, містить:

- комплект широкодіапазонних антен з квазіізотропною діаграмою спрямованості, одна з яких («опорна») винесена за межі виділеного приміщення;
- керований антенний комутатор;
- керований по частоті приймальний тракт з шириною смуги пропускання по ПЧ, що дорівнює смузі одночасного аналізу;
- пристрій аналого-цифрової обробки на основі ШПФ [14];
- керуючий пристрій із змінною структурою, яка визначається розробленим в п. 3.4 дисертаційної роботи програмним забезпеченням.

**Підвищення ефективності** використання апаратури МЕО при даному способі забезпечується використанням:

- панорамного аналізу на основі ШПФ;
- скороченням обсягу оброблюваних даних при використанні бази «відомих» електромагнітних випромінювань або сигналів з виходу «опорної» антени.

Для підвищення інтегральної чутливості пошукової системи апаратура системи містить антенний комутатор і набір широкодіапазонних антен, що розміщуються в виділеному приміщенні. Кожна із антен має квазіізотропну діаграму спрямованості. Одна з них використовується як «опорна» і розміщена на достатньому видаленні від виділеного приміщення, наприклад, на даху установи. В ході панорамного аналізу на кожній частотній ділянці здійснюється по чергове підключення кожної з антен до входу РПУ, при

цьому в смузі миттєвого аналізу (5 або 2 МГц для комплексів високої / середньої продуктивності) для кожної з антен знімається спектр із заданою дискретністю (3 кГц або менше), а потім здійснюється порівняння кожної з компонент спектра з пороговим рівнем. Ті з компонент, які перевищили поріг, порівнюються між собою, і максимальна з них порівнюється з рівнем відповідної компоненти від «опорної» антени [16].

В основу даного способу покладено відоме положення електродинаміки про різний характер зміни напруженості електромагнітного поля в ближній і дальній зонах [17]. Згідно [17] компоненти вектора напруженості електричного поля, випромінюваного електричним диполем  $p$ , в сферичних координатах визначаються виразами:

$$\begin{cases} E_r = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left( \frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} \right) \cos\theta |\vec{p}| \exp[-i\omega t], \\ E_\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left( \frac{1}{r^3} - \frac{ik}{r^2} - \frac{k^2}{r} \right) \sin\theta |\vec{p}| \exp[-i\omega t], \\ E_\varphi = 0. \end{cases} \quad (3.3)$$

де  $r$ ,  $\theta$  та  $\varphi$  - сферичні координати,

$E_r$ ,  $E_\theta$ ,  $E_\varphi$  - компоненти напруженості електричного поля в сферичних координатах,

$\epsilon$ ,  $\mu$  - електрична і магнітна проникності вільного середовища,

$\omega$  - кругова частота випромінювання.

Дипольний момент пов'язаний з випромінюваною потужністю  $W$  співвідношенням:

$$W = \frac{\omega^4}{12\pi} \mu \sqrt{\epsilon\mu} |\vec{p}|^2, \quad (3.4)$$

Модуль напруженості електричного поля з урахуванням (3.3 - 3.4) визначається виразом:

$$|\vec{E}| = \sqrt{\frac{12\pi W}{\mu\sqrt{\epsilon\mu}\omega^4}} \sqrt{\frac{1}{(2\pi\epsilon)^2} \left( \frac{1}{r^6} + \frac{k^2}{r^4} \right) \cos^2\theta + \frac{1}{(4\pi\epsilon)^2} \left( \left( \frac{1}{r^3} + \frac{k^2}{r} \right)^2 + \frac{k^2}{r^4} \right) \sin^2\theta}, \quad (3.5)$$



Максимум модуля напруженості електричного поля по всіх можливих напрямках  $\theta$ , при заданому  $r$  визначається виразом:

$$E_{max}(r) = \sqrt{\frac{12\pi W}{\mu\sqrt{\epsilon}\omega^4}} \sqrt{\max\left\{\frac{1}{(2\pi\epsilon)^2}\left(\frac{1}{r^6} + \frac{k^2}{r^4}\right), \frac{1}{(4\pi\epsilon)^2}\left(\left(\frac{1}{r^3} + \frac{k^2}{r}\right)^2 + \frac{k^2}{r^4}\right)\right\}}, \quad (3.6)$$

На рис. 3.10 - 3.11 представлені залежності максимального значення модуля напруженості електричного поля  $E_{max}$ , породжується порівняно малопотужними (100 мкВт і 1 мВт) джерелами електромагнітних випромінювань з частотами 30 і 300 МГц в виділеному приміщенні на відстанях  $R$  від 1 до 10 м. На тих же рисунках приведені залежності потужних (100 Вт) джерел електромагнітних випромінювань, наприклад, радіомовних станцій, віддалених від виділеного приміщення на 3 км. Аналіз характеру зміни кривих показує, що в ближній (1 ... 8 м) зоні рівень випромінювання від малопотужних джерел, як і слід було очікувати, перевищує рівень потужних, але віддалених джерел.

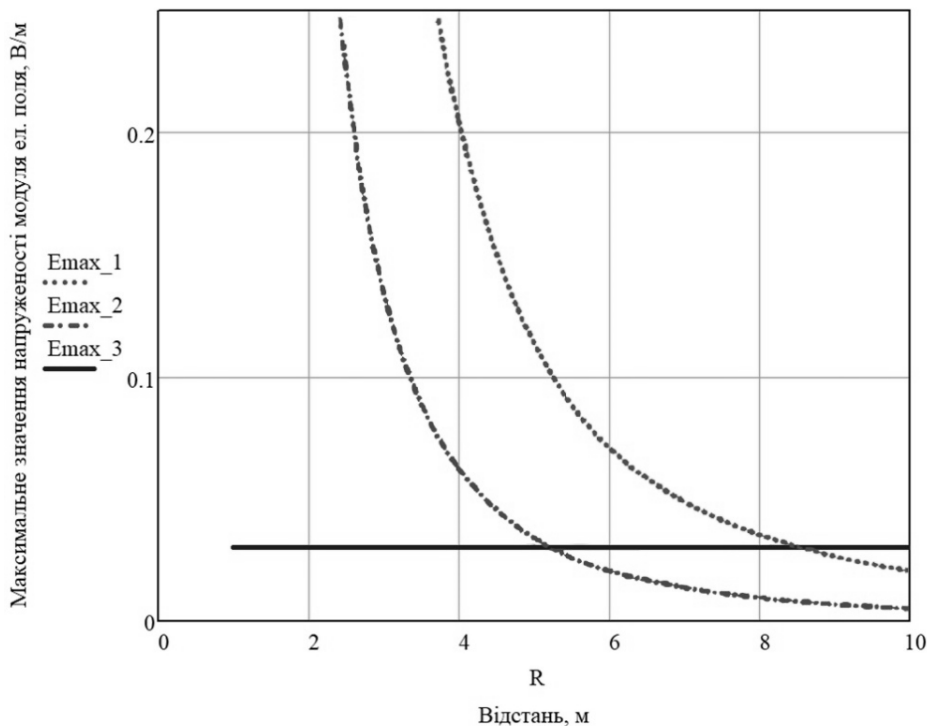


Рис. 3.10. Залежність  $E_{max}$  від відстані до джерела випромінювання на частоті 30 МГц при значеннях потужності 1 мВт ( $E_{max\_1}$ ), 100 мкВт ( $E_{max\_2}$ ), 100 Вт (віддалене джерело на відстані 3 км  $E_{max\_3}$ )

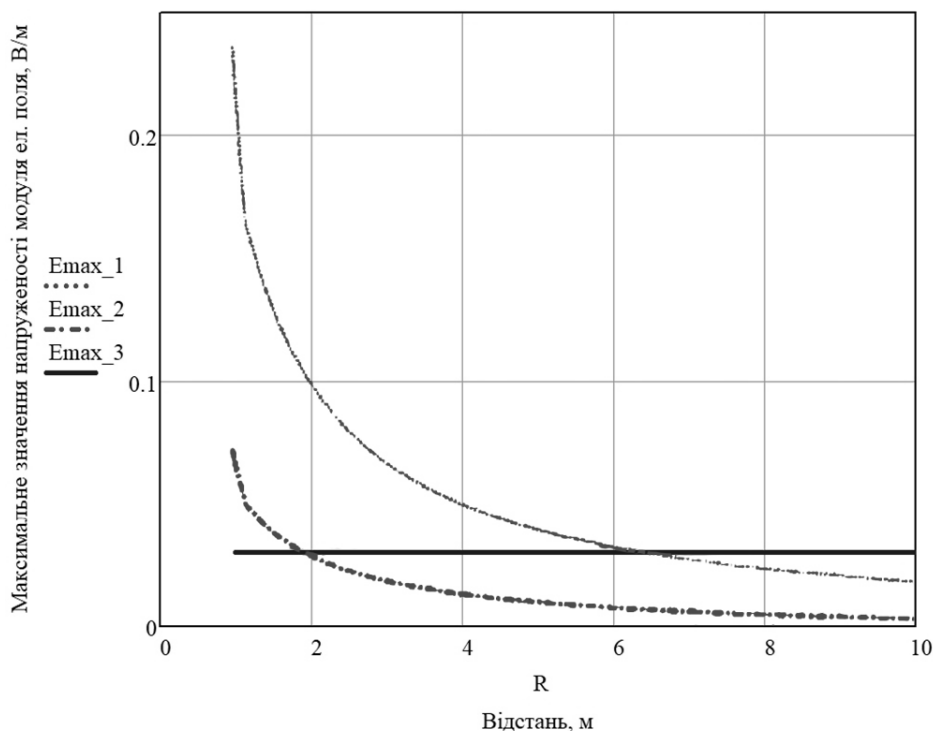


Рис. 3.11. Залежність  $E_{\max}$  від відстані до джерела випромінювання на частоті 300 МГц при значеннях потужності 1 мВт ( $E_{\max\_1}$ ), 100 мкВт ( $E_{\max\_2}$ ), 100 Вт (віддалене джерело на відстані 3 км  $E_{\max\_3}$ )

Для реалізації можливості виявлення малопотужних неконтрольованих і неліцензованих засобів передачі інформації по радіоканалах з потужністю передавача від 100 мкВт по радіоканалах в умовах складної заводої електромагнітної обстановки і підвищення інтегральної чутливості пошукової системи в виділеному приміщенні (розміром до 100 м<sup>2</sup>) розміщуються декілька (2 ... 4) антен з квазіізотропними діаграмами спрямованості. Вони встановлюються з таким розрахунком, що при будь-якому розміщенні джерела ЕМВ його відстань до антени складе 1 ... 5 метрів, що відповідає «ближній» зоні прийому.

Така обробка дає можливість виділити антену, сигнал з виходу якої має найбільший рівень. Цим досягаються такі можливості:

- відселектувати випромінювання джерела ЕМВ на фоні випромінювань штатних радіозасобів;
- компенсувати нерівномірності діаграми спрямованості квазіізотропних антен в різних просторових секторах.

Можливість підключення до одного з входів комутатора зовнішньої («опорної») антени істотно збільшує ймовірність розрізнення зовнішніх і внутрішніх джерел випромінювань в складній електромагнітній обстановці, підвищує швидкодію пошуку нових сигналів.

**Методика виявлення джерел «невдомих» електромагнітних випромінювань в зоні електромагнітної доступності з урахуванням детермінованих та випадкових відхилень параметрів електромагнітного поля складається з наступних кроків:**

1. Радіоприймальний пристрій налаштовується на ділянку частот, що дорівнює смузі  $\Delta F(q)$  з номером  $q$  робочого діапазону RD,  $q = 1, 2, \dots, Q$ ,  $Q = \frac{RD}{\Delta F}$
2. Антенний комутатор підключає до входу пристрою МЕО «опорну» антену з номером  $j$  ( $j=1$ )
3. За відліком спостережуваного енергетичного спектра вхідного випадкового процесу на основі

$$\hat{\sigma}_{\text{уточ.}}^2 = \frac{N}{N_p - N_c} \times \sum_{n \notin \theta_c} x_n, \quad (3.7)$$

розраховується оцінка інтенсивності шуму.

4. Проводиться виявлення вузькосмугових сигналів в смузі частот  $\Delta F(q)$  і запам'ятовування всіх компонент, що перевищили порогове значення.
5. Антенний комутатор підключає до входу пристрою МЕО антену з номером  $j = 2, \dots, J$  після чого виконуються дії відповідно до кроків 3, 4.
6. Для кожного з виявлених сигналів  $u_m(j, t)$ ,  $j = 2, \dots, J$  визначаються номер  $j$  і середня потужність, для якого  $\hat{P}_{j,m}$  максимальна, а також  $\hat{P}_{1,m}$  для опорної антени ( $j = 1$ ).
7. Для кожного з виявлених сигналів розраховується оцінка відмінності спостережуваної інтенсивності  $\Delta P_{\text{спост}}$  за правилом:

$$\Delta P_{\text{спост}} = 10 \lg \left( \frac{\hat{P}_{j,m}}{\hat{P}_{1,m}} \right) + (\mu_c - \mu_o), \quad (3.8)$$

де  $j = 2, \dots, J$  з перерахунком поправочних коефіцієнтів  $\mu_c$  та  $\mu_o$  відповідно до параметрів антен в РЗ («сигнальних») і «опорної».

8. Визначається клас джерела електромагнітних випромінювань  $\zeta_m$  відповідно до правила:

$$\zeta_m = \begin{cases} \rho_{EMD}, \text{ якщо } \Delta P_{\text{спост}} > \Delta P_{\text{пор } 2} \\ \text{не визначено, якщо } \Delta P_{\text{пор } 1} < \Delta P_{\text{спост}} < \Delta P_{\text{пор } 2}, \\ \rho_{\text{зовн}}, \text{ якщо } \Delta P_{\text{спост}} \leq \Delta P_{\text{пор } 1} \end{cases} \quad (3.9)$$

де  $\rho_{EMD}$  - об'єднує джерела, що належать РЗ, а  $\rho_{\text{зовн}}$  - віддалені джерела випромінювань.

9. Далі процедура повторюється для всіх ділянок робочого діапазону, тобто дії по пунктам 1-9 для  $q = 2$  і т.д.

Використовувані пороги  $\Delta P_{\text{пор } 1}$  і  $\Delta P_{\text{пор } 2}$  можуть в кожному конкретному випадку коригуватися з урахуванням властивостей області контролю і розміщення приймальних антен. Крім того, дані пороги можуть бути різними для різних ділянок спектра відповідно до реальних параметрів електромагнітної обстановки.

### **3.6. Оцінка ефективності використання радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки**

Під ефективністю роботи пристроїв МЕО будемо розуміти відношення кількісно виражених результатів, отриманих за допомогою даного пристрою за заданий період часу, до потенційних або максимально можливих за той же період.

Ефективність функціонування пристроїв МЕО в значній мірі залежить від його функціональних і технічних можливостей, що визначають їх продуктивність та виробничу потужність при вирішенні основних завдань радіомоніторингу [18-19].

Відповідно до детермінованого просторово-частотно-часового підходу до оцінювання ефективності функціонування пристроїв МЕО [18-19] їх продуктивність в загальному вигляді визначається виразом [18]:

$$\Pi = \Delta S \times \Delta F \left( \frac{\Delta T}{T} \right), \quad (3.10)$$

де  $\Delta S$ ,  $\Delta F$  и  $\Delta T$  – площа зони ЕМД, частотний діапазон і час контролю;  $T$  – період часу (година, зміна, доба).

Тоді виробничу потужність пристроїв МЕО можна оцінити як [18]:

$$\pi = \Pi \times T_{\text{пл.МЕО}}, \quad (3.11)$$

де  $T_{\text{пл.МЕО}}$  – плановий час радіоконтролю (місяць, квартал, рік).

Технологія використання пристроїв МЕО залежить від контрольованої радіотехнології, характеру вирішуваних завдань, рівня автоматизації їх вирішення і кваліфікації операторів.

Відповідно до [20] Державне підприємство «Український державний центр радіочастот» здійснює плановий періодичний (щомісячний) технічний радіоконтроль випромінювань РЕЗ 23 радіотехнологій загального користування протягом  $T_{\text{пл.МЕО}} = 21$  робочого дня при тривалості робочої зміни  $T_{\text{зм}} = 8$  годин з наданням щомісячної та узагальненої щоквартальної електронної звітності за  $3T_{\text{пл.МЕО}} = 63$  робочих дня. При цьому вирішуються такі завдання моніторингу електромагнітної обстановки з кількісно вираженими результатами:

- контроль відповідності параметрів випромінювань зареєстрованих РЕЗ нормативним документам;
- контроль зайнятості смуг радіочастот;
- виявлення неліцензованих та незаконно встановлених радіопередавачів;
- виявлення джерел радіозавад.

Для їх вирішення використовується сукупність стаціонарних, мобільних і пересувних пристроїв МЕО, що представлені в таблиці 3.3. із зазначенням їх призначення і ступеня мобільності згідно [21]. Детальні технічні характеристики зазначених пристроїв можна знайти в довідниках з радіомоніторингу [22] і на сайтах фірм-виробників.

Перелік використовуваних засобів радіоконтролю

№ п/п	Тип пристрою МЕО	Призначення	Мобільність
1.	PM-172	Виявлення та технічний радіоконтроль	Стаціонарний
2.	PM-2500P	Загальне	Стаціонарний
3.	АИК-С	Загальне	Стаціонарний
4.	АИК-СП6	Виявлення та технічний радіоконтроль	Стаціонарний
5.	UMS-100	Виявлення та технічний радіоконтроль	Стаціонарний
6.	PM-1300 ХХ	Загальне	Мобільний
7.	PM-1300-2P3	Загальне	Мобільний
8.	PM-1300-P3/5	Спеціалізоване	Мобільний
9.	PM-1300-P3/5M	Спеціалізоване	Мобільний

З багатьох причин об'єктивного і суб'єктивного характеру (несправності апаратури контролю і транспортних засобів мобільних пристроїв МЕО, недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу і ін.) Деякі типи пристроїв МЕО не можуть бути використані для виконання завдань радіомоніторингу весь плановий період  $T_{пл.МЕО}$ . Для виявлення конкретних причин такого характеру доцільно ввести показник і критерій ефективності використання пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки.

В якості такого показника пропонується коефіцієнт (показник ефективності) використання існуючого переліку пристроїв МЕО.

Оцінювання показників ефективності має важливе практичне значення. За допомогою показника [18]:

$$E_{пл.МЕО} = \frac{\pi_p}{\pi_{п}}, \quad (3.12)$$

де  $\pi_p$ ,  $\pi_{п}$  – реальна та потенційна продуктивні потужності.

Оцінити ефективність роботи кожного пристрою МЕО за плановий період можна:

$$E_B = \frac{\sum_{z=1}^Z \times \sum_{j=1}^J T_{\text{пл.МЕО}}^{zj}}{T_{\text{пл.МЕО}}}, \quad (3.13)$$

де  $\sum_{z=1}^Z \times \sum_{j=1}^J$  – показники продуктивності пристроїв МЕО [1.10] в певному просторово-частотно-часовому континуумі узагальнені за завданнями і класам радіотехнологій,  $T_{\text{пл.МЕО}}^{zj}$  – кількість робочих змін для вирішення задачі моніторингу електромагнітної обстановки.

Спільне використання показників (3.12) та (3.13) дозволяє розробити напрями вдосконалення (оптимізації) структури пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки.

Продемонструємо практичну спрямованість викладеного методичного підходу до оцінки ефективності роботи і використання існуючого переліку пристроїв МЕО.

Виходячи з виразу [18]:

$$\Delta T^{zj} = \Delta T_{\text{пр}}^{zj} + \Delta T_{\text{непр}}^{zj}, \quad (3.14)$$

необхідно визначити і розрахувати продуктивні і непродуктивні витрати часу при виконанні процедури моніторингу електромагнітної обстановки. Відповідно до [4] було визначено, що загальні непродуктивні витрати часу включають в себе:

- час  $\Delta T_{\text{пз}}$  постановки завдань операторам на зміну;
- час  $\Delta T_{\text{кф}}$  на проведення контролю функціонування пристроїв МЕО;
- час  $\Delta T_{\text{рм}}$  рух до місця проведення моніторингу;
- час  $\Delta T_{\text{рз}}$  на розгортання / згортання пристроїв МЕО;
- час  $\Delta T_{\text{ко}}$  на кінцеву обробку результатів радіомоніторингу.

З урахуванням технології використання пристроїв МЕО непродуктивні витрати часу для стаціонарних, мобільних і портативних застосувань будуть відрізнятися. Непродуктивні витрати часу для стаціонарних пристроїв МЕО розраховуються як:

$$\Delta T_{\text{непр.стац}}^{zj} = \Delta T_{\text{пз}}^{zj} + \Delta T_{\text{кф}}^{zj} + \Delta T_{\text{ко}}^{zj}, \quad (3.15)$$

Непродуктивні витрати часу для мобільних і портативних пристроїв МЕО визначаються наступними часовими параметрами:

$$\Delta T_{\text{непр.моб}}^{zj} = \Delta T_{\text{пз}}^{zj} + \Delta T_{\text{кф}}^{zj} + \Delta T_{\text{ко}}^{zj} + \Delta T_{\text{рм}}^{zj} + \Delta T_{\text{рз}}^{zj}, \quad (3.16)$$

При цьому необхідно враховувати також те, що не всі мобільні пристрої потребують в розгортанні апаратури на місцевості і можуть здійснювати виконання необхідних функціональних операцій в автоматичному режимі під час руху. В цьому випадку час  $\Delta T_{\text{рз}}^{zj} = 0$ .

До продуктивним витрат часу на моніторинг електромагнітної обстановки одного РЕЗ стаціонарними, мобільними і портативними пристроями МЕО були віднесені:

- час  $\Delta T_{\text{МЕО}}^{zj1}$  на виконання операцій по моніторингу електромагнітних випромінювань;
- час  $\Delta T_{\text{фп}}^{zj1}$  на формування електронного протоколу вимірювань;
- час  $\Delta T_{\text{по}}^{zj1}$  на первинну обробку результатів.

Відповідно загальні продуктивні витрати часу для всіх типів пристроїв МЕО дорівнюють:

$$\Delta T_{\text{пр}}^{zj1} = \Delta T_{\text{МЕО}}^{zj1} + \Delta T_{\text{фп}}^{zj1} + \Delta T_{\text{по}}^{zj1}, \quad (3.17)$$

Для проведення відповідних розрахунків було проведено хронометраж продуктивних і непродуктивних витрат часу відповідно до 3.14. Розроблений пристрій на основі методу викладеного у підрозділах 3.4-3.5 дисертаційної роботи умовно позначимо як АДБ-511 та порівняємо його хронометраж використання з пристроями з табл. 3.3 при однаковій продуктивності та вирішенні завдань моніторингу електромагнітної обстановки. У табл. 3.4 для прикладу представлені статистично усереднені результати вимірювання зазначених часових витрат при



вирішенні завдань моніторингу електромагнітної обстановки, наведеними вище типами пристроїв МЕО.

Загальні продуктивні витрати часу на рішення завдань в перебігу зміни  $T_{зм}$  визначені, виходячи з табл. 3.4 за виразом (3.14).

Таблиця 3.4

Результати вимірювань продуктивних і непродуктивних витрат часу по вирішенню завдань МЕО за робочу зміну

Тип пристроїв МЕО	Продуктивні затрати часу за робочу зміну, хв				Непродуктивні затрати часу за робочу зміну, хв					
	$\Delta T_{МЕО}^{zj1}$	$\Delta T_{фп}^{zj1}$	$\Delta T_{по}^{zj1}$	$\Delta T_{пр}^{zj1}$	$\Delta T_{пз}$	$\Delta T_{кф}$	$\Delta T_{рм}$	$\Delta T_{рз}$	$\Delta T_{ко}$	$\Delta T_{непр}^{zj}$
PM-172	25	5	5	40	40	10	0	0	10	60
PM-2500P	25	5	5	40	40	10	0	0	10	60
АІК-С	25	5	5	40	40	10	0	0	10	60
АІК-СП6	25	5	5	40	40	10	0	0	10	60
UMS-100	60	10	10	80	40	10	0	0	10	60
PM-1300 XX	12	4	10	26	40	10	45	0	15	110
PM-1300-2P3	10	4	10	24	40	10	45	0	15	110
PM-1300-P3/5	12	4	10	26	40	10	45	0	15	110
PM-1300-P3/5M	10	4	10	24	40	10	45	0	15	110
АДБ-511	6	4	5	15	40	10	0	0	5	55

Виходячи з таблиці 3.4 загальні продуктивні витрати часу  $\Delta T_{пр}^{zj1}$  для запропонованого пристрою зменшились на 10 хв в порівнянні з середнім часом для мобільних пристроїв МЕО, що становить 40 %; в порівнянні з середнім часом для стаціонарних пристроїв МЕО  $\Delta T_{пр}^{zj1}$  зменшилось на 33 хв, що становить 68.75%. Результати порівняння зображені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Порівняння продуктивних і непродуктивних витрат часу по вирішенню завдань МЕО за робочу зміну запропонованого пристрою АДБ-511 та переліку існуючих мобільних та стаціонарних пристроїв МЕО

	<b>Продуктивні затрати часу за робочу зміну <math>\Delta T_{\text{пр}}^{zj1}</math>, хв</b>	<b>Непродуктивні затрати часу за робочу зміну <math>\Delta T_{\text{непр}}^{zj}</math>, хв</b>
<b>Мобільний: PM-1300 XX, PM-1300-2P3, PM-1300-P3/5, PM-1300-P3/5M</b>	10	55
<b>Стаціонарний: PM-172, PM-2500P, АІК-С, АІК-СП6, UMS-100</b>	33	5

Ефективність використання  $E_b$  (3.13) пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки в урбанізованих середовищах розрахуємо відповідно до детермінованого просторово-частотно-часового підходу [18] за плановий щомісячний технічний радіоконтроль випромінювань РЕЗ радіотехнологій загального користування протягом  $T_{\text{пл.МЕО}} = 21$  робочого дня при тривалості робочої зміни  $T_{\text{зм}} = 8$  годин.

Середня ефективність використання переліку пристроїв МЕО згідно з табл. 3.3 складає  $E_b = 0.71$  (71%), показник ефективності використання запропонованого пристрою АДБ-511, що включає зменшення затрат продуктивного і непродуктивного часу за робочу зміну складає  $E_b = 0.91$  (91%). Підвищення ефективності використання радіотехнічних пристроїв МЕО за плановий період складає 20%.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

В результаті проведених наукових досліджень за розглянутими в третьому розділі дисертаційної роботи проблемами отримані такі найважливіші наукові результати:

1. Обґрунтовано наукові методи синтезу багатоетапного процесу виявлення неконтрольованих та неліцензованих пристроїв передавання інформації по радіоканалах, що включає етапи: отримання «відомих» ЕМВ (I), виявлення «невдомих» ЕМВ (II), ідентифікації та оцінки небезпеки ЕМВ і ПЕМВН (III) та побудова периметру зони ЗМД, локалізації місця розташування виявленого джерела електромагнітних випромінювань і його локалізації (IV). Результати проведених досліджень: «відомі» випромінювання (I), перелік «невдомих» випромінювань (II), переліки ідентифікованих ЕМВ, параметрів цифрових радіосигналів і частот виявлених джерел ЕМВ (III), координати розташування джерела електромагнітних випромінювань в виділеному приміщенні, формування прицільних перешкод на частотах ідентифікованих джерел ЕМВ і зниження рівня побічних випромінювань перевірених технічних засобів (IV).

2. Розроблено програмне забезпечення для побудови периметру зони електромагнітної доступності на основі методу удосконалення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань та відповідного нового математичного апарату. Проведено експериментальну верифікацію програмного забезпечення та наукових результатів, отриманих в попередніх розділах.

3. Розроблено оригінальний підхід, алгоритм функціонування та методи синтезу одноканальних апаратно-програмних засобів МЕО, що вирішують завдання виявлення неконтрольованих та неліцензованих засобів передачі інформації по радіоканалах та забезпечують підвищення швидкодії їх виявлення в умовах радіоперешкод, в тому числі від радіомовних станцій.

4. Розраховано загальні продуктивні витрати часу  $\Delta T_{\text{пр}}^{zj1}$  для запропонованого пристрою МЕО, що зменшились на 10 хв (40 %) в порівнянні з середнім часом для мобільних пристроїв МЕО; в порівнянні з середнім часом для стаціонарних пристроїв МЕО  $\Delta T_{\text{пр}}^{zj1}$  зменшились на 33 хв (68.75%). Показник ефективності використання запропонованого пристрою АДБ-511, що включає зменшення затрат продуктивного і непродуктивного часу за робочу зміну складає  $E_{\text{в}} = 0.91$  (91%). Підвищення ефективності використання радіотехнічних пристроїв МЕО за плановий період складає 20%.

## Список використаних джерел у третьому розділі

1. Андрухович П. О. Аналіз нормативної бази в області захисту інформації / П. О. Андрухович, Д. І. Бахтіяров. // Проблеми навігації і управління рухом: тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів; м. Київ 18-20 листопада. – 2013. – С. 96.
2. Безпека інформаційних мереж та систем: методичні рекомендації по виконанню курсового проекту / Уклад.: Г.Ф. Конахович, Д.І. Бахтіяров, А.С. Муранов. - К.: НАУ, 2016. - 46 с.
3. Хорев А.А. Комплексы радиоконтроля для выявления электронных устройств перехвата информации // Специальная техника.- 2003.- № 1.- С.33-40.
4. Модель электромагнитных излучений проводных интерфейсов передачи данных средств вычислительной техники / А. А.Горбунова, М. А. Коновалюк, А. Б. Баев, А. Б. Кузнецов. // Специальная техника. – 2013. – №5. – С. 26–36.
5. Лыков Ю. В. Анализ источников ПЭМИ в современных ПЭВМ / Ю. В. Лыков. // Радиотехника. – 2012. – №169. – С. 196–207.
6. Закандаев Т. Ю. Оценка возможности перехвата побочных электромагнитных излучений клавиатуры компьютера [Електронний ресурс] / Т. Ю. Закандаев, В. М. Степаненко – Режим доступу до ресурсу: <http://ptmir.ipt.kpi.ua/wp-content/uploads/sites/6/2014/06/Zakandaev.pdf>.
7. Бахтіяров Д. І. Аналіз ефективності комплексного застосування заходів завадозахищеності для підвищення стійкості функціонування засобів керування БПЛА / Д. І. Бахтіяров, І. О. Козлюк. // Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: тези доповідей науково-технічної конференції; м. Київ, 17-19 листопада. – 2014. – С. 50.
8. Bakhtiarov D. I. Evaluation of energy availability of means to communicate with UAVs in conditions of radioelectronic countermeasures by the enemy //Collection" Information technology and security". – 2016. – Т. 4. – №. 1. – С. 118-130.
9. Електричні канали витоку інформації [Електронний ресурс] // Віртуальний університет ЛДУ БЖД. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://goo.su/2mxI>.

10. Захист інформації в автоматизованих системах управління [Текст]: навч. посібник/ Уклад. І.А. Пількевич, Н.М. Лобанчикова, К.В. Молодецька. – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2015. – 226 с.
11. ПЭМИН-2005. Расчет показателей защищенности [Электронный ресурс] // ЦБИ-Сервис. – 2005. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.cbi-info.ru>.
12. WinProp - Propagation Modeling A new dimension of wave propagation and radio network planning [Электронный ресурс] // Altair Hyperworks. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: <https://altairhyperworks.com/product/Feko/WinProp-Propagation-Modeling>.
13. Бахтіяров Д. І. Методика визначення контрольованої зони за допомогою модернізованої моделі Хата / Д. І. Бахтіяров, С. О. Бережко. // Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/АТМ: Науково-технічна конференція, 21-23 листопада 2018 р.: тези доп. – К., 2018. – С. 24.
14. Конахович Г. Ф., Давлет'янц О. І., Лавриненко О. Ю., Бахтіяров Д. І. Порівняльний аналіз перетворення Фур'є, косинусного перетворення та Вейвлет-перетворення як спектрального аналізу цифрових мовних сигналів //Наукоємні технології. – 2015. – Т. 27. – №. 3. – С. 210-220.
15. Konakhovych G. F., Lavrynenko O. Y., Antonov V. V., Bakhtiiarov D. I. A Digital Speech Signal Compression Algorithm Based on Wavelet Transform //Electronics and control systems. – 2016. – №. 2. – С. 30-36.
16. Рембовский А. М. Теоретические исследования, разработка и внедрение семейства радиосистем автоматизированного радиомониторинга, пеленгования и идентификации источников электромагнитного излучения : дис. докт. техн. наук : 05.12.04 / Рембовский А. М. – М., 2003. – 327 с.
17. Електродинаміка та пристрої надвисоких частот: навч. посіб. / В. О. Іванов, Є. І. Габрусенко, Л. В. Сібрук; за ред. В. О. Іванова. - К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту "НАУ-друк", 2009. - 312 с.
18. Методический подход к оценке эффективности работы средств радиоконтроля по комплексному решению задач радиочастотного мониторинга / Н. М.Калюжный, А. И. Задонский, В. А. Ковшарь // Теоретичні основи розробки систем озброєння. – 2015. – С. 99–105.

19. Калюжный Н.М. Системная методология оценивания эффективности функционирования национальных систем радиочастотного мониторинга на основе пространственно-частотно-временного подхода / Н.М. Калюжный, П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарный // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – Вып. 12, № 3. – С. 375-386.

20. Система управління якістю. Виконання робіт з технічного радіоконтролю параметрів випромінювання РЕЗ (ВП). Інструкція І-3.4.3/01-09. Редакція 01. (Введена наказом УДЦР від 19.11.2009 № 522).

21. Слободянюк П.В. Радиомониторинг: вчера, сегодня, завтра (теория и практика построения системы радиомониторинга) / П.В. Слободянюк, В.Г. Благодарный. – Прилуки: Аір-Поліграф, 2010. – 296 с.

22. Довідник з радіомоніторингу / Під ред.. П.В. Слободянюка. – Ніжин: Фспект-Поліграф», 2008. – 588 с.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ПРИЛАДАМИ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ

#### **4.1. Експериментальне дослідження рівнів основних електромагнітних випромінювань. Методи і апаратура моніторингу електромагнітної обстановки**

Всі експериментальні дослідження проводилися в приміщеннях офісного типу з урахуванням наступних їх конструктивних особливостей. При експерименті на одному поверсі враховувалися [1, 2]:

- обмеженість обсягу, відбиття від поверхонь та їх матеріал;
- складна конфігурація приміщення, виступи, повороти, отвори;
- затінення меблями, перегородками, обладнанням (фіксоване затінення);
- затінення людьми (рухоме затінення).

При експерименті на декількох поверхах враховувалися:

- проникнення сигналу через перекриття;
- однотипні конструкції поверхів;
- наявність наскрізних отворів (сходи), шахт ліфтів.

При експерименті поза / всередині приміщень враховувалися:

- перехід сигналу ззовні всередину приміщення;
- перехід сигналу зсередини приміщення назовні;
- вплив дверних і віконних прорізів.

Оцінка структурних закономірностей розподілу поля всередині приміщень базувалась на власних експериментальних дослідженнях, які можна умовно розділити на наступні групи:

- затування в довгих приміщеннях (коридор, тунель);
- затування в затінених приміщеннях (навчальна лабораторія, офіс);

- затухання в відсутності прямої видимості (Г-подібні приміщення, передавач і приймач розташовані в сусідніх приміщеннях);
- затухання сигналу між поверхами;
- затухання при наявності затінення рухомими об'єктами (людьми);
- затухання при переході сигналу з вулиці в приміщення.

На рис. 4.1 наведено приклад приміщення, що пояснює деякі фактори, що враховуються в описі проведених експериментів.

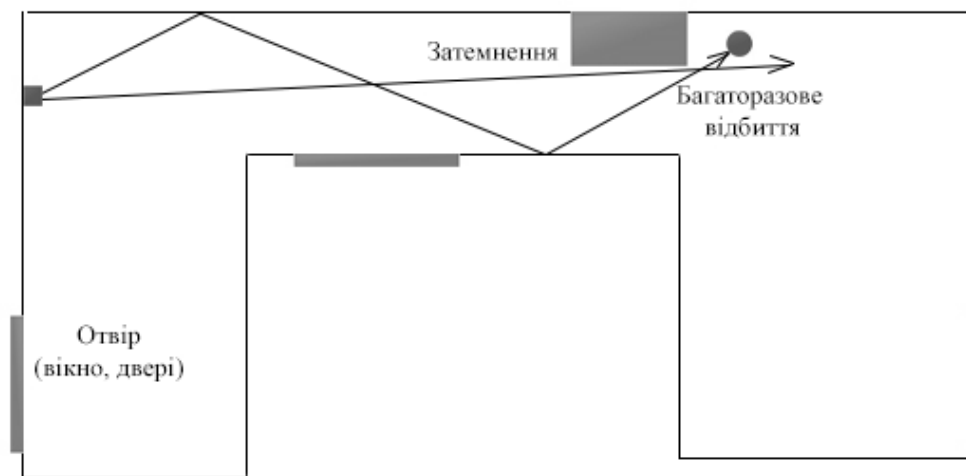


Рис. 4.1. Приклад приміщення, що пояснює фактори, що враховуються при проведенні експериментів

#### ***4.1.1. Схема проведення експериментальних досліджень по вимірюванню рівня сигналу в межах прямої видимості всередині будівлі при різній висоті розташування антен***

На рис. 4.2 представлені схема проведення експериментальних досліджень по вимірюванню рівня сигналу в межах прямої видимості всередині будівлі. Ширина коридору - 3 метри, довжина - понад 41 метр. Висота передавальної антени відносно підлоги (точка 1), відповідно до методики випробувань, становить 1 метр. Висота передавача змінювалася від 0,17 до 1 м. Що дозволило провести дослідження всередині приміщення при низько розташованих антенах. Вимірювання проводяться через кожні 5 метрів.



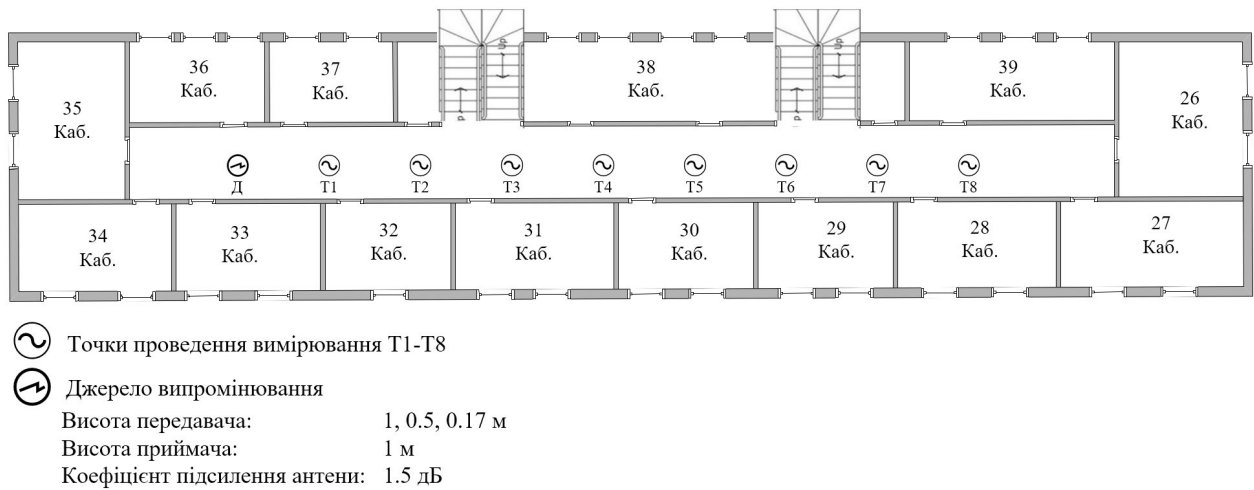


Рис. 4.2. Схема проведення експерименту в межах прямої видимості всередині будівлі

#### 4.1.2. Схема проведення експериментальних досліджень по вимірюванню рівня сигналу на різних поверхах

Дослідження проводилися в триповерховій будівлі при фіксованому положенні передавача (на рис. 4.3 позначено літерою Д), з переміщенням приймача (положення вимірювальних точок на рис. 4.3 позначено T<sub>1</sub>-T<sub>26</sub>)



Рис. 4.3. Схема проведення експерименту на різних поверхах

Виміри проводилися в триповерховій офісній будівлі, і результати були використані для відтворення контурів потужності сигналу на схемі будівлі [1].

Результати вимірювань також оброблялися з використанням моделі втрат на трасі. Додатково можна було оцінити показник статечної залежності від відстані, для одно- і багатоповерхових конструкцій приміщень. Значення цього показника необхідно для розрахунку властивостей внутрішнього середовища при моніторингу електромагнітної обстановки.

Будівля, в якій проводилися експерименти, складається з цегляних стін, товщиною 0.2 м. Деякі кімнати обгороджені скляними перегородками з металевим каркасом, товщиною - 0.08 м. Ширина бетонної підлоги 0.25 м. Відстань між двома міжповерховими перекриттями становить 2.7 м.

Передавач був встановлений на 3-му поверсі будівлі, в точці 1 (Рис. 2.4). Приймач всередині будівлі був мобільним, і вимірювання потужності сигналу були виконані при його різних місцях розташування. В процесі експериментів приймач переміщався на одному поверсі з передавачем і на різних.

Для початку були виміряні показники ослаблення через перегородки. Їх величини залежали від будівельних матеріалів стін і міжповерхових перекриттів. Щоб з'ясувати, яке ослаблення привносить стіна, проводилася наступна процедура. Передавач з сигналом прямої послідовності на частоті 433 МГц був розташований біля стіни з одного боку, а приймач був розташований біля стіни, з іншого боку. Так були визначені додаткові затування, що вноситься перегородкою.

Аналогічно проводилися експерименти по дослідженню загасання радіохвиль при виході з приміщення в зовнішнє середовище (приймач розташовувався на вулиці) [2].

#### ***4.1.3. Експерименти з дослідження впливу людей на розповсюдження електромагнітних випромінювань в приміщенні***

У методиці проведення експериментів по затіненню радіосигналу людьми враховується затінення не тільки прямого променя, але і променів, відбитих від елементів конструкції приміщення. На рис. 4.4 представлений приклад подібного затінення, де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ - кути, що характеризують напрямок прямого променя і кути падіння відбитих променів.

Схема проведення експериментів по затіненню радіосигналів людьми всередині приміщення представлена на рис. 4.5. Кількість людей в експериментах змінювалося від 1 до 8. В окремих досліджах брала участь повна група студентів.

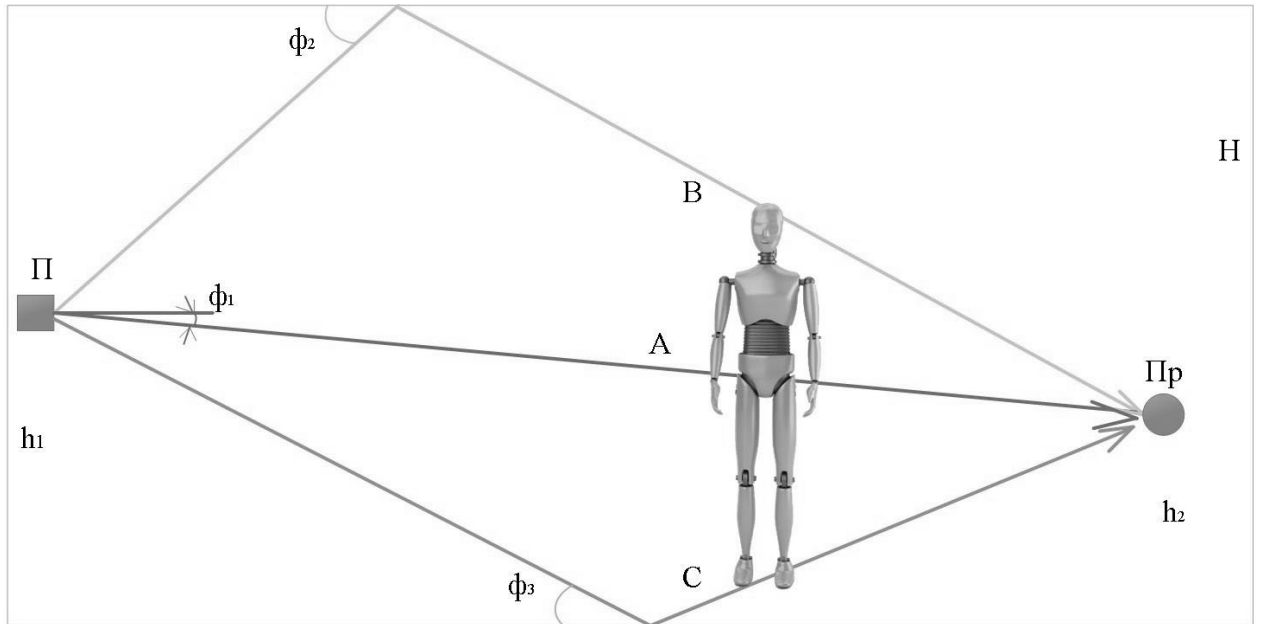
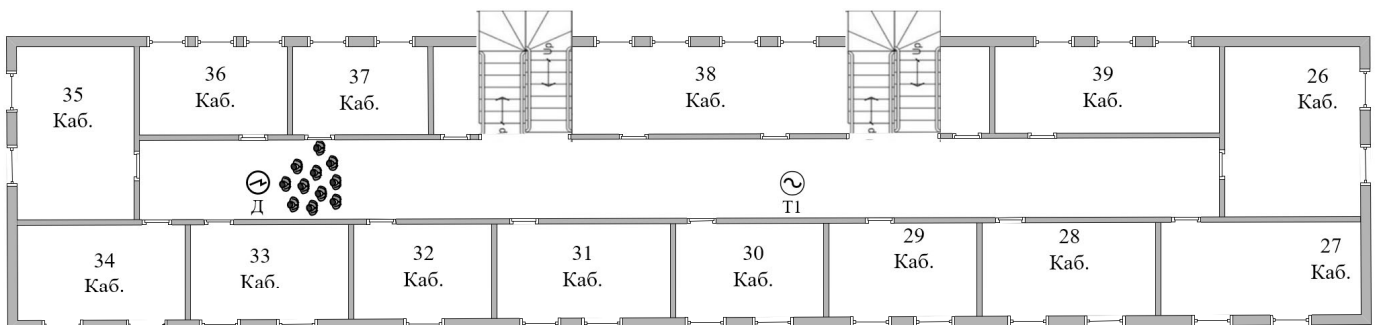


Рис. 4.4. Схема обліку затінення від прямого і відбитих променів тілом ЛЮДИНИ



⊗ Точка проведення вимірювання Т1

⊙ Джерело випромінювання

Висота передавача: 1.5 м  
 Висота приймача: 1.5 м  
 Відстань між передавачем і приймачем: 25 м  
 Коефіцієнт підсилення антени: 1.5 дБ

Рис. 4.5. Схема проведення експерименту по затіненню радіосигналів людьми всередині коридору

#### 4.1.4. Прилади та антени для проведення експериментальних досліджень

Експерименти проводилися в неліцензованих діапазонах частот на стандартизованих пристроях моніторингу і для всепрямованих антен (схема вимірювального стенду та діаграми спрямованості антен наведені на рис. 4.6, 4.7).

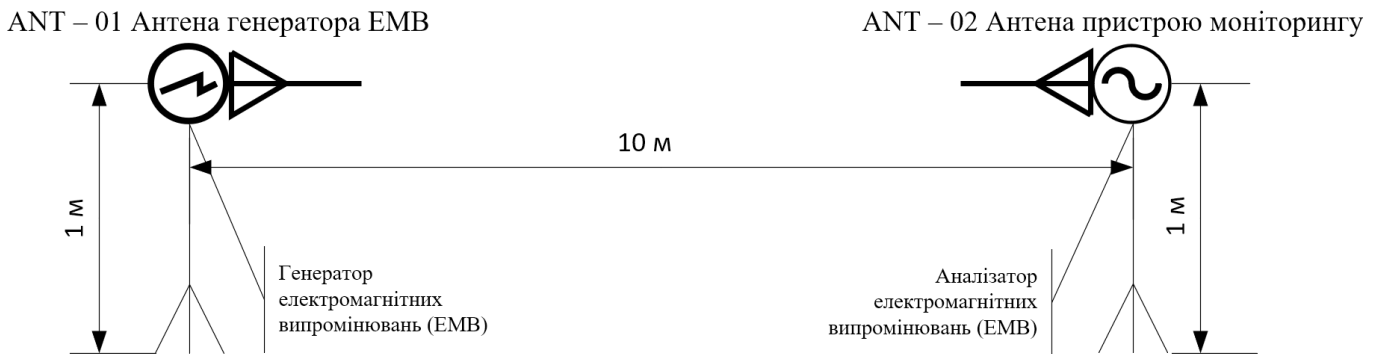


Рис. 4.6. Структурна схема вимірювального стенду

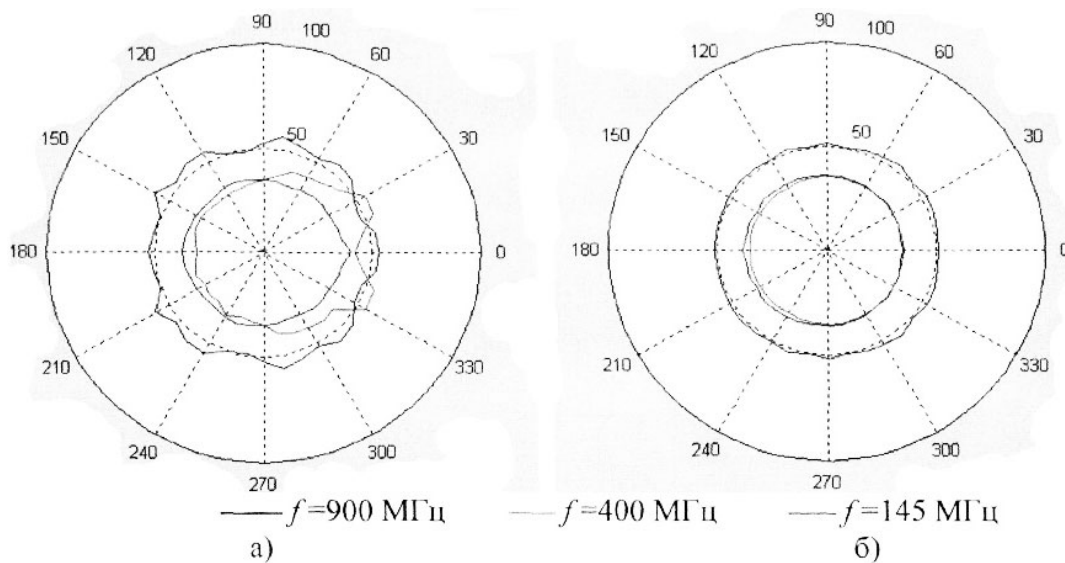


Рис. 4.7. Діаграми спрямованості антен:

а - вертикальна (нормальна) площина, б - горизонтальна площина

Для проведення експериментальних досліджень було створено вимірювальний стенд на основі обладнання компанії Rohde & Schwarz. У якості генератора електромагнітних випромінювань використовувався прилад R&S SML 03, R&S SMH 6 – прилад моніторингу електромагнітної обстановки (аналізатор ЕМВ). У таблиці 4.1 наведені технічні характеристики даного стенду.

Таблиця 4.1

## Технічні характеристики вимірювального стенду

Характеристики	Одиниці вимірювання	Значення
Діапазон частот	МГц	від 10 до 3000
Робоча температура	град с	від -20 до +70
Смуга частот (PBW)	кГц	від $10 \cdot 10^{-3}$ до 3000
Загальна похибка вимірювань	дБ	<1
Середній рівень шуму (DANL)	дБм	-155
Час запису	год	>2
Швидкість вимірювань	с <sup>-1</sup>	1500

Основні вимірювання проводилися в триповерховому офісному (навчальному) корпусі. Про достовірність випробувань можна судити за даними табл. 4.2.

Таблиця 4.2

## Кількість експериментів і середньоквадратичне відхилення

Дослідження	В коридорі	Між поверхами	З людьми	З приміщення в відкритий простір
Кількість досліджень	>100	>30	>30	>20
Відхилення	3 дБ	4 дБ	4 дБ	6 дБ

#### 4.2. Методика проведення вимірювань рівнів основних та побічних електромагнітних випромінювань

Методика вимірювання напруженості поля в діапазоні частот  $0,1 \dots 1$  ГГц була розроблена на основі рекомендацій "методики інструментального оцінювання (вимірювання) напруженості електромагнітного поля випромінювання засобами радіочастотного контролю" [3].

1. Розмістити генератор сигналу і антену ANT – 01 в точці 1, згідно зі схемою випробувань. Антена встановлюється на висоті 1м.

2. Підключити антену ANT – 01 до генератора сигналів кабелем мінімальної довжини. Включити генератор сигналів.

3. Встановити антену ANT – 02 на переносний аналізатор спектру. Включити аналізатор спектру.

4. Встановити на генераторі необхідну частоту.

5. Установити на аналізаторі спектра центральну частоту таку ж як виставлена на генераторі сигналів.

6. Встановити аналізатор спектру в точці 2, згідно зі схемою випробувань.

7. Записати показання аналізатора спектра.

8. Перемістити аналізатор спектру на наступну точку згідно зі схемою випробувань.

9. Повторюючи пункти 7,8, зняти показання аналізатора спектра в усіх точках згідно зі схемою випробувань.

10. Змінити частоту генератора.

11. Повторюючи пункти 5-10, зняти показання аналізатора спектра на інших частотах.

12. Скласти звіт.

Методика експерименту з урахуванням затінення.

1. Розмістити генератор сигналу і антену ANT – 01 в точці 1, згідно зі схемою випробувань. Антена встановлюється на висоті 1м.

2. Підключити антену ANT – 01 до генератора сигналів кабелем мінімальної довжини. Включити генератор сигналів.

3. Встановити антену ANT – 02 на переносний аналізатор спектру. Встановити аналізатор спектру в точці 9, згідно зі схемою випробувань. Включити аналізатор спектру.

4. Встановити на генераторі необхідну частоту.

5. Установити на аналізаторі спектра центральну частоту таку ж як виставлена на генераторі сигналів.

6. Записати показання аналізатора спектра.

7. Розмістити перешкоду в точці 2, згідно зі схемою випробувань.

8. Записати показання аналізатора спектра.
9. Перемістити перешкоду на наступну точку, згідно зі схемою випробувань.
10. Записати показання аналізатора спектра.
11. Повторюючи пункти 9,10, зняти показання аналізатора спектра в усіх точках згідно зі схемою випробувань.
12. Збільшити кількість перешкод.
13. Повторюючи пункти 7-12, зняти показання аналізатора спектра для різної кількості перешкод.
14. Змінити частоту генератора.
15. Повторюючи пункти 5-13, зняти показання аналізатора спектра на інших частотах.
16. Скласти звіт.

#### ***4.2.1. Оцінка можливості перехоплення ПЕМВН у відеосистемі ПК***

Для передачі зображення на ЕПТ-монітор використовуються сигнали інтенсивності для кожного з трьох основних кольорів - RGB (Red - червоний, Green - зелений, Blue-синій), а також сигнали для управління ходом електронного променя - так звані сигнали синхронізації горизонтальної (H) і вертикальної (V) розгортки, які передаються в аналоговому VGA (Video Graphics Array) інтерфейсі.

При підсумовуванні сигналів з трьох каналів в просторі за допомогою випадкової антени виходить сигнал яскравості. У загальному випадку такий сигнал досить просто декодувати зловмисникові навіть, коли в простір випромінюється сигнал тільки від одного RGB каналу. При цьому втрачається тільки інформація про колір виведеного на екран зображення або тексту.

Рідкокристалічні монітори представляють собою набір паралельних скляних пластин, між якими розташовані поляризатори, прозорі адресні електроди і рідкі кристали. Молекули рідких кристалів під впливом електрики можуть змінювати свою орієнтацію і внаслідок цього змінювати властивості світлового променя проходить крізь них. На задній панелі дисплея розташована лампа рівномірної підсвічування. Керуюча електроніка построчно подає напругу на певні електроди, змінюючи

прозорість відповідних комірок рідких кристалів. В результаті створюється зображення на екрані рідкокристалічного монітора. Як правило, застосовуються два типи інтерфейсу: аналоговий VGA і цифровий DVI (Digital Visual Interface).

В основі цифрового протоколу знаходиться запропонована Silicon Image технологія швидкодіючого послідовного інтерфейсу PanelLink, що використовує метод різницевих сигналів з мінімізацією переходів - Transition Minimised Differential Signalling (TMDS). Фактично, даний стандарт об'єднує три підвиди: тільки аналоговий DVI-A, що передає аналоговий сигнал у форматі VGA, чисто цифровий DVI-D і суміщений DVI-I, який об'єднує DVI-A і DVI-D в одному роз'ємі [4, 5].

Оскільки в DVI-A і DVI-I інтерфейсах, для сумісності з інтерфейсом VGA, відеоінформація продубльована в аналоговому вигляді то вона, так само, як і у ЕПТ-моніторів може бути перехоплена зловмисником.

Для порівняльного аналізу та визначення підвищення рівня ПЕМВН над рівнем шуму індустриального характеру при використанні кабелів VGA, DVI, HDMI було проведено лабораторне дослідження цих кабелів на відстанях 1 м і 3 м, а також потенційне поле корекції рівня ПЕМВН, достатнє для подальшого відновлення вихідної інформації. Досліди проводились з мінімізацією зовнішніх та внутрішніх впливів у витягнутому стані кабеля.

Для зручності обробки статистичних даних результати зводяться до форми відмінності між рівнем шуму в приміщенні лабораторії за наявності ефекту ПЕМВН компонентів стандартів VGA, DVI, HDMI та без нього [6].

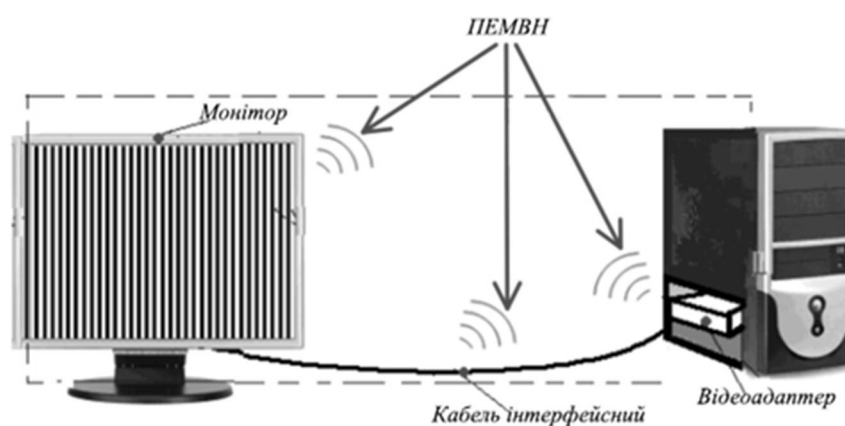


Рис. 4.8. Джерела небезпечних сигналів у відеосистемі



Таблиця 4.3

Рівень ПЕМВ кабельних інтерфейсів VGA, DVI, HDMI на відстані 1 м

Частота, МГц (номер гармоніки)	VGA, дБмкВ/м	DVI, дБмкВ/м	HDMI, дБмкВ/м
74,3 (1)	16,32	0	23,17
222,9 (3)	7,4	0	19,16
371,5 (5)	0	4,71	14,57
519,9 (7)	0	3,57	27,86
668,7 (9)	0	0	28,64
965,9 (13)	0	3,73	16,74
1114,5 (15)	0	0	8,51
173,3 (1)	0	0	18,32
519,9 (3)	0	3,57	27,86
866,5 (5)	0	0	6,98
247,5 (5)	0	0	19,54
346,7 (7)	0	0	15,63
544,5 (11)	0	0	11,91
643,5 (13)	0	0	8,64
198,1 (3)	0	0	18,91

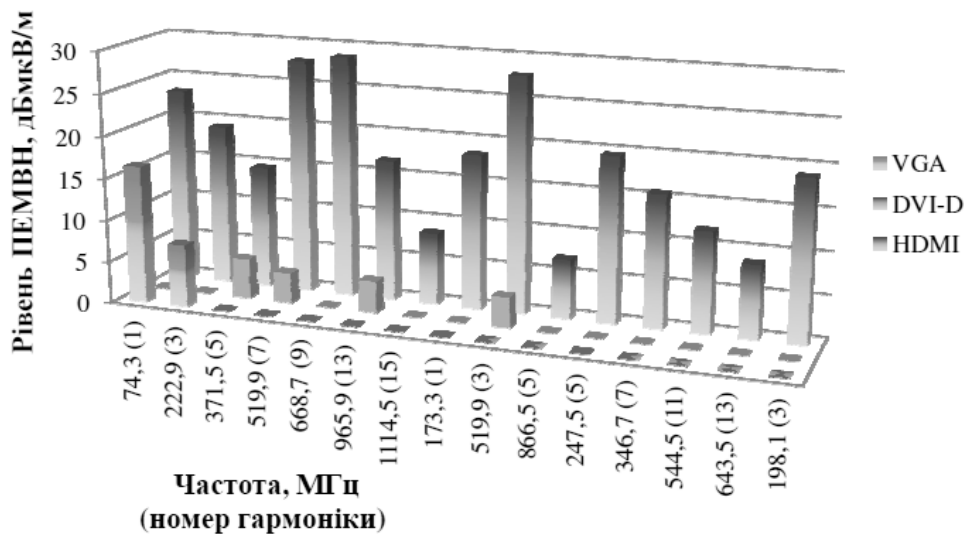


Рис. 4.9. Результати дослідження рівнів ПЕМВ від кабельних інтерфейсів VGA, DVI, HDMI на відстані 1 м

Таблиця 4.4

Рівень ПЕМВ кабельних інтерфейсів VGA, DVI, HDMI на відстані 3 м

Частота, МГц (номер гармоніки)	VGA, дБмкВ/м	DVI, дБмкВ/м	HDMI, дБмкВ/м
74,3 (1)	11,15	0	17,32
222,9 (3)	5,1	0	14,92
371,5 (5)	0	3,11	10,53
519,9 (7)	0	4,19	18,72
668,7 (9)	0	0	16,91
965,9 (13)	0	4,76	12,09
1114,5 (15)	0	0	5,73
173,3 (1)	0	0	11,36
519,9 (3)	0	4,19	18,72
866,5 (5)	0	0	4,31
247,5 (5)	0	0	18,12
346,7 (7)	0	0	13,75
544,5 (11)	0	0	8,98
643,5 (13)	0	0	5,92
198,1 (3)	0	0	15,27

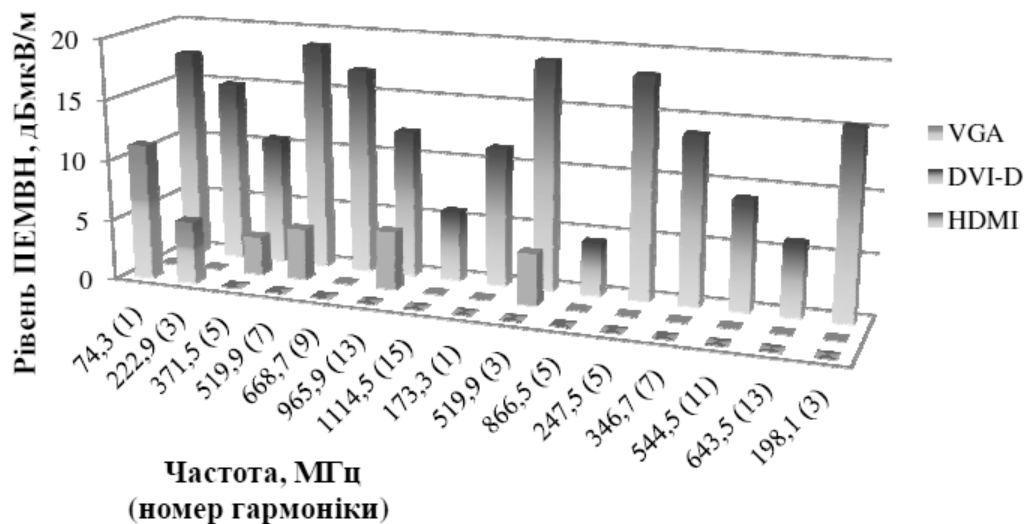


Рис. 4.10. Результати дослідження рівнів ПЕМВ від кабельних інтерфейсів VGA, DVI, HDMI на відстані 3 м

Результати всіх проведених досліджень відповідають фізичним принципам розповсюдження електромагнітного випромінювання, а також відслідковуються

закономірності зміни ПЕМВН за різних умов, що є взаємною гарантією точності проведених досліджень.

Відповідно до отриманих значень ПЕМВН, оптимальна відстань для спеціальних досліджень кабелю протоколу HDMI - це відстань 3 м, оскільки ця відстань є межею для частот зі слабким рівнем ПЕМВН. Співвідношення сигнал / шум на таких частотах з більшої відстані не перевищує 3 дБмВ / м, тому ПЕМВН на таких частотах не можна перехоплювати з більшої відстані з подальшим відновленням інформаційного сигналу.

Таким чином, найбільшу небезпеку з точки зору витoku інформації являє випромінювання відеосистеми персонального комп'ютера, до складу якої входить монітор, відеоадаптер та інтерфейсний кабель. [4, 6]

### **4.3. Експериментальна оцінка можливості перехоплення ПЕМВН**

Прикладом доступного перехоплення ПЕМВН може слугувати програма, яка з наведень монітора та відеокарти відновлює зображення (TempestSDR), а в якості апаратного засобу може виступати SDR-приймач в тому числі RTL-SDR, AirSpy, SDRplay, HackRF, які коштують від 20 доларів. Отже, такі програмні рішення знижують витрати і збільшують мобільність зловмисника порівняно з існуючими рішеннями. Це дозволяє провести додаткову пост-обробку, що покращує відношення сигнал / шум.

TempestSDR - це інструмент з відкритим кодом, який дозволяє використовувати будь-який SDR приймач, який підтримує бібліотеку ExtIO (наприклад, RTL-SDR, AirSpy, SDRplay, HackRF) для отримання ПЕМВН, випромінюваних з екрана, і перетворити цей сигнал назад в живий образ. Це дозволяє переглядати те, що на екрані через стіну, не використовуючи фізичних кабелів. Якщо використовується спрямована антена з високим коефіцієнтом посилення, можливо, можна також отримувати зображення на відстані до 20 метрів [6].

Експерименти проводилися у будівлі, розташованій в напівміському середовищі. Незважаючи на те, що у будівлі знаходилося більше 20 працюючих комп'ютерів, при експериментах вдавалося перехоплювати текстові зображення на

відстанях 10 м через два офісні приміщення з трьома гіпсокартонними стінами, розташованих на тому ж поверсі будівлі [6].

Традиційно вважається, що перехоплення ПЕМВН і виділення корисної інформації - дуже трудомістке і дороге завдання, що вимагає застосування складної спеціальної техніки. Але, насправді для перехоплення побічного електромагнітного випромінювання засоби обчислювальної техніки противника можуть використовуватися як звичайні засоби радіо-, радіотехнічної розвідки, так і спеціальні засоби розвідки, які називаються технічними засобами розвідки побічних електромагнітних випромінювань і наведень (ТЗР ПЕМВН). Зазвичай ТЗР ПЕМВН розташовуються за межами об'єкта інформатизації (контрольованої зони об'єкта).



Рис. 4.11. Експериментальна установка на базі приймача RTL-SDR V3 та програмного забезпечення TempestSDR

Приймач містить два основних чіпи [7]:

- R820T2 - це тюнер із заявленою смугою від «42 до 1002 МГц» (реально більше - 24 ~ 1700 МГц) і придушенням бічної «Image rejection: 65 dBc».

На виході проміжна частота 3.57 МГц.

- RTL2832U - це 8 бітний АЦП з частотою дискретизації 28.8 МГц (декодер DVB-T і робота з USB). У базовому режимі он оцифровує околиці 3.57 МГц.

Що стосується смуги в 2-3 MSPS, яку ми бачимо в ПЗ TempestSDR, то сигнал обмежується вже після АЦП - для DAB (Digital Audio Broadcasting), де SDR режим використовувався розробником чіпу, велика смуга була не потрібна.

У RTL-SDR V3 можна також переключитися зі звичайного квадратурного режиму (з використанням R820T2) на директ семплінг, RTL2832U буде оцифровувати сигнал з інших ніжок. Деяка проблема цього режиму в тому, що після половини частоти дискретизації 14.4 МГц (Котельников-Найквіст), піде друга зона Найквіста і ми фактично отримуємо дзеркальну смугу прийому, яку можна прибрати тільки фільтрами на вході.

На комп'ютер, з якого необхідно зчитати інформацію, впроваджується спеціальна програма, яка здійснює пошук необхідної інформації в пам'яті. У разі виявлення відповідної інформації, вона використовується для модуляції сигналів ПЕМВН. При перемиканні частоти оновлення кадрів дисплея з 60 на 75 Гц, спектральний склад тестового сигналу міняється. У першому випадку в спектрі містяться гармоніки з частотами 272,15; 371,15 і 455 МГц (VGA інтерфейс), а в другому - 259,62; 380,13 і 455 МГц (DVI та HDMI інтерфейси) [6]. Перша трійка гармонік (або одна з них) може використовуватися для передачі "0", друга - "1".



Рис. 4.12. Демонстрація зняття ПЕМВН з інтерфейсу VGA з роздільною здатністю 1280x1024 пікселів та частотою оновлення 75 Гц (на частоті 455 МГц і відстані 7,5 метрів) за допомогою програми TempestSDR та приймача RTL SDR V3

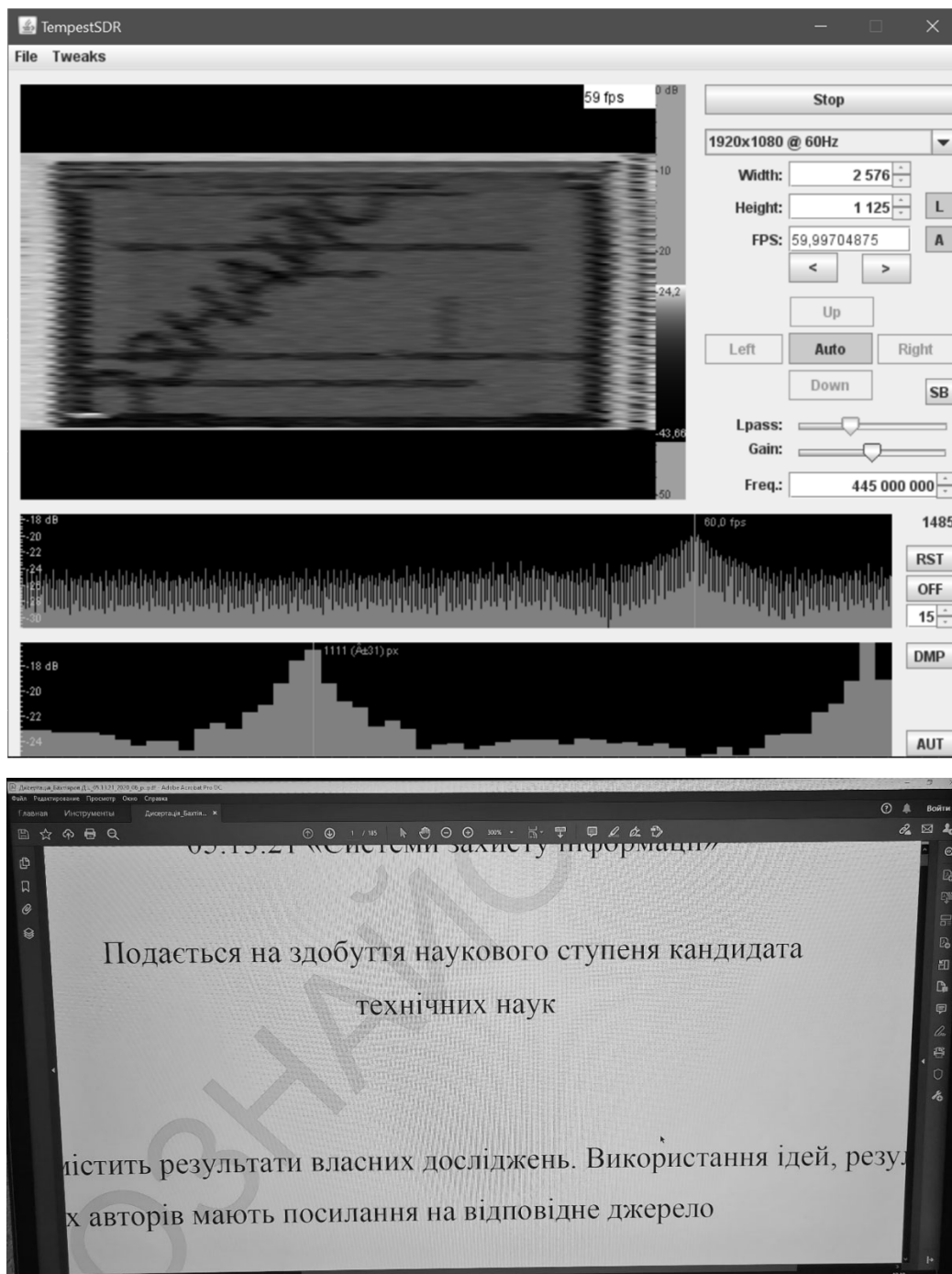


Рис. 4.13. Демонстрація зняття ПЕМВН з інтерфейсу HDMI з роздільною здатністю 1920x1080 пікселів та частотою оновлення 60 Гц (на частоті 455 МГц і відстані 15 метрів) за допомогою програми TempestSDR та приймача RTL SDR V3

Результати всіх проведених досліджень відповідають фізичним основам збільшення електромагнітного випромінювання, а також відстежується регулярність змін ПЕМВН в різних умовах, забезпечуючи точність проведених досліджень.

Відповідно до отриманих значень ПЕМВН, оптимальною відстанню для спеціальних досліджень за протоколом HDMI є відстань  $S$ , що дорівнює 3 м, оскільки ця відстань є межею для частот зі слабким рівнем ПЕМВН. Співвідношення сигнал/шум на таких частотах з більшої відстані не перевищує 3 дБмкВ / м, тому перехоплення ПЕМВН на таких частотах з більшої відстані з подальшим відновленням інформаційного сигналу неможливе [8].

Максимальна відстань перехоплення (з можливістю подальшого отримання інформаційного сигналу) також була визначена при регулюванні кабелю без активного та непрямого захисту, що означає  $S'$ , що дорівнює 15 м [6].

Таблиця 4.5

Рівень ПЕМВ кабельних інтерфейсів VGA, DVI, HDMI на максимальній відстані

Частота, МГц (номер гармоніки)	VGA, дБмкВ/м	DVI, дБмкВ/м	HDMI, дБмкВ/м
74,3 (1)	3,72	0	22,71
222,9 (3)	0	0	14,69
371,5 (5)	0	0	12,29
455 (7)	0	3,27	29,12
668,7 (9)	0	0	28,61
965,9 (13)	0	3,12	13,89
1114,5 (15)	0	0	6,37
173,3 (1)	0	0	10,16
455 (3)	0	3,27	29,02
866,5 (5)	0	0	5,2
247,5 (5)	0	0	17,66
346,7 (7)	0	0	14,4
544,5 (11)	0	0	10,75
643,5 (13)	0	0	7,29
198,1 (3)	0	0	16,43
<b>Відстань перехоплення ПЕМВН, м</b>	<b>7,5</b>	<b>9</b>	<b>15</b>

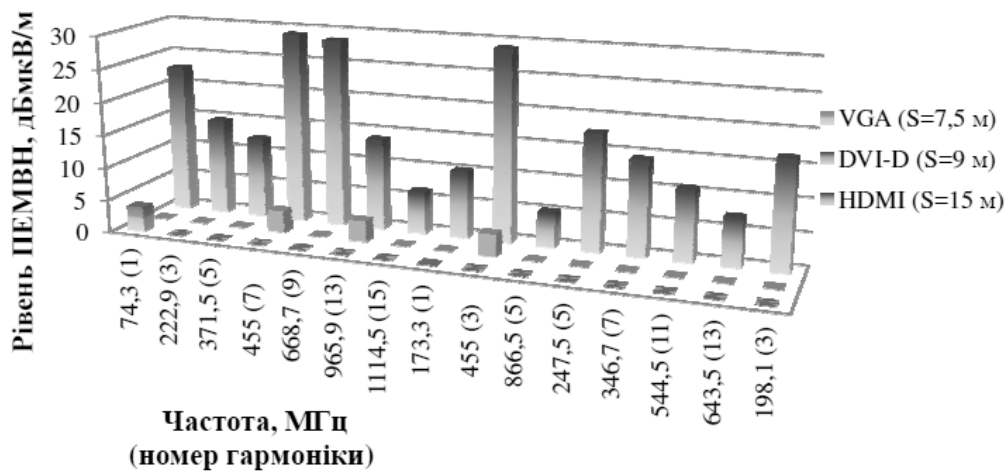


Рис. 4.14. Результати дослідження рівнів ПЕМВ від кабельних інтерфейсів VGA, DVI, HDMI на максимальній відстані перехоплення

На підставі результатів вимірювань, отриманих на відстані  $S'$ , можна оцінити збільшення рівня ПЕМВН за наявності зовнішніх впливів. У середньому, при дослідженні скручених кабелів, збільшення рівня ПЕМВН протоколу HDMI знаходиться в діапазоні від 50% до 100% від значення ПЕМВН, коли кабель досліджується в розтягнутому стані, але при порівнянні кабелів для зчитування рівня ПЕМВН протоколів VGA та DVI, спостерігається зростання не більше ніж на 40%.

Слід зазначити, що дальність прийому сигналу за допомогою такого програмного забезпечення близько декількох десятків метрів, а швидкість передачі даних досягає 60 біт/с. Ця розробка є принципово новим кроком в розвитку приймачів ПЕМВН, оскільки в якості приймача може використовуватись смартфон або планшета на базі ОС Android.

Використання ж професійного устаткування дозволить додатково збільшити зону можливого прийому.

#### 4.4. Порівняння результатів експериментального визначення зони електромагнітної доступності за допомогою пристроїв МЕО та розрахункових методів

Зону електромагнітної доступності будемо для наступного приміщення: Рис. 4.15. Корпус триповерховий, блочно-панельний, висота кожного поверху з урахуванням міжповерхових перекриттів – 4 м. У приміщеннях будівлі розташовані робочі письмові столи.



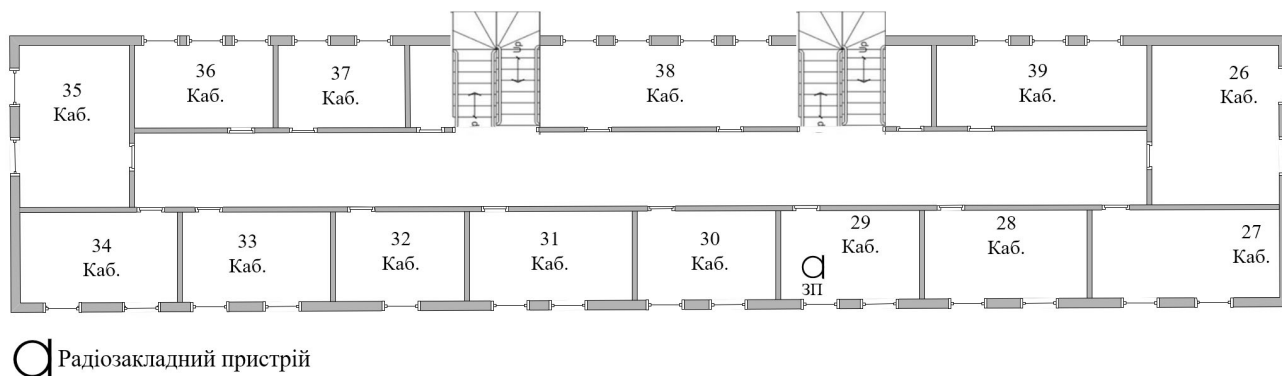


Рис. 4.15. План будівлі

В якості джерела випромінювання використовуємо радіомікрофон з підвищеною чутливістю SIM-DSS-5000, що позначено на рисунку 4.15 – ЗП з наступними характеристиками [9-11]:

- потужність – 2,3 мВт;
- габарити - 94x57x11 мм;
- робоча частота - 96,1 МГц. (частота передавача регульована)

В якості приладу виявлення радіовипромінювань використаємо обладнання Rohde & Schwarz, що описано у другому розділі дисертаційної роботи.

Спочатку знаходимо максимальне значення напруженості поля джерелом якого є закладний пристрій за формулою 4.1:

$$E_d = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot D}}{r}, \quad (4.1)$$

де:  $P$  – потужність закладного пристрою;  $r$  – відстань від джерела випромінювання;  $D$ - коефіцієнт направленої дії антени (приблизно 2 дБ).

Для визначеного закладного пристрою значення  $E_d = 0.295$  В/м (49.396 дБмВ/м).

Розрахунок втрат розповсюдження  $L$  проводимо за декількома сценаріями внутрішньо-зовнішнім, внутрішньо-внутрішнім сценаріями.

Для першого напрямку (внутрішньо-зовнішній) використаємо наступну формулу для визначення втрат сигналу (4.2):

$$L = 34.2 + 20 \cdot \lg(f) + 10 \lg(d^2) + L_{\omega i}, \quad (4.2)$$

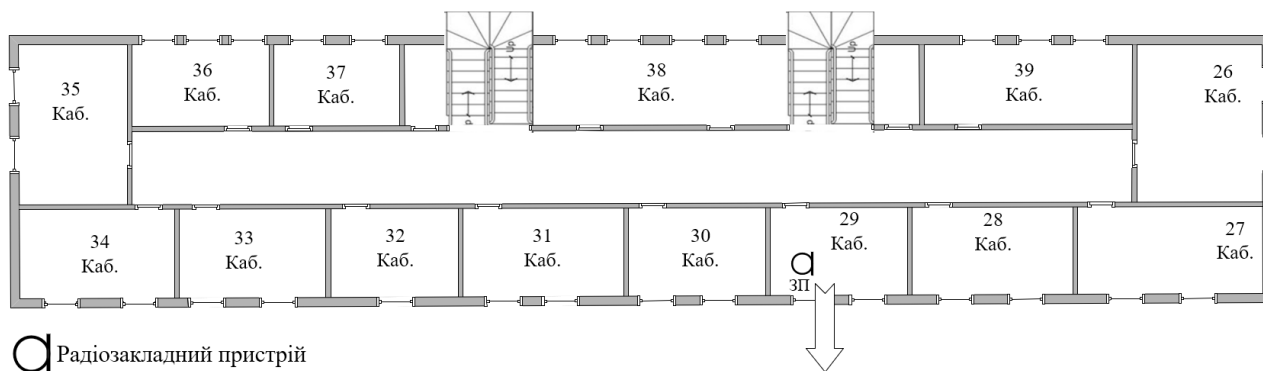


Рис. 4.16. Схематичне зображення першого напрямку розповсюдження сигналу

Змінюючи значення відстані  $d$  знаходимо порогове значення за якого приймач не зможе зафіксувати електромагнітне поле. Такому значенню, у даному випадку, відповідає відстань 24 м.

$$L = 34.2 + 20 \cdot \lg(96.1) + 10 \lg(24^2) + 3.4 = 104.859 \text{ дБ.}$$

Напруженість поля на відстані 24м від джерела, з урахуванням обрахованих втрат, буде становити – 55.463 дБмВ/м (1.686 мкВ/м).

Далі за допомогою визначення діючої висоти антени встановимо чи зможе приймач (із чутливістю 2,5 мкВ) зафіксувати даний сигнал. Використаємо наступну формулу (4.3):

$$e = E \cdot h, \quad (4.3)$$

де  $e$  - значення ЕРС що наводиться на антену приймача;  $h$  - діюча висота антени;  $E$  - напруженість поля в точці прийому.

Значення діючої висоти антени можна знайти з наступного співвідношення:

$$h = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{G \cdot R_{\text{вх}}}{120}}, \quad (4.4)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі, м;  $G$  – коефіцієнт підсилення антени;  $R_{\text{вх}}$  - вхідний опір антени приймача.

$$h = \frac{3,125}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 50}{120}} = 1,437 \text{ м,}$$

Відповідно до цього з урахуванням формули 4.3 визначимо електрорушійну силу, що наводиться на антену приймача:

$$e = 1.686 \cdot 1.437 = 2.424 \text{ мкВ},$$

отже сигнал вже не може бути зафіксований. Тобто можемо зробити висновок, що в цьому напрямку, починаючи з 24-х метрів і далі сигнал цим приймачем зафіксувати не можливо.

*Для другого напрямку (внутрішньо-внутрішній)* використаємо наступну формулу для визначення втрат сигналу:

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(d) + 10 \cdot \lg(f) + k \cdot L_{\omega}, \quad (4.5)$$

де  $L_{\omega}$  створена функція втрат у стіні від частоти;  $k$  – кількість подоланих стін.

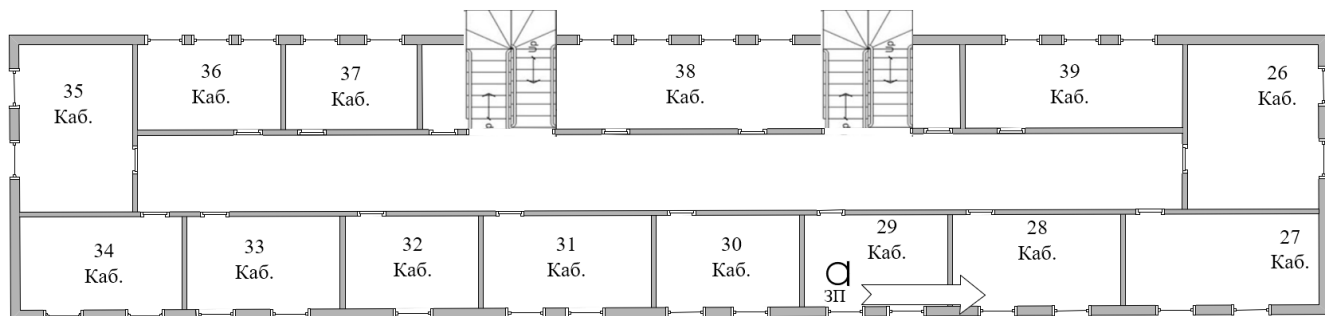


Рис. 4.17. Схематичне зображення другого напрямку розповсюдження сигналу

Змінюючи значення відстані  $d$  знаходимо порогове значення за якого приймач не зможе зафіксувати електромагнітне поле. Такому значенню, у даному випадку, відповідає відстань 10 м.

Відповідно до виведеної функції 2.16:

$$L_{\omega} =$$

$$\begin{cases} 3,363 \cdot 10^{-4} f^3 - 0,097 f^2 + 7,882 f - 198,018 & 30 \text{ МГц} \leq f < 130 \text{ МГц} \\ 1,792 \cdot 10^{-5} f^3 - 0,015 f^2 + 4,277 f - 452,657 & 130 \text{ МГц} \leq f < 300 \text{ МГц} \\ 3,167 \cdot 10^{-7} f^3 - 8,4 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,668 f - 188,5 & 300 \text{ МГц} \leq f \leq 1000 \text{ МГц} \end{cases}$$

значення втрат у стіні дорівнює  $L_{\omega} = 37,906$  дБ.

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(10) + 10 \cdot \lg(96.1) + 1 \cdot 37,906 = 114.733 \text{ дБ.}$$

Напруженість поля на відстані 10 м від джерела, з урахуванням обрахованих втрат, буде становити  $-65.337 \text{ дБмВ/м}$  ( $0.541 \text{ мкВ/м}$ ).

Далі за допомогою визначення діючої висоти антени за формулою 4.4 встановимо чи зможе приймач (із чутливістю  $2,5 \text{ мкВ}$ ) зафіксувати даний сигнал:

$$h = \frac{3,125}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 50}{120}} = 1,437 \text{ м,}$$

відповідно до цього з урахуванням формули 4.1 визначимо електрорушійну силу, що наводиться на антену приймача:

$$e = 0,541 \cdot 1,437 = 0,778 \text{ мкВ,}$$

отже сигнал вже не може бути зафіксований. Тобто можемо зробити висновок, що в цьому напрямку, починаючи з 10 метрів і далі сигнал цим приймачем зафіксувати не можливо.

Для *третього напрямку (Внутрішньо-внутрішній)* використаємо наступну формулу для визначення втрат сигналу:

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(d) + 10 \cdot \lg(f) + k \cdot L_{\omega}, \quad (4.6)$$

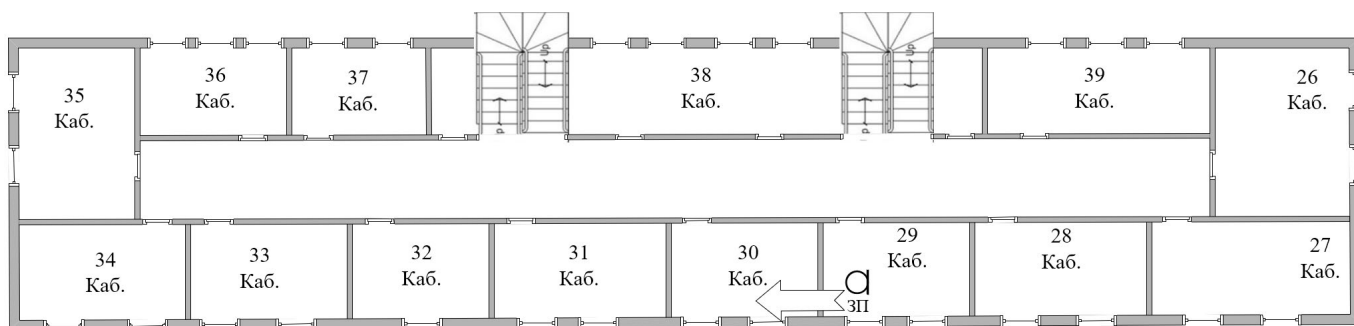


Рис. 4.18. Схематичне зображення третього напрямку розповсюдження сигналу

Змінюючи значення відстані  $d$  від джерела знаходимо порогове значення за якого приймач не зможе зафіксувати сигнал. Такому значенню, у даному випадку, відповідає відстань 10 м.

Відповідно до виведеної залежності 2.16:

$$L_{\omega} = \begin{cases} 3,363 \cdot 10^{-4} f^3 - 0,097 f^2 + 7,882 f - 198,018 & 30 \text{ МГц} \leq f < 130 \text{ МГц} \\ 1,792 \cdot 10^{-5} f^3 - 0,015 f^2 + 4,277 f - 452,657 & 130 \text{ МГц} \leq f < 300 \text{ МГц} \\ 3,167 \cdot 10^{-7} f^3 - 8,4 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,668 f - 188,5 & 300 \text{ МГц} \leq f \leq 1000 \text{ МГц} \end{cases}$$

значення втрат у стіні дорівнює  $L_{\omega} = 37,906$  дБ.

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(10) + 10 \cdot \lg(96.1) + 1 \cdot 37,906 = 114,733 \text{ дБ.}$$

Напруженість поля на відстані 10 м від джерела, з урахуванням обрахованих втрат, буде становити – 65.337 дБмВ/м ( 0.541 мкВ/м).

Далі за допомогою визначення діючої висоти антени за формулою 4.4 встановимо чи зможе приймач (із чутливістю 2,5 мкВ) зафіксувати даний сигнал:

$$h = \frac{3,125}{3.14} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 50}{120}} = 1,437 \text{ м,}$$

відповідно до цього з урахуванням формули 4.3 визначимо електрорушійну силу, що наводиться на антену приймача:

$$e = 0,541 \cdot 1,437 = 0,778 \text{ мкВ,}$$

отже сигнал вже не може бути зафіксований. Тобто можемо зробити висновок, що в цьому напрямку, починаючи з 10 метрів і далі сигнал цим приймачем зафіксувати не можливо і результати третього напрямку аналогічні до другого.

*Для четвертого напрямку (Внутрішньо-внутрішній)* використаємо наступну формулу (4.7) для визначення втрат сигналу:

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(d) + 10 \cdot \lg(f) + k \cdot L_{\omega}, \quad (4.7)$$

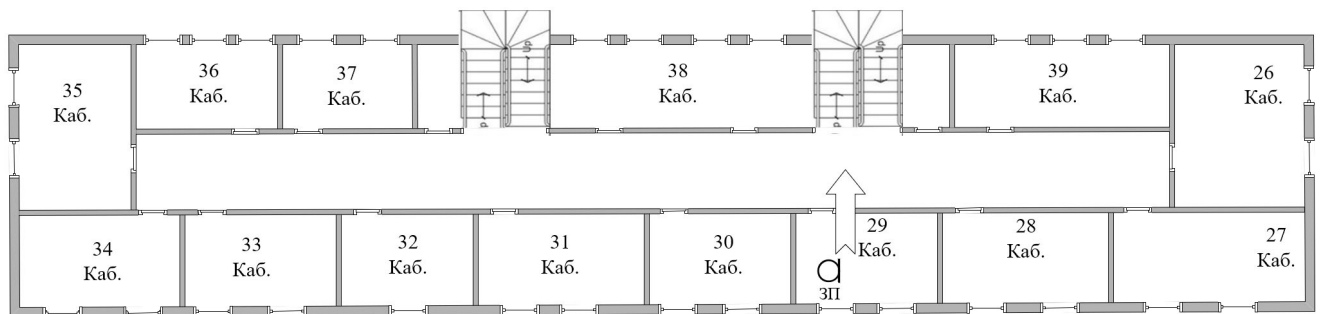


Рис. 4.19. Схематичне зображення четвертого напрямку розповсюдження сигналу

Змінюючи значення відстані  $d$  знаходимо порогове значення за якого приймач не зможе зафіксувати сигнал. Такому значенню, у даному випадку, відповідає відстань 8,5 м.

Відповідно до виведеної залежності 2.16:

$$L_{\omega} = \begin{cases} 3,363 \cdot 10^{-4} f^3 - 0,097 f^2 + 7,882 f - 198,018 & 30 \text{ МГц} \leq f < 130 \text{ МГц} \\ 1,792 \cdot 10^{-5} f^3 - 0,015 f^2 + 4,277 f - 452,657 & 130 \text{ МГц} \leq f < 300 \text{ МГц} \\ 3,167 \cdot 10^{-7} f^3 - 8,4 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,668 f - 188,5 & 300 \text{ МГц} \leq f \leq 1000 \text{ МГц} \end{cases}$$

значення втрат у стіні дорівнює  $L_{\omega} = 37,906$  дБ.

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(8,5) + 10 \cdot \lg(96,1) + 1 \cdot 37,906 = 113,321 \text{ дБ.}$$

Напруженість поля на відстані 9 м від джерела, з урахуванням обрахованих втрат, буде становити – 63.925 дБмВ/м (0.636 мкВ/м).

Далі за допомогою визначення діючої висоти антени за формулою 4.4 встановимо чи зможе приймач (із чутливістю 2,5 мкВ) зафіксувати даний сигнал:

$$h = \frac{3,125}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 50}{120}} = 1,437 \text{ м,}$$

відповідно до цього з урахуванням формули 4.1 визначимо електрорушійну силу, що наводиться на антену приймача:

$$e = 0.636 \cdot 1.437 = 0.915 \text{ мкВ,}$$

отже сигнал вже не може бути зафіксований. Тобто можемо зробити висновок, що в цьому напрямку, починаючи з 8,5 метрів і далі сигнал цим приймачем зафіксувати не можливо.

За отриманими результатами приведемо графічне зображення зони електромагнітної доступності / контрольованої зони [11]:

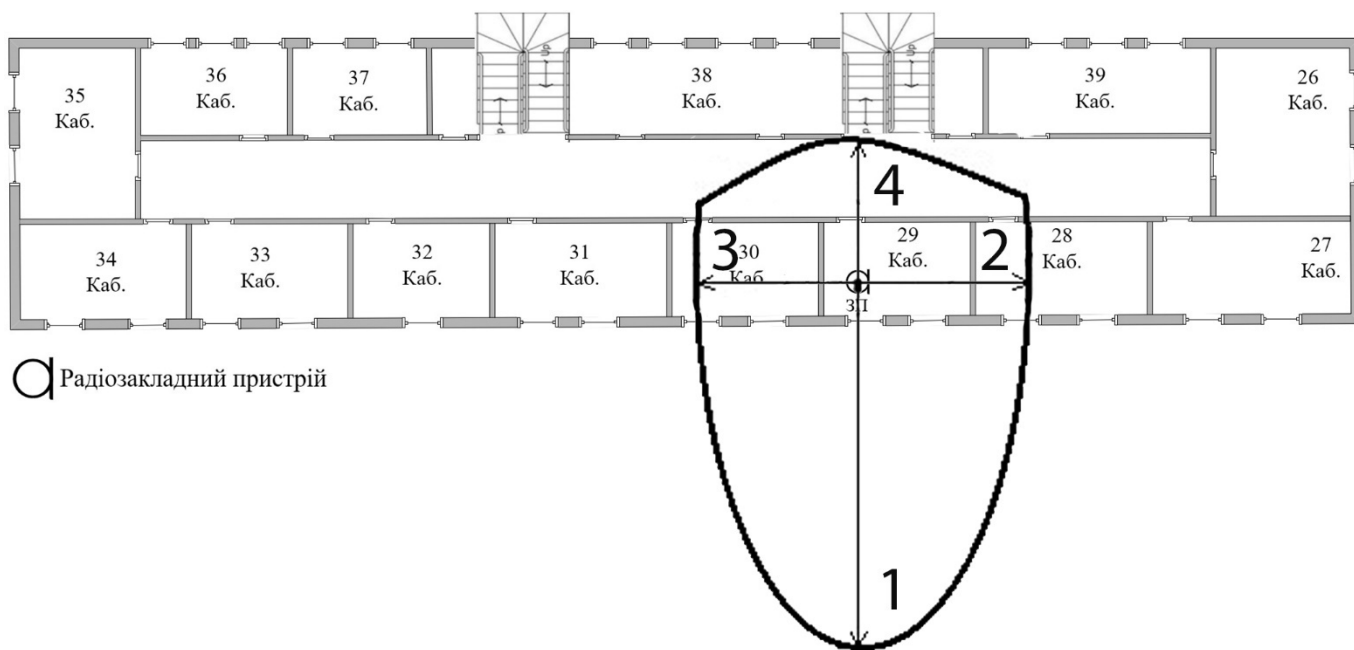


Рис. 4.20. Схематичне зображення зони електромагнітної доступності / контрольованої зони приміщення за чотирма напрямками

Отже сигнал може бути зафіксований у межах:

- перший напрямок – 24м;
- другий напрямок – 10м;
- третій напрямок – 10м;
- четвертий напрямок – 8,5м .

Проведемо розрахунок втрат сигналу у напрямку нижнього та верхнього поверхів.

Для *n*'ятого напрямку (внутрішньо-внутрішній) використаємо наступну формулу для визначення втрат сигналу:

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(d) + 10 \cdot \lg(f) + L_f \cdot n^{\left(\frac{n+2}{n+1} - 0.46\right)}, \quad (4.8)$$

де  $L_f$  - значення втрат сигналу між суміжними поверхами визначене за допомогою створеної функції;  $n$  – кількість подоланих поверхів.

48 Каб.	47 Каб.	46 Каб.	45 Каб.	44 Каб.	43 Каб.	42 Каб.	41 Каб.	III поверх
34 Каб.	33 Каб.	32 Каб.	31 Каб.	30 Каб.	29 Каб. ЗП	28 Каб.	27 Каб.	II поверх
19 Каб.	18 Каб.	17 Каб.	16 Каб.	15 Каб.	14 Каб.	13 Каб.	12 Каб.	I поверх

Рис. 4.21. Схематичне зображення п'ятого напрямку розповсюдження сигналу

Змінюючи значення відстані  $d$  знаходимо порогове значення за якого приймач не зможе зафіксувати сигнал. Такому значенню, у даному випадку, відповідає відстань 4,5 м.

Відповідно до виведеної залежності 2.19:

$$L_f =$$

$$\begin{cases} 2.256 \cdot 10^{-4} f^3 - 0.063 f^2 + 4.865 f - 117.554 & 30 \text{ МГц} \leq f < 130 \text{ МГц} \\ 2.467 \cdot 10^{-5} f^3 - 0.019 f^2 + 4.988 f - 461.464 & 130 \text{ МГц} \leq f < 300 \text{ МГц} \\ -1.417 \cdot 10^{-7} f^3 + 1.85 \cdot 10^{-4} f^2 - 0.078 f - 4.75 & 300 \text{ МГц} \leq f < 1000 \text{ МГц} \end{cases}$$

значення втрат між суміжними поверхами дорівнює  $L_f = 31,625$  дБ.

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(4,5) + 10 \cdot \lg(96,1) + 31,625 \cdot 2^{\left(\frac{2+2}{2+1} - 0.46\right)} = 127,825 \text{ дБ.}$$

Напруженість поля на відстані 4,5 м від джерела, з урахуванням обрахованих втрат, буде становити  $-78.429$  дБмВ/м (0.12 мкВ/м).

Далі за допомогою визначення діючої висоти антени за формулою 4.4 встановимо чи зможе приймач (із чутливістю 2,5 мкВ) зафіксувати даний сигнал:

$$h = \frac{3,125}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 50}{120}} = 1,437 \text{ м,}$$

відповідно до цього з урахуванням формули 4.1 визначимо електрорушійну силу, що наводиться на антену приймача:

$$e = 0.12 \cdot 1.437 = 0.172 \text{ мкВ,}$$

отже сигнал вже не може бути зафіксований. Тобто можемо зробити висновок, що в цьому напрямку, починаючи з 4,5 метрів і далі сигнал цим приймачем



зафіксувати не можливо. У нижній аудиторії 14 можна зафіксувати сигнал від закладного пристрою, але він повністю затухає у підлозі першого поверху.

Для шостого напрямку (внутрішньо-внутрішній) використаємо наступну формулу для визначення втрат сигналу:

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(d) + 10 \cdot \lg(f) + L_f \cdot n^{\left(\frac{n+2}{n+1}-0.46\right)}, \quad (4.9)$$

Змінюючи значення відстані  $d$  від джерела знаходимо порогове значення за якого приймач не зможе зафіксувати сигнал. Такому значенню, у даному випадку, відповідає відстань 7 м.

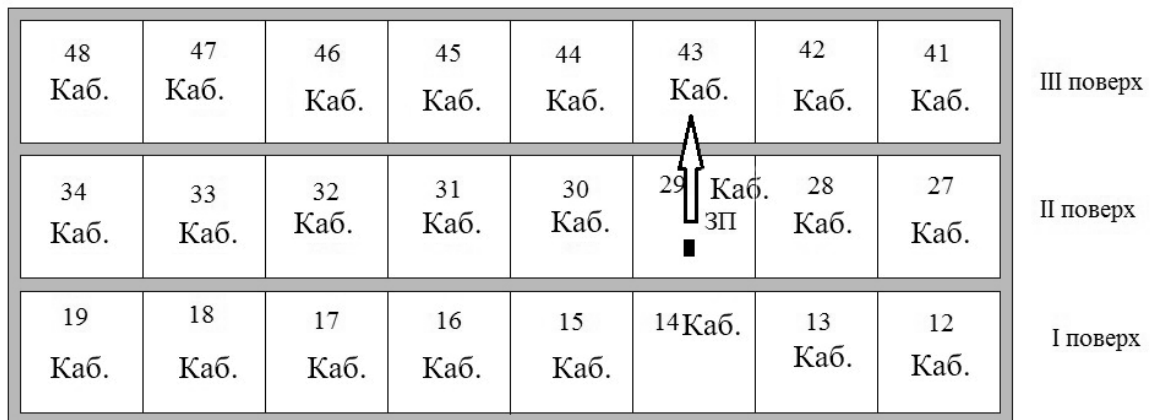


Рис. 4.22. Схематичне зображення шостого напрямку розповсюдження сигналу

Відповідно до виведеної залежності:

$$L_f =$$

$$\begin{cases} 2.256 \cdot 10^{-4} f^3 - 0.063 f^2 + 4.865 f - 117.554 & 30 \text{ МГц} \leq f < 130 \text{ МГц} \\ 2.467 \cdot 10^{-5} f^3 - 0.019 f^2 + 4.988 f - 461.464 & 130 \text{ МГц} \leq f < 300 \text{ МГц} \\ -1.417 \cdot 10^{-7} f^3 + 1.85 \cdot 10^{-4} f^2 - 0.078 f - 4.75 & 300 \text{ МГц} \leq f < 1000 \text{ МГц} \end{cases}$$

значення втрат між суміжними поверхами дорівнює  $L_f = 31,625$  дБ.

$$L = 37 + 20 \cdot \lg(7) + 10 \cdot \lg(96,1) + 31,625 \cdot 1^{\left(\frac{1+2}{1+1}-0.46\right)} = 105,354 \text{ дБ.}$$

Напруженість поля на відстані 7 м від джерела, з урахуванням обрахованих втрат, буде становити – 55.958 дБмВ/м (1.593 мкВ/м).

Далі за допомогою визначення діючої висоти антени за формулою 4.4 встановимо чи зможе приймач (із чутливістю 2,5 мкВ) зафіксувати даний сигнал:

$$h = \frac{3,125}{3,14} \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 50}{120}} = 1,437 \text{ м},$$

відповідно до цього з урахуванням формули 4.1 визначимо електрорушійну силу, що наводиться на антену приймача:

$$e = 1,593 \cdot 1,437 = 2,289 \text{ мкВ},$$

отже сигнал вже не може бути зафіксований. Тобто можемо зробити висновок, що в цьому напрямку, починаючи з 7 метрів і далі сигнал цим приймачем зафіксувати не можливо. У верхній аудиторії 43 можна зафіксувати сигнал від закладного пристрою, але він повністю затухає у стелі третього поверху. На даху будинку сигнал фіксуватися не буде.

За отриманими результатами приведемо графічне зображення зони електромагнітної доступності / контрольованої зони:

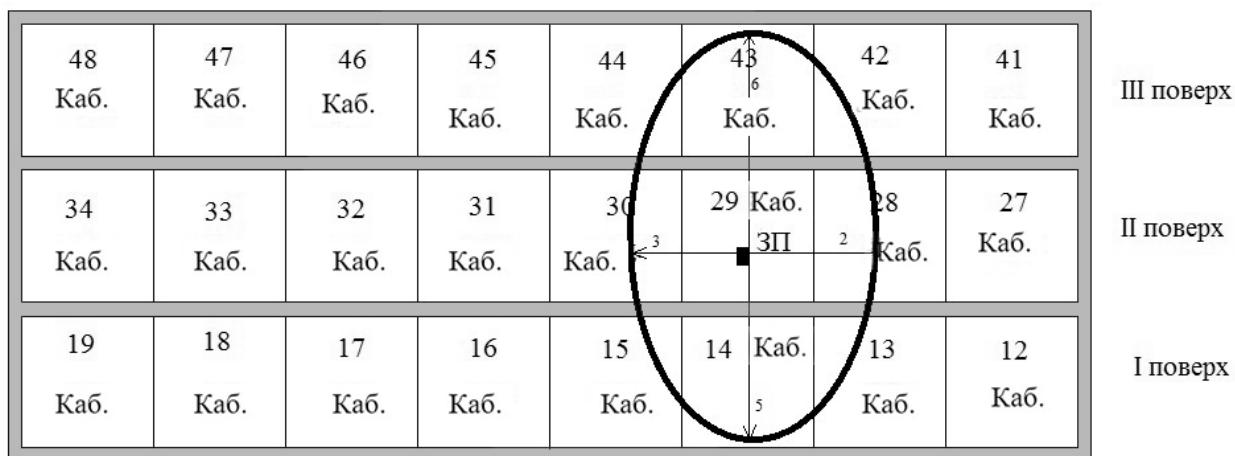


Рис. 4.23. Схематичне зображення зони електромагнітної доступності / контрольованої зони приміщення за п'ятьма та шістьма напрямками

Отже сигнал може бути зафіксований у межах:

- другий напрямок – 10 м;
- третій напрямок – 10 м;
- п'ятий напрямок – 4,5 м;
- шостий напрямок – 7 м.

Приведемо на одному зображенні схематичне позначення зони електромагнітної доступності / контрольованої зони визначене за допомогою стандартної моделі COST 231 MWM (пунктирна лінія) та удосконаленої моделі (чорна лінія) (Рис. 4.16) [11]:

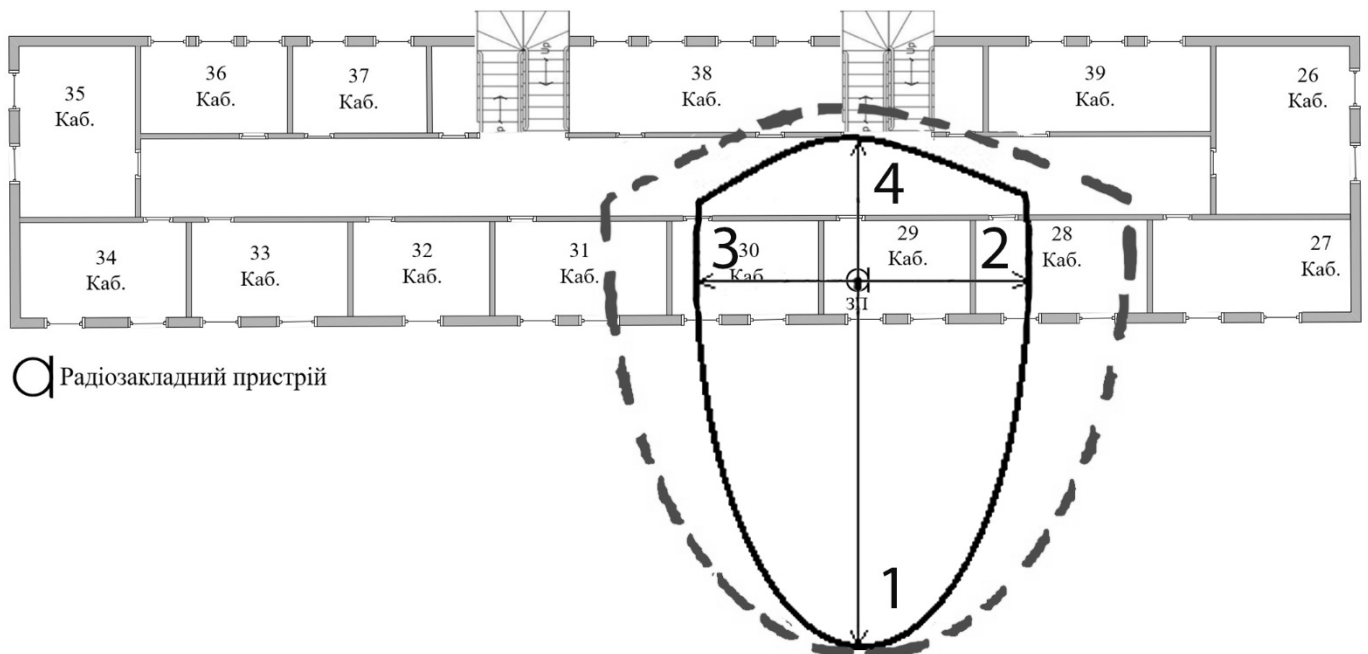


Рис. 4.24. Порівняння зон ЕМД / КЗ отриманих за допомогою стандартної моделі COST 231 MWM (червона лінія) та уточненої моделі (чорна лінія)

Стандартна модель COST 231 MWM дає наступні значення розмірів зони електромагнітної доступності / контрольованої зони:

- перший напрямок – 24м;
- другий напрямок – 17м;
- третій напрямок – 17м;
- четвертий напрямок – 8,5м .

Розроблені формули, за допомогою запропонованого методу уточнення моделей для опису розповсюдження електромагнітних випромінювань, що дають можливість більш точного визначення меж робочої зони у порівнянні із стандартною моделлю, що засвідчує рис. 4.16. Різниця складає : другий напрямок – 7 м; третій напрямок – 7 м; четвертий напрямок – 4.5 м. За допомогою розроблених формульних залежностей можна визначати втрати сигналу для будь-якого значення частоти в межах від 30 МГц до 1000 МГц. Похибка результатів не перевищує 8 % для визначення втрат сигналу між суміжними поверхами, та 12 % для визначення втрат у стінах.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

У даному розділі дисертаційної роботи було проведено експериментальні дослідження особливостей розповсюдження основних та побічних електромагнітних випромінювань всередині приміщень та оцінка можливості несанкціонованого отримання семантичної інформації за рахунок ПЕМВН.

1. Запропоновано конфігурацію експериментальної установки моніторингу електромагнітної обстановки придатної для проведення всього циклу дослідів по вимірюванню рівнів основних та побічних електромагнітних випромінювань в рамках даної дисертаційної роботи, по дослідженню особливостей їх моніторингу всередині приміщень. Всі експерименти розділені на наступні групи: в межах, прямої видимості; з урахуванням затінення фіксованими об'єктами; для сусідніх приміщень; для приміщень в багатоповерхових будівлях; з урахуванням затінення рухомими об'єктами (людьми); перехід сигналу з приміщення на вулицю і навпаки.

Перевірка адекватності розрахунків за моделлю з експериментальними даними, зокрема, показала характер ходу експериментальних і розрахункових залежностей. Відзначимо, що вимірювальне обладнання сертифіковане фірмою-виробником, тому сумніви в точності експериментів не можуть бути обґрунтовані.

В результаті експериментальних досліджень показано, що навіть відомі моделі з розвиненими базами даних можуть призводити до значних помилок при розрахунку та потребують в уточненні.

2. Був проведений аналіз існуючих джерел витоку конфіденційної інформації за рахунок побічних електромагнітних випромінювань та можливості виділення семантичної інформації з ПЕМВН.

Найбільшу небезпеку становить випромінювання пристроїв, в яких інформація, що захищається, циркулює у вигляді послідовного коду. Таким чином, найбільш небезпечним, з точки зору витоку інформації за рахунок ПЕМВН, є відеотракт ПЕОМ.

Застосувавши технологію Soft TEMPEST - приховану передачу даних по каналу побічних електромагнітних випромінювань було проведено експериментальні дослідження по виявленню та визначенню рівнів ПЕМВН кабельних компонентів

засобів телекомунікацій, що використовують для передачі інформації протоколи VGA, DVI і HDMI. Здійснено перехоплення ПЕМВ у відеотракті ПК та виділено семантичну інформації за допомогою SDR приймача RTL-SDR V.3 та програмного забезпечення TempestSDR. Експериментальним шляхом встановлено максимальну відстань перехоплення ПЕМВ кабельних інтерфейсів VGA, DVI, HDMI.

3. Для підведення підсумків був проведений порівняльний аналіз зон ЕМД / КЗ на прикладі стандартної моделі COST 231 MWM та уточненої моделі. В ході порівняння було встановлено, що розроблені формульні залежності, за допомогою запропонованих методів уточнення моделей розповсюдження ЕМВ, дають можливість отримання більш точних результатів у порівнянні із стандартними моделями. Похибка результатів не перевищує 8 % для визначення затухання ЕМВ між суміжними поверхами та 12 % у стінах.

## Список використаних джерел у четвертому розділі

1. Бахтіяров Д.І. Методи вимірювань побічних електромагнітних випромінювань /Д.І. Бахтіяров.// Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики: тези доповідей II Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих учених, м. Київ, 23-24 жовтня 2013р./редкол. М.С. Кулик та ін. – К. : НАУ, 2013. – С. 26.
2. Bakhtiarov D. I. Evaluation of energy availability of means to communicate with UAVs in conditions of radioelectronic countermeasures by the enemy //Collection" Information technology and security". – 2016.
3. Методика інструментального оцінювання (вимірювання) напруженості електромагнітного поля випромінювання засобами радіочастотного контролю [Електронний ресурс] // Наказ Українського державного центру радіочастот – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va012487-07>.
4. Крылова С. Л. Исследование побочных электромагнитных излучений видеосистемы ПЭВМ в учебной лаборатории информационной безопасности [Електронний ресурс] / С. Л. Крылова // Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sworld.com.ua/konfer35/597.pdf>.
5. Бахтіяров Д. І. Аналіз ефективності комплексного застосування заходів заводозахисності для підвищення стійкості функціонування засобів керування БПЛА / Д. І. Бахтіяров, І. О. Козлюк. // Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: тези доповідей науково-технічної конференції; м. Київ, 17-19 листопада. – 2014. – С. 50.
6. Бахтіяров Д. І. Оцінка можливості перехоплення семантичної інформації за рахунок побічних електромагнітних випромінювань у відеосистемі персонального комп'ютера / Д. І. Бахтіяров. // Colloquium-journal. – 2020. – №26. – С. 40–46.
7. Бахтіяров Д. І. GPS Spoofing як засіб перехоплення керування безпілотним літальним апаратом // XIV Міжнародна науково-практична конференція молодих

учених і студентів "Політ. Сучасні проблеми науки".- Київ, 2014 [Електронний ресурс].- Режим доступу: [http://polit.nau.edu.ua/polit\\_2014.pdf](http://polit.nau.edu.ua/polit_2014.pdf)

8. Бахтіяров Д. І. Аналіз ефективності комплексного застосування заходів заводозахисності для підвищення стійкості функціонування засобів керування БПЛА / Д. І. Бахтіяров, І. О. Козлюк. // Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: тези доповідей науково-технічної конференції; м. Київ, 17-19 листопада. – 2014. – С. 50.

9. Бахтіяров Д. І. Методика визначення контрольованої зони за допомогою модернізованої моделі Хата / Д. І. Бахтіяров, С. О. Бережко. // Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM: Науково-технічна конференція, 21-23 листопада 2018 р.: тези доп. – К., 2018. – С. 24.

10. Bakhtiiarov D. An approach to modernization of the Hat and COST 231 model for improvement of electromagnetic compatibility in premises for navigation and motion control equipment / D. Bakhtiiarov, O. Lavrynenko, G. Konakhovych. // 2018 IEEE 5th International Conference "Methods and Systems of Navigation and Motion Control" Proceeding October 16-18, 2018. – К., 2018. – С. 271-274.

11. Бахтіяров Д. І., Козлюк І.О. Методика модернізації моделі розповсюдження радіохвиль в середині приміщення для побудови контрольованої зони корпоративної мережі // Наукоємні технології. – 2019. – Т. 43. – №. 3. – С. 349-356.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання підвищення ефективності використання радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки шляхом уточнення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань та синтезі процесу виявлення їх джерел в урбанізованому середовищі.

На підставі цього було зроблено такі висновки.

1. Моделі для опису, розповсюдження електромагнітних випромінювань всередині приміщень, як: правило, значно складніші за моделі для сигналів у відкритому просторі (поза приміщеннями), що обумовлено такими обставинами, як обмеженість простору між передавачем і приймачем і його складна конфігурація (коридори, повороти, переходи, багатоповерхові будівлі) та необхідність розрахунку ефектів багатопронемності (сигнали в приймач надходять як в результаті відбиття від поверхонь, так і за рахунок дифракції, а також проникнення крізь перегородки, стіни). Науково-технічне підґрунтя для підвищення ефективності методу забезпечення моніторингу електромагнітної обстановки базується, насамперед, на використанні нових системоутворюючих факторів - складних розрахунків затухань енергії під час розповсюдження електромагнітного випромінювання. Це, в свою чергу, ставить завдання по дослідженню математичних моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань та розробці комплексних математичних моделей електромагнітного простору в системі моніторингу електромагнітної обстановки і їх впливу на системи забезпечення електромагнітної доступності.

2. За рахунок виявлених структурних закономірностей розподілу електромагнітних випромінювань всередині приміщень було запропоновано метод уточнення моделей їх розповсюдження. Результатом уточнення стала функція для розрахунку затухання ЕМВ між суміжними поверхами та функція для розрахунку затухання у стіні, які залежить від частоти. Загальна похибка результатів обрахованих за допомогою отриманої моделі  $L_f$  не перевищує 8 %, а  $L_\omega$  – 12 %. Дані науково-прикладні результати дають підґрунтя для підвищення ефективності використання



приладів моніторингу електромагнітної обстановки з використанням апаратного та розрахункового методів виявлення ЕМВ всередині приміщень.

3. Обґрунтовано наукові методи синтезу багатоетапного процесу виявлення неконтрольованих та неліцензованих пристроїв передавання інформації по радіоканалах, що включає етапи: отримання «відомих» ЕМВ (I), виявлення «невдомих» ЕМВ (II), ідентифікації та оцінки небезпеки ЕМВ і ПЕМВН (III) та побудова периметру зони ЗМД, локалізації місця розташування виявленого джерела електромагнітних випромінювань і його локалізації (IV). Результати проведених досліджень: «відомі» випромінювання (I), перелік «невдомих» випромінювань (II), переліки ідентифікованих ЕМВ, параметрів цифрових радіосигналів і частот виявлених джерел ЕМВ (III), координати розташування джерела електромагнітних випромінювань в виділеному приміщенні, формування прицільних перешкод на частотах ідентифікованих джерел ЕМВ і зниження рівня побічних випромінювань перевірених технічних засобів (IV).

Розроблено програмне забезпечення для побудови периметру зони електромагнітної доступності на основі методу удосконалення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань та відповідного нового математичного апарату. Проведено експериментальну верифікацію програмного забезпечення та наукових результатів, отриманих в розділах 2-3.

4. Розроблено оригінальний підхід, алгоритм функціонування та методи синтезу одноканальних апаратно-програмних засобів МЕО, що вирішують завдання виявлення неконтрольованих та неліцензованих засобів передачі інформації по радіоканалах та забезпечують підвищення швидкодії їх виявлення в умовах радіоперешкод, в тому числі від радіомовних станцій.

5. Розраховано загальні продуктивні витрати часу  $\Delta T_{\text{пр}}^{zj1}$  для запропонованого пристрою МЕО, що зменшились на 10 хв (40 %) в порівнянні з середнім часом для мобільних пристроїв МЕО; в порівнянні з середнім часом для стаціонарних пристроїв МЕО  $\Delta T_{\text{пр}}^{zj1}$  зменшились на 33 хв (68.75%). Показник ефективності використання запропонованого пристрою АДБ-511, що включає зменшення затрат продуктивного і непродуктивного часу за робочу зміну складає  $E_B = 0.91$  (91%). Підвищення

ефективності використання радіотехнічних пристроїв МЕО за плановий період складає 20%.

6. Запропоновано конфігурацію експериментальної установки для верифікації отриманих результатів. Всі експерименти розділені на наступні групи: в межах, прямої видимості; з урахуванням затінення фіксованими об'єктами; для сусідніх приміщень; для приміщень в багатоповерхових будівлях; з урахуванням затінення рухомими об'єктами (людьми); перехід сигналу з приміщення на вулицю і навпаки.

Перевірка адекватності розрахунків за уточненою моделлю з експериментальними даними, зокрема, показала характер ходу експериментальних і розрахункових залежностей, що довело точність отриманих формульних залежностей.

Був проведений аналіз можливості виділення семантичної інформації з ПЕМВН у відеотракті ПК за допомогою SDR приймача RTL-SDR V.3 та програмного забезпечення TempestSDR. Експериментальним шляхом встановлено максимальну відстань перехоплення ПЕМВ кабельних інтерфейсів VGA, DVI, HDMI.

# ДОДАТОК А

## АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ



ДЕРЖАВНА ФІСКАЛЬНА СЛУЖБА УКРАЇНИ  
**СУМСЬКА МИТНИЦЯ ДФС**  
 вул. Юрія Ветрова, 24, м. Суми, 40020, тел./факс (0542) 24-72-18  
**E-mail: sumy@customs.sfs.gov.ua** Код ЄДРПОУ 39420037

### АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи  
 Бахтіярова Дениса Ілшатовича «Метод підвищення ефективності  
 використання радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної  
 обстановки в урбанізованих середовищах» на здобуття наукового ступеня  
 кандидата технічних наук у діяльність Сумської митниці  
 Державної фіскальної служби України

Даний акт констатує, що результати дисертаційної роботи Бахтіярова Дениса Ілшатовича будуть впроваджені і використовуватися в діяльності Сумської митниці ДФС. Під час роботи над дисертацією автором був розроблений ряд методів та відповідних програмних модулів для посилення безпеки, що дозволило проводити оцінку затухання побічних електромагнітних випромінювань від телекомунікаційного устаткування організації в залежності від частоти та відстані в реальних умовах експлуатації. Запропонована методика визначення контрольованої зони (Зона 1) дозволяє визначити граничну відстань від основних технічних засобів митниці до межі, за якою унеможливується наведення небезпечних сигналів на технічні засоби зловмисника.

Крім того, пропонується математична модель загроз інформації за рахунок побічних електромагнітних випромінювань, що дає змогу без залучення додаткових коштів на спеціалізоване обладнання оцінити рівень паразитних випромінювань та підвищити рівень інформаційної безпеки.

Запропоновані підходи та методика були використані в Сумській митниці ДФС у секторах інформаційних технологій та охорони державної таємниці, технічного та криптографічного захисту інформації для реалізації рішень в області інформаційної безпеки відомостей, що становлять державну таємницю та дозволять підвищити швидкодію систем захисту інформації від витоків за рахунок ПЕМВН.

К  
 СУМСЬКА МИТНИЦЯ ДФС  
 116/18-70-40 від 03.12.2018 09:47:36



Завідувач  
 сектора інформаційних технологій

В.БОРМОТОВ

Завідувач  
 сектора охорони державної таємниці,  
 технічного та криптографічного  
 захисту інформації

О.КАЛІНІЧЕНКО



Україна

**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ КОМПЛЕКС  
«ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ»**

04116, м. Київ, Шевченківський район, вул. Богдана Гаврилишина, 24

№177 від 25.05.2019 р.

**АКТ**

**впровадження результатів дисертаційної роботи  
Бахтіярова Деніса Ілшатовича**

Цим Актом засвідчується, що наступні наукові та практичні результати досліджень, які розроблені в дисертаційній роботі на тему «Метод підвищення ефективності використання радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки в урбанізованих середовищах» Бахтіярова Деніса Ілшатовича, використовуються у Навчально-науково-виробничому комплексі «Інформаційно-комунікаційні системи»:

1. Програмний застосунок в середовищі JavaScript, що спрощує проведення розрахунків зони надійного прийому електромагнітних випромінювань з урахуванням особливостей їх розповсюдження всередині приміщень на етапі проектування будівлі та дозволяє визначати периметр території, за межами якої унеможливується перехоплення радіосигналу.

2. Методику прийняття рішення про наявність джерел «невдомих» електромагнітних випромінювань з урахуванням детермінованих та випадкових відхилень параметрів електромагнітного поля всередині приміщень, що дозволяє в умовах складної структури електромагнітного поля проводити моніторинг електромагнітної обстановки та отримувати результати з високим рівнем достовірності.

3. Метод підвищення ефективності використання пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки всередині приміщень, що дозволяє зменшити продуктивні та непродуктивні витрати часу під час проведення радіомоніторингу за плановий період.

Директор Навчально-науково-  
виробничого комплексу  
«Інформаційно-комунікаційні  
системи»



Фесенко А.О.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

В.П. Харченко

2020 р.

## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи  
 Бахтіярова Дениса Ілшатовича «Метод підвищення ефективності використання  
 радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки в урбанізованих  
 середовищах»  
 в навчальний процес Національного авіаційного університету

Ми, що підписалися нижче, в.о. декана факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій (ФАЕТ), к.т.н., Завгородній С.О., завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем Факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій, д.т.н., доц. Одарченко Р.С., склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи старшого викладача кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем, Бахтіярова Дениса Ілшатовича на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук «Метод підвищення ефективності використання радіотехнічних пристроїв моніторингу електромагнітної обстановки в урбанізованих середовищах» використовуються в навчальному процесі факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем.

№	Що впроваджено	Форма впровадження	Ефект від впровадження
1	Метод уточнення моделей розповсюдження електромагнітних випромінювань	Постановка нової лабораторної роботи з дисципліни «Комп'ютерне моделювання телекомунікаційних систем»	Підвищення якості підготовки бакалаврів за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
2	Метод визначення периметру контрольованої зони	Постановка нової лабораторної роботи з дисципліни «Захист інформації в телекомунікаційних системах»	Підвищення якості підготовки бакалаврів за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
3	Метод підвищення інтегральної чутливості засобів моніторингу електромагнітної обстановки та точності прогнозування електромагнітного поля з урахуванням особливостей джерел випромінювань	Розробка нового практичного заняття «Захист інформації в авіаційних радіоелектронних пристроях, системах та комплексах»	Підвищення якості підготовки магістрів за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

В.о. декана ФАЕТ

Завідувач кафедри телекомунікаційних та радіоелектронних систем

С.О. Завгородній

Р.С. Одарченко

## ДОДАТОК Б

### МОДЕЛІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

#### *Г-подібна модель*

В роботі [1] запропонована геометрична (трасування променів) модель розповсюдження радіохвиль в приміщеннях Г-подібної конфігурації (коридор з поворотом). Модель використовується для передбачення потужності сигналу в точці прийому. У моделі враховується до чотирьох відбиттів від стін (вважається, що через втрати відбиття облік доданків більш високого ступеня не привносить істотних змін в точність моделі). Модель будується на основі експериментальних даних в діапазонах частот 433, 915 і 2400 МГц в приміщенні.

#### *Модель Окамури*

Модель часто застосовується для відстаней 1...100 км і частотного діапазону 150..1920 МГц (разом з тим вона добре екстраполюється для діапазону до 3 ГГц). Висоти базових станцій при цих вимірах були від 30 до 100 м, що перевищує звичайну висоту базових станцій, використовуваних у цей час. Формула Окамури для розрахунку середнього значення втрат розповсюдження, Дб, на трасі має вигляд [2]:

$$L_{\text{ср}} = L_f + A_{\text{ср}}(f, d) - G(h_{\text{БС}}) - G(h_{\text{АС}}) - G_{\text{НС}}$$

де  $d$  — відстань між передавачем і приймачем;  $L_f$  — втрати у вільному просторі;  $A_{\text{ср}}$  — середнє загасання відносно загасання у вільному просторі;  $G(h_{\text{БС}})$  — висотний множник, що враховує висоту антени базової станції;  $G(h_{\text{АС}})$  — висотний множник антени мобільної станції;  $G_{\text{НС}}$  — коефіцієнт, що враховує тип навколишнього середовища. Значення  $A_{\text{ср}}$  й  $G_{\text{НС}}$  одержують із емпіричних графіків Окамури. Крім того, є формули для  $G(h_{\text{БС}})$  й  $G(h_{\text{АС}})$ :

$$G(h_{\text{БС}}) = 20 \log(h_{\text{БС}}/200), \quad 10\text{м} < (h_{\text{БС}}) < 1000 \text{ м}$$

$$G(h_{AC}) = \begin{cases} 10 \log(h_{AC}/3), & h_{AC} < 3 \text{ для першого випадку й } 3 \text{ м} < h_{AC} < 10 \text{ м для} \\ 20 \log(h_{AC}/3), & \end{cases}$$

другого.

Є також поправочні коефіцієнти, що враховують характер місцевості і забезпечують підвищення точності моделі.

### ***Модель Хата***

Модель Хата є емпіричним зображенням графічних даних про втрати на трасі, що приводить Окамура. Стандартна формула для розрахунку середніх втрат на трасі у міському середовищі відповідно до моделі Хата має вигляд [2]:

$$L_{\text{місто}} = 69,55 + 16 \log(f_c) - 13,83 \log(h_{\text{БС}}) - a(h_{\text{AC}}) - [44,9 - 6,55 \log(h_{\text{БС}})] \log(d).$$

Параметри в цій моделі такі ж, що в моделі Окамури,  $a(h_{\text{AC}})$  поправочний коефіцієнт для висоти антени мобільної станції. Внесено певні зміни в модель для міста, а також у моделі розповсюдження сигналів у приміських і сільських районах:

$$L_{\text{передмістя}} = L_{\text{місто}} - 2[\log(f_c/28)]^2 - 5,4$$

$$L_{\text{село}} = L_{\text{місто}} - 4,78[\log(f_c)]^2 - 18,33[\log(f_c)] - 40,98$$

У моделі Хата не потрібно використання поправочних коефіцієнтів залежно від конкретної траси, як це має місце в моделі Окамури. Модель Хата добре апроксимує модель Окамури для відстаней  $d > 1$  км [2].

### ***Модель COST 231 та модель COST 231 MWM***

Модель Хата була розширена до 2 ГГц Європейською кооперацією на основі проведених науково-технічних досліджень (EURO-COST) у такий спосіб:

$$L_{\text{місто}} = 46,3 + 3,9 \log(f_c) - 13,82 \log(h_{\text{БС}}) - a(h_{\text{AC}}) - [44,9 - 6,55 \log(h_{\text{БС}})] \log(d) - C_M.$$

де  $a(h_{\text{AC}})$ —поправочний коефіцієнт,  $C_M = 0$  дБ для міст середнього розміру, пригородів і 3 дБ для великих міст. Ця модель обмежується наступними граничними параметрами:  $1,5 \text{ ГГц} < f_c < 2 \text{ ГГц}$ ;  $30 \text{ м} < h_{\text{БС}} < 200 \text{ м}$ ;  $1 \text{ м} < h_{\text{AC}} < 10 \text{ м}$ ;  $1 \text{ км} < d < 20 \text{ км}$ .

Багатостінна модель COST231 (COST 231 Multi-Wall Model) є покращеною версією моделі Кінана-Мотлі. Вона враховує той факт, що загальні втрати при проходженні через поверхи мають нелінійну залежність від числа пройдених поверхів. Ця характеристика враховується шляхом введення емпіричного параметра  $b$ . Втрати на трасі в дБ можуть бути визначені як [2]:

$$PL(d) = L_{FS} + L_c + \sum_{i=1}^l k_{wi} L_{wi} + k_f \left( \frac{n_f + 2}{n_f + 1} - b \right) L_f$$

де  $L_{FS}$  - втрати у вільному просторі між передавачем і приймачем, дБ;  $L_c$  - постійні втрати, дБ;  $L_{wi}$  - втрати на проникнення стін  $i$ -го типу, дБ;  $n_{wi}$  - число пройдених стін  $i$ -го типу;  $l$  - число типів стін;  $L_f$  - втрати між суміжними поверхами, дБ;  $n_f$  - кількість поверхів;  $b$  - емпіричний параметр.

Існує два типи стін: тонка стіна  $L_{w1}$  (коли товщина стіни  $< 10$  см), наприклад, гіпсокартон, і товста стіна  $L_{w2}$  (коли товщина стіни  $> 10$  см), яка виконана з бетону або цегли.

### **Модель Лі**

Модель складається із двох частин. Перша частинна (регіон-регіон) використана для прогнозування втрат при розповсюдженні над відносно плоскою поверхнею без прийняття в увагу територіальних властивостей. Друга частина (точка-точка) моделі Лі використовує результат, отриманий у першій частині, за основу й отримує більш точне значення. Заснована на даних профілю, поверхня другої частини моделі ураховує умови прямої видимості.

Основна частина втрат при розповсюдженні на шляху сигналу може бути визначена наступною формулою [2-3]:

$$P_r = P_{r0} (r/r_0)^{-\gamma} (f/f_0)^{-n} \alpha_0,$$

де  $P_r$  - потужність сигналу на відстані  $r$  від передавача,  $f$  - частота сигналу,  $P_{r0}$  - потужність сигналу у точці перетину лінії розповсюдження з перешкодою на відстані  $r_0$  від передавача,  $\gamma$  - враховує ступінь кривизни поверхні,  $n$  - показує ступінь частотної залежності,  $\alpha_0$  - поправочний коефіцієнт, залежить від висоти розташування



антен, потужності передавача, коефіцієнту посилення передавальної і приймальної антен.

Ця модель може використовуватися для загального випадку, коли радіохвилі розповсюджуються в різних умовах. В цьому випадку повинні бути відомі коефіцієнти кривизни поверхні  $\gamma_i$  і границі області з такими коефіцієнтами кривизни.

Дана модель дозволяє визначити потужність сигналу, що приймається:

$$P_{\text{пр}} = A - B \log R - n \log\left(\frac{f}{900}\right) + 10 \log \alpha,$$

де  $A$  і  $B$  залежать від характеристик оточуючого середовища і були розраховані статистично по розрахункам в декількох містах. Для великих міст  $A = 55 \dots 80$ ,  $B = 30 \dots 43$ . Для пригородів  $A = 54$ ,  $B = 39$ . Множник  $n$  приймає наступне значення:  $n=2$  для пригородів і для діапазону  $f < 450$  МГц,  $n=3$  для міст при  $f > 450$  МГц. Параметр  $\alpha$  розраховується наступним чином:

$$\alpha = \frac{h_b^2 h_M^m P_{\text{перед}} G_{\text{перед}} G_{\text{прийм}}}{3660},$$

де  $P_{\text{перед}}$  - потужність передавача, Вт;  $G_{\text{перед}} G_{\text{прийм}}$  - коефіцієнти підсилення антен;  $h_b, h_M$  - висота антен мобільної і базової станцій;  $m=1$  при  $h_M < 3$  м і  $m=2$  при  $h_M > 10$  м.

### **Модель Кся-Бертолі**

Ця модель дозволяє врахувати ряд додаткових параметрів, пов'язаних з кількістю поверхів, шириною вулиці і т.д. Це аналітична модель, розроблена для розрахунків загасань на трасах систем рухомого радіозв'язку у міських і приміських зонах. Модель побудована на рівняннях хвильової оптики і розглядає різноманітні механізми розповсюдження радіохвиль в умовах міської забудови: розповсюдження радіохвиль у вільному просторі, дифракцію на крайках дахів будинків, відбиття від стін будівель і т.д.

Величина середніх втрат у цьому випадку [2-3]:

$$L = -10 \lg\left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2\right] - 10 \lg\left[\frac{\lambda}{2\pi r} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta}\right)^2\right] - 10 \lg\left[2.35^2 \left(\frac{\Delta h_b}{R} \sqrt{\frac{d}{\lambda}}\right)^{1.8}\right],$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі;  $R$  — відстань між БС і МС;  $\Delta h_B = h_{BS} - h_0$  — різниця висот антени БС і середнього рівня дахів;  $\theta = \tan^{-1}(\Delta h_M/x)$ ,  $\Delta h_M = h_0 - h_{MS}$  — різниця висот середнього рівня дахів і антени МС;  $x$  — відстань по горизонталі між МС і кромкою даху, на якій дифрагує хвиля; зазвичай  $x = \omega/2$ , де  $\omega$  — середня ширина вулиць;

$r = \sqrt{\Delta h_M^2 + x^2}$ ,  $d$  — середній інтервал між кварталами.

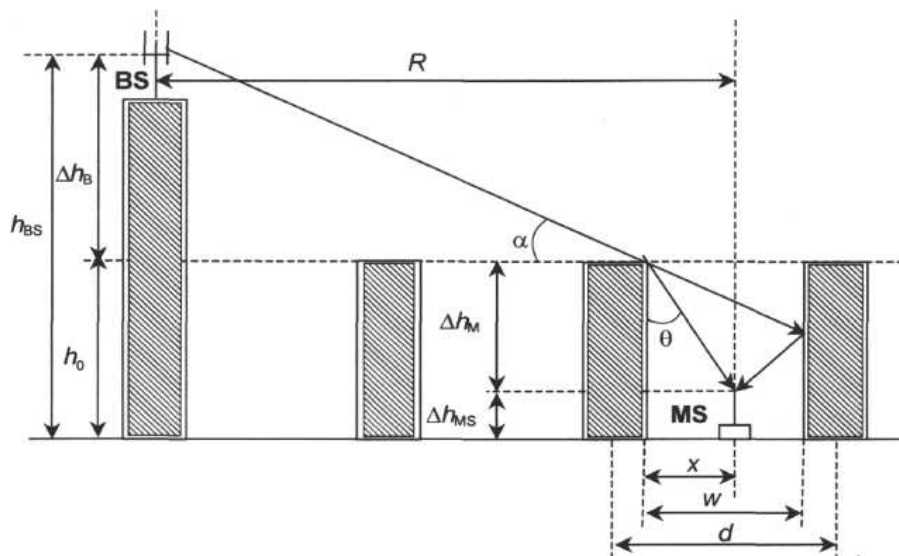


Рис. Б.1. Інтерференція променів у точці прийому

Модель Кся-Бертолі дозволяє оцінити середній рівень втрат й у тих випадках, коли антена БС розташована на рівні дахів або нижче рівня дахів.

У цих випадках вираження для величини загасання будуть наступні:

1. Антена BS на рівні дахів:

$$L = -10 \lg \left[ \left( \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi R} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[ \frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[ \left( \frac{d}{R} \right)^2 \right]$$

2. Антена BS нижче рівня дахів:

$$L = -10 \lg \left[ \left( \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi R} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[ \frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left( \frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[ \left( \frac{d}{2\pi(R-d)} \right)^2 \frac{\lambda}{\sqrt{\Delta h_B^2 + d^2}} \left( \frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi} \right) \right]$$

де  $\phi = \tan^{-1}(\Delta h_B/d)$

### ***Модель з одним нахилом***

Модель з одним нахилом (One-slope model) являє собою швидкий і простий спосіб обчислити середню потужність сигналу всередині будівлі, коли немає інформації про планування будівлі. Ця модель передбачає лінійну залежність між втратами на трасі в дБ і логарифмічної відстані між передавачем і приймачем [3]:

$$PL(d) = L_0 + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

де  $L_0$  - втрати на трасі на відстані 1 метр між передавачем і приймачем, дБ;  $n$  - показник втрат на трасі;  $d$  - відстань між передавачем і приймачем, м.

$L_0$  і  $n$  є емпіричними параметрами. Значення показника  $n$  змінюються в залежності від конкретного середовища розповсюдження, тобто від типу будівлі, різних будівельних матеріалів, планування.

Модель з одним нахилом дає найкращі результати для однорідного середовища розповсюдження радіосигналу з більш-менш рівномірно розподіленими стінами і перешкодами.

### ***Модель лінійного ослаблення***

Модель лінійного ослаблення (Linear attenuation model) зазвичай використовується, коли передавач і приймач знаходяться на одному поверсі. На відміну від моделі з одним нахилом, модель лінійного ослаблення передбачає, що втрати на трасі в дБ лінійно залежать від відстані між передавачем і приймачем [2]:

$$PL(d) = L_{FC} + \alpha_n \cdot d$$

де  $\alpha_n$  - коефіцієнт ослаблення, дБ / м;  $d$  - відстань між передавачем і приймачем, м;  $L_{FC}$  - втрати у вільному просторі, дБ. Наприклад, в офісному середовищі коефіцієнт ослаблення складає  $\alpha_n = 0,47$  дБ / м [3].

### ***Модель логарифмічного затухання з урахуванням затінення***

На жаль, моделі з одним нахилом і лінійного ослаблення не можуть передбачити значень потужності сигналу на всіх ділянках мережі, навіть якщо вони

розташовані на одному і тому ж відстані від передавача. Випадкові ефекти затінення описуються логарифмічним нормальним розподілом. Втрати на трасі на відстані від передавача можуть бути описані як [3]:

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

де  $X_\sigma$  - випадкова величина з гауссовим розподілом з нульовим середнім (в дБ) і стандартним відхиленням  $\sigma$  (в дБ);  $d$  - відстань між передавачем і приймачем, м;  $d_0$  - еталонна відстань між передавачем і приймачем (зазвичай 1 м);  $n$  - показник втрат на трасі.

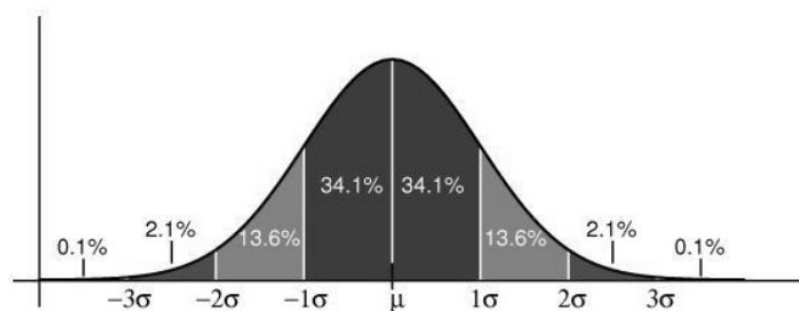


Рис. Б.2. Функція щільності ймовірностей гауссового розподілу

Недоліком моделі логарифмічного згасання з урахуванням затінення є те, що довідкові значення для  $n$  і  $\sigma$  обмежені, особливо для умов житлових приміщень. Тому значення  $n$  і  $\sigma$  можуть бути отримані емпірично.

### ***Модель Мотлі-Кінана***

Ця модель безпосередньо розглядає наявність численних стін і підлоги в навколишньому середовищі в залежності від їх товщини і матеріалу. Показник втрат фіксований і дорівнює  $n = 2$ , як і при розповсюдженні у вільному просторі. додаються додаткові коефіцієнти втрат для моделювання загасання при проходженні через стіни і підлогу, що перетинають лінію прямої видимості між передавачем і приймачем. Тоді втрати на трасі в дБ можуть бути, представлені як [3-4]:

$$PL(d) = L_1 + 20 \log(d) + n_f a_f + n_w a_w$$

де  $L_1$  - реальні втрати на відстані 1 м, дБ;  $d$  - відстань між передавачем і приймачем, м;  $a_f$  і  $a_w$  - коефіцієнти втрат при проходженні через підлогу і через стіну, відповідно, дБ;  $n_f$  і  $n_w$  - кількість поверхів і стін, відповідно.

Складові втрат від стін і підлоги представляють лінійну залежність, це означає, що стіни або підлогу з тієї ж самої категорії додають постійну затримку до втрат на трасі, навіть якщо сигнал раніше проходив через інші стіни або підлогу того ж типу.

### *Модель запуску променів*

Модель запуску променів [4] заснована на геометричній оптиці, яка моделює розповсюдження радіохвиль відповідно до фізичних явищ, таких як відображення, заломлення і дифракція. Модель запуску променів активно запускає ряд променів з кінця передавача. Ці промені розділені під невеликим кутом, так що кожен з них має різне спрямування передачі. Далі запущені промені взаємодіють з об'єктами в середовищі розповсюдження відповідно до теорії відображення, заломлення і дифракції (рис. Б.3). Поширення променя припиняється або тоді, коли його потужність падає нижче визначеного порогового значення або коли число взаємодій з об'єктами досягає заздалегідь визначеного числа, або коли промінь досягає приймача. Модель запуску променів має властивою їй недолік - віддалені об'єкти можуть бути втрачені променями, навіть якщо кут поділу між променями у передавача дуже малий (рис. Б.4).

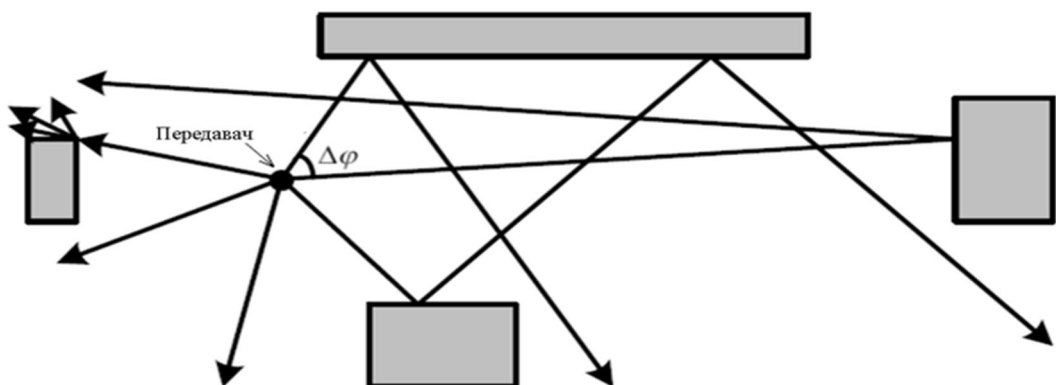


Рис. Б.3. Запуск променю

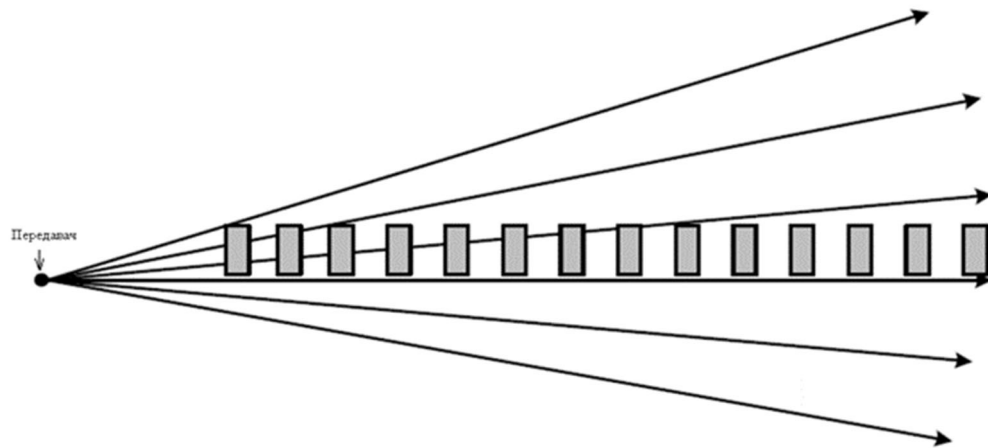


Рис. Б.4. Віддалені об'єкти можуть бути випущеними променями

### ***Модель трасування променів***

На відміну від моделі запуску променів, яка відстежує промені спрямовані від передавача до приймача, модель трасування променів відстежує промені в зворотному напрямку. Модель трасування променів [2-4] заснована на методі уявних променів (зображень), яка передбачає, що всі об'єкти в середовищі розповсюдження є потенційними відбивачами. Метод зображень є аналітичним методом, і тому розглядаються лише точні шляхи розповсюдження. Це робить модель трасування променів надійною і більш точної в порівнянні з моделлю запуску променів, який дає приблизні результати.

Ідея методу зображень полягає в тому, щоб обчислювати тільки точно відображені шляхи до приймача з використанням зображень передавача (Рис. Б.5). Спочатку передавач створює точку зображення з використанням першій відбивача. Точка зображення - це відображення розташування передавача на протилежній стороні поверхні. Якщо наступне відображення відбувається після відображення від першої поверхні, нова точка зображення обчислюється аналогічно, але попередня точка зображення розглядається як передавач.

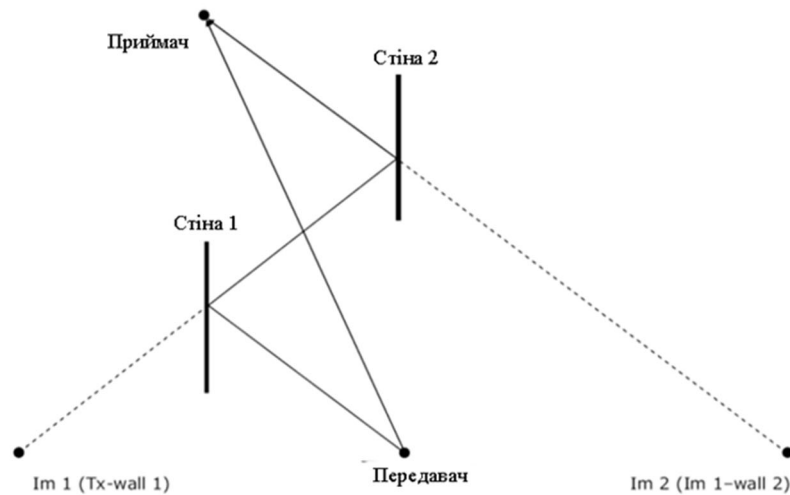


Рис. Б.5. Приклад методу зображень

Коли всі точки зображення були створені, проводиться лінія з точки місця розташування приймача до останньої точки зображення. Потім виконується перевірка: чи перетинається з проведеною лінією поверхня, що належить до точки зображення. Якщо немає, то шлях не дійсний. Якщо так, то проводиться нова лінія з точки перетину до наступної точки зображення і проводиться нова перевірка. Ця процедура триває до тих пір, поки точка перетину не досягне передавача. Отже, необхідно обчислити безліч точок зображень і шляхів, особливо в складному середовищі розповсюдження з безліччю поверхонь. Це призводить до великого часу обчислення, адже з порядком обчислених відображень обчислювальний час зростає експоненціально. Алгоритм методу зображень в цілому більш складний, ніж алгоритм запуску променів, так як повинні бути перевірені всі можливі шляхи, що з'єднують передавач і приймач.

Модель трасування променів має деякі переваги в порівнянні з моделлю запуску променів. У моделі запуску променів необхідно запустити велику кількість променів від передавача, але лише деякі з них можуть досягти приймача, і більшість з цих променів будуть запуснені даремно.

Як в моделі запуску променів, так і в трасуванні променів, потужність відображених і заломлених променів обчислюються відповідно до законів геометричної оптики. Для променевих моделей складність середовища

розповсюдження сильно впливає на їх обчислювальну навантаження, оскільки, чим більше число перешкод, тим більше число відображень.

### ***Модель, заснована на методі КРЧО***

Моделі, засновані на методі кінцевих різниць у часовій області (КРЧО) - це чисельне рішення рівнянь Максвелла. Рівняння Максвелла вважаються найточнішим описом того, як електричне і магнітне поле взаємодіють один з одним і як поширюються електромагнітні хвилі. Однак рівняння Максвелла є набором окремих випадків диференціальних рівнянь, які дуже важко вирішити. Ідея полягає в тому, що набір диференціальних рівнянь Максвелла замінюється набором кінцево-різницевого рівнянь, які можна вирішити на основі просторово-часової сітки [5].

Оскільки модель КРЧО приблизно вирішує рівняння Максвелла, то основною перевагою є їх висока точність. Більш того, кінцево-різницево рівняння вже враховують конструктивні параметри (тобто провідність  $\sigma$ , діелектричну проникність  $\epsilon$  і проникність  $\mu$ ) об'єктів, все ефекти об'єктів або перешкод в середовищі розповсюдження природним чином включені в модель КРЧО. Отже, складність середовища розповсюдження (наприклад, кількість перешкод, які існують в середовищі розповсюдження) не вплине на обчислювальну навантаження моделі.

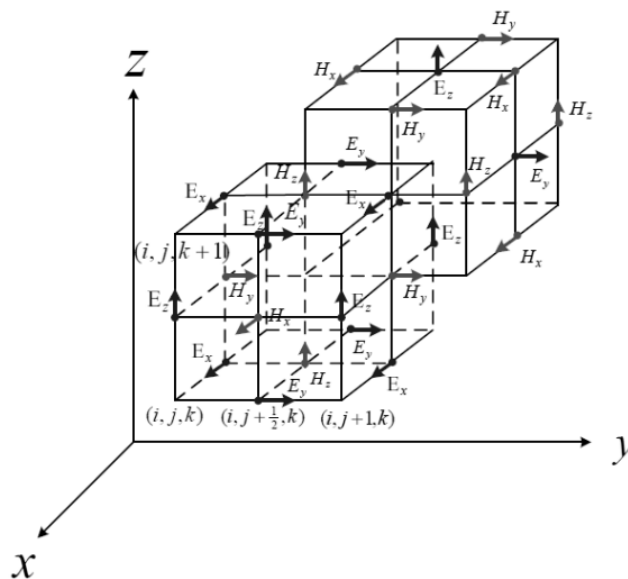


Рис. Б.6. Просторово-часова сітка



Основним недоліком моделі КРЧО є її високе обчислювальне навантаження. Як відомо, в моделі КРЧО вирішуються рівняння Максвелла в просторово-часовій сітці. Для того, щоб уникнути проблем чисельної нестійкості, розмір кроку сітки не повинен бути занадто великим щодо довжини хвилі.

### Список використаних джерел в додатку Б

1. Геометрическая модель распространения радиоволн в; помещениях Г-образной конфигурации / Аунг Мьинт Эй; ЧжоЧжоНьянЛин^ Кондратов А.В.; Лужнов М.С. // Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция для студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика». Тезисы докладов. М.: МИЭТ, 2008. С. 223.
2. Узагальнена модель поширення радіосигналів [Електронний ресурс] // АрхівІнфо. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://arhivinfo.ru/1-33908.html>.
3. Распространение радиоволн: Учебник / Под ред. О.И.Яковлева. - М.: ЛЕНАНД, 2009.-496с.
4. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн: Учебник для вузов / Г. А. Ерохин, О. В. Чернышев, Н. Д. Козырев, В. Г. Кочержевский; Под. Ред. Г. А. Ерохина. - 2-е изд., испр. - М.: Горячая линия - Телеком, 2004.
5. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. Учебник для вузов. М., «Связь», 1972. - 336 с.

## ДОДАТОК В

## ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОНТРОЛЬОВАНОЇ ЗОНИ

```

package p7;
import static p7.Constants.SCALING;
public class Calculating {
    public static int n = 5;
    public static int x[];
    public static int y[];
    public static double dx;
    public static double dy;
    public double Lon;
    public double Lat;
    //room picture
    public Calculating(double lon, double lat, double dev_lon, double
dev_lat, double dev_place, double height) {
        double startPointLon;
        double startPointLat;
        Formulas formulas = new Formulas();
        formulas.RightDirection(lat, dev_lat);
        formulas.LeftDirection(lat, dev_lat);
        formulas.DownDirection(lat, dev_lat);
        formulas.UpDirection();
        formulas.HeightUpDist(height, dev_place);
        formulas.HeightDownDist(height, dev_place);
        double right = Scaling(Formulas.distanceRight);
        double left = Scaling(Formulas.distanceLeft);
        double up = Formulas.distanceUp*SCALING;
        double down = Scaling(Formulas.distanceDown);
        double UpUp = Scaling(Formulas.distanceHeightUp); //distance up
between floors
        double DownDown =
Scaling(Formulas.distanceHeightDown); //distance down between floors
        if (lon > 50 | lat > 50 | dev_lat > 50 | dev_lon > 50) {
            double scalingLon;
            double scalingLat;
            double scalingDevLat;
            double scalingDevLon;
            scalingLon = lon / 50;
            scalingLat = lat / 50;
            if (right > 250 | left > 250 | up > 250 | down > 250){
                lon/=4;
                lat/=4;
                scalingDevLat = dev_lat / 4;
                scalingDevLon = dev_lon / 4;
                right /= 4;
                left/= 4;
                up /= 4;
                down /= 4;
            }
        }
    }
}

```

```

    }else {
        lon/=2;
        lat/=2;
        scalingDevLat = dev_lat / 2;
        scalingDevLon = dev_lon / 2;
        right /= 2;
        left/= 2;
        up /= 2;
        down /= 2;}
    startPointLon = 250 - lon * SCALING / 2 / scalingLon;
    startPointLat = 250 - lat * SCALING / 2 / scalingLat;
    Lon = lon * SCALING / scalingLon;
    Lat = lat * SCALING / scalingLat;
    Calculating.dx = (startPointLat + scalingDevLat *
SCALING);
    Calculating.dy = (startPointLon + scalingDevLon *
SCALING);
    } else {
        if (right > 250 | left > 250 | up > 250 | down > 250){
            lon/=4;
            lat/=4;
            dev_lat /= 4;
            dev_lon /= 4;
            right /= 4;
            left/= 4;
            up /= 4;
            down /= 4;
        }else {
            lon/=2;
            lat/=2;
            dev_lat /= 2;
            dev_lon /= 2;
            right /= 2;
            left/= 2;
            up /= 2;
            down /= 2;}
        startPointLon = 250 - lon / 2 * SCALING;
        startPointLat = 250 - lat / 2 * SCALING;
        Lon = lon * SCALING;
        Lat = lat * SCALING;
        Calculating.dx =(startPointLat+dev_lat*SCALING);
        Calculating.dy =(startPointLon+dev_lon*SCALING);}
    formulas.setDistanceRight(right);
    formulas.setDistanceLeft(left);
    formulas.setDistanceDown(down);
    formulas.setDistanceUp(up);
    formulas.setDistanceHeightUp(UpUp);
    formulas.setDistanceHeightDown(DownDown);
    Calculating.x = new int[]{(int) startPointLat, (int)
startPointLat, (int) (startPointLat + Lat), (int) (startPointLat +
Lat), (int) startPointLat};
    Calculating.y = new int[]{(int) startPointLon, (int)
(startPointLon + Lon), (int) (startPointLon + Lon), (int)

```

```

startPointLon, (int) startPointLon};
    new GraphBuild().setVisible(true);
    new ShowResultsFrame().setVisible(true);}
private double Scaling(double original){
    double scaling = original * SCALING;
    return scaling;}}
package p7;
import javax.swing.*;
public class Constants {
    public static final int SCALING = 10;
    public static final String ITEMS[] = {"Радіомікрофон з підвищеною
чутливістю MP2", "Системна плата", "CD-ROM", "Відеомонітор",
"Клавіатура", "Принтер" };
    public static final JComboBox COMBO_BOX = new JComboBox(ITEMS);}
import javax.swing.*;
import java.awt.*;
class DrawingComponent extends JPanel {
    int xg[] = Calculating.x;
    int yg[] = Calculating.y;
    int ng = Calculating.n;
    @Override
    protected void paintComponent(Graphics gh) {
        Graphics2D drp = (Graphics2D)gh;
        int basey = (int) Calculating.dy;
        int basex = (int) Calculating.dx;
        Color graph = new Color(192,192,192,150);
        drp.setColor(Color.BLUE);
        drp.drawOval(basex-5,basey-5,10,10);
        drp.setColor(Color.RED);
        //right line
        drp.drawLine(basex, basey, basex+Formulas.distanceRight,
basey);
        drp.drawLine(basex+Formulas.distanceRight, basey,
basex+Formulas.distanceRight-20, basey+10);
        drp.drawLine(basex+Formulas.distanceRight, basey,
basex+Formulas.distanceRight-20, basey-10);
        //down line
        drp.drawLine(basex, basey, basex,
basey+Formulas.distanceDown);
        drp.drawLine(basex, basey+Formulas.distanceDown, basex-10,
basey+Formulas.distanceDown-20);
        drp.drawLine(basex, basey+Formulas.distanceDown, basex+10,
basey+Formulas.distanceDown-20);
        //left line
        drp.drawLine(basex, basey, basex-Formulas.distanceLeft,
basey);
        drp.drawLine(basex-Formulas.distanceLeft, basey, basex-
Formulas.distanceLeft+20, basey+10);
        drp.drawLine(basex-Formulas.distanceLeft, basey, basex-
Formulas.distanceLeft+20, basey-10);
        //up line
        drp.drawLine(basex, basey, basex, basey-Formulas.distanceUp);
        drp.drawLine(basex, basey-Formulas.distanceUp, basex-10,

```

```

basey-Formulas.distanceUp+20);
    drp.drawLine(basex, basey-Formulas.distanceUp, basex+10,
basey-Formulas.distanceUp+20);
    //up-left line
    drp.drawLine(basex, basey, basex+Formulas.distanceHeightUp,
basey-Formulas.distanceHeightUp);
    drp.drawLine(basex+Formulas.distanceHeightUp, basey-
Formulas.distanceHeightUp, basex+Formulas.distanceHeightUp-10, basey-
Formulas.distanceHeightUp);
    drp.drawLine(basex+Formulas.distanceHeightUp, basey-
Formulas.distanceHeightUp, basex+Formulas.distanceHeightUp, basey-
Formulas.distanceHeightUp+10);
    //down-right line
    drp.drawLine(basex, basey, basex-Formulas.distanceHeightDown,
basey+Formulas.distanceHeightDown);
    drp.drawLine(basex-Formulas.distanceHeightDown,
basey+Formulas.distanceHeightDown, basex-Formulas.distanceHeightDown,
basey+Formulas.distanceHeightDown-10);
    drp.drawLine(basex-Formulas.distanceHeightDown,
basey+Formulas.distanceHeightDown, basex-
Formulas.distanceHeightDown+10, basey+Formulas.distanceHeightDown);
    drp.setColor(graph);
    drp.fillPolygon(xg, yg, ng);}}
package p7;
public class Formulas {
    public static double sensibility;
    public static double frequency;
    public double L;
    public double E;
    public double lambda = 3*Math.pow(10,8) /
(frequency*Math.pow(10,6));
    public double h = lambda/3.14 * Math.sqrt(5*50/120);
    public double e;
    public double P;
    public static int distanceRight;
    public static int distanceLeft;
    public static int distanceDown;
    public static int distanceUp;
    public static int distanceHeightUp;
    public static int distanceHeightDown;
    public static void setDistanceHeightUp(double distanceHeightUp) {
        Formulas.distanceHeightUp = (int) distanceHeightUp;}
    public static void setDistanceHeightDown(double
distanceHeightDown) {
        Formulas.distanceHeightDown = (int) distanceHeightDown;}
    public static void setDistanceRight(double distanceRight) {
        Formulas.distanceRight = (int) distanceRight;}
    public static void setDistanceLeft(double distanceLeft) {
        Formulas.distanceLeft = (int) distanceLeft;}
    public static void setDistanceDown(double distanceDown) {
        Formulas.distanceDown = (int) distanceDown;}
    public static void setDistanceUp(double distanceUp) {
        Formulas.distanceUp = (int) distanceUp;}

```

```

public void UpDirection() {
    double r = 0;
    do {
        r+=0.5;
        L = 34.2 + 20 * Math.log10(frequency) + 10 * Math.log10(r
* r) + 3.4;
        E = 49.396 - L;
        P = 1000 * Math.pow(10, E / 20);
        e = P * h;
    } while (e > sensibility);
    distanceUp = (int) r;
    Holder.up = r;
}
public void RightDirection(double lat, double dev_lat){
    int k;
    double r = 0;
    double Lw;
    do {
        r+=0.5;
        if (r <= lat-dev_lat){
            k=0;
        }else{
            k= (int) (r/lat);
            if(k<=1){
                k=1;}}
        if(30 <= frequency && frequency < 130){
            Lw=3.363*Math.pow(10,-4)*Math.pow(frequency,3)-
0.097*Math.pow(frequency,2)+7.882*frequency-198.018;
        }else if(130 <= frequency && frequency < 300) {
            Lw=1.792*Math.pow(10,-5)*Math.pow(frequency,3)-
0.015*Math.pow(frequency,2)+4.277*frequency-452.657;
        }else{
            Lw=3.167*Math.pow(10,-7)*Math.pow(frequency,3)-
8.4*Math.pow(frequency,2)+0.668*frequency-188.5;}
        L = 37 + 20 * Math.log10(r) + 10 *
Math.log10(frequency)+k*Lw;
        E = 49.396-L;
        P = 1000*Math.pow(10,E/20);
        e = P * h;
    }while(e> sensibility);
    distanceRight= (int) r;
    Holder.right=r;}
public void LeftDirection(double lat, double dev_lat){
    int k;
    double r = 0;
    double Lw;
    do {
        r+=0.5;
        if (r <= lat-(lat-dev_lat)){
            k=0;
        }else{
            k= (int) (r/lat);
            if(k<=1){

```

```

        k=1;}}
    if(30 <= frequency && frequency < 130){
        Lw=3.363*Math.pow(10,-4)*Math.pow(frequency,3)-
0.097*Math.pow(frequency,2)+7.882*frequency-198.018;
    }else if(130 <= frequency && frequency < 300) {
        Lw=1.792*Math.pow(10,-5)*Math.pow(frequency,3)-
0.015*Math.pow(frequency,2)+4.277*frequency-452.657;
    }else{
        Lw=3.167*Math.pow(10,-7)*Math.pow(frequency,3)-
8.4*Math.pow(frequency,2)+0.668*frequency-188.5;}
    L = 37 + 20 * Math.log10(r) + 10 *
Math.log10(frequency)+k*Lw;
    E = 49.396-L;
    P= 1000*Math.pow(10,E/20);
    e = P * h;
    }while(e> sensibility);
    distanceLeft= (int) r;
    Holder.left=r;}
public void DownDirection(double lon, double dev_lon){
    int k;
    double r = 0;
    double Lw;
    do {
        r+=0.5;
        if (r <= lon-dev_lon){
            k=0;
        }else{
            k= (int) (r/lon);
            if(k<=1){
                k=1;}}
        if(30 <= frequency && frequency < 130){
            Lw=3.363*Math.pow(10,-4)*Math.pow(frequency,3)-
0.097*Math.pow(frequency,2)+7.882*frequency-198.018;
        }else if(130 <= frequency && frequency < 300) {
            Lw=1.792*Math.pow(10,-5)*Math.pow(frequency,3)-
0.015*Math.pow(frequency,2)+4.277*frequency-452.657;
        }else{
            Lw=3.167*Math.pow(10,-7)*Math.pow(frequency,3)-
8.4*Math.pow(frequency,2)+0.668*frequency-188.5;}
        L = 37 + 20 * Math.log10(r) + 10 *
Math.log10(frequency)+k*Lw;
        E = 49.396-L;
        P= 1000*Math.pow(10,E/20);
        e = P * h;
    }while(e> sensibility);
    distanceDown= (int) r;
    Holder.down=r;}
public void HeightUpDist(double height, double dev_height){
    int n;
    double r = 0;
    double Lf;
    do {
        r+=0.5;

```

```

    if (r <= height-dev_height){
        n=0;
    }else{
        n= (int) (r/height);
        if(n<=1){
            n=1;}}
    if(30 <= frequency && frequency < 130){
        Lf=2.257*Math.pow(10,-4)*Math.pow(frequency,3)-
0.063*Math.pow(frequency,2)+4.865*frequency-117.554;
    }else if(130 <= frequency && frequency < 300) {
        Lf=2.467*Math.pow(10,-5)*Math.pow(frequency,3)-
0.019*Math.pow(frequency,2)+4.988*frequency-461.464;
    }else{
        Lf=-1.417*Math.pow(10,-
7)*Math.pow(frequency,3)+1.85*Math.pow(10,-
4)*Math.pow(frequency,2)+0.078*frequency-4.75;}
    L = 37 + 20 * Math.log10(r) + 10 *
Math.log10(frequency)+Lf*Math.pow(n, (n+2) / (n+1)-0.46);
    E = 49.396-L;
    P= 1000*Math.pow(10,E/20);
    e = P * h;
    }while(e> sensibility);
    distanceHeightUp = (int) r;
    Holder.heightUp=r;}
public void HeightDownDist(double height, double dev_height){
    int n;
    double r = 0;
    double Lf;
    do {
        r+=0.5;
        if (r <= height-(height-dev_height)){
            n=1;
        }else{
            n= (int) (r/height);
            if(n<=1){
                n=2;}}
        if(30 <= frequency && frequency < 130){
            Lf=2.257*Math.pow(10,-4)*Math.pow(frequency,3)-
0.063*Math.pow(frequency,2)+4.865*frequency-117.554;
        }else if(130 <= frequency && frequency < 300) {
            Lf=2.467*Math.pow(10,-5)*Math.pow(frequency,3)-
0.019*Math.pow(frequency,2)+4.988*frequency-461.464;
        }else{
            Lf=-1.417*Math.pow(10,-
7)*Math.pow(frequency,3)+1.85*Math.pow(10,-
4)*Math.pow(frequency,2)+0.078*frequency-4.75;}
        L = 37 + 20 * Math.log10(r) + 10 *
Math.log10(frequency)+Lf*Math.pow(n, (n+2) / (n+1)-0.46);
        E = 49.396-L;
        P= 1000*Math.pow(10,E/20);
        e = P * h;
    }while(e> sensibility);

```



```

        distanceHeightDown = (int) r;
        Holder.heightDown=r;}}
package p7;
import javax.swing.*;
import java.awt.*;
public class GraphBuild extends JFrame {
    public GraphBuild() {
        super("Вказана кімната і вектори");
        int basey = (int) Calculating.dy;
        int basex = (int) Calculating.dx;
        JPanel jcp = new JPanel(new BorderLayout());
        JLabel right = new JLabel(String.valueOf(Holder.right) + "
M");
        JLabel left = new JLabel(String.valueOf(Holder.left) + " M");
        JLabel up = new JLabel(String.valueOf(Holder.up) + " M");
        JLabel down = new JLabel(String.valueOf(Holder.down) + " M");
        JLabel UpUp = new JLabel(String.valueOf(Holder.heightUp) + "
M");
        JLabel DownDown = new JLabel(String.valueOf(Holder.heightDown)
+ " M");
        right.setBounds(basex+Formulas.distanceRight+10, basey, 40,
10);
        down.setBounds(basex, basey+Formulas.distanceDown+10, 40, 10);
        left.setBounds(basex-Formulas.distanceLeft-40, basey, 40, 10);
        up.setBounds(basex, basey-Formulas.distanceUp-10, 40, 10);
        UpUp.setBounds(basex+Formulas.distanceHeightUp+10, basey-
Formulas.distanceHeightUp-10, 40, 10);
        DownDown.setBounds(basex-Formulas.distanceHeightDown-10,
basey+Formulas.distanceHeightDown+10, 40, 10);
        setContentPane(jcp);
        jcp.add(new DrawingComponent (), BorderLayout.CENTER);
        jcp.add(right);
        jcp.add(down);
        jcp.add(left);
        jcp.add(up);
        jcp.add(UpUp);
        jcp.add(DownDown);
        jcp.add(new DrawingComponent (), BorderLayout.CENTER);
        jcp.setBackground(Color.gray);
        setSize(500, 500);
        setLocationRelativeTo(null);
        setDefaultCloseOperation(DISPOSE_ON_CLOSE);}}
package p7;
public class Holder {
    public static double right;
    public static double up;
    public static double down;
    public static double left;
    public static double heightUp;
    public static double heightDown;}
package p7;
import javax.swing.*;
import javax.swing.border.Border;

```

```

import java.awt.*;
import java.awt.event.ActionEvent;
import java.awt.event.ActionListener;
import static javax.swing.JFrame.EXIT_ON_CLOSE;
import static p7.Constants.COMBO_BOX;
public class SetRoom {
    public SetRoom() {
        JFrame frame = new JFrame("Введіть розміри кімнати в метрах");
        Dimension screenSize =
Toolkit.getDefaultToolkit().getScreenSize();
        int sizeWidth = 400;
        int sizeHeight = 400;
        int locationX = (screenSize.width - sizeWidth) / 2;
        int locationY = (screenSize.height - sizeHeight) / 2;
        frame.setBounds(locationX, locationY, sizeWidth, sizeHeight);
        JPanel jcp = new JPanel(new BorderLayout());
        jcp.setLayout(null);
        //components
        JTextField lon = new JTextField();
        JTextField lat = new JTextField();
        JTextField dev_lon = new JTextField();
        JTextField dev_lat = new JTextField();
        JTextField dev_place = new JTextField();
        JTextField height = new JTextField();
        JTextField sense = new JTextField();
        Border border = BorderFactory.createLineBorder(Color.BLACK);
        JButton but = new JButton("Позрахувати");
        //label set
        JLabel labelLat = new JLabel("Ширина приміщення");
        JLabel labelLon = new JLabel("Довжина приміщення");
        JLabel labelDevLat = new JLabel("Відстань приладу від лівої
стіни");
        JLabel labelDevLon = new JLabel("Відстань приладу від верхньої
(зовнішньої) стіни");
        JLabel labelDevPlace = new JLabel("Відстань приладу від
підлоги");
        JLabel labelHeight = new JLabel("Висота приміщення");
        JLabel labelSense = new JLabel("Чутливість приладу вимірювання
в мкВт");
        //label bounds
        labelLon.setBounds(10, 50, 300, 10);
        labelLat.setBounds(10, 5, 300, 10);
        labelDevLat.setBounds(10, 130, 300, 10);
        labelDevLon.setBounds(10, 170, 300, 10);
        labelDevPlace.setBounds(10, 210, 300, 10);
        labelHeight.setBounds(10, 250, 300, 10);
        labelSense.setBounds(10, 280, 300, 10);
        //set label
        labelLon.setLabelFor(lon);
        labelLat.setLabelFor(lat);
        labelDevLat.setLabelFor(dev_lat);
        labelDevLon.setLabelFor(dev_lon);
        labelDevPlace.setLabelFor(dev_place);

```

```

labelHeight.setLabelFor(height);
labelSense.setLabelFor(sense);
//lon conf
lon.setBounds(10,60,300,20);
lon.setBorder(border);
//lat conf
lat.setBounds(10,20,300,20);
lat.setBorder(border);
//device lon conf
dev_lon.setBounds(10,180,300,20);
dev_lon.setBorder(border);
//device lat conf
dev_lat.setBounds(10,140,300,20);
dev_lat.setBorder(border);
//device place above floor
dev_place.setBounds(10,220,300,20);
dev_place.setBorder(border);
//room height
height.setBounds(10,260,300,20);
height.setBorder(border);
//device sensibility
sense.setBounds(10,290,300,20);
sense.setBorder(border);
//button conf
but.setBounds(10,310,130,20);
but.setName("Calculate");
but.addActionListener(new ActionListener() {
    @Override
    public void actionPerformed(ActionEvent e) {
        String item = (String) COMBO_BOX.getSelectedItem();
        double Lat = Double.valueOf(lat.getText());
        double Lon = Double.valueOf(lon.getText());
        double Dev_lat = Double.valueOf(dev_lat.getText());
        double Dev_lon = Double.valueOf(dev_lon.getText());
        double Dev_place =
Double.valueOf(dev_place.getText());
        double Height = Double.valueOf(height.getText());
        Formulas.sensibility =
Double.valueOf(sense.getText());
        switch (item){
            case "Радіомікрофон з підвищеною чутливістю MP2" :
                Formulas.frequency = 96.1;
                break;
            case "Системна плата" :
                Formulas.frequency = 1000;
                break;
            case "CD-ROM" :
                Formulas.frequency = 800;
                break;
            case "Відеомонітор" :
                Formulas.frequency = 1000;
                break;
            case "Клавіатура" :

```

```

        Formulas.frequency = 20;
        break;
    case "Принтер" :
        Formulas.frequency = 30;
        break;}

    new
Calculating(Lon,Lat,Dev_lon,Dev_lat,Dev_place,Height);
    //frame.setVisible(false);});
//ComboBox label
JLabel labelBox = new JLabel("Оберіть апаратуру");
labelBox.setBounds(10,90,300,10);
COMBO_BOX.setBounds(10,100,300,20);
//add components
jcp.add(labelBox);
jcp.add(COMBO_BOX);
jcp.add(labelLon);
jcp.add(lon);
jcp.add(labelLat);
jcp.add(lat);
jcp.add(labelDevLat);
jcp.add(dev_lat);
jcp.add(labelDevLon);
jcp.add(dev_lon);
jcp.add(but);
jcp.add(labelDevPlace);
jcp.add(dev_place);
jcp.add(labelHeight);
jcp.add(height);
jcp.add(labelSense);
jcp.add(sense);
frame.getContentPane().add(jcp);
frame.setLocationRelativeTo(null);
frame.setDefaultCloseOperation(EXIT_ON_CLOSE);
frame.setVisible(true);}}}

package p7;
import javax.swing.*;
import java.awt.*;
public class ShowResultsFrame extends JFrame {
    public ShowResultsFrame(){
        super("Довжини векторів");
        JPanel jcp = new JPanel(new BorderLayout());
        JLabel right = new JLabel("Другий напрямок " +
String.valueOf(Holder.right) + " м");
        JLabel left = new JLabel("Четвертий напрямок "
+String.valueOf(Holder.left) + " м");
        JLabel up = new JLabel("Перший напрямок " +
String.valueOf(Holder.up) + " м");
        JLabel down = new JLabel("Третій напрямок "
+String.valueOf(Holder.down) + " м");
        JLabel UpUp = new JLabel("П'ятий напрямок "
+String.valueOf(Holder.heightUp) + " м");
        JLabel DownDown = new JLabel("Шостий напрямок "
+String.valueOf(Holder.heightDown) + " м");

```

```
JLabel label = new JLabel(" ");
right.setBounds(10,30,300,10);
down.setBounds(10,50,300,10);
left.setBounds(10,70,300,10);
up.setBounds(10,10,300,10);
UpUp.setBounds(10,90,300,10);
DownDown.setBounds(10,110,300,10);
label.setBounds(10,150,300,10);
setSize(300,170);
jcp.add(up);
jcp.add(right);
jcp.add(down);
jcp.add(left);
jcp.add(UpUp);
jcp.add(DownDown);
jcp.add(label);
setContentPane(jcp);
setLocation(0,0);
setDefaultCloseOperation(DISPOSE_ON_CLOSE);}}
package p7;
public class Main {
    public static void main(String[] args)    {
        new SetRoom();}}
```