

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Стиценко Тетяни Євгенівни

УДК 615.849.11

## **ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОД ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ МЕДИЧНОГО  
ПЕРСОНАЛУ ВІД ВПЛИВУ ВИПРОМІНЮВАНЬ НАДВИСОКОЇ ЧАСТОТИ**

05.11.17 – Біологічні та медичні прилади і системи

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  
\_\_\_\_\_Т.Є. Стиценко

Науковий керівник Семенець В.В., доктор технічних наук, професор

Харків – 2017

## АНОТАЦІЯ

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.17 «Біологічні та медичні прилади і системи». – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2017. Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальній науково–технічній задачі – розробці метода оцінки ефективності захисту медичного персоналу, удосконаленню існуючих методів та засобів захисту від впливу електромагнітного випромінювання.

В удосконалених моделях на відміну від відомих, враховуються як паразитні випромінювання, число відбитих хвиль так і число зовнішніх джерел, які мають випадкові амплітуди і фази. Це дозволило визначити показники електромагнітного випромінювання в медичних приладах і системах.

Розроблена математична модель біологічної системи життєдіяльності і узагальнений критерій ефективності системи захисту. Це дозволило характеризувати як всю систему, так і її окремі частини, що важливо при порівнянні декількох систем.

Визначення параметрів багатосарових покриттів при довільних кутах падіння електромагнітної хвилі дозволило розрахувати коефіцієнт поглинання при різних товщинах захисних матеріалів.

Ключові слова: хвиля, фаза, електромагнітне випромінювання, система життєдіяльності, критерій оцінки, коефіцієнт поглинання.

### Список публікацій здобувача

1. Стыценко Т.Е. Критерии и способы оптимального размещения датчиков контрольно–измерительной аппаратуры / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк,

- М.И. Пацера // Вестник национального технического университета ХПИ. –2006.– №10.–С.47–51.
2. Стыценко Т.Е. Структуры и типы моделей систем «человек–машина–среда» / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк, И.В. Наумейко, Н.Н. Сердюк. // АСУ и приборы автоматики. – 2007.– № 138.– С.47–50.
  3. Стыценко Т.Е. Безопасность работы при использовании различных видов мониторов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк, И.И. Хондак // Вестник национального университета ХПИ. – 2008.–№ 43.– С.94–98.
  4. Стыценко Т.Е. Критерии и методы оптимизации систем с защитой / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2008.– 2/3(32).– С.10–13.
  5. Стыценко Т.Е. Исследование характеристик радиозащитного костюма с постоянным коэффициентом защиты // Т.Е. Стыценко Вестник НТУ ХПИ. –2010.– № 44.– С. 101–104.
  6. Стыценко Т.Є. Системний підхід до інформаційного забезпечення охорони праці // Т.Є. Стыценко Вестник Харьковского национального автомобильно–дорожного университета. – 2012.– Вып. 59.– С. 155 – 157.
  7. Стыценко Т.Е. Подходы к обеспечению безопасности жизнедеятельности в современных условиях // Т.Е. Стыценко Збірка наукових статей, що видана за матеріалами VII–ї міжнародної науково–методичної конференції НТУ «ХПІ» та 105–ї міжнародної конференції EAS «Безпека людини в сучасних умовах». – 2015.– С. 76 – 80.
  8. Стыценко Т.Е. Разработка материала для защиты медицинского персонала от воздействия излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Восточно–Европейский журнал передовых технологий – 2016. – № 2/5(80).– С. 30–37.
  9. Стыценко Т.Е. Анализ электромагнитной обстановки и моделирование источников паразитных излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Радиотехника. – 2016.– № 184.– С. 155–163.
  10. Стыценко Т.Е. Разработка биомедицинской системы жизнедеятельности

- при воздействии электромагнитных излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Системи обробки інформації. – 2016.– № 8(145).– С. 139–144.
11. Stytsenko T.E, Semenets V.V Analysis of electromagnetic and modeling of spurious radiation sources / T.E.Stytsenko, V.V.Semenets // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016, Vol. 75, Issue 15. – P. 1385–1396.
12. Стыценко Т.Е. К вопросу о проектировании систем защиты от воздействия вредных факторов / Б.В. Дзюндзюк, П.Н. Маслов // Научно-методическая конференция по БЖД, 27–28 ноября 2001г., материалы конф. – Х., 2001. – С. 68 – 70.
13. Стыценко Т.Е. Обеспечение электромагнитной безопасности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Сборник тезисов доклада по материалам международной научной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации», г. Туапсе, 2004. – С. 277 – 278.
14. Стыценко Т.Е. Воздействие электромагнитных излучений на зрительный анализатор человека, средства защиты / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Тезисы докладов на научно-методическую конференцию по БЖД, ноябрь 2005 г.: материалы конф. – Харьков, 2005. – С. 113 – 114.
15. Стыценко Т.Е. Оперативная система управления условиями труда / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Межвузовская научно-техническая конференция «Психологічні та технічні проблеми безпеки праці, життя та здоров'я людини» 2005 г.: матеріали конф. – Полтава, 2005 г.– С. 18 – 19.
16. Стыценко Т.Е. Безопасность человека при работе с компьютерами // Т.Е. Стыценко 6 региональная методическая конференция НТУ ХПИ «Безопасность жизнедеятельности человека», г. Харьков, 06.12.2006 г. – С.76–77.
17. Стыценко Т.Е. Расчет эффективности экранирования сплошными металлическими экранами// Т.Е. Стыценко Тезисы докладов 7-й региональной

- научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. – 2007. – НТУ ХПИ, 41 с.
- 18.Стыценко Т.Е. Структура экспертной системы контроля и управления условиями труда / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Тезисы докладов 8–й региональной научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. – 2008. – НТУ ХПИ, г. Харьков. – 2008. – С. 132 – 133.
- 19.Стыценко Т.Е. Уменьшение влияния электромагнитных полей на человека за счет применения поглощающих экранов // Т.Е. Стыценко Тезисы докладов 7–й региональной научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. –2007. – НТУ ХПИ, С. 51 – 52.
- 20.Стыценко Т.Е. Уменьшение влияния электромагнитных полей при помощи радиопоглощающих экранов // Т.Е. Стыценко Тези доповідей 8–ї Міжвузівської науково–методичної конференції «Безпека людини в сучасних умовах» 4–5 грудня, НТУ ХПИ, м. Харків. – 2008 р.– 55 с.
- 21.Стыценко Т.Е. Определение плотности потока энергии в специальных помещениях / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк //Міжнародно–науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», м. Харків, НТУ ХПІ 3 – 4 грудня, 2009 р.– С. 85 – 86.
22. Стыценко Т.Е. К вопросу о разработке радиозащитных костюмов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк //Міжнародно–науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», м. Харків, НТУ ХПІ 3–4 грудня, 2009 р. – 65 – 66 с.
- 23.Стыценко Т.Е. К вопросу о нормировании комплекса вредных производственных факторов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // II Міжнародна науково – методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 2 – 3 грудня, 2010 р.– м. Харків. – С. 273 – 274.
- 24.Стыценко Т.Е. Некоторые вопросы защиты от воздействия электромагнитных полей / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // II Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 2 – 3 грудня, 2010 р.– м. Харків. – С. 229 – 231.

- 25.Стыценко Т.Е. Эффективность экранирования – как средство обеспечения безопасности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // III Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 8 – 9 грудня, 2011р.– м. Харків. – С. 166 – 168.
- 26.Стыценко Т.Е. Безопасность человека – главная составляющая здоровья // Т.Е. Стыценко VI Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 6 – 7 грудня, 2012р.– м. Харків. – С. 106 – 107.
- 27.Стыценко Т.Е. Экономико–математическое моделирование систем безопасной жизнедеятельности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Международная научно–практическая конференция «Математическое моделирование процессов в экономике и управлении инновационными проектами» (ММП – 2013), г. Харьков. – С. 54 – 55.
- 28.Стыценко Т.Е. Безопасность жизнедеятельности при использовании радиотехнических систем // Т.Е. Стыценко VI Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 4 – 5 грудня, 2014р.– м. Харків. – С. 285 – 287.

## ABSTRACT

Stytsenko T.E. Method to assess effectiveness of protection of medical staff from the action of extremely high electromagnetic frequencies' radiation – Qualification scientific work for task manuscript rights.

Thesis for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.11.17 – Biological and medical devices and systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2017. The thesis is devoted to solution of important scientific and technical problem, which consists in the development of new and improvement of existing methods and means of medical personnel protection from electromagnetic radiation.

In the advanced models, in contrast to the known ones, both spurious radiation, the number of reflected waves and the number of external sources, that have random amplitude and phase, are considered. This made it possible to determine the indicators of electromagnetic radiation in medical devices and systems.

The mathematical model of the biomedical system of vital activity and the generalized statistical criterion were developed. This made it possible to characterize the system and its individual parts using a single number, which is important when comparing multiple systems.

Determination of the parameters of multilayer coatings with arbitrary angles of incidence of electromagnetic waves made it possible to calculate the absorption coefficient for various thicknesses of protective materials.

Keywords: wave, phase, electromagnetic radiation, system of vital activity, statistical criterion, absorption coefficient.

#### List of publications of the applicant

1. Стыценко Т.Е. Критерии и способы оптимального размещения датчиков контрольно–измерительной аппаратуры / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк, М.И. Пацера // Вестник национального технического университета ХПИ. –2006.– №10.–С.47–51.
2. Стыценко Т.Е. Структуры и типы моделей систем «человек–машина–среда» / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк, И.В. Наумейко, Н.Н. Сердюк. // АСУ и приборы автоматики. – 2007.– № 138.–С.47–50.
3. Стыценко Т.Е. Безопасность работы при использовании различных видов мониторов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк, И.И. Хондак // Вестник национального университета ХПИ. – 2008.–№43.– С.94–98.
4. Стыценко Т.Е. Критерии и методы оптимизации систем с защитой / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2008.– 2/3(32).– С.10–13.

5. Стыценко Т.Е. Исследование характеристик радиозащитного костюма с постоянным коэффициентом защиты // Т.Е. Стыценко Вестник НТУ ХПИ. –2010.– № 44.– С. 101–104.
6. Стыценко Т.Е. Системний підхід до інформаційного забезпечення охорони праці // Т.Е. Стыценко Вестник Харьковского национального автомобильно–дорожного университета. – 2012.– Вып. 59.– С. 155–157.
7. Стыценко Т.Е. Подходы к обеспечению безопасности жизнедеятельности в современных условиях // Т.Е. Стыценко Збірка наукових статей, що видана за матеріалами VII–ї міжнародної науково–методичної конференції НТУ «ХПИ» та 105–ї міжнародної конференції EAS «Безпека людини в сучасних умовах». – 2015.– С. 76–80.
8. Стыценко Т.Е. Разработка материала для защиты медицинского персонала от воздействия излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Восточно–Европейский журнал передовых технологий – 2016. – № 2/5(80).– С. 30–37.
9. Стыценко Т.Е. Анализ электромагнитной обстановки и моделирование источников паразитных излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Радиотехника. – 2016.– № 184.– С. 155–163.
10. Стыценко Т.Е. Разработка биомедицинской системы жизнедеятельности при воздействии электромагнитных излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Системи обробки інформації. – 2016.– № 8(145).– С. 139–144.
11. Stytsenko T.E, Semenets V.V Analysis of electromagnetic and modeling of spurious radiation sources / T.E.Stytsenko, V.V.Semenets // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016, Vol. 75, Issue 15. – P. 1385–1396.
12. Стыценко Т.Е. К вопросу о проектировании систем защиты от воздействия вредных факторов / Б.В. Дзюндзюк, П.Н. Маслов // Научно–методическая конференция по БЖД, 27–28 ноября 2001г., материалы конф. – Х., 2001. – С. 68 – 70.



- 13.Стыценко Т.Е. Обеспечение электромагнитной безопасности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Сборник тезисов доклада по материалам международной научной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации», г. Туапсе, 2004. – С. 277 – 278.
- 14.Стыценко Т.Е. Воздействие электромагнитных излучений на зрительный анализатор человека, средства защиты / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Тезисы докладов на научно–методическую конференцию по БЖД, ноябрь 2005 г.: материалы конф. – Харьков, 2005. – С. 113 – 114.
- 15.Стыценко Т.Е. Оперативная система управления условиями труда / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Межвузовская научно–техническая конференция «Психологічні та технічні проблеми безпеки праці, життя та здоров'я людини» 2005 г.: матеріали конф. – Полтава, 2005 г.– С. 18 – 19.
- 16.Стыценко Т.Е. Безопасность человека при работе с компьютерами // Т.Е. Стыценко 6 региональная методическая конференция НТУ ХПИ «Безопасность жизнедеятельности человека», г. Харьков, 06.12.2006 г. – С.76–77.
17. Стыценко Т.Е. Расчет эффективности экранирования сплошными металлическими экранами// Т.Е. Стыценко Тезисы докладов 7–й региональной научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. – 2007. – НТУ ХПИ, 41 с.
- 18.Стыценко Т.Е. Структура экспертной системы контроля и управления условиями труда / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Тезисы докладов 8–й региональной научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. – 2008. – НТУ ХПИ, г. Харьков. – 2008. – С. 132 – 133.
- 19.Стыценко Т.Е. Уменьшение влияния электромагнитных полей на человека за счет применения поглощающих экранов // Т.Е. Стыценко Тезисы докладов 7–й региональной научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. –2007. – НТУ ХПИ, С. 51 – 52.
- 20.Стыценко Т.Е. Уменьшение влияния электромагнитных полей при помощи радиопоглощающих экранов // Т.Е. Стыценко Тези доповідей 8–ї Мі-

жвузівської науково–методичної конференції «Безпека людини в сучасних умовах» 4–5 грудня, НТУ ХПИ, м. Харків. – 2008 р.– 55 с.

- 21.Стыценко Т.Е. Определение плотности потока энергии в специальных помещениях / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк //Міжнародно–науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», м. Харків, НТУ ХПІ 3 – 4 грудня, 2009 р.– С. 85 – 86.
22. Стыценко Т.Е. К вопросу о разработке радиозащитных костюмов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк //Міжнародно–науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», м. Харків, НТУ ХПІ 3–4 грудня, 2009 р. – С. 65–66.
- 23.Стыценко Т.Е. К вопросу о нормировании комплекса вредных производственных факторов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // II Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 2–3 грудня, 2010 р.– м. Харків. – С. 273 – 274.
- 24.Стыценко Т.Е. Некоторые вопросы защиты от воздействия электромагнитных полей / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // II Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 2 – 3 грудня, 2010 р.– м. Харків. – С. 229 – 211.
- 25.Стыценко Т.Е. Эффективность экранирования – как средство обеспечения безопасности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // III Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах»,8 – 9 грудня, 2011р.– м. Харків. – С. 166 – 168.
- 26.Стыценко Т.Е. Безопасность человека – главная составляющая здоровья // Т.Е. Стыценко VI Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах»,6 – 7 грудня, 2012р.– м. Харків. – С. 106 – 107.
- 27.Стыценко Т.Е. Экономико–математическое моделирование систем безопасной жизнедеятельности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Международная научно–практическая конференция «Математическое моделиро-

вание процессов в экономике и управлении инновационными проектами» (ММП – 2013), г. Харьков. – С. 54 – 55.

- 28.Стыценко Т.Е. Безопасность жизнедеятельности при использовании радиотехнических систем // Т.Е. Стыценко VI Міжнародна науково-методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 4 – 5 грудня, 2014р.– м. Харків. – С. 285 – 287.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ЛЮДИНИ	
ВІД ДІЇ ВИПРОМІНЮВАНЬ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ.....	22
1.1 Вплив електромагнітних полів на біологічні об'єкти.....	22
1.2 Дія електромагнітних полів на різні системи організму людини.....	26
1.3 Негативна дія електромагнітних полів на організм людини залежно від частотного діапазону.....	37
1.4 Класифікація методів захисту від електромагнітного випромінювання .....	41
1.5 Захист персоналу при настройці, регулюванні і випробуваннях біомедичних приладів і систем з джерелами НВЧ випромінювань	51
Висновки до першого розділу.....	52
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ І МЕТОДІВ ЗАХИСТУ МЕДИЧНОГО ПЕРСОНАЛУ ВІД НЕГАТИВНОЇ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ .....	
2.1 Побудова методу оцінки ефективності захисту	54
2.2 Обґрунтування методів кількісного визначення небезпечних електромагнітних полів складної структури.....	55
2.3 Розробка моделі електромагнітної обстановки у приміщенні з медичною апаратурою .....	58
2.4 Розрахунок коефіцієнта захисту однорідних багатосарових матеріалів .....	68
2.5 Метод розрахунку допустимого рівня електромагнітного випромінювання на організм людини, яка знаходиться в захисному середовищі .....	70
Висновки до другого розділу .....	78

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ І ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ БІОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	79
3.1 Доза шкідливої дії як критерій безпеки біологічної системи.....	79
3.2 Функціональна модель системи біологічного захисту від електромагнітного випромінювання.....	87
3.3 Потенційна модель системи біологічного захисту від електромагнітного випромінювання.....	89
3.4.Реальная модель системи біологічного захисту від електромагнітного випромінювання.....	94
3.5 Моделювання джерел паразитних випромінювань медичних приладів.....	97
3.5.1 Моделювання джерел на стінках прямокутного хвилеводу медичного приладу .....	98
3.5.2 Моделювання випромінювань на круглих циліндрових поверхнях медичних приладів.....	103
3.5.3 Моделювання випромінювань в зовнішньому провіднику коаксіальної лінії медичних приладів.....	105
Висновки до третього розділу .....	107
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРНОГО ЗАХИСТУ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ .....	109
4.1 Вимоги, які пред'являються до захисних поглинаючих матеріалів.....	109
4.2 Експериментальне дослідження поглинаючих матеріалів .....	110
4.2.1 Технологія виготовлення радіопоглинаючих матеріалів на основі пінополістиролу. ....	110
4.2.2 Установка для дослідження радіопоглинаючих матеріалів .....	113
4.2.3 Експериментальні дослідження неоднорідних	

	14
радіопоглинаючих матеріалів.....	116
4.3 Експериментальні дослідження захисного одягу.....	121
4.3.1 Експериментальні дослідження радіозахисного костюму і визначення слабо захищених областей тіла людини при дії електромагнітного випромінювання.....	121
4.3.2 Засоби підвищення ефективності екранування захисного одягу. Вироблення рекомендацій.....	128
4.3.3 Розробка захисного одягу з рівноефективними захисними властивостями.....	133
Висновки до четвертого розділу.....	135
Основні результати і висновки.....	137
Список використаних джерел.....	140
Додаток А.....	153
Додаток Б.....	167

## ВСТУП

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** В даний час, при широкому використуванні в сучасній медицині приладів, що працюють в діапазоні випромінювань надвисоких частот (НВЧ), виникає необхідність забезпечення умов, при яких медичний персонал би був забезпечений ефективним захистом від дії, даного негативного чинника.

Сучасна медична апаратура, яка реалізує складні діагностичні методи представлена широким спектром фізіотерапевтичної ЕМА (електронно–медичної апаратури), яка використовується для терапевтичної дії на організм і тканини різними фізичними факторами, що створюється цими апаратами: низькочастотна (до 2 кГц) – апарати для електростимуляції, високочастотна (70 кГц – 30 МГц) – апарати для дарсонвалізації, діаметрії, індикатометри, ультрависокочастотна (30–30 МГц) – апарати для УВЧ терапії, надвисокочастотна (частота понад 300 МГц) – НВЧ апарати, апарати КВЧ терапії.

Жорсткі технічні вимоги до систем захисту, обумовлюють необхідність пошуку комплексних рішень задачі забезпечення безпеки життєдіяльності від дії електромагнітного випромінювання (ЕМВ) в умовах постійного перебування медичного персоналу під впливом випромінювань НВЧ. Такі рішення включають використання не тільки спеціальних матеріалів і покриттів, але і оцінку ефективності захисту цих методів та засобів, облік електродинамічних властивостей навколишнього середовища, вибору найбільш ефективних та менш затратних технологій виготовленні.

Серед робіт по біологічній дії випромінювань надвисоких частот на системи організму людини значне місце займають роботи М.Г. Шандали, К.В. Никонової, Б.А. Чухловіна, М.Л. Баранникова, Яшина С.А. і ін.

Рекомендації по захисту систем і органів людини від дії випромінювань надвисоких частот пропонувалися починаючи з минулим століттям, такими вченими як К.Г. Кнорре, В.В. Елісєєвим, А.С. Прейсманом і ін. Не слабшає ін-

терес і до практичної реалізації розробок і засобів, які засновані на принципі відображення і поглинання електромагнітної хвилі.

Напрямок, пов'язаний з дослідженням і розробкою матеріалів і конструкцій з кінцевою провідністю, які забезпечили б заданий коефіцієнт захисту в складній структурі електромагнітного поля, отриманий розвиток в роботах В.А. Торганова, П.М.Маслова, Н.А.Хижняка, Б.В.Дзюндзюк, О.С. Островського, Л.М. Линькова, Ю.К. Александрова і ін.

Сучасні терапевтичні апарати мають можливість генерувати високі пучки енергії, що можливо використовувати при розробці нових методів променевого лікування пухлин. Найбільш придатними виявилися лінійні прискорювачі електронів.

Медичні лінійні прискорювачі електронів – це установки, у яких електрони прискорюються до кінетичної енергії від 4 до 25 МеВ із застосуванням електромагнітних полів у діапазоні надвисоких частот (НВЧ)  $1 \div 10$  ГГц.

Функціональна готовність та безпека експлуатації лінійних прискорювачів електронів визначається у відповідності з принципами міжнародного стандарту ІЕС 60976–2011 «Вироби медичні електричні. Медичні прискорювачі електронів. Функціональні характеристики».

Сучасні технології виробництва мають деякі недоліки, а саме електромагнітні перехідні процеси, що виникають через вплив міських та промислових споживачів, можуть мати тривалість до кількох секунд та смугу частот до десятків мегагерц. Через це виникають провали та імпульси напруги, короточасні перенапруги.

Найбільшою проблемою, яка впливає на працездатність сучасних медичних систем, є їх непристосованість до «вітчизняних» умов експлуатації, які часто не узгоджуються з вимогами виробника. Насамперед, це стосується стану приміщень, мереж живлення та інженерних комунікацій.

Іншим важливим чинником забезпечення працездатності лінійних прискорювачів у режимі інтенсивного навантаження є безперебійна робота системи внутрішнього охолодження, яка забезпечує стабільний тепловий режим у сис-



темі генерації фотонного пучка. При безперервній експлуатації, внаслідок великої кількості пацієнтів за робочу зміну, виникає можливість надходження електромагнітних хвиль «на ружу» за рахунок недостатньої щільності у стиках хвилеводів. Виникають так звані «паразитні випромінювання».

У зв'язку з удосконаленням методів побудови систем захисту (СЗ) від випромінювань надвисоких частот, особливу роль грає рішення задачі дослідження особливостей дії радіопоглинаючих матеріалів (РПМ) на рівень випромінювання у приміщеннях з медичною апаратурою, яка працює у діапазоні НВЧ, а також властивостей цих матеріалів: коефіцієнта відображення, поглинання, екранування в широкому спектрі електродинамічних параметрів.

Для вирішення даної задачі потрібно провести оцінку ефективності захисту медичного персоналу від впливу хвиль НВЧ, та на основі моделі, здійснити теоретичні і експериментальні дослідження властивостей поглинаючих матеріалів, які задовольняли б співвідношенню «ефективний захист плюс низька вартість» та зменшили можливі гострі та хронічні захворювання медичного персоналу при роботі з даною медичною апаратурою.

**Мета роботи.** Мета даної дисертаційної роботи полягає в розробці методу оцінки ефективності захисту медичного персоналу та удосконаленню захисту при обслуговуванні, ремонті і експлуатації медичних приладів і систем.

**Основні задачі досліджень.** Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- провести аналіз джерел ЕМП при використанні медичної апаратури у лікувальних закладах;
- провести аналіз існуючих захисних пристроїв і методів захисту людини від дії випромінювань надвисоких частот;
- розробити функціональну модель біологічної системи життєдіяльності;
- визначити критерій оцінки ефективності захисту при дії електромагнітного випромінювання на біологічні об'єкти;

- дослідити властивості багат шарових поглиначів, на можливість їх застосування для захисту медичного персоналу;
- удосконалити моделі індивідуальних засобів захисту біологічного об'єкту, які забезпечили б рівно ефектний захист від дії випромінювань по всьому об'єму тіла людини при обслуговуванні, ремонті і експлуатації медичних приладів і систем;
- провести апробацію ефективності засобів захисту медичного персоналу в лікувальних закладах при дії випромінювання надвисоких частот.

**Методи дослідження.** Методи електродинаміки – для дослідження і розробки засобів захисту від дії ЕМП, методи моделювання складних стохастичних об'єктів – для аналізу процесів та оцінки ефективності захисту ЕМП, методи математичного моделювання – для розроблення моделі біологічної системи життєдіяльності; методи статистичної обробки даних – для перевірки адекватності та підтвердження достовірності розроблених методів захисту медичного персоналу від дії електромагнітного випромінювання.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше розроблено метод оцінки ефективності захисту медичного персоналу при комплексній дії електромагнітного випромінювання та запропоновано узагальнений критерій оцінки, що дозволило більш адекватно оцінити існуючі системи захисту.
2. Вдосконалена модель оцінки рівня ЕМВ, яка на відміну від відомих враховує всі джерела випромінювання, що дозволило одночасно оцінювати показники електромагнітного випромінювання для різних типів джерел.
3. Отримало подальший розвиток рішення задачі визначення параметрів багат шарових покриттів, що слабо відображають, при довільних кутах падіння електромагнітної хвилі і поляризації в широкому частотному діапазоні застосування медичних приладів і систем (10– 75ГГц), що дозволило розрахувати коефіцієнт поглинання при різній товщині поглинача.

4. Отримав подальший розвиток метод розрахунку коефіцієнта захисту при впливі електромагнітного випромінювання на організм людини, що дозволило запропонувати систему захисту людини, яка забезпечує рівноеквівалентні захисні властивості по всьому об'єму тіла людини.

### **Практична значущість отриманих результатів**

1. Розроблена методологія створення біологічної системи життєдіяльності людини і узагальнений критерій захисту при дії електромагнітного випромінювання на біологічні об'єкти.

2. Проведено експериментальне дослідження поглинаючих матеріалів при дії електромагнітного випромінювання. Показано, що резистивний поглинаючий матеріал на основі пінополістиролу (EPS) з додаванням графіту, володіє тією особливістю, що дозволяє реалізувати розрахункові закони зміни комплексної діелектричної проникності. Зокрема, поглинаючий матеріал без шару, що погоджує, з додаванням в кожний шар аквадагу різної концентрації, має коефіцієнт відображення більше, ніж з погоджуючим. Поглинаючі властивості матеріалу практично не залежать від кута падіння електромагнітної хвилі.

3. Експериментально доведено, що можливо створити матеріал з якнайкращими коефіцієнтами відображення і поглинання в широкому діапазоні кутів падіння електромагнітної хвилі в нижній частині частотного діапазону. Застосування в матеріалі елементів конусоподібної форми, що відображають, приводить до істотного зростання коефіцієнта поглинання. Це, у свою чергу, дозволяє отримати матеріал малої товщини в широкому діапазоні довжин хвиль.

4. Експериментально встановлено, що матеріал для екранування ЕМВ на основі пінополістиролу (EPS) з додаванням графіту, володіє високими екрануючими властивостями без використання складної технології виготовлення. Найкращими характеристиками в досліджуваному діапазоні частот був виявлений аквадаг з розміром частинок графіту 30–70 мкм.

5. Експериментальним шляхом встановлено, що ефективність захисту всіх частин тіла людини залежить від властивості тканини, що містить струмопровідну сітку і від кроку сітки. Чим крок сітки менше, тим вище ефективність екранування. Встановлено, що якщо радіозахисний одяг виконати з тканини, в якій змінний крок сітки, то рівень потужності електромагнітного випромінювання, що пройшов через екран, буде однаковим для всіх ділянок тіла людини.

**Апробація роботи.** Основні результати дисертаційної роботи докладалися і отримали схвалення на 17 Всеукраїнських і Міжнародних конференціях: Міжнародній науково–практичній конференції «Безпека людини в сучасних умовах» 2001 р., 2005–2015 рр. м. Харків; 10 – й Міжнародній конференції «Теорія і техніка передачі, прийому і обробка інформації» р. Харків 2004; Міжвузівської науково–технічної конференції «Психологічні і технічні проблеми безпеки праці, життя і здоров'я», м. Полтава 2005–2006 рр.; Міжнародній науково–практичній конференції «Математичне моделювання процесів в економіці і управлінні інноваційними проектами» (ММП– 2013), м. Харків.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 28 наукових праць, з них: 7 статі в наукових виданнях, що входять до переліку фахових видань України для публікацій результатів дисертаційних робіт з технічних наук; 1 стаття в періодичному зарубіжному виданні, 2 в періодичному виданні, що входить в наукометричних баз даних; 18 публікації за матеріалами тез доповідей науково –практичних конференцій.

**Об'єм дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаних джерел з 114 найменувань на 13 сторінках та 2 додатків на 18 сторінках, а також містить 30 рисунків і 3 таблиці (рисунки та таблиці, що займають окрему прощу на 2 сторінках). Загальний обсяг роботи 170 сторінок, включаючи 125 сторінок основного тексту.

**Особистий внесок автора.** Основні результати дисертаційного дослідження отримані особисто автором роботи. Основні з них наступні:

1. Розроблено метод оцінки ефективності захисту медичного персоналу при впливі випромінювання надвисокої частоти.
2. Розроблено математичну модель біологічної системи життєдіяльності і узагальнений критерій ефективності захисту при дії електромагнітного випромінювання на біологічні об'єкти.
3. Вдосконалено математичну модель визначення рівня електромагнітного випромінювання при впливі на людину.
4. Досліджені багатошарові поглиначі, що складаються з комбінацій однорідних і неоднорідних шарів.
5. Вдосконалено метод індивідуального захисту біологічного об'єкту, який забезпечує рівно ефективні захисні властивості при дії випромінювання по всьому об'єму тіла людини при обслуговуванні, ремонті і експлуатації медичних приладів і систем.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ЛЮДИНИ ВІД ДІЇ ВИПРОМІНЮВАНЬ НАДВИСОКИХ ЧАСТОТ

#### 1.1 Вплив електромагнітних полів на біологічні об'єкти

Дискусії про негативний вплив електромагнітних полів (ЕМП) на організм людини продовжуються не один десяток літ. Так ще в 60 – ті роки минулого століття був запропонований новий медичний діагноз – «радіохвильова хвороба», викликана дією електромагнітних полів. По наслідках дії на організм людини нагадувала нейроциркуляторну дистонію (НЦД). Було показано, що радіохвильова хвороба як би «розгойдує» весь організм і «розриває» там, де тонко: у однієї людини сприяє гіпертонії, у іншого – серцевої аритмії, у третього – хвороби язви, у четвертого – гормональному дисбалансу, а значить безлічі ендокринних захворювань (від ожиріння до порушення потенції у чоловіків і дисменореї у жінок).

Подальші дослідження, як в нашій країні, так і за кордоном [1–5] показали, що причина порушення здоров'я людей в зонах з підвищеною інтенсивністю електромагнітних випромінювання полягає у стійкій зміні характеристик власних енергетичних полів організму (біополів). Внаслідок чого різні органи людини (втім, як і інших живих організмів) змінюють свої природні параметри функціонування, аж до зміни молекулярної структури. Хоча після виходу з небезпечної зони захисні механізми здорового організму у змозі частково або повністю усунути зміни, які утворилися, проте, при тривалому або постійному перебуванні в місцях прояву підвищених ЕМП такі зміни неминуче накопичуються, набуваючи стабільного хворобливого характеру різної тяжкості і симптоматики, що може виявлятися в наступному: швидка стомлюваність, стан апатії, загальна слабкість, головні болі; порушення функціонування ослаблених органів, яке переходить у патологічний стан;

ослаблення уваги, пам'яті, порушення логіки мислення і мови; нервові і психічні розлади; захворювання крові; онкологічні захворювання; хвороби Паркінсона і Альцгеймера; синдром раптової смерті зовні здорової дитини.

Як відзначає більшість дослідників [6–8] біологічна дія електромагнітних полів на організм залежить від таких фізичних параметрів як довжина хвилі, інтенсивність випромінювання, режим опромінювання (безперервний або переривистий), тривалість дії на організм, а також комбінованої дії з іншими виробничими чинниками середовища (підвищена температура повітря, наявність рентгенівського випромінювання, шуму і ін.), які можуть змінювати опірність на дію ЕМП.

Проте, численні дослідження [9–11] дають підставу як самих небезпечних зі всіх перерахованих чинників виділити два: потужність поля і частоту. Крім того, аналіз досліджень [12,13] дозволяє до цих двох чинників додати і третій (який не враховується деякими авторами), – залежність наслідків дії ЕМП від стану системи і органів організму, на який воно робить вплив.

У залежності від потужності, розрізняють теплову (при відносно високих рівнях випромінюючого ЕМП) і нетеплову (при відносно низькому рівні) дію. Умовною межею між цими типами дії є величина в  $10 \text{ мВт/см}^2$  опромінюваної поверхні, – при такому значенні потужності, тканини можуть прогрітися на декілька десятків часток градуса (гіпертермія).

Необхідно відзначити, що теплову дію можуть викликати ЕМП різної частоти. В низькочастотному і високочастотному діапазонах перетворення енергії ЕМП в теплову пов'язано в основному з втратами провідності, що виникають за рахунок виділення в тканинах Джоулева тепла індукованими в них іонними струмами. До частот порядку 10 МГц розміри тіла людини і крупних тварин (а тим більше дрібних) малі у порівнянні з довжиною хвилі, а тканини тіла можна розглядати як провідне середовище. Тому виконуються умови квазістаціонарності і розрахунки можна проводити як для статичного поля; потужність ЕМП, що поглинається в одиниці об'єму тіла, може бути в цьому випадку обчислений по законах постійного струму:

$$P = I^2 \rho \text{ (Вт/см}^3\text{)} \quad (1.1)$$

Величину густини струму  $I$  слід обчислювати стосовно форми і електричних параметрів біологічного об'єкту.

За цих умов густина струму у разі електричного поля рівна:

$$I_e = 1,3 \cdot 10^{-13} \cdot f \cdot E \text{ (А/см}^2\text{)}, \quad (1.2)$$

а у разі магнітного поля

$$I_H = 1,3 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot H \text{ (А/см}^2\text{)}. \quad (1.3)$$

Кількість тепла, що виділяється при цьому в тілі людини, визначатиметься із співвідношень:

$$\begin{aligned} Q_E &= 2 \cdot 10^{-20} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot f^2 \cdot E^2 \text{ кал/хвил}, \\ Q_H &= 2 \cdot 10^{-16} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot f^2 \cdot H^2 \text{ кал/хвил} \end{aligned} \quad (1.4)$$

де  $\rho_{\text{ср}}$  – середній питомий опір тканин тіла людини.

В діапазонах надвисоких частот (НВЧ) перетворення енергії ЕМП в теплову пов'язано вже не тільки з втратами провідності, але і з діелектричними втратами. При цьому частка діелектричних втрат в загальному поглинанні енергії ЕМП в тканинах зростає з частотою. Наприклад, втрати, пов'язані з релаксацією молекул води в тканинах, на частоті 1 ГГц складають близько 50% від загальних втрат, на частоті 10 ГГц – близько 90% і на частоті 30 ГГц – близько 98%.

В цих частотних діапазонах розміри тіла людини і крупних тварин вже порівнянні з  $\lambda$  або перевищують її, а тканини тіла вже не можна розглядати як провідне середовище, також не можна вважати різні тканини гомогенними по електричним властивостям. Інакше кажучи, умова квазістаціонарності тут не виконується і необхідне розглядати потік хвиль, частина якого відображається від поверхні тіла, а решта частини поступово поглинається в електрично негетогенних тканинах.

З урахуванням відображення потужність ЕМП, що поглинається на  $1 \text{ см}^2$  поверхні об'єкту, діюча потужність ( $P_d$ ) буде дорівнювати:



$$P_d = P_o * (1 - k), \quad (1.5)$$

де  $P_o$  – густина потоку потужності, яка падає на поверхню об'єкту;

$k$  – коефіцієнт відображення.

Значення коефіцієнта відображення ЕМП на різних частотах від різних тканин і глибина проникнення енергії ЕМП в глиб тканин (тобто глибина, на якій енергія зменшується в  $e$  раз) наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнт відображення від меж розділу між тканинами на різних частотах

Межа розділу	Частота, МГц							
	100	200	400	1000	3000	10000	24500	35000
Повітря – шкіра	0,756	0,684	0,623	0,570	0,550	0,530	0,470	–
Шкіра – жир	0,340	0,227	–	0,231	0,190	0,230	0,220	–
Жир – м'язи	0,355	0,3515	0,3004	0,2608	–	–	–	–

Залежність ступеня поглинання енергії ЕМП в біологічному об'єкті від розмірів останнього можна оцінити з розрахунків для напівпровідної сфери. З них витікає, що при  $R > \lambda$  в напівпровідній сфері поглинається приблизно 50% потужності, падаючій на поперечний перетин, незалежно від активної провідності речовини сфери. Розрахунки і експерименти на моделях виявили [14], що це справедливо для біологічних об'єктів будь-якої форми в діапазоні частот від 300 МГц до 3 ГГц. Але при  $R < \lambda$  потужність, що поглинається, залежить від електричних параметрів об'єкту і при деяких значеннях  $R/\lambda$  в ньому поглинається більше енергії, ніж падає на поперечний перетин.

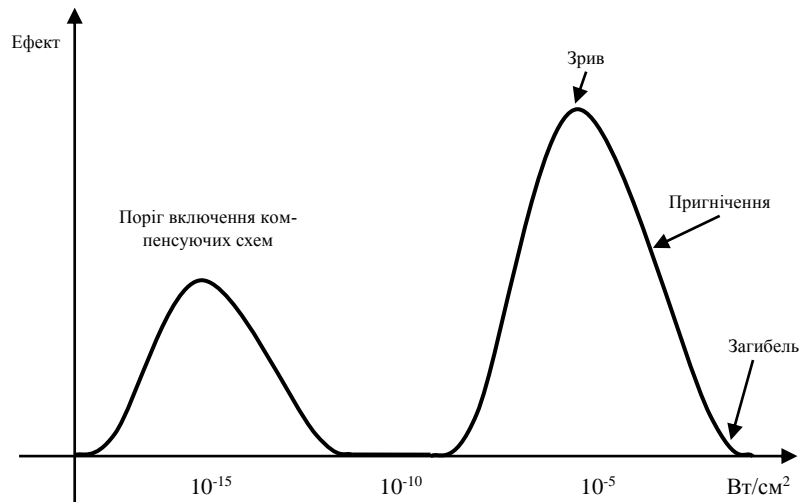


Рисунок 1.1 – Залежність ефекту (реакції об'єкту) від густини потужності НВЧ випромінювання

Якщо розглядати НВЧ випромінювання, то вони мають одну характерну особливість: на кривій залежності величини фізіологічного ефекту від густини потужності випромінювання спостерігаються два максимуми (рисунок 1.1). Ці максимуми розділені «мертвою зоною», наявність якої пояснюється як результат включення в роботу активних бар'єрних механізмів і компенсуючих систем організму. Коли ж ці сили перестають чинити опір, спостерігається тотальне збудження, що завершується зривом і загибеллю організму [15].

## 1.2 Дія електромагнітних полів на різні системи організму людини

Другим основним чинником, від якого залежать наслідки дія ЕМП на організм людини, є, як наголошувалося раніше, те, на яку систему і/або органи організму здійснюється дана дія [16]. Як відзначає більшість дослідників, найбільшу небезпеку ЕМП представляють для нервової, імунної, ендокринної, статеві системи і пов'язаних з ними органів, а також органи, бідні кровоносними судинами.

Вплив на нервову систему. Багато досліджень [17–21] дають підстава віднести нервову систему до однієї з найчутливіших систем в організмі людини до дії ЕМП. Особливу чутливість до електромагнітної дії проявляє нервова система ембріона на пізніх стадіях внутрішньоутробного розвитку.

При дії поля малої інтенсивності виникають істотні відхилення в передачі нервових імпульсів на рівні нейронних біоелектрохімічних ретрансляторів (синапсів). Змінюється вища нервова діяльність, пам'ять у людей, що мають контакт з ЕМП, ці особи можуть мати схильність до розвитку стресових реакцій. Порушується структура капілярного гематоенцефалічного бар'єру головного мозку, що з часом може привести до несподіваних патологічних проявів.

Крім того, головний і спинний мозок чутливі до змін тиску, і тому підвищення температури в результаті опромінювання голови може мати серйозні наслідки. Підвищення температури мозку відбувається найбільш швидко, коли голова опромінюється зверху або, коли опромінюється грудна клітина, оскільки нагріта кров з грудної клітини безпосередньо прямує до мозку. Опромінювання голови викликає сонливий стан з подальшим переходом до несвідомості. При тривалому опромінюванні з'являються судоми, які потім переходять в параліч, а якщо температура мозку підвищується на 6°C, неминуче настає смерть.

Вплив на імунну систему. В даний час накопичено достатньо даних, які вказують на негативний вплив ЕМП на імунологічну реактивність організму [22 – 24]. Так, при дії ЕМП порушуються процеси імуногенезу, частіше у бік їх пригнічення, змінюється характер інфекційного процесу – перебіг інфекційного процесу обтяжується аутоімунною реакцією (атакою імунної системи на власний організм). Виникнення аутоімунітету пов'язано з патологією імунної системи, внаслідок чого вона реагує проти нормальних, властивих даному організму тканинних структур. Окрім цього, ЕМП можуть сприяти неспецифічному придушенню імунітету, а також особливо небезпечної аутоімунної реакції до ембріона, що розвивається.

Вплив на ендокринну систему. Ще в 60–ті роки вченими було встановлено, що ЕМП приводять до функціональних порушень гіпофізу – наднирково–залозній системі. Це пов'язано з тим, що під дією ЕМП відбувається стимуляція гіпофізу, що супроводжується збільшенням адреналіну в крові і активізацією процесів згортання крові. Також наголошуються зміни в корі надниркових структурі та гіпоталамусу [25 – 27].

Вплив на статеву систему. Порушення статевої функції звичайно пов'язано із зміною її регуляції з боку нервової і нейроендокринної систем. З цим пов'язані результати робіт по вивченню стану гонадотропної активності гіпофізу при дії ЕМП [28], в яких показано, що багаторазове опромінювання ЕМП викликає пониження активності гіпофізу.

Встановлено, що чутливість ембріона до ЕМП значно вище, ніж чутливість материнського організму, а внутрішньоутробне пошкодження плоду ЕМП може відбутися на будь–якому етапі його розвитку, хоча найуразливішими періодами є звичайно ранні стадії розвитку зародка, які відповідають періодам імплантації і ранньої органогенезу. Хоча дослідниками наголошується більш висока чутливість до дії ЕМП яєчників ніж сім'яників, чоловічі статеві органи надзвичайно чутливі до теплової дії ЕМП і, отже, також значно уразливі при опромінюванні, у результаті якого може наступити тимчасова або постійна безплідність. І навіть невеликі дози опромінювання, що не приводять до яких–небудь фізіологічних порушень, на думку деяких дослідників [29], можуть викликати мутації генів, які залишаються прихованими протягом декількох поколінь.

Вплив на органи, бідні кровоносними судинами. Відсутність кровоносних судин в деяких частинах тіла робить їх особливо уразливими до опромінювання ЕМП надвисоких частот. В цьому випадку теплота може поглинатися тільки навколишніми судинними тканинами, до яких вона може поступати тільки шляхом теплопровідності. Мала кількість кровоносних судин в цих тканинах ускладнює процес авторегулювання температури.

Знайдено, що при однократному опромінюванні очей мікрохвилями (від 3 до 30 см), в результаті багаторазових опромінювань (10 сеансів по 30 хвилин з інтенсивністю  $150 \text{ мВт/см}^2$ ) і при хронічній (декілька років) дії мікрохвиль з інтенсивністю  $150 \text{ мВт/см}^2$  у кришталику ока виникає помутніння (катаракта) [30]. Також під дією мікрохвиль відзначається зниження активності ферментів аденозінфосфатази і пірофосфатази, а у кроликів, що опромінювалися щодня протягом 3,5 місяця мікрохвилями інтенсивністю  $1 \text{ мВт/см}^2$ , знижувався внутрішньо очний тиск [31].

Для сім'яників було знайдено, що дегенеративні зміни у сім'яників щурів при 10–хвилинному опромінюванні мікрохвилями (2800 МГц) виникають при підвищенні температури до  $30 - 35^0 \text{ C}$ . При багаторазовому опромінюванні 3 – сантиметровими хвилями з інтенсивністю  $100 \text{ мВт/см}^2$ , спостерігається підвищення температури в тканинах сім'яників тільки на  $3,3^0 \text{ C}$ , що призводить до атрофії насінних каналців [31,32].

Окрім перерахованих наслідків впливу ЕМП на окремі системи і органи організму можливо загальна негативна дія на організм людини як єдину систему, що призводить до радіохвильової хвороби. Дане захворювання у міру посилення тяжкості захворювання може мати три синдроми [33]: астенічний синдром, астено–вегетативний синдром, гіпоталамічний синдром.

Найранішими клінічними проявами радіохвильової хвороби є функціональні порушення з боку нервової системи, що виявляються перш за все у вигляді вегетативних дисфункцій неврастенічного і астенічного синдрому. Медичний персонал який тривалий час знаходився у зоні ЕМП, пред'являв скарги на слабкість, дратівливість, швидку стомлюваність, послаблення пам'яті, порушення сну. Нерідко до цих симптомів приєднуються розлади вегетативних функцій. Виявляються і порушення із сторони серечно – судинної системи, як правило, у вигляді нейроциркуляторної дистонії: лабільність пульсу і артеріального тиску, схильність до гіпотонії, болі в області серця і ін. При радіохвильовій хворобі наголошуються фазові зміни складу периферичної крові (лабільність показників) з подальшим розвитком помірної лейкопенії, нейропенія, еритроцитопенія, а

також зміни кісткового мозку, які носять характер реактивної компенсаторної напруги регенерації.

Глибина проникнення енергії ЕМП у тканину (тобто глибина, на якій енергія зменшується в  $e$  раз) наведена в табл.1.2.

Таблиця 1.2. – Глибина проникнення електромагнітних хвиль в різні тканини, см

Тканина	Частота МГц							
	100	200	400	1000	3000	10000	24000	35000
Кістковий мозок	22,9	20,66	18,73	11,9	9,924	0,34	0,145	0,073
Головний мозок	3,56	4,132	2,072	1,933	0,476	0,168	0,075	0,0378
Кришталік ока	9,42	4,39	4,23	2,915	0,500	0,174	0,0706	0,0378
Склоподібне тіло	2,17	1,69	1,41	1,23	0,535	0,195	0,045	0,0314
Жир	20,45	12,53	8,52	6,42	2,45	1,1	0,342	–
М'язи	3,451	2,32	1,84	1,456	–	0,314	–	–
Цільна кров	2,86	2,15	1,787	1,40	0,78	0,148	0,0598	0,0272
Шкіра	3,765	2,78	2,18	1,638	0,646	0,189	0,0722	–

Залежність характеру поглинання від анатомічного розташування тканин визначається головним чином товщиною підшкірного жирового шару і способом додачі ЕМП до об'єкту. Якщо проводиться опромінювання об'єкту хвилями, то жировий шар може зіграти роль «трансформатора імпедансу» між повітряним середовищем і м'язовою тканиною, що може привести до тієї або іншої компенсації відображення хвиль і, отже, до відповідного збільшення частки по-

тужності, що поглинається. Цей ефект залежить від товщини жирового шару, товщини шару шкіри і від частоти ЕМП [34].

Існує і ще один фізичний процес, від якого може залежати відносний розподіл поглинання енергії ЕМП в тканинах живих організмів, а саме виникнення стоячих хвиль, в результаті якого енергія, що поглинається в тому або іншому шарі тканин, може значно зрости у порівнянні з випадком розповсюдження хвиль в цій тканині. Стоячі хвилі можуть виникнути у зв'язку з відображеннями на межах розділу тканин, які мають різні електричні параметри у тих випадках, коли товщина даного шару тканин порівнянна з довжиною хвилі (величина якої у свою чергу залежить від електричних параметрів тканини).

Експерименти, проведені групою вчених [35] з фантомами (рис.1.2), показали, що із збільшенням об'єму об'єкту потрібен більший час для нагрівання його до заданої температури за допомогою ЕМП цієї потужності. Це пояснюється, по-перше, тим, що для нагрівання більшого об'єму потрібно більше калорій, і, по-друге, тим, що при однаковій глибині проникнення енергії ЕМП в тканині частка об'єму, в якій відбувається поглинання, буде тим більше, чим менше об'єм.

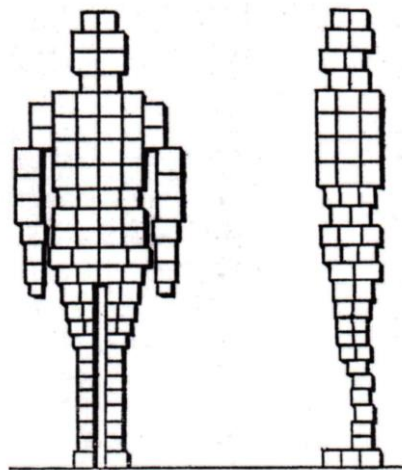


Рисунок 1.2 – Фантом для оцінки нагріву НВЧ різних частин тіла людини при загальному опромінюванні.

Було проведено більш детальне теоретичне дослідження умов нагрівання тканин тіла людини і різних тварин під дією мікрохвиль [36,37], внаслідок чого було показано, що час, необхідний для підвищення температури тіла на  $5^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ ), обчислюється з рівняння:

$$t = \frac{GC_b\Delta T}{E + M - S_b\alpha_{ab}(\theta_{ab} + \Delta T)}, \quad (1.6)$$

де:  $G$  – маса тіла;

$C_b$  – питома теплоємність;

$M$  – тепло за рахунок метаболізму;

$E$  – тепло за рахунок опромінювання мікрохвилями,  $S_b$  – поверхня тіла;

$\alpha_{ab}$  – коефіцієнт теплопередачі повітря – тіло;

$\theta_{ab}$  – початкова різниця температур повітря – тіло.

Це означає, що при дуже великих значеннях  $t$ , відповідних малій інтенсивності опромінювання, практично немає різниці в швидкості нагрівання тваринних різних розмірів, але при великих інтенсивностях ( $t$  мізерно) тіло малих тварин нагрівається швидше. На рис. 1.3 представлені можливі зміни в організмі людини під впливом електромагнітної випромінювань різної інтенсивності.



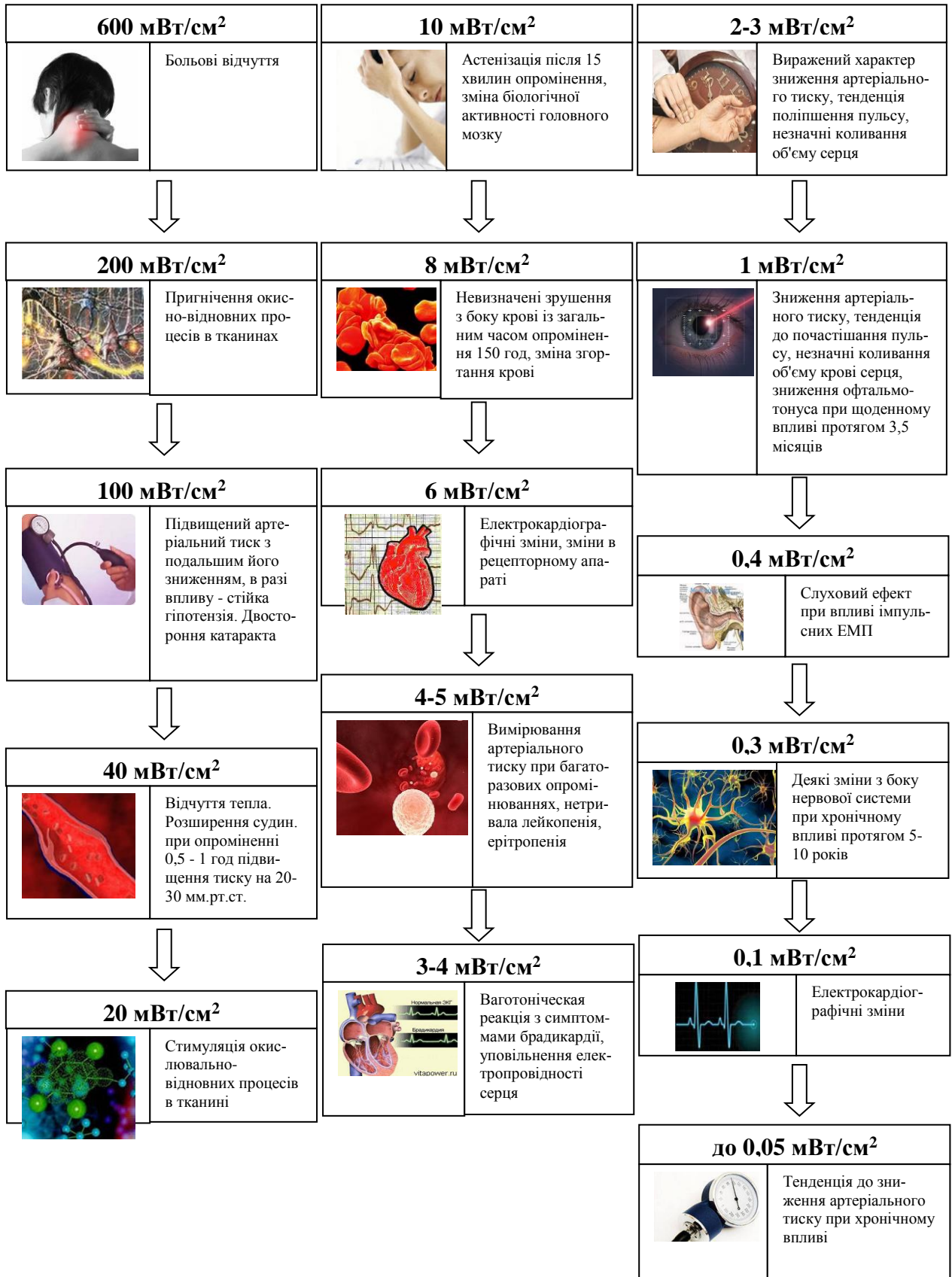


Рисунок 1.3 – Можливі зміни в організмі людини у залежності від інтенсивності електромагнітного випромінювання

В [38] описується експериментальна оцінка порогових інтенсивностей ЕМП для теплового ефекту в різних частотних діапазонах при загальній і локальній дії на людину і тварину. Межу теплового ефекту визначали по мінімальному підвищенню температури тіла або тканин, що не перевищує звичайних її коливань в організмі. Як ознака появи теплового ефекту у людини використовували також і мінімальне теплове відчуття.

З результатів експерименту виявилось, що порогові інтенсивності ЕМП зменшуються з підвищенням частоти. Це і зрозуміло, оскільки коефіцієнт поглинання електромагнітної енергії пропорційний частоті і величині електричних параметрів  $\sigma$  і  $\epsilon$ , які у свою чергу, змінюються з частотою.

Ще одна серія експериментів була проведена для вивчення дії на організм собак, кроликів і щурів імпульсних і безперервних ЕМП НВЧ високих інтенсивностей (2800 та 200 МГц відповідно), що викликають теплову дію [2,39,40]. В результаті експериментів з'ясували наступне:

- по–перше, загибель тварин настає в тих випадках, коли під дією ЕМП високої інтенсивності температура тіла тварин (визначувана по ректальній температурі) підвищується до рівня вище за критичний, тобто до 41– 42<sup>0</sup>С для крупних тварин і 42– 43<sup>0</sup>С для дрібних, – за таких умов відбувається необоротне порушення терморегуляції в організмі і тварина гине;

- по–друге, загибель тварин під дією ЕМП не можна розглядати просто як результат перегріву тіла, оскільки спостерігається ряд глибоких порушень регуляторних процесів в організмі, які залежать не тільки від величини електромагнітної енергії, що перетворюється в теплову, але і від частоти ЕМП, від локалізації дії і від фізіологічного стану тваринного;

- по–третє, що даний ефект можна розглядати як результат теплової стресової дії ЕМП, оскільки фази зміни температури відповідають трьом стадіям стресу – «реакції тривоги», «стадії резистентності» і «стадії виснаження», а спостережувані зміни крові характерні для ранніх проявів теплового стресу.

Разом з тепловою дією ЕМП існує, як наголошувалося вище, і нетеплове, яке також може приводити до негативних наслідків для організму, що пов'язано з чотирма фізичними ефектами.

Перший ефект полягає в тому, що під дією безперервних і імпульсних ЕМП надвисоких частот (1 – 100 МГц) еритроцити і лейкоцити шикуються в ланцюжки, розташовані паралельно електричним силовим лініям, формування яких відбувається в результаті тяжіння між частинками, в яких під дією ЕМП індукуються дипольні заряди. Постійна часу формування ланцюжків пропорційна кубу радіусу частинок (вона рівна 1 сек. при радіусі в 1 мк). Вона мало залежить від  $E$  в слабих полях і обернено пропорційна  $E^2$  в сильних полях. В імпульсних ЕМП ефект визначається середнім значенням  $E$ .

Другий ефект – «діелектричне насичення» в розчинах білків і інших біологічних макромолекул під дією високо інтенсивних ЕМП надвисоких частот. Він припускає, що під дією таких полів всі поляризовані бічні ланцюги макромолекул орієнтуються у напрямі електричних силових ліній і що це може приводити до розриву водневих зв'язків і інших вторинних всередині – і міжмолекулярних зв'язків і до зміни зони гідратації (від якої залежить розчинність молекул).

Третій ефект обумовлений дією сил Лоренца в змінних полях на іони в електроліті. Якщо розчин електроліту знаходиться під дією перпендикулярних один одному і синфазних електричного і магнітного полів, які змінюються, то електричне поле (в середньому за часом) не робить впливу на іони, а під дією сил Лоренца, і позитивні і негативні іони переміщуються в одному напрямку – перпендикулярно напрямку електричних силових ліній. При цьому дії сил Лоренца в клітинному середовищі піддаватимуться не тільки іони електроліту, але і вільні метаболіти в іонізованій формі.

Четвертий ефект – резонансне поглинання ЕМП білковими молекулами у зв'язку з так званими дисперсійними силами взаємодії. В білках, що містять ряд нейтральних і негативно заряджених основних бічних груп, середньоквадратична величина дипольного моменту відмінна від нуля, навіть якщо їх середній

постійний момент дорівнює нулю. Це обумовлюється тим, що (за винятком випадку сильно кислотних розчинів) число поляризованих бічних груп в білковій молекулі звичайно перевищує число пов'язаних з ними протонів, так що існує безліч можливих конфігурацій розподілу протонів в молекулі, мало відмінних по вільній енергії. Для молекул ферментів, в припущенні безперервного розподілу основних груп, середня відстань між групами складає приблизно  $9,5 \text{ \AA}$ . З такими дипольними взаємодіями, що відбуваються за рахунок флуктуації розподілу протонів, може бути зв'язано поглинання кванта енергії, відповідного частоті 10 ГГц. Такий резонансний вплив ЕМП на розподіл протонів в молекулі ферменту може привести до зміни швидкості утворення фермент–субстратного комплексу [2,41,42].

Інший аспект особливостей резонансних дій демонструють результати теоретичних і експериментальних досліджень, проведених під керівництвом П.П.Гаряєва. Ці результати показують наявність коливань в інфраструктурі позаклітинних матриксів цитомембрани, цитоскелету і ядра клітки [43]. Всі зміни в живому організмі пов'язані в першу чергу із змінами в цих структурах. ДНК, рибосоми і колаген (основна складова частина білків позаклітинних матриксів) – це головні інформаційні біополімери, між якими в епігенетичні режимі відбувається обмін інформацією по фізичних каналах нелінійних акустичних і електромагнітних коливань.

Експериментально були визначені приблизні резонансні частоти в Гц деяких структур живої клітки: соматична клітка –  $2,39 \times 10^{12}$ ; ядро соматичної клітки –  $9,55 \times 10^{12}$ ; мітохондрії з клітки печінки –  $3,18 \times 10^{13}$ ; геном клітки людини –  $2,5 \times 10^{13}$ ; хромосома інтерфазна –  $7,5 \times 10^{11}$ ; хромосома метафазу –  $1,5 \times 10^{13}$ ; ДНК –  $(2...9) \text{ Ч } 10^9$ ; нуклеосома –  $4,5 \times 10^{15}$ ; рибосоми –  $2,65 \times 10^{15}$ ; клітинні мембрани –  $5 \times 10^{10}$ ; цитоскелет –  $10^8$ ; еритроцити –  $(3,5...4,0) \times 10^{10}$  [43].

Відзначені ефекти, якомога бачити, хоча і є «не помітнішим» за теплову дію, проте також здатні приводити до серйозних патологічних змін в організмі

людини, особливо при тривалій (постійному) дії ЕМП. Виникає небезпека того, що можуть бути спровоковані небажані наслідки на генному і фізіологічному рівнях.

Так, при опромінюванні людини можливо інгібування ряду ділянок генома лімфоцитів. Це може привести до різних відхилень, в першу чергу, в найскладнішій системі імунного захисту організму. Наприклад, в результаті інгібування трансляції певних генів припиниться синтез імуноцитів, які відповідають за вироблення антитіл до певного антигену і, через деякий час після дії, імунна система опромінених буде не в змозі протистояти інфекції, викликаній антигеном, реакція на який інгібована, унаслідок чого навіть звичайний грип може виявитися смертельним.

### 1.3 Негативна дія електромагнітних полів на організм людини у залежності від частотного діапазону

Третій основний чинник, від якого залежить дія ЕМП на організм людини – це частота. Так, саме частота визначає в першу чергу, наскільки добре поглинається електромагнітна енергія в тілі людини. Наприклад, хвилі метрового діапазону (30 – 300 МГц) слабкіше поглинаються в тканинах, ніж хвилі дециметрового діапазону (300 – 3000 МГц), а випромінювання сантиметрового діапазону (НВЧ) (3 – 30 ГГц) може повністю «застрягти» в живій тканині на глибині декілька сантиметрів. На біологічний організм в значній мірі впливають і випромінювання дециміліметрового діапазону, так званого діапазону у край високих частот (КВЧ) (30 – 300 ГГц).

Багато авторів [2,18,25], розглядаючи негативний біологічний вплив ЕМП, особливо підкреслюють дію саме ЕМП радіочастот. При цьому наголошується, що найбільш біологічно активний діапазон КВЧ і СВЧ, тобто із зменшенням довжини хвилі біологічна активність поля майже завжди зростає.

На рівні окремих держав питання регулювання забруднення навколишнього середовища електромагнітним полем і контролю джерел даного забруд-

нення звичайно вирішують профільні державні установи, що відають зв'язком, телекомунікаціями, енергетикою і природоохоронні організації. Так, наприклад, в США – це Агентство з охорони довкілля (US Environment Protection Agency), в Німеччині – Міністерство по охороні навколишнього середовища і ядерної безпеки (Bundes Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), в Нідерландах – Міністерство будівництва, територіального планування і охорони навколишнього середовища (Department Housing, Spatial Planning and Environment ). В Україні такою структурою є Головне санітарно-епідеміологічне управління України.

В багатьох країнах реалізуються також довгострокові міжнародні і національні програми за оцінкою небезпеки ЕМП для населення. Це, наприклад, Міжнародний проект ВІЗ «ЕМП і здоров'я», програма ЄС COST, Національна програма досліджень США електричних і магнітних полів і розповсюдження суспільної інформації (EMF RAPID). Успішно реалізуються відповідні національні програми в Швеції, Фінляндії, Франції, Великобританії, Австралії, Японії, Німеччині, Данії, Канаді.

Зараз у всьому світі, і в Україні у тому числі, діють норми для гранично допустимих рівнів електромагнітних випромінювань побутової і промислової апаратури, але при цьому відмінність норм різних країн може складати сотні, а іноді і тисячі раз. Причини цьому полягає, перш за все, в різному підході до вибору критерію щодо того, що вважати дією електромагнітного поля на організм.

Так, наприклад, в США використовують «тепловий критерій», відповідно до якого норми дії засновані на такому порозі випромінювання, якому відповідає початкова стадія – або патологічного або необоротного процесу.

В Україні як основний критерій санітарно-епідеміологічного нормування дії ЕМП прийнято положення, відповідно до якого безпечною для людини вважається ЕМП такої інтенсивності, знаходження в якому не призводить до навіть тимчасового порушення гомеостазу (включаючи репродуктивну функцію), а також до напруги захисних і адаптаційних – компенсаторних механізмів ні в

найближчому, ні у віддаленому періоді часу (при цьому, згідно давніх традицій в нашій країні, гігієнічна регламентація ЕМП в різних частотних діапазонах заснована на результатах гігієнічних, клінічних і епідеміологічних досліджень [1,6,9,12]).

Як ми можемо бачити, український підхід є більш «жорстким» в порівнянні з американським, проте, поступається при цьому європейському. Взагалі, вперше найжорсткіші норми були розроблені в Швеції (стандарти MPR I, MPR II, TCO 07) [44–46]. На даний момент ці нормативи включені в офіційні документи ЕЕС і є основоположними для створення базового стандарту країн ЕЕС. Пропоновані в них норми відображають сучасні поняття ступеня біологічної безпеки з одного боку і технічні можливості електронної промисловості з другого боку, в них також відсутні деякі недоліки, властиві системі санітарно-епідеміологічного нормування ЕМП в Україні.

Так, наприклад, в українських стандартах відсутні ПДР, регламентуючі дію магнітної складової ЕМП у всьому частотному діапазоні (3–300 ГГц) для умов непрофесійної дії, перш за все магнітного поля промислової частоти 50 Гц. Є необхідним і створення ПДР для квазістатичного і низькочастотного (до 30 Гц) ЕМП, створюваного транспортом на електротязі, медичним устаткуванням і т. п., а також для ЕМП в діапазоні частот 50 Гц–10 кГц. Крім того, на сьогоднішній день у нормативах не розглядається модифікуючі впливи модуляції ЕМП, у тому числі імпульсної дії, а також інших чинників навколишнього середовища (фізичних і хімічних).

При цьому повне або часткове запозичення ПДР (навіть менш жорстких в порівнянні з українськими), що містяться в стандартах по електромагнітній безпеці зарубіжних країн і міжнародних організацій, наприклад, Міжнародної комісії по захисту від неіонізуючого випромінювання (ICNIRP), в даний час не є можливим через згадані відмінності у підходах до нормування.

Можна виділити і загальні проблеми у сфері нормування. Так, в даний час, як в Україні, так і за кордоном регламентація ЕМП промислової частоти здійснюється роздільно для електричної і магнітної складових без урахування

того, що в більшості випадків, як у виробничих умовах, так і в побуті ЕМП діють на людину спільно. Звичайно, питання про одночасну регламентацію обох становить ЕМП представляє достатню трудність, оскільки вимагає визначення і аналізу внеску кожної з них у вплив на здоров'я людини, але він вимагає свого рішення.

Ще однією найважливішою проблемою є регламентація дії ЕМП на оточуючу середовище, на екосистеми. Хоча дана проблема залишається до кінця не вирішеною, але тут слідує, як найдоцільніший, виділити підхід, пропонований [47]. Відповідно до нього, основним критерієм екологічного нормування ЕМП може служити положення, виходячи з якого безпечним для екосистеми вважається ЕМП такої інтенсивності, при якій можлива втрата окремої особини при обов'язковій умові збереження стабільності екосистеми. При екологічному нормуванні ПДР ЕМП має сенс визначення верхньої межі стійкості організму, при перевищенні якого ЕМП стає лімітуючим чинником навколишнього середовища (рисунок 1.4).

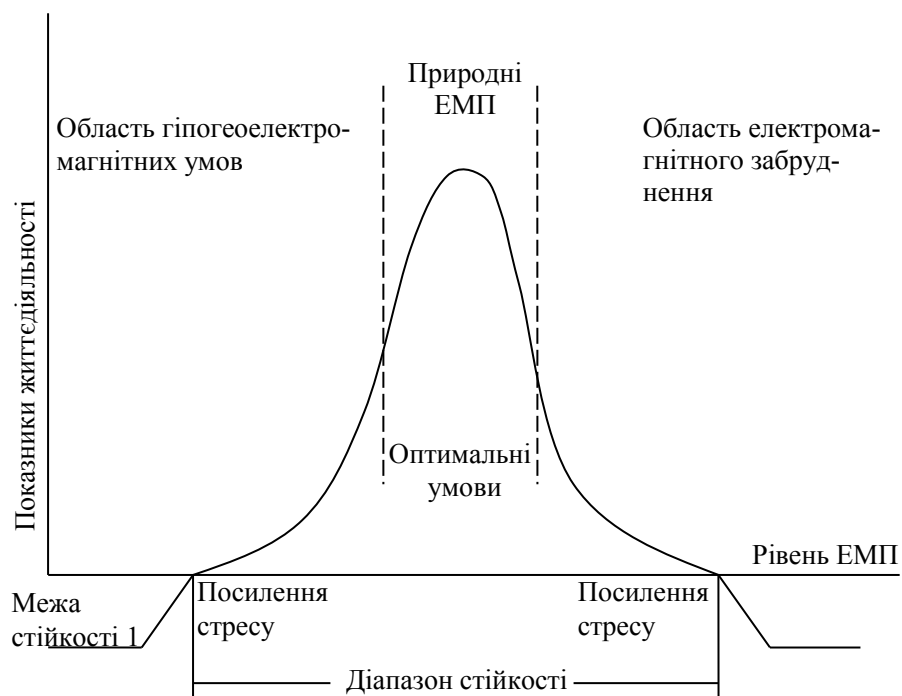


Рисунок 1.4 – Умовна крива змін показників життєдіяльності організму від інтенсивності впливаючого ЕМП



Таким чином, при даному підході безпека екосистеми визначається близькістю її стану до меж стійкості, що дозволяє зберігати: розмір і біомасу екосистеми, постійність видового складу, чисельні співвідношення між видами і функціональними групами організмів. А саме від цього і залежить стабільність трофічних зв'язків, внутрішніх взаємодій між структурними компонентами екосистеми та її продуктивність, тобто її стійке існування.

Рішення питань нормування електромагнітних випромінювань лежить в «ідеологічній площині» забезпечення електромагнітної безпеки. Практично ж безпеку дозволяють забезпечувати ряд методів, що розглядаються в наступному розділі.

#### 1.4 Класифікація методів захисту від електромагнітного випромінювання

Як відомо, простір біля антени або іншого провідника із змінним струмом, де існує електромагнітне поле, ділиться на ближню, проміжну і дальню зони (позначені відповідно цифрами I, II і III на рисунку 1.5).

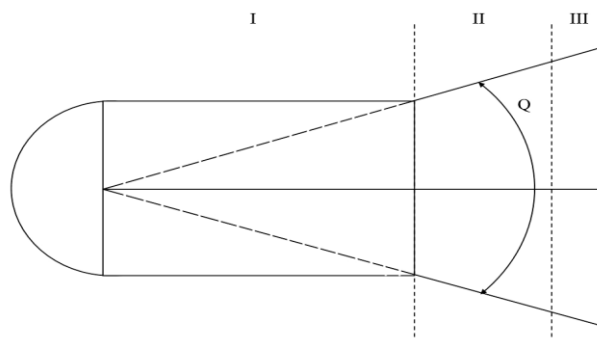


Рисунок 1.5 – Зони електромагнітного поля антени з параболічним відбивачем

В ближній зоні електричне і магнітне поля зсунуті по фазі на  $90^\circ$ , енергія електромагнітного поля зосереджена біля провідника, вектор Умова–Пойнтинга рівний нулю, тобто випромінювання в зовнішній простір відсутнє, а поле хара-

ктеризується напруженням складових його електричного і магнітного полів

$$E = \frac{I}{2\pi\epsilon\omega r^3}, \quad H = \frac{I}{4\pi r^2}, \quad (1.7)$$

де  $I$  – струм в провіднику (антені);

$l$  – довжина провідника (антени);

$\epsilon$  – діелектрична проникність середовища;

$\omega$  – кругова частота поля.

У проміжній зоні формується поле випромінювання (хвильове поле), яке існує і розповсюджується в наступній, дальній зоні. Тут має місце залежність напруженості електричного і магнітного полів і густини потоку потужності від відстані до провідника (антени), а для направленої антени – від типу опромінювання її рефлектора. Можна відзначити, що густина потоку потужності в цій зоні має менші значення, ніж в ближній і дальній зонах.

В загальному випадку – при ізотропному випромінюванні – межа між проміжною і дальньою зоною визначається відстанню

$$r_{\text{дз}} = \frac{\lambda}{2\pi}. \quad (1.8)$$

При направлених антенах у напрямі головного максимуму випромінювання, ця відстань дорівнює

$$r_{\text{дз}} = \frac{D^2}{\lambda}. \quad (1.9)$$

У вільному просторі дальня зона йде у нескінченність.

У дальній зоні густина потоку потужності визначається виразами для напруженостей електричного і магнітного полів в цій зоні

$$E = \frac{\sqrt{3PG}}{r}, \quad H = \frac{\sqrt{PG/30}}{4\pi r} \quad (1.10)$$

З виразу (1.7, 1.10) безпосередньо витікає, що зменшення напруженості полів і густини потоку потужності випромінювання даного провідника в даному середовищі може бути досягнутий:

- по–перше, збільшенням відстані між випромінюючим пристроєм і об'єктом, що захищається;
- по–друге, зменшенням сили струму в провіднику (антені) або залежної від неї потужності випромінювання.

Захист відстанню є першим основним методом захисту від ЕМВ, мабуть, найпростішим і ефективним. Даний метод цілком застосовний для персоналу, якому при виконанні роботи немає необхідності знаходитися поблизу джерел електромагнітного випромінювання, а також у випадках можливості дистанційного керування випромінюючою установкою.

Зменшення потужності випромінювання припускає можливу реалізацію ряду методів. Перший з них – це безпосереднє регулювання генератора. Проте, в сучасних генеруючих установках, як правило, не передбачено безпосереднє регулювання потужності випромінювання або воно можливе в дуже малому ступені, що вимагає непрямих способів регулювання. Іншим способом непрямого зменшення потужності випромінювання може бути застосування спеціальних пристроїв, які повністю поглинають, відображають або в необхідному ступені, ослабляють передаючу енергію на її шляху від генератора до випромінюючого пристрою, усередині останнього або, нарешті, в просторі, де знаходяться люди.

Для екранування широко використовуються метали, які завдяки тому, що мають високі коефіцієнти поглинання і майже повну відсутність хвильового опору, володіють високою відображаючою здатністю. Послаблення опромінювання сітками при лінійній поляризації хвилі визначається по формулі (1.11)

$$L = 10 \lg \frac{(1 - \cos \beta)^2 + 4 \left( \frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2}{1 + 4 \left( \frac{d}{\lambda} \ln \frac{d}{2\pi r_0} \right)^2}, \quad (1.11)$$

де  $d$  – відстань між сусідніми проволочками сітки (крок сітки);

$r_0$  – радіус дроту;

$\beta$  – кут падіння хвилі на сітку.

Слід зазначити, що приведена формула є вірною при дотриманні наступних умов: сітка повинна знаходитися в хвильовій зоні опромінюючої антени; довжина і ширина плоского сітчастого екрану повинна перевищувати довжину хвилі більш ніж в п'ять разів; відношення кроку сітки до довжини хвилі повинне відповідати нерівності  $d/\lambda < 1$ ; відношення радіусу дроту до довжини хвилі повинне відповідати нерівності  $r_0/\lambda < 0,04$ ; відношення радіусу дроту до кроку сітки повинне відповідати нерівності  $r_0/d < 0,1$ ; кут падіння хвилі в  $< 75^\circ$ , оскільки при великих кутах, по перше, дроти сітки затіняють проsvіти між ними і поверхня сітки для хвиль стає як би суцільною, а по-друге, хвиля стає плаваючою, тому вона в основному відображається від сітки.

Даний підхід є повністю виправданим, оскільки заснований на закономірності розповсюдження радіохвиль в хвилеводах, особливо в граничних, тобто таких, поперечні розміри яких дорівнюють або менше розмірів, які відповідають критичним довжинам хвиль. При цьому ослаблення випромінювання на 1 см довжини граничного хвилеводу (коефіцієнт лінійного послаблення) можна визначати по наступних формулах (1.12), (1.13):

в загальному випадку

$$\mu = \frac{17,2\pi \sqrt{\epsilon_{відн}}}{\lambda_{кр}}, \text{ дБ / см}; \quad (1.12)$$

для хвилеводу, заповненого повітрям

$$\mu = \frac{17,2\pi}{\lambda_{кр}}, \quad (1.13)$$

де  $\varepsilon_{відн}$  – відносна діелектрична постійна діелектрика, яка наповнює хвилевід.

Слід зазначити, що конструкція патрубків з декількох граничних хвилеводів володіє більшою ефективністю екранування, ніж сумарна ефективність від всіх цих хвилеводів, що розглядаються окремо. Додаткове послаблення випромінювання в цьому випадку визначається за формулами:

при квадратних патрубках

$$L_{дон} = 20 \lg \sqrt{n_1}, \quad (1.14)$$

при прямокутних патрубках

$$L_{дон} = 20 \lg \sqrt{n_2}, \quad (1.15)$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – числа, що показують, скільки разів довга сторона перетину стільника хвилеводу укладається відповідно на стороні квадратного і широкій стороні прямокутного патрубка. Що ж до світлових і оглядових вікон, то їх доцільно закривати спеціальним склом.

Крім металів, які відображають практично всю падаючу на них енергію електромагнітних хвиль, властивостями, що відображають, володіють і інші речовини. Проте іноді відображення є небажаним і навіть неприпустимим, оскільки, по–перше, відображена хвиля може створювати серйозні перешкоди при виконанні регулювальних і налаштувальних робіт з радіоелектронними пристроями, виводити з ладу чутливі частини цих пристроїв, а по–друге, відображена енергія може збільшувати інтенсивність опромінювання людей. В подібних ви-

падках має місце застосування поглинаючих матеріалів.

Отже, вимоги до поглинаючих матеріалів, можна сформулювати таким чином [48 – 50]:

по–перше, забезпечення найбільш плавного переходу між хвильовими опорами повітря  $W_{вплив}^0$  і матеріалу  $W_{ПМ}^0$ , тобто

$$W_{ПМ}^0 \approx W_{вплив}^0, \quad (1.16)$$

Інакше

$$\sqrt{\mu_{ПМ} / \varepsilon_{ПМ}} \approx \sqrt{\mu_{вплив} / \varepsilon_{вплив}} = 120\pi \approx 377 \text{ Ом}. \quad (1.17)$$

По–друге, ефективне і якнайповніше поглинання енергії, що проникла, тобто найвище значення коефіцієнта поглинання.

Проте, в природі немає речовин, що відповідають цим двом вимогам, тому всі радіопоглинаючі матеріали створюються штучно. Оскільки найбільшим поглинанням володіють провідники, в матеріал–основу яких (каучук, поролон і ін.) вводяться провідні добавки, такі як активоване вугілля, сажа, порошок карбонільного заліза і т.п. А для наближення хвильового опору поглинаючого матеріалу до хвильового опору повітря використовують два методи.

В першому випадку матеріалу додається структура або форма, що збільшує його активну поверхню, звернену до випромінювання: матеріал робиться волоконним або пористим, або з складною, покритою пірамідами або конусами поверхнею, так щоб хвиля, що прийшла, багато разів відображалася на поверхні (рисунок 1.6).

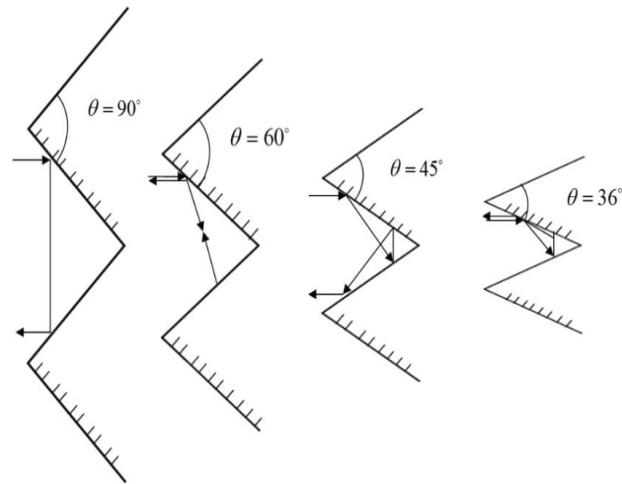


Рисунок 1.6 – Збільшення числа віддзеркалень від матеріалу з складною поверхнею

Приблизно такий же ефект досягається складною структурою матеріалу, коли шари розташовуються в порядку зростання їх густини у міру видалення від передньої поверхні, а також при поступовому збільшенні концентрації поглинаючих включень у міру видалення від поверхні матеріалу.

Виконані за першим способом матеріали є широкосмуговими і володіють малою об'ємною вагою, але при цьому вони громіздкі, чутливі до води і пилу, швидко піддаються ерозії, що є їх істотним недоліком.

Другий метод створення поглинаючих матеріалів полягає у використуванні «принципу чверть хвильового узгодження» [48], відповідно до якого поглинаючий матеріал товщиною в  $1/4$  довжини хвилі наклеюється на металевий лист або сітку. Якщо такий матеріал поставити на шляху випромінювання (рис. 1.7), то радіохвиля частково відобразиться від нього, частково пройде в нього, певною мірою поглинеться в ньому, відобразиться від металевої підкладки, знову частково поглинеться, досягне передньої поверхні, частково відобразиться в матеріалі і частково вийде в повітря.

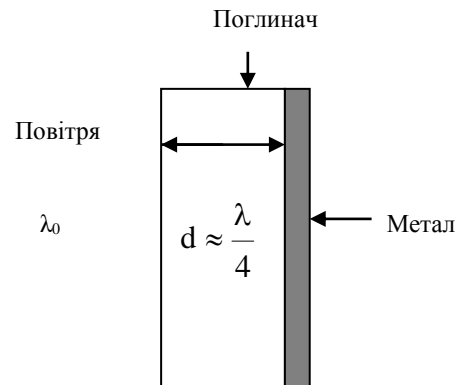


Рисунок 1.7 – Пристрій поглинаючого матеріалу на основі чверть хвильового узгодження

В результаті хвиля, що вийшла з матеріалу, змінить свою фазу на  $180^\circ$  в порівнянні з хвилею, відображеною від передньої поверхні (різниця шляхів цих хвиль дорівнює половині довжини хвилі). А хвилі в протифазі, як відомо, взаємно знищуються. Відповідним поєднанням коефіцієнта відображення від передньої поверхні з відповідним коефіцієнтом поглинання матеріалу, досягають найбільшого наближення хвиль, відображеної від передньої поверхні і відображеної від металевої підкладки, до амплітуди, яку хвиля мала у передньої поверхні. При цьому досягається мінімальне сумарне відображення від такого матеріалу. Матеріали, виготовлені по другому методу, є вузько смуговими, тому їх недоліком є залежність товщини від довжини хвилі.

Радіопоглинаючі матеріали виготовляються у вигляді еластичних або жорстких пінопластів, рихлої сипкої маси або заливальних компаундів. Більшість з них незаймиста і вогнестійка. Звичайно ці матеріали відображають приблизно 1 % падаючої на них енергії, в деяких випадках відображення може бути знижено до 0,01 – 0,001 %. Максимальна густина потужності, що поглинається, залежить від матеріалу-основи. Для радіопоглинаючих матеріалів на основі каучуку, поролону і т.п., вона складає 0,156–0,465 Вт/см<sup>2</sup>, при поліуретановій основі вона досягає 1,3 Вт/см<sup>2</sup> а у пінокерамічних матеріалів – 7,75 Вт/см<sup>2</sup>. Повіт-



ряне охолодження задньої поверхні матеріалу може істотно збільшити густину поглинаючої потужності.

Розглянуті нами методи захисту від ЕМВ направлені на зменшення до безпечних величин потужностей випромінювання, яке падає на тіло людини. З цією ж метою застосовуються також і індивідуальні засоби захисту. Але ступінь дії випромінювання залежить також від часу опромінювання. Отже, зменшення цього часу також є методом захисту від дії ЕМВ, до якої, як правило, слід вдаватися, коли інші методи не забезпечують безпечних умов праці.

Таким чином, можна привести наступну класифікацію методів захисту від дії електромагнітного випромінювання надвисоких частот (рисунок 1.8), яка охоплює всі можливі на теперішній час методи захисту, поєднання яких дозволить більш якісно провести забезпечення персоналу належними умовами праці та зберегти здоров'я при тривалому навантаженні.

## Класифікація методів захисту біологічної систем життєдіяльності



Рисунок 1.8 – Класифікація методів захисту біологічної системи життєдіяльності від дії НВЧ випромінювань

В цілому ж, на практиці бажано поєднувати декілька методів захисту одночасно, вирішуючи при цьому відповідні оптимізаційні задачі. Особливо це актуально при роботі з джерелами НВЧ – випромінювань, які, з одного боку, зустрічаються дуже часто в професійній діяльності, а з другого боку, як наголошувалося вище, є самими небезпечними серед ЕМВ радіочастот.

### 1.5 Захист медичного персоналу при настройці, регулюванні і випробуваннях біомедичних приладів і систем з джерелами НВЧ– випромінювань

Захист включає, перш за все, використання, а при необхідності і обладнання спеціальних приміщень, в яких здійснюються роботи по настройці, регулюванню і випробуванням медичної апаратури НВЧ діапазону. Дані приміщення повинні відповідати наступним вимогам [51]:

1. Вони повинні бути ізольований від інших приміщень будівлі і мати безпосередні виходи в коридор або назовні.

2. Ці приміщення слід влаштовувати так, щоб при включенні медичної апаратури на максимальну потужність їх випромінювання практично не проникло крізь стіни, перекриття, отвори і двері в суміжні приміщення, розташовані з боків, зверху або знизу.

3. Товщина стін і перекриттів таких приміщень повинна визначатися в кожному випадку розрахунковим шляхом виходячи з потужностей установок і поглинаючих властивостей будівельних матеріалів.

4. Необхідність в додатковому екрануванні конструктивних частин приміщень визначається в кожному випадку розрахунком або експериментально шляхом вимірювання в суміжних приміщеннях густини потоків потужності або напруженостей полів, які можливо проникли з приміщення настройки і випробувань випромінюючої апаратури.

5. Приміщення для настройки, регулювання і випробування медичної апаратури повинні бути обладнанні світловими сигнальними пристроями, з

застереженнями для людей, які входять до приміщення, про те, що там ведуться роботи з випромінюванням радіохвиль.

Основна мета моніторингу електромагнітної обстановки полягає в контролі за тим, щоб на будь-якому робочому місці в даному приміщенні максимальна інтенсивність опромінювання не перевищувала гранично допустимі рівні, оскільки робота в умовах опромінювання, що перевищує гранично допустимі норми, забороняється. Для здійснення такого моніторингу використовуються різні інформаційно-вимірювальні системи (ІВС). Наприклад, в [52] приведена така ІВС.

Індивідуальні засоби захисту. При цьому використання тих або інших засобів індивідуального захисту здійснюється у залежності від поверхні опромінювання. Так, у разі опромінювання тільки очей або голови людини, як засоби індивідуального захисту використовуються радіозахисні окуляри, для виготовлення яких використовують спеціальне скло, а гумове обрамлення окулярів має упресовану металеву сітку або наклеєну із зовнішньої сторони металізовану тканину. При опромінюванні всієї голови і шиї для індивідуального захисту доцільно застосовувати спеціальний капюшон, який виготовляється із спеціальних, як правило, металізованих тканин.

### Висновки до першого розділу

1. В результаті аналізу показано, що сучасна лікувальна медична апаратура, має велику кількість джерел електромагнітних полів.

2. Показано, що ЕМП діють на людину вкрай небезпечно. Дія ЕМП залежить від багатьох фізичних параметрів – довжини хвилі, частоти, інтенсивності випромінювання, режиму опромінювання (безперервний або перервний), тривалості дії та ін.

3. Існуючі засоби розраховані на виконання конкретної роботи медичної апаратури тому необхідно:

- оцінити рівень дії медичної апаратури, яка працює у діапазоні надвисоких хвиль, у лікувальних закладах на медичний персонал;
- проаналізувати існуючі методи захисту від дії ЕМП;
- розробити функціональну модель захисту при дії всіх можливих джерел випромінювання;
- провести оцінку ефективності захисту медичного персоналу від ЕМП;
- проаналізувати можливість використання для захисту медичного персоналу багат шарових поглинаючих матеріалів при дії ЕМП;
- провести перевірку адекватності запропонованого методу оцінки ефективності захисту медичного персоналу при настройці, ремонті та використанні медичної апаратури.

4. Не дивлячись на досить «жорсткі» нормативні вимоги відносно використання електромагнітного випромінювання при роботі медичних апаратів і систем, які існують в Україні, у теперішній час вони потребують перегляду у напрямку співвідношення Європейським, враховуючі курс України на Євроінтеграцію.

Список використаних джерел у даному розділі наведені у повному списку використаних джерел під номерами:[1 – 52]

## РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ І МЕТОДІВ ЗАХИСТУ МЕДИЧНОО  
ПЕРСОНАЛУ ВІД НЕГАТИВНОЇ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ

## 2.1 Розробка метода оцінки ефективного захисту медичного персоналу

На першому етапі побудови методу використовується аналіз електромагнітної обстановки в приміщенні з медичною апаратурою (томотерапії, радіо хірургії), яка є джерелом прямих, паразитних, відображених хвиль, а також зовнішній електромагнітних випромінювань надвисоких частот.

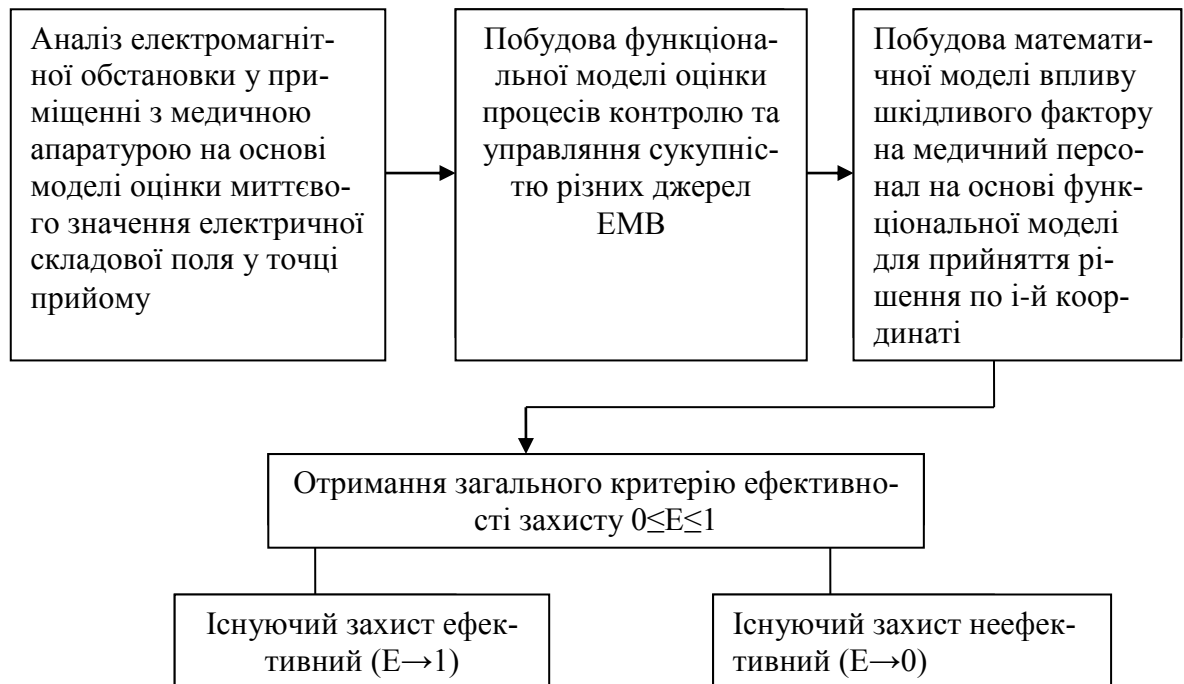


Рисунок 2.1 – Метод оцінки ефективності захисту від дії електромагнітних випромінювань надвисоких частот

Даний метод включає побудову математичної моделі по миттєвому значенню електричної складової поля в точці прийому, оскільки, виходячи з природи поля, електрична складова є найприйнятнішим параметром поля для

оцінки впливу електромагнітного випромінювання надвисоких частот на біологічний об'єкт. На другому етапі, визначивши параметри поля і координати зовнішніх і внутрішніх джерел випромінювань, будується функціональна модель біомедичної системи життєдіяльності для  $n$  різної вірогідності існування джерел випромінювань в аналізованому приміщенні. Вектора вихідних координат джерела можуть визначити просторове і тимчасове положення біологічного об'єкту, а також нести інформацію про змінні стани ЕМВ при дії на джерело і систему захисту векторів управляючих сигналів, що виробляються системою керування і контролю. На третьому етапі, будується модель математичної оцінки, в основу якій встановлені детерміністські критерії і вірогідність виконання задачі, кількість інформації, отриманої з урахуванням витрат на отримання необхідного коефіцієнта захисту.

Після ухвалення рішення і управління рівнем джерела, вірогідність стану джерела випромінювання по  $i$ -й координаті, з урахуванням загальної кількості інформації і витрат на отримання потрібної надійності, оцінюється ефективність захисту біологічного об'єкту в діапазоні зміни критерію.

Якщо система захисту виявляється недосконалою, необхідно вибрати і (або) удосконалити колективні або індивідуальні засоби захисту для забезпечення необхідного коефіцієнту.

## 2.2 Обґрунтування методів кількісного визначення небезпечних електромагнітних полів складної структури

При багатопроменевій інтерференції кількісне визначення ЕМП, з погляду їх безпеки дії на людину, є достатньо складною проблемою. Проте в теперішні часи час методика вимірювань параметрів поля і вимірювальна апаратура, заснована на найпростішій моделі розповсюдження плоскої хвилі, [53 – 55] не дозволяють зміряти складну структуру ЕМП. Прямі формулювання, засновані на принципі плоскої хвилі, слід розглядати як неправомірні. На думку авторів, [56,57] саме незастосовність прийнятих принципів і мето-

дики застосування вимірювальної техніки для визначення параметрів поля, є причиною більшості труднощів і непорозумінь в питаннях дослідження небезпеки електромагнітного випромінювання (ЕМВ).

Тому, виникає необхідність застосування фундаментальних понять теорії поля для обґрунтування кількісного визначення інтенсивності ЕМП, визначення межі застосовності існуючих принципів і методик для забезпечення надійного захисту персоналу від дії ЕМВ.

Для найпростішої плоскої хвилі параметрами поля можуть служити вектор електричного поля  $\vec{E}$ , вектор магнітного поля  $\vec{H}$ , а також усереднені за часом величини: густина енергії електричного поля  $W^E$ , густина енергії магнітного поля  $W^M$ , густина енергії сумарного поля  $W$  і густина потоку потужності  $P$ . Всі перераховані вище величини поля можуть бути достатньо точно виміряні для найпростішої плоскої хвилі. Якщо відомі характеристики середовища, то кожна величина визначається достатньо точно.

В ближньому або багатопроменевому полі, рівняння для плоскої хвилі перестають бути справедливими. Відношення фундаментальних величин поля можуть змінюватися в широких межах залежно від просторового положення точки прийому і локальної структури поля поблизу цієї крапки. Так, стояча хвиля, утворена в результаті взаємодії двох плоских хвиль однакової амплітуди і однієї і тієї ж лінійної поляризації, але що розповсюджуються в різних напрямках, мають нульову усереднену за часом густину енергії, хоча  $W^E$  та  $W^M$  можуть в чотири рази перевищувати відповідні величини первинних хвиль в деяких конкретних точках. Далі, в межах реактивної зони джерел, середня за часом густина потужності може прагнути малого значення, тоді як  $E$  та  $H$  можуть бути довільно великими [58].

Отже, необхідно встановити, який з можливих параметрів поля є істотним при дослідженні електромагнітної інтерференції.

Вимірювання ближніх полів, засновані на концепції дальньої зони, слід розглядати як спрощені. Результатами вимірювання параметрів поля в ближ-



ній зоні, є вельми наближені кількісні оцінки, які не завжди дають якісно правильну картину.

Оскільки густина потужності не може бути адекватною мірою небезпеки або електромагнітній інтерференції в ближньому або багатопроменевому полі, виникає необхідність у розробці відповідних критеріїв. Унаслідок неоднозначності взаємозалежностей між різними параметрами для полів довільної структури вибраний критерій повинен бути безпосередньо пов'язаний з механізмом небезпеки або електромагнітної інтерференції.

Припустимо, що потенційна небезпека дії електромагнітного поля даного типу вивчена настільки добре, що вимірювання параметрів незбуреного поля можуть дати інформацію, достатню для адекватної оцінки ступеня небезпеки. Тоді виникає питання, які параметри є самими відповідними для характеристики поля? Густина потужності, як було сказано вище, не може бути критерієм для складного поля. Найприроднішим і теоретично обґрунтованим є параметри  $|E|^2$ ,  $|H|^2$ ,  $W^M$ ,  $W^e$  або  $W$ .

Нижче, для характеристики потенційної небезпеки дії електромагнітного поля найбільш широко, виходячи з природи поля, використовуватимуться параметри  $|E|^2$ ,  $W^e$ ,  $W$ .

Проте, для отримання загальної фізичної картини поля у приміщеннях з медичним устаткуванням, більш зручним, при описі структури розповсюдження ЕМП є напруженість електричного поля.

Аналітичний метод розрахунку поля в межах виробничого приміщення не може бути застосований унаслідок того, що поле є суперпозицією прямої хвилі (активні джерела випромінювання), багатого числа відображених хвиль і зовнішніх джерел, що мають випадкові амплітуди і фази.

Для оцінки перевипромінювань зазвичай вводять величину ефективної площі розсіяння [59]. Оскільки випромінювання походить з апаратури, а число пере відбиттів, так і випромінювачів випадково, зрозуміла неможливість детермінованого визначення напруженості поля на робочому місці [60 – 64]. До вищесказаного в приміщенні присутній так зване паразитне ви-

промінювання (з'єднання хвилеводних і коаксіальних трактів конструктивних отворів апаратури).

### 2.3 Розробка моделі електромагнітної обстановки у приміщенні з медичної апаратури

Для вибору і розробки реальних засобів захисту людини від дії паразитних електромагнітних випромінювань медичного устаткування, необхідна оцінка рівнів цих випромінювань. Такі оцінки можна отримати шляхом вивчення амплітудно–фазних характеристик певних електродинамічних моделей реальних приладів і пристроїв – хвилеводів різного поперечного перерізу з прорізнаними в їх бічних стінках щілинами, різного виду хвилеводів поверхневих хвиль, смушкових ліній і т.д. Основні властивості відкритих систем визначаються дифракційними явищами, отже вивчення даних структур можна звести до дифракційної задачі на замкнутій металевій поверхні з розрізами і отворами. З електродинамічної точки зору це означає, що необхідно знайти рішення різнорідних рівнянь Максвела з джерелами і розривними граничними умовами. Існує і інший підхід до вивчення відкритих систем і рішенням однорідних рівнянь: розгляд розповсюдження власних хвиль відкритого хвилеводу.

В цьому випадку облік випромінювання енергії у вільний простір через отвір описується введенням комплексної постійної розповсюдження. Такий засіб вперше був застосований Хансеном [65] для аналізу властивостей циліндра з поздовжньою щілиною, що використовується як щілиста антена. Хвилі, що володіють такою характерною поведінкою, визначаються як leaky-wave («витікаючі хвилі», хвилі «з витоком»). Аналіз структур таких «витікаючих хвиль» отримав широке розповсюдження. Власні режими щілинних хвилеводів детально вивчені в роботах за допомогою еквівалентних схем і використання поняття поперечного резонансу.

«Витікаючи хвилі» є рішеннями рівнянь Максвелла без джерел, але вони не відносяться до власних мод, оскільки мають особливість на нескінченності у напрямку, перпендикулярному щілині.

В літературі широко представлені роботи по дослідженню «витікаючих хвиль» прямокутних структур, в яких пропонуються різні наближені методи визначення постійної розповсюдження. В. Рамсей привів широкий аналіз прямокутних витікаючих хвильових систем, застосовуючи при дослідженні метод варіацій, який, як указують Голдстон і Олівер насправді, прихованим чином, включає визначення параметрів еквівалентного ланцюга поперечних розривів (щілин).

Метод еквівалентних схем дозволяє розповсюдити на хвилеводи добре розроблені засоби інженерного розрахунку і якісного аналізу довгих ліній, проте, істотним його недоліком є заміна безпосереднього строгого рішення рівнянь електродинаміки моделюванням поставленої задачі.

Серед методів, вільних від обмежень по довжині щілини, відзначимо в першу чергу методи, розвинені Я.Н. Фельдом [66] в теорії щілистих антен. При рішенні отриманого рівняння робиться додаткове обмеження ширини щілини. Щілина передбачається не просто вузької, а експоненціально вузької, тобто  $\ln \frac{\lambda}{a} \sim \ln \frac{l}{a} \geq 1$ , де  $l$  – довжина, а  $a$  – ширина щілини. Таке грубе обмеження ширини щілини дозволяє розкласти напругу в ряд по малому параметру  $a$ , де  $a = (12 \ln \frac{ka}{4} \lambda)^{-1}$ .

Утримуючи члени малого першого порядку, Я.Н. Фельд отримав диференціальне рівняння для напруги на щілині, у яке геометрія зв'язуючих об'ємів входить тільки через падаючі поля. В іншому ж задача про зв'язок двох об'ємів при зроблених обмеженнях виявляється тотожною задачею про зв'язок двох напівпросторів через щілину в нескінченно тонкій ідеально провідній площині.

Основною фізичною величиною, що визначає властивості щілистого зчленування, є напруга між краями щілини. Я.Н. Фельд привів широке дослідження залежності закону розподілу напруги на щілині від геометрії щілини, засобу її збудження і наявності інших щілин.

Проте, на практиці цікавляться не полем на щілині, а матрицею розсіювання зчленування. Використовуючи інтегральне рівняння, можна за допомогою методів, розвинених Ю. Швінгером, отримати варіаційний вираз для елементів матриці розсіювання. Правильний вибір пробної напруги надзвичайно важливий. Як пробну напругу, пропонується брати напругу на експоненціально вузькій щілині. Варіаційний метод Швінгера був використаний для дослідження вузьких поперечних щілин в стінках круглого і прямокутного хвелеводів.

У виробничих умовах щілисті випромінювачі частіше за все розташовуються на обмежених поверхнях неправильної форми. Можливий найпростіший підхід рішення задачі, що полягає в заміні криволінійної металеві поверхні на дотичну металеву площину (нескінченний фланець). Шляхом порівняння результатів не багатьох строгих рішень задач випромінювання щілин на криволінійних поверхнях (куля, циліндр, клин і ін.) встановлено, що цей підхід може з успіхом використовуватися для розрахунку провідностей випромінювання резонансних щілин на поверхнях, лінійні розміри яких (а також радіуси кривизни в місці розташування щілини) мають порядок довжини хвилі і більше.

Система координат при аналізі вибирається такій, щоб координатна поверхня співпала з поверхнею тіла. При цьому спрощується математичне формулювання граничних умов, що істотно полегшує рішення поставленої задачі. Як приклад можна вказати на аналіз роботи щілини, що прорізає в хвелеводі прямокутного перетину [67 – 69].

Аналітичний метод розрахунку поля в межах виробничого приміщення не може бути застосований унаслідок того, що поле є суперпозиці-

єю прямої хвилі, паразитних випромінювань, більшого числа відображених хвиль і зовнішніх джерел, що мають випадкові амплітуди і фази.

Для оцінки перевипромінювачей звичайно вводять величину ефективної площі розсіяння [59]. Оскільки випромінювання походить з антени, а число перевідбиттів, як і випромінювачів випадково, зрозуміла неможливість детермінованого визначення напруженості поля на робочому місці [60]. До вищесказаного у приміщенні присутнє так зване паразитне випромінювання (з'єднання хвилеводних і коаксіальних трактів конструктивних отворів).

В будь-якій точці простору напруженість поля або щільність потоку потужності (ЩПП) може розглядатися як суперпозиція прямої хвилі, паразитного випромінювання і великого числа перевідбиттів хвиль (як від різних предметів так і від стін, стелі, підлоги і т.д.).

Миттєве значення напруженості поля прямої хвилі в точці прийому (з урахуванням втрат при розповсюдженні за рахунок поглинання і розсіяння на неоднородностях  $\epsilon$  на шляху розповсюдження), визначається виразом:

$$e_{np} = \frac{\sqrt{60P_1G_1'}}{r} e^{i(\omega t - kr)}, \quad (2.1)$$

де  $P_1$  – потужність випромінювання, Вт;

$G_1$  – коефіцієнт посилення антени;

$r$  – відстань між передаючим джерелом і точкою прийому;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  хвильове число.

Введемо множник послаблення  $V$ , тоді

$$e_{вт.випр.} = \frac{\xi BR \sqrt{60PG_1}}{r + \Delta r} e^{i(\omega t - k(r + \Delta r) - \theta)} \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (2.2)$$

де  $R$  – модуль комплексного коефіцієнта відображенні;

$\theta$  – зміни фази при відображенні;

$\Delta r$  – різниця відстаней, прямої і перевипроміненої хвилі;

$\xi$  – коефіцієнт, що враховує поляризацію.

Аналізуючи формули (2.1) і (2.2) можна визначити, що перевідбитий промінь відрізняється від прямого по амплітуді і фазі.

1. По фазі – унаслідок двох причин:

а) в результаті зсуву фази при відображенні на куті;

б) через втрати фази за рахунок різниці ходу проміння.

2. По амплітуді – унаслідок втрат при відображенні:

$$F = B + \sum_{j=1}^n \frac{\xi_j B_j R_j r}{r + \Delta r_j} e^{i(k\Delta r_j + \theta_j)} \quad (2.3)$$

є функцією послаблення, яка характеризує відмінність реального поля хвилі від поля у вільному просторі. У залежності від характеру середовища функція  $F$  підкоряється певному закону розподілу. Знаючи цей закон можливо обчислити вірогідність того, що  $F$ , а також і напруженість поля, перевищує допустиме значення. Абсолютно очевидно, що вона є випадковою величиною, яка визначена деяким законом розподілу вірогідності, що описує також зміни амплітудних значень напруженості поля.

Враховуючи вищевикладене, миттєве значення напруженості поля від різних джерел в точці прийому може бути визначений

$$\begin{aligned} E = & \frac{\sqrt{60P_1 G_1}}{r} e^{i(\omega t - Kr)} \left[ B + \sum_{j=1}^n \frac{\xi_j B_j R_j r}{r + \Delta r_j} e^{-i(K\Delta r_j + \Theta_j)} \right] + \\ & + \sum_{s=1}^s \frac{\sqrt{60P_2 G_2}}{r_2} e^{i(\omega t - Kr_s)} \left[ B_s + \sum_{t=1}^m \frac{\xi_t B_{st} R_{t s}}{r_s + \Delta r_t} e^{-i(K\Delta r_t + \Theta_t)} \right] + \\ & + \sum_{g=1}^a \frac{\sqrt{60P_3 G_3}}{r_g} e^{i(\omega t - Kr_g)} \left[ B_g + \sum_{\gamma=1}^p \frac{\xi_\gamma B_{g\gamma} R_{\gamma g}}{r_g + \Delta r_\gamma} e^{-i(K\Delta r_\gamma + \Theta_\gamma)} \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

Вирази в квадратних дужках є функціями послаблення, що характеризують відмінність реального поля від поля у вільному просторі. Абсолютно очевидно, що вони є випадковими величинами, певними деякими законами розподілу вірогідності, що описують також зміну амплітудних значень напруженості поля.

Оскільки перевипромінені хвилі і паразитні випромінювання підсумовуються в точці прийому з випадковими відносними фазами, рівномірно розподіленими в інтервалі від  $0 - 2\pi$ , амплітуда сумарного поля випромінювання випадкова, а фази розподілені рівномірно з густиною  $1/2\pi$ . Для аналізу амплітуди результуючого поля скористаємося методикою, вживаною при розгляді випадкових процесів [62]. Розкладемо коливання на ортогональні складові. Очевидно, що амплітуди ортогональних складових полів  $E_1$  і  $E_2$  є незалежними величинами і є результуючою напруженістю поля. Максимуми і мінімуми на робочих місцях обумовлені змінами амплітуди напруженості поля. Знайдемо закон розподілу вірогідності результуючої напруженості  $E_j$ .

У разі зміни положення випромінюючого пристрою, робочого місця і взаємних переміщень перевипромінюючих об'єктів у приміщенні, змінюється кількість перевідображень, різниці відстаней, множники послаблення і комплексні коефіцієнти відображення. Отже, зміняться і амплітуди ортогональних складових. Припустимо, що

1. Число перевипромінених полів є достатньо великим.

2. Амплітуди  $E_j$  перевипромінених складових невеликі в порівнянні з

їх результуючою амплітудою  $E_j \ll \sqrt{\sum_{j=1}^n E_j^2}$ .

3. Фази окремих складових  $E_j$  розподілені рівномірно.

4. Результуюча потужність перевипромінених полів  $\sum_{j=1}^n E_j^2$  постійна.

Знаючи закони розподілу випадкових величин, можна знайти закони розподілу для амплітуд ортогональних складових  $E_1$  і  $E_2$ . Для суми з вказаними властивостями справедлива центральна гранична теорема вірогідності [63], тому

можна вважати, що випадкові амплітуди  $E_{\Sigma 1}$ ,  $E_{\Sigma 2}$ , ортогональних складових розподілені по нормальному закону. Математичні очікування цих складових відповідно становлять  $E_1 = E_0$ ,  $E_2 = 0$ . Самі випадкові величини  $E_1$  та  $E_2$  розподілені по нормальному закону:

$$\rho(E_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_1} \exp\left[-\frac{(E_1 - E_0)^2}{2\delta_1^2}\right]; \rho(E_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_2} \exp\left(-\frac{E_2^2}{2\delta_2^2}\right). \quad (2.5)$$

Амплітуда  $E$  і фаза  $\varphi$  результуючої напруженості поля є випадковим координатами в системі координат  $E_1$ ,  $E_2$ . Сумісну густину вірогідності для випадкових величин  $E$  та  $\varphi$  запишемо:

$$p(E, \varphi) = \frac{E}{2\pi\delta_1\delta_2} \exp\left[\frac{(E \cos \varphi - E_0)^2}{2\delta_1^2} - \frac{E^2 \sin^2 \varphi}{2\delta_2^2}\right] \quad (2.6)$$

де  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – дисперсія випадкових величин  $E_1$  та  $E_2$ .

Інтегруючи вираз (2.6) по всіх можливих значеннях  $\varphi$ , знаходимо одновимірну густину вірогідності поля  $E$ :

$$p(E) = \frac{E}{\delta_1\delta_2} \exp\left[-\frac{E_0}{2\delta_1^2} - \frac{(\delta_1^2 + \delta_2^2)}{4\delta_1^2\delta_2^2} E^2\right] \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \varepsilon_m * I_m\left(\frac{\delta_2^2 - \delta_1^2}{4\delta_1^2\delta_2^2} E^2\right) I_{2m} \frac{E_0 E}{\delta_1^2} \quad (2.7)$$

Виходячи з фізичної симетрії, для розкладання випадкової результуючої напруженості поля на ортогональні складові можна стверджувати, що

$$\delta_1^2 = \delta_2^2 = \delta^2 = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{2}.$$

Аналізуємо вираз (2.7). У разі закритих трас (робочі місця екрановані) напруженість поля прямої хвилі досить мала, тобто  $E_0 \rightarrow 0$ .

Оскільки, для Бесельової функції



$$J_m(0) = \begin{cases} 1, m = 0 \\ 0, m \neq 0 \end{cases}$$

то, підставляючи ці значення в (2.7), одержуємо

$$p(E) = \frac{E}{\delta^2} \exp\left(-\frac{E^2}{2\delta^2}\right). \quad (2.6)$$

Таким чином, густина вірогідності результуючої амплітуди випадкових полів вторинного і паразитних випромінювань описується нормальним законом Релея.

Для відкритої траси (робочі місця не захищені), коли поля прямої хвилі значно перевищують суму полів відображених хвиль отримаємо

$$p(E) = \frac{E}{\delta^2} \exp\left[-\frac{E_0^2 + E^2}{2\delta^2}\right] J_0\left(\frac{E_0 E}{\delta^2}\right), \quad (2.8)$$

$$\text{де } J_0\left(\frac{E_0 E}{\delta^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{E_0 E}{\delta^2} \cos \varphi\right) dy.$$

Вираз (2.8) для густини вірогідності огинаючої напруженості поля є узагальненим законом Релея.

Переходячи у виразі (2.8) від напруженості до потужності, отримаємо

$$p(P) = \frac{1}{\delta^2} \exp\left[-\frac{P + P_0}{\delta^2}\right] J_0\left[\frac{2\sqrt{PP_0}}{\delta^2}\right], \quad (2.9)$$

де  $P_0 = \frac{E_0^2}{2}$  – потужність стабільної складової сигналу;

$P = \frac{E^2}{2}$  – потужність результуючого сигналу.

Введемо позначення

$$m = \frac{P_0}{\delta^2} = \frac{a^2}{2} \quad (2.10)$$

Тоді середня потужність відображеного сигналу дорівнює:

$$\bar{P} = \delta^2 + P_0 \quad (2.11)$$

Враховуючи (2.10) і (2.11), вираз (2.9) запишемо у вигляді:

$$p(P) = \frac{1+m}{\bar{P}} \exp\left[-m(1+m)\frac{P}{\bar{P}}\right] J_0\left[2\sqrt{m(1+m)\frac{P}{\bar{P}}}\right] \quad (2.12)$$

Якщо стабільна складова відсутня ( $m=0$ ), то випадковий розмір  $p(P)$  розподілена згідно із законом

$$p(P)_{m=0} = \frac{1}{\bar{P}} \exp\left[-\frac{P}{\bar{P}}\right] \quad (2.13)$$

У виразі (2.12) параметр  $m$  можна розглядати як відношення потужності стабільно відображеного сигналу  $P_0$  до середнього значення потужності всіх випадкових відображень  $P_\Sigma$ . Тоді для відносної потужності  $\frac{P}{\bar{P}}$  густина розподілу (2.12) і (2.13) приймуть наступний вигляд:

$$p\left(\frac{P}{\bar{P}}\right) = (1+m) \exp\left[-m - (1+m)\frac{P}{\bar{P}}\right] J_0\left[\sqrt{m(1+m)\frac{P}{\bar{P}}}\right]. \quad (2.14)$$

$$p\left(\frac{P}{\bar{P}}\right)_{m=0} = \exp\left[-\frac{P}{\bar{P}}\right]. \quad (2.15)$$

На зміну амплітуд перевипромінених і паразитних хвиль, за рахунок зміни різниці відстаней  $\Delta r_j$ , множників ослаблення  $B_j$  і коефіцієнтів відо-

браження  $R_j$ , головним чином впливає взаємне переміщення випромінюючого пристрою, робочого місця і нерухомого перевипромінення.

Для всіх можливих практичних випадків виконуються умови, що призводять до розподілу огинаючої напруженості поля на робочому місці за законом Релея.

Можливо виділити деякі характерні випадки:

1. Випромінюючі пристрої і робочі місця розташовані на відкритій траєкторії, тобто робочі місця не екрановані. При цьому потужність прямої хвилі значно перевищує суму потужностей перевипромінених хвиль і паразитних випромінювань і огинаюча результуючої потужності розподілена за законом Релея.

2. Робочі місця екрановані від випромінюючого пристрою і в першій зоні Френеля є предмети, що мають різні відображення. Тоді потужність прямої хвилі значно менше сумарної величини відображених і паразитних потужностей і потужності зовнішнього джерела. Огинаюча результуючої потужності розподілена по нормальному закону.

Таким чином, якщо припустити, що густина потоку енергії на робочому місці створюється прямою хвилею, зовнішніми джерелами, паразитними випромінюваннями і сумою перевипромінених хвиль, то розподіл потужності описується виразами (2.12) і (2.13).

Покриття предметів, що відображають, радіопоглинаючими матеріалами призводить до того, що вторинне випромінювання  $\sum_{j=1}^n e_{j\text{втор.випром.}} \rightarrow 0$ , тобто отримуємо умови, аналогічні вільному простору.

Розглянемо умови застосовності закону Релея для опису зміни рівня ЕМВ в приміщенні за різних умов розповсюдження електромагнітної енергії НВЧ.

На робочому місці при нерухомому випромінюючому пристрої амплітуда напруженості поля прямої хвилі практично постійна, якщо в межах

першої зони Френеля [66] відсутні предмети, які переміщуються. Огинаюча і фаза сумарного поля відображених хвиль і паразитних випромінювань на робочих місцях випадкові і залежать від взаємного розташування випромінюючого пристрою, робочого місця, пасивних і паразитних випромінювань. Якщо відсутні переміщення перевипромінень в межах приміщення, то огинаюча і фаза суми векторів прямої хвилі, векторів відображених хвиль і паразитного випромінювання не змінюються в часі.

#### 2.4 Розрахунок коефіцієнту захисту при використанні однорідних багат шарових матеріалів

Розрахунок коефіцієнту відображення одношарового матеріалу не представляє ускладнень. В даному підрозділі ми отримаємо вирази для визначення коефіцієнту відображення і поглинання багат шарового матеріалу, які зручно застосувати для чисельних розрахунків на ЕОМ [68].

Розглянемо двошарову структуру, що складається з шарів, що характеризуються хвильовими числами  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  (рисунок 2.1). Верхній і нижній напівпростори характеризуються відповідно хвильовими числами  $\gamma_3$  і  $\gamma_0$ . Нехай плоска хвиля магнітного типу падає на поверхню структури.

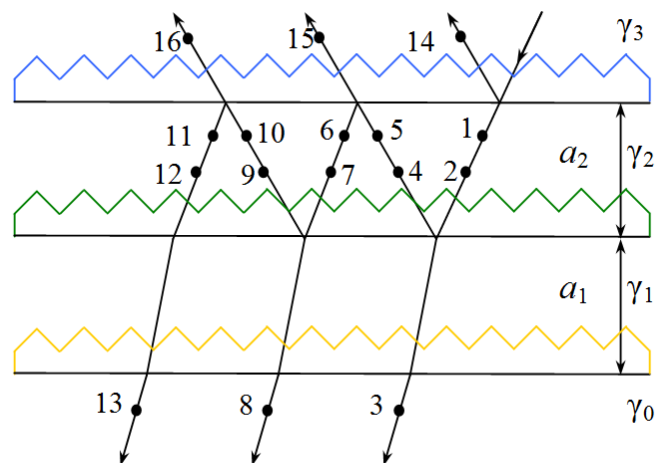


Рисунок 2.2 – Багат шарова структура РПМ матеріалу

Коефіцієнт відображення визначається виразом

$$R_{21} = \frac{R_{21} + R_{10}e^{-2\gamma_1\alpha_1}}{1 + R_{21}R_{10}e^{-2\gamma_1\alpha_1}} \quad (2.16)$$

і коефіцієнт екранування

$$S_{21} = \frac{(1 + R_{21})(1 + R_{10})e^{-2\gamma_1\alpha_1}}{1 + R_{21}R_{10}e^{-2\gamma_1\alpha_1}}, \quad (2.17)$$

$$\text{де } R_{10} = \frac{\gamma_0 - \gamma_1}{\gamma_0 + \gamma_1}, R_{21} = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2},$$

$R_{10}, R_{21}$  – коефіцієнти відображення від відповідних меж.

В приведених виразах подвійні індекси справа вказують на напрям руху електромагнітної хвилі, а індекс зліва – на кількість екрануючих шарів.

Коефіцієнт проходження двошарової структури  ${}_2S_{32}$  визначається підсумовуванням коефіцієнтів, які характеризують випромінення, що вийшло в нижній напівпростір (крапки 3, 8, 13 і т.п.)

$$S_{32} = \frac{{}_1S_{21}(1 + R_{32})e^{-\gamma_2\alpha_2}}{1 + R_{32}R_{21}e^{-2\gamma_2\alpha_2}}.$$

Аналогічно, коефіцієнт відображення двошарової структури визначається підсумовуванням коефіцієнтів випромінення, що вийшло назад у верхній напівпростір (крапки 14,15,16 і т.п.)

$$R_{32} = \frac{R_{32} + R_{21}e^{-2\gamma_2\alpha_2}}{1 + R_{32}R_{21}e^{-2\gamma_2\alpha_2}}.$$

Застосовуючи метод математичної індукції для  $N$  – шарової структури, отримаємо:

коефіцієнт екранування

$${}_N S(N+1)_N = \frac{{}^{(N-1)}S_{N(N-1)} (1 + R_{(N+1)N}) e^{-\gamma_N a_N}}{1 + R_{(N+1)N(N-1)} R_{N(N-1)} e^{-2\gamma_N a_N}} \quad (2.18)$$

і коефіцієнт відображення

$${}_N R(N+1)_N = \frac{R_{(N+1)N} + {}^{(N-1)}R_{N(N-1)} e^{-\gamma_N a_N}}{1 + R_{(N+1)N(N-1)} R_{N(N-1)} e^{-2\gamma_N a_N}}, \quad (2.19)$$

$$\text{де } R_{(N+1)N} = \frac{\gamma_N - \gamma_{N+1}}{\gamma_N + \gamma_{N+1}}.$$

Отримані формули зручні при комп'ютерній реалізації.

Вважаючи параметри всіх шарів у виразах (2.18) і (2.19) однаковими, можливо отримати формули (2.16) і (2.17) для одношарової структури з сумарною товщиною, що є зручним способом перевірки правильності отриманих виразів.

Крім того, помітимо, що вираз (2.18) отриманий для вектора  $\bar{n}$ . Для отримання коефіцієнта проходження по вектору  $\bar{e}$  достатньо (2.18) помножити на величину  $\gamma_N/\gamma_0$ .

При цьому вираз (2.19) міняє знак. Очевидно, що якщо обидві структури середовища будуть однаковими, вирази для коефіцієнтів проходження по векторах  $\bar{e}$  і  $\bar{n}$  співпадуть.

2.5 Метод розрахунку допустимого рівня електромагнітного випромінювання на організм людини, яка знаходиться в захисному середовищі

Як відомо, у разі падіння плоскої хвилі на діелектричну сферу остання фокусує падаюче електромагнітне випромінювання [70].

Радіозахисний костюм в різних областях має певні радіуси кривизни, тобто різні ділянки можна представити у вигляді циліндрів і сфер з різними радіусами. Все це приводить до фокусуєчого ефекту падаючого ЕМВ всередину костюма і зниження його захисних властивостей.

В даному підрозділі приводяться теоретичні дослідження фокусуєчих властивостей циліндрів з кінцевою об'ємною провідністю. З середовища (рисунок 2.3) з діелектричною проникністю  $\epsilon_0$  і магнітною проникністю  $\mu_0$  (вільний простір) на двошаровий циліндр падає плоска електромагнітна хвиля одиничної амплітуди.

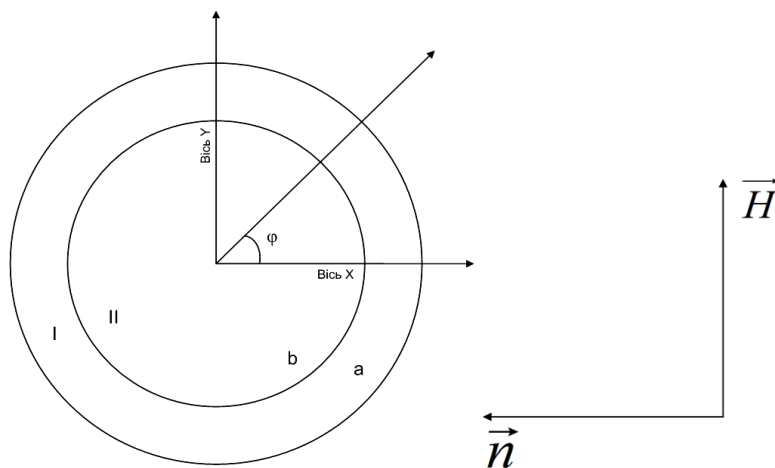


Рисунок 2.3 – Циліндровий екран з кінцевою об'ємною провідністю

Вирішимо задачу дифракції плоскої  $E$  – поляризованої хвилі для цього випадку, з урахуванням того, що для діапазону НВЧ це є резонансна система. Вибрана система координат допускає розділення змінних в рівняннях Максвелла. Поле електромагнітної хвилі в циліндровій системі координат запишемо

$$E_z^0 = e^{ik_0 \rho \cos \varphi}, H_\varphi = -\frac{i}{\omega \mu_0} \frac{\partial E_z^0}{\partial \rho},$$

де  $K_0$  – хвильове число у вільному просторі.

Поле усередині циліндра визначається рівнянням [71]

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + K^2 E_z = 0; \quad (2.20)$$

$$H_\varphi = -\frac{i}{\omega \mu} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial \rho}$$

і умовами безперервності тангенціальних складових на межах розділу середовищ.

Використовуючи метод розділення змінних і враховуючи, що  $E_z = R(\rho)\psi(\varphi)$ , рівняння (2.20) перетвориться до вигляду

$$\frac{d^2 R}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dR}{d\rho} + \left(K^2 - \frac{m^2}{\rho^2}\right)R = 0; \quad (2.21)$$

$$\frac{d^2 \psi}{d\varphi^2} + m^2 \psi = 0. \quad (2.22)$$

Оскільки поле повинне бути періодичним щодо кута  $\varphi$  (враховуючи симетрію даної моделі),  $m$  дорівнює будь-якому цілому числу  $m=0,1,2,3$ .

Тоді рівняння (2.21) є рівняння Бесселя цілого порядку і його рішення має вигляд

$$R = A_m J_m(k\rho) + B_m N_m(k\rho), \quad (2.23)$$

або

$$R = A_m H_m^{(1)}(k\rho) + B_m H_m^{(2)}(k\rho),$$

де  $J_m(k\rho)$ ;  $N_m(k\rho)$ ;  $H_m^{(1)}(k\rho)$ ;  $H_m^{(2)}(k\rho)$  є відповідно функції Бесселя, Неймана і Ханкеля першого і другого роду.



Дані вирази справедливі при  $|z| \gg 1$  і  $|z| \gg m$ , при цьому складове  $B_m H_m^{(2)}(k\rho)$ , при  $\rho \rightarrow 0$ , відповідає хвилі, яка розповсюджується від джерела (циліндра) на нескінченність, а доданок  $A_m H_m^{(1)}(k\rho)$ , при  $\rho \rightarrow \infty$  з нескінченності до джерела.

При  $A_m = 0$  буде задоволений принцип випромінювання на нескінченності.

В цьому випадку функцію  $R$  зовні циліндра можна записати

$$R = B_m H_m^{(2)}(k\rho).$$

З (2.22) витікає, що

$$\psi = C_m \cos m\varphi + D_m \sin m\varphi.$$

Враховуючи, що компоненти поля падаючої хвилі є парними функціями кута  $\varphi$ , покладемо  $D_m = 0$ . Тоді  $\psi = C_m \cos m\varphi$  і поле зовні циліндра (розсіяне) напишемо у виразі:

$$\left. \begin{aligned} E_z^{0-} &= \sum_{m=0}^{\infty} B_m H_m^{(2)}(k_0\rho) \cos m\varphi; \\ H_{\varphi}^{0-} &= -\frac{i}{\omega\eta} \sum_{m=0}^{\infty} B_m \frac{\partial}{\partial \rho} H_m^{(2)}(k_0\rho) \cos m\varphi \end{aligned} \right\} (2.24)$$

Поле в середовищі I має вигляд

$$\left. \begin{aligned} E_z^I &= \sum_{m=0}^{\infty} [C_m J_m(k_1\rho) + D_m N_m(k_1\rho)] \cos m\varphi; \\ H_{\varphi}^I &= -\frac{i}{\omega\rho} \cdot \frac{\partial}{\partial \rho} E_z^I \end{aligned} \right\} (2.25)$$

При  $\rho \rightarrow 0$  полі у середовищі II повинне бути кінцевим.

Дана умова буде виконана, якщо у рівнянні (2.23) коефіцієнти при функціях Неймана будуть дорівнювати нулю. Поле в середовищі II має вигляд

$$\left. \begin{aligned} E_z^{\text{II}} &= \sum_{m=0}^{\infty} A_m J_m(k_z \rho) \cos m \varphi; \\ H_{\varphi}^{\text{II}} &= -\frac{i}{\omega \mu} \cdot \frac{\partial}{\partial \rho} E_z^{\text{II}}. \end{aligned} \right\} \quad (2.26)$$

Поле падаючої плоскої хвилі можна записати у вигляді

$$\left. \begin{aligned} E_z^0 &= e^{ik_0 \rho \cos \varphi} = J_0(k \rho) + \sum_{m=1}^{\infty} 2(i)^m J_m(k_0 \rho) \cos m \varphi; \\ H_{\varphi}^0 &= -\frac{i}{\omega \mu^0} \cdot \frac{\partial}{\partial \rho} E_z^0. \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

Якщо відомі коефіцієнти  $A_m, B_m, C_m, D_m$ , у системи рівнянь (2.24) – (2.27) – описують поле у кожному середовищі.

З урахуванням граничних умов:

для  $\rho=b$

$$E_z^0 + E_z^{0-} = E_z^I, \quad H_{\varphi}^0 + H_{\varphi}^{0-} = H_{\varphi}^I; \quad (2.28)$$

для  $\rho=a$

$$E_z^i = E_z^{\text{II}}, \quad H_{\varphi}^i = H_{\varphi}^{\text{II}}. \quad (2.29)$$

Використовуючи вираз для компонент поля та підставляючи їх вирази в (2.28) і (2.29), після нескладних перетворень отримаємо систему рівнянь

$$\begin{aligned}
J_0(k_0 b) + B_0 H_0^{(2)}(k_0 b) &= C_0 J_0(k_1 b) + D_0 J_0(k_1 b) + D_0 N_0(k_1 b); \\
2(i)^n J_n(k_0 b) + B_n H_n^{(2)}(k_0 b) &= C_n J_n(k_1 b) + D_n J_n(k_1 b); \\
\frac{\partial J_0}{\partial \rho}(k_0 b) + B_0 \frac{\partial}{\partial \rho} H_0^{(2)}(k_0 b) &= C_0 \frac{\partial}{\partial \rho} J_0(k_1 b) + D_0 \frac{\partial}{\partial \rho} N_0(k_1 b); \\
2(i)^n \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(k_0 b) + B_n \frac{\partial}{\partial \rho} H_n^{(2)}(k_0 b) &= C_n \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(k_1 b) + D_n \frac{\partial}{\partial \rho} N_n(k_1 b); \\
C_n J_n(k_1 a) + D_n N_n(k_1 a) &= A_n J_n(k_2 a); \\
C_n \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(k_1 a) + D_n \frac{\partial}{\partial \rho} N_n(k_1 a) &= A_n \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(k_2 a).
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Для визначення поля  $E_z^{\text{II}}$  усередині циліндра нам необхідно систему рівнянь (2.30) вирішити щодо коефіцієнта  $A_n$ .

Коефіцієнт  $A_n$  (пропускаючи проміжні викладення) можна записати

$$A_0 = -\frac{4i}{n^2 ab(L - T)}, \tag{2.31}$$

де

$$\begin{aligned}
L &= [k_1 J_1(k_1 b) H_0^{(2)}(k_0 b) - k_0 H_1^{(2)}(k_0 b) J(k_1 b)] \times \\
&\times [k_2 J_1(k_2 a) N_0(k_1 a) - k_1 J_0(k_2 a) N_1(k_1 a)]; \\
T &= [k_1 N_1(k_1 b) H_0^{(2)}(k_0 b) - k_0 H_1^{(2)}(k_0 b) N_0(k_1 b)] \times \\
&\times [k_2 J_0(k_0 a) J_1(k_2 a) - k_1 J_1(k_1 a) J_0(k_2 a)].
\end{aligned}$$

$$A_n = \frac{8(i)^{n-1}}{\bar{n}^2 ab[rt - dl]}, \tag{2.32}$$

де

$$\begin{aligned}
r &= \left\{ [k_0 H_{n-1}^{(2)}(k_0 b) - \frac{n}{b} H_n^{(2)}(k_0 b)] J_n(k_1 b) - [k_1 J_{n-1}(k_1 b) - \frac{n}{b} J_n(k_1 b)] H_n^{(2)}(k_0 b) \right\}; \\
t &= \left\{ [k_1 N_{n-1}(k_0 a) - \frac{n}{a} N_n(k_1 a)] J_n(k_2 a) - [k_2 J_{n-1}(k_2 a) - \frac{n}{a} J_n(k_2 a)] N_n(k_1 a) \right\};
\end{aligned}$$

$$d = \left\{ [k_0 H_{n-1}^{(2)} - \frac{n}{b} H_n^{(2)}(k_0 b)] N_n(k_1 b) - [k_1 N_{n-1}(k_1 b) - \frac{n}{b} N_n(k_1 b)] H_n^2(k_0 b) \right\};$$

$$l = \left\{ [k_1 J_{n-1}(k_1 a) - \frac{n}{a} J_n(k_1 a)] J_n(k_2 a) - [k_2 J_{n-1}(k_2 a) - \frac{n}{a} J_n(k_2 a)] J_n(k_1 a) \right\}.$$

Вирази (2.31) і (2.32) справедливі при обмеженому значенні аргументу циліндрових функцій. Це витікає з того, що для комплексних значень аргументу  $z$  за умови, що  $(z \rightarrow \infty)$  має місце співвідношення  $J_n(z) \rightarrow iN(z)$ .

Таким чином, в системі рівнянь (2.32) коефіцієнт  $A_n$  має невизначеність вигляду  $0/0$ , розкрити який не представляється можливим.

Якщо аргумент циліндрових функцій  $|z| \gg 1$  та  $|z| \gg n$ , то для їх обчислень можна скористатися наближеними виразами [68]

$$H_n^2(z) \approx \sqrt{\frac{2}{\bar{n}z}} [P_n(z) - iQ_n(z)] e^{-i(z - \frac{n\bar{n}}{2} - \frac{\bar{n}}{4})}. \quad (2.33)$$

$$J_n(z) \approx \sqrt{\frac{2}{\bar{n}z}} [P_n(z) \cos(z - \frac{n\bar{n}}{2} - \frac{n}{4}) - Q_n(z) \sin(z - \frac{n\bar{n}}{2} - \frac{\bar{n}}{4})]. \quad (2.34)$$

$$N_n(z) \approx \sqrt{\frac{2}{\bar{n}z}} [P_n(z) \sin(z - \frac{n\bar{n}}{2} - \frac{n}{4}) - Q_n(z) \cos(z - \frac{n\bar{n}}{2} - \frac{\bar{n}}{4})], \quad (2.35)$$

$$\text{де } P_n(z) = 1 - \frac{(4n^2 - 1)(4n^2 - 3^2)}{2!(8z)^2} + \frac{(4n^2 - 1)(4n^2 - 3^2)(4n^2 - 5^2)(4n^2 - 7^2)}{3!(8z)^3};$$

$$P_n(z) = 1 - \frac{(4n^2 - 1)(4n^2 - 3^2)}{2!(8z)^2} + \frac{(4n^2 - 1)(4n^2 - 3^2)(4n^2 - 5^2)(4n^2 - 7^2)}{3!(8z)^3};$$

$$Q_n(z) = \frac{4n^2 - 1}{1!8z} - \frac{(4n^2 - 1)(4n^2 - 3^2)(4n^2 - 5^2)}{3!(8z)^3}.$$

Якщо вважати, що  $k > \frac{2n-5}{4}$  для  $P_n(z)$  і  $k > \frac{2n-7}{4}$  для  $Q_n(z)$ , то похибка буде менше першого відкинутого члену.

Таким чином, рівняння (2.26), (2.31), (2.32) повністю визначають поле усередині циліндра для  $E$  – поляризованого випромінювання.

Для  $H$  – поляризованого випромінювання можна скористатися принципом переставлення подвійності рівнянь Максвелла [72] і рівняння (2.36) мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} E_z^{\text{II}} &= \frac{i}{\omega \epsilon_2} \sum_{n=0}^{\infty} A_n \frac{\partial}{\partial \rho} J_n(k_z \rho) \cos n\varphi; \\ H_{\varphi}^{\text{II}} &= \sum_{n=0}^{\infty} A_n J_n(k_z \rho) \cos n\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

Розподіл напруженості електричного поля усередині порожнього циліндра уздовж радіусу при падінні на нього плоскої хвилі одиничної амплітуди представлено на рисунку 4.4 розділу 4.

Як видно з рисунку, захисні властивості циліндрового екрану гірше ніж плоского, крім того для циліндрового екрану спостерігається зростання амплітуди електромагнітного поля до центру, що підтверджує наявність фокусування в даному випадку. Явище фокусування при цьому тим вище, чим більше діелектрична проникність матеріалів циліндра. Хвилеподібний характер кривих пояснюється явищем інтерференції. Приведена на рисунку 4.5 розділу 4 крива показує розподіл напруженості поля усередині циліндра по азимуту, при цьому максимум минулої потужності концентрується у напрямі падаючої ЕМВ.

На рисунку 4.6 представлена залежність першого максимуму напруженості електричного поля усередині циліндра від його радіусу. Видно, що зменшення радіусу призводить до збільшення фокусувального ефекту і зниженню

захисних властивостей. Рисунок 4.7 ще раз підтверджує погіршення захисних властивостей циліндрових екранів в порівнянні з плоскими.

Для Н – поляризованої хвилі також спостерігається ефект фокусування падаючого випромінювання і погіршення захисних властивостей в порівнянні з плоским екраном.

#### Висновки до другого розділу

1. Запропоновано метод оцінки ефективності захисту медичного персоналу від дії електромагнітного випромінювання надвисоких частот при використанні приладів та систем у сучасних медичних закладах. Даний метод дозволить провести якісну оцінку електромагнітної обстановки у приміщенні з медичною апаратурою, яка є джерелом електромагнітного випромінювання надвисоких частот та запропонувати удосконалення методів захисту.

2. Вдосконалені моделі визначення рівня електромагнітного випромінювання, які впливають на біологічні об'єкти. В цих моделях на відміну від відомих враховуються як паразитні випромінювання, число відображених хвиль так і число зовнішніх джерел, що мають випадкові амплітуди і фази. Це дозволило визначити показники електромагнітного випромінювання для різних типів джерел випромінювання і їх інтенсивності в медико-діагностичних, лікувальних, хірургічних приладах і системах, а також в їх окремих частинах.

Список використаних джерел у даному розділі наведені у повному списку використаних джерел під номерами:[53 – 72]

## РОЗДІЛ 3

# РОЗРОБКА МОДЕЛІ І ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ БІОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### 3.1 Доза шкідливої дії, як критерій безпеки біологічної системи

В даний час відомо, що результатом функціонування будь-якої складної технічної системи (СТС) є фізична робота (корисна) і шкідлива дія (як для самої системи, так і для обслуговуючого персоналу, навколишнього середовища і т.д.). Будь-яка шкідлива дія, в кожній технічній системі, викликає негативний вплив на життєдіяльність людини, тобто є неминучим злом або «розплатою за технічний прогрес», отже СТС повинна мати захист від шкідливої дії. Таким чином, моделювання систем біомедичного захисту, для виготовлення конкретних технічних заходів, є актуальною задачею.

Складні системи біологічного захисту (СБЗ) можна розглядати як системи контролю і керування електромагнітним випромінюванням(ЕМВ) [73]. Ці системи можливо розділити на автоматичні і ергодичні. В останніх, що отримали в теперішній час широке розповсюдження, певну роль у контролі і керуванні грає інженер – оператор настроювання і випробування медичних приладів і систем. Для ергодичних систем, необхідна оцінка кількості інформації, яка може бути передана системою інженеру – оператору за допомогою того або іншого сигналу в певні тимчасові інтервали, вірогідність виконання помилки і витрати, при виконанні системою і оператором поставленого завдання.

В розділі описується засіб оцінки ефективності роботи системи біологічного захисту (СБЗ) на основі оцінки дози шкідливої дії, а також побудови функціональної моделі з джерелами ЕМВ і математичних моделей потенційних і реальних можливостей системи.

В основу побудови моделі встановлені детерміністські критерії і вірогідність виконання задачі захисту, кількість інформації, одержуваною СБЗ з урахуванням витрат [74 – 88].

Система біологічного захисту є складною технічною системою.

При розробці складних систем можливо здійснити математичне моделювання на безперервних і дискретних моделях вірогідності ідеальних і реальних процесів контролю і керування(КК). Введення потенційних моделей обумовлено необхідністю оцінки ефективності і оптимізації реальних можливостей системи щодо потенційних.

Визначення законів розподілу вірогідності представляє складну задачу аналізу в статистичній постановці. Цю ж задачу як окремий випадок можна вирішити в постановці детерміністської [89].

В класичній постановці задача синтезу системи захисту взагалі поки не може бути вирішена, з – за відсутності статистичних даних. Тому в дисертації вона розв'язується покроковим прийомом, шляхом дослідження ЕМВ від різних джерел і визначення характеристик, найефективніших заходів захисту. При цьому в основу дослідження і синтезу захисту біологічних об'єктів встановлений детерміністський підхід, який дозволить звести до окремого випадку розгляд математичних очікувань замість випадкових величин.

Узагальнено–функціонально–статистичний критерій при цьому використовується як основа для узагальнення методології аналізу і синтезу СБЗ.

Як критерій рівня забезпечення безпеки біологічної системи життєдіяльності використовується запропонований в роботі [68,90 – 93] критерій – захисна функція, яка дозволяє порівнювати існуючі технічні системи по рівню їх безпеки. Для мети проектування нових складних технічних систем і системи біологічного захисту, пропонується іншій – оптимізаційний підхід.

Зважаючи на складність і неоднозначність вибору глобального критерію, розглянемо спочатку СБЗ без урахування її зв'язків з іншими елементами системи «біологічний об'єкт – прилади – середовище».



Нехай  $D \geq 0$  – доза шкідливої дії. Індексом «з» далі скрізь позначатиметься значення параметра системи або величини шкідливого чинника, отримана в результаті (і після) дії системи біологічного захисту. Таким чином,  $D_3$  – значення  $D$  після дії захисту.

Введемо функцію  $\Phi$ , що зв'язує ці величини

$$\Phi(D, \vec{V}, t) = D_3 \quad (3.1)$$

Назвемо  $\Phi(D, \vec{V}, t)$  захисною функцією системи біологічного захисту (ЗФСБЗ).

Очевидно, що

$$0 \leq \Phi(D, \vec{V}, t) \leq D \text{ и } \Phi(0, \vec{V}, t) = 0$$

У разі лінійності функції  $\Phi(D, \vec{V}, t)$  по змінній  $D$  має місце співвідношення

$$D_3 = K_3(\vec{V}, t) D$$

Функцію

$$K_3(\vec{V}, t) = \Phi(1, \vec{V}, t) \quad (3.2)$$

назвемо коефіцієнт захисту.

Відзначимо, що всупереч назві, мета роботи СБЗ полягає, згідно (3.1) і (3.2), в зменшенні  $K_3$ . Згідно «здоровому глузду» коефіцієнтом захисту було слід назвати величину, зворотну до  $K_3$ .

Якщо той, що розглядається ТСЗ є структурним, тобто її параметри  $\vec{V}$  та  $K_3$  не залежать від часу. В цьому випадку розробка системи призводить до вибору значень параметрів, які дають мінімум  $K_3$ . При цьому, якщо виконується вимога лінійності дози, то достатньо її оцінити по рівню дії.

Відзначимо, що поняття захисної функції і коефіцієнту захисту можуть бути введені за допомогою (3.1) і (3.2) одноманітно як для одного пристрою, так і для складної ТСБЗ.

Оптимізація ТСБЗ природним чином розбивається на два ієрархічні рівні: верхній (перший) рівень – структурна оптимізація (СО): вибір типів захисних пристроїв, їх розташування і зв'язків ТСЗ, і нижній (другий) рівень – параметричну оптимізацію (ПО) самих пристроїв при відомій структурі ТСБЗ. В даний час перший рівень слабо формалізований і виконується в основному в ручну, на підставі особистого досвіду розробника, або, в кращому випадку, за допомогою експертних оцінок. Формалізація задач другого рівня принципових труднощів не викликає, але потрапляє на цілий ряд обчислювальних труднощів, наприклад, проблема розмірності.

Припустимо на нижньому (параметричному) рівні оптимізації відомий набір  $\{Z_i\}$  з  $m$  ( $i = 1, \dots, m$ ) захисних пристроїв, кожне з яких описане залежністю коефіцієнту захисту  $K_3$  від параметрів  $H_k$  цього пристрою

$$K_3 = Z^{n_i}(H_1, \dots, H_{n_i}), \quad (3.3)$$

де  $n_i$  – верхній індекс, що означає розмірність векторів параметрів  $i$  – го пристрої;

$$H^i = \bigotimes_1^{n_i} \{H_k^i\}$$

На множині  $H_i$  для кожного індексу  $i$ , тобто для  $i$  – го пристрою, визначена функція вартості

$$C_i^{n_i}(H_1, \dots, H_n) > 0.$$

Тут і далі, якщо йдеться про конкретний пристрій, індекс  $i$  не будемо враховувати. Знак  $\bigotimes_1^n$  означає декартову множену з  $n$  множин. Конкретизація параметрів  $\{H_k\}$  залежить від типу захисного пристрою.

Визначення необхідних коефіцієнтів захисту  $K_3$  ґрунтується на залежності функціонального стану оператора від рівня шкідливих чинників.

У залежності від характеру зміни в часі шкідливих чинників на робочому місці персоналу і властивостей оператора «дія–ефект», змінюється підхід до вибору  $K_3$ .

Якщо рівень шкідливих чинників трохи коливається біля свого середнього значення, то можна орієнтуватися на існуючі норми гранично допустимих шкідливостей. В цьому випадку початкова вимога до  $K_3$  матиме вигляд

$$K_3 \leq \frac{x_{\text{норм}}}{x}.$$

Якщо шкідливі чинники  $x$  зовнішнього середовища робочого місця змінюються в часі, і для оператора «дія – ефект» спостерігається кумулятивна складова, то до вибору  $K_3$  доцільний дозовий підхід.

В загальному випадку при дозовому підході допустимим є наступне наближення для біологічної дії  $y$ :

$$y = \varphi \left( \int_0^T g(x(\tau)) d\tau \right),$$

де  $\varphi, g$  – монотонно спадна функція.

Визначення нормативу дози  $D_{\text{норм}}$  за зміну проводиться з рівняння

$$y_{\text{норм}} = \varphi(D_{\text{норм}}) \quad (3.4)$$

Оскільки  $\varphi$  – монотонна функція, те рівняння (4) має єдине рішення

$$D_{\text{норм}} = \varphi^{-1}(y_{\text{норм}}).$$

Після цього  $K_3$  визначається із співвідношення

$$\int_0^T g(K_3 x(\tau)) d\tau \leq D_{\text{норм}}. \quad (3.5)$$

В першому наближенні можна обмежитися випадком  $x(\tau) = \text{const}$ .

Тоді мають місце співвідношення:

$$g(K_3x)T \leq D_{\text{норм}} \Leftrightarrow g(K_3x) \leq \frac{D_{\text{нг}}}{T} \Leftrightarrow K_3x \leq$$

$$g^{-1}\left(\frac{D_{\text{норм}}}{T}\right) \Leftrightarrow K_3 \leq \frac{g^{-1}\left(\frac{D_{\text{норм}}}{T}\right)}{x}.$$

З другого боку, оскільки  $\int_0^T g(x)dt = Tg(x) = D$  – величина дози за зміну

без застосування захисту, то  $x = g^{-1}\left(\frac{D}{T}\right)$ .

Таким чином при дозовому підході в першому наближенні можна прийняти умову

$$K_3 \leq \frac{g^{-1}\left(\frac{D_{\text{норм}}}{T}\right)}{g^{-1}\left(\frac{D}{T}\right)}. \quad (3.6)$$

Відзначимо, що в окремому випадку  $g(x) = x$  рівність (3.5) має вигляд

$$\int_0^T K_3x(\tau) d\tau \leq D_{\text{норм}},$$

або

$$K_3D \leq D_{\text{норм}} \Leftrightarrow K_3 \leq \frac{D_{\text{норм}}}{D}.$$

Величина  $D$  може бути визначена експериментально, а для проектованих систем – на підставі узагальненого структурного методу.

Якщо дозовий підхід неможливо застосувати, вибір  $K_3$  повинен спиратися безпосередньо на модель взаємозв'язку «дія–ефект». Для лінійної динамічної моделі маємо

$$y(t) = \int_0^t w(\tau)x(t-\tau)d\tau. \quad (3.7)$$

Момент  $t_0$  вибирається з умови максимальної біологічної дії

$$\max_{t \in [0; T]} y(t) = y(t_0).$$

Тоді вимоги до  $K_3$  визначаються із співвідношення

$$\int_0^{t_0} w(t)K_3x(t_0-\tau)d\tau \leq y_{\text{норм}}$$

$$K_3 \leq \frac{y_{\text{норм}}}{\int_0^{t_0} w(\tau)x(t_0-t)dt} = \frac{y_{\text{норм}}}{y_{\text{max}}}. \quad (3.8)$$

Для проведення цієї оцінки потрібна інформація про характер зміни  $x(t)$  в перебігу робочої зміни  $t$ . Для діючих виробництв ці характеристики можна отримати експериментально. Для проєктованих технологічних процесів раціональним є чисельне стохастичне моделювання функції  $x(t)$  з урахуванням апіорної інформації.

Якщо шкідливий чинник викликає істотну зміну декількох параметрів стану здоров'я, то по кожному з них потрібно визначити значення коефіцієнта захисту і вибрати з цих чисел якнайменше.

На етапі технічного проєкту будь-якого із засобів або пристроїв захисту необхідно вирішувати задачу

$$\text{opt}_{\Omega_N} K_3 | C \leq C^*, \quad (3.9)$$

де роль  $C^*$  грає величина вартості  $C$  на етапі технічно–економічного обґрунтування.

У разі оптимізації системи з  $m$  пристроїв відзначимо, що  $K_3 \neq \sum_{i=1}^m k_{i3}$ .

Що стосується критерію вартості  $C$ , то він традиційно вважається адитивним

$$C = \sum_{i=1}^m C_i. \quad (3.10)$$

Якщо захисні пристрої між собою не зв'язані, то вся безліч пристроїв природним чином розбивається на непересічні класи. Ця умова завжди виконується для стаціонарних систем захисту (що безпосередньо виходить з їх визначення), а також для більшості систем функціональних. Таким чином, оптимум кожного пристрою окремо приводить до оптимальності всю систему. Цей прийом, який істотно спрощує задачу, інтуїтивно завжди використовувався проектувальниками захисних систем. При цьому, проте, не враховується обмеження – позитивність  $K_{i3}$  і умова неперетинну класів параметрів, що може призвести до заниженої або завищеної оцінки вартості системи захисту. Захисні пристрої, класи параметрів яких перетинаються, слід об'єднати і розглядати як макропристрої (або підсистему). Цей процес може значно збільшити розмірність задачі параметричної оптимізації, але дозволяє користуватися знаком рівності в (3.9) і спрощує оптимізацію на верхньому рівні.

Розглянемо тепер задачу оптимізації верхнього рівня – структурну. Для першого наближення вважатимемо, що розміщення всіх пристроїв оптимально, відзначивши, що в області оптимального геометричного розміщення відомі значні результати, які можуть бути при необхідності використані. Таким чином, наша задача звелася до оптимального вибору  $n$  пристроїв з

сукупності  $N$ . Всього можливостей вибору:  $\sum_{v=1}^N C_N^v = 2^N - 1$ , оскільки порядок вибору ролі не грає, а число вибраних пристроїв (яке визначається ефективністю і вартістю) може бути будь-яким  $1 \leq v \leq N$ . Ця задача може бути названа «задачею оптимізації на поєднаннях» (по аналогії з терміном, «оптимізація на перестановках») і записується подібно задачі (3.9) і (3.10)

$$1) \underset{\Omega_N}{opt} K_3 | C \leq C^*; \quad 2) \underset{\Omega_N}{min} C | K_3 \leq K^*, \quad (3.11)$$

де  $\Omega_N$  – безліч всіх поєднань з  $N$  по  $1 \leq v \leq N$ . Відзначимо, що тут під «пристроєм» може розумітися і макропристрій. В задачах (3.11) передбачається, що оптимізація на нижньому рівні вже проведена. В протилежному випадку змінні  $K_3$  і  $C$  будуть нечіткими.

### 3.2 Функціональна модель біологічної системи життєдіяльності

Синтез оптимальної моделі біологічної системи життєдіяльності (БСЖ) можливо виконати на основі узагальненого функціонально–статистичного критерію [88]. При цьому в загальному випадку для синтезу необхідно знати багатовимірні закони розподілу вірогідності випадкових векторів  $X, X', Z, Z', U, U, Y, \Phi$ , а також власних і узагальнених витрат  $C$ . Знання характеристик цих векторів дозволить визначити необхідну вірогідність і узагальнені показники для формування параметрів критерію.

В останньому випадку для векторів  $X, X'$  можна обмежитися визначенням для інтенсивності випромінювання НВЧ, яка визначається значенням електричної  $E$  і магнітної  $H$  складових, або густиною потоку потужності  $P$  при різних джерелах випромінювання з урахуванням зон.

При рішенні проблеми синтезу, виходячи з допустимих значень векторів  $Y$  і  $\Phi$ , необхідно синтезувати пристрої біологічного захисту від ЕМВ, вивести закони вимірювання керуючих векторів  $U$  і  $U'$ .

На рисунку 3.1. приведена функціональна модель СБЖ з джерелом ЕМВ, на яку діє деякий вектор зовнішніх  $Z_1(h_1, h_2, h_3, \dots, h_k)$  і внутрішніх  $Z(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$  обурень, які носять випадковий характер.

Ці обурення обумовлюють випадковість вектору координат джерела ЕМВ  $X(X_1, X_2, \dots, X_m)$  і вектору координат джерела, яке проминуло середовище  $X'(X'_1, X'_2, \dots, X'_m)$ .

Вектор вихідних координат джерела ЕМВ може визначити просторове і тимчасове положення об'єкту, а також нести інформацію про координати стану ЕМВ при дії векторів управляючих сигналів  $U(U_1, U_2, \dots, U_m)$  на джерело НВЧ випромінювань і на систем захисту  $U'(U'_1, U'_2, \dots, U'_m)$ , які виробляються системою контролю і керуванням (СКК). Виконуючи вимірювання векторів  $X$ ,  $X'$ , які характеризують стан ЕМВ до і після середовища і враховуючи рішення про стан ЕМВ, СКК формує вектора управлінь  $U$  і  $U'$ . Система захисту формує вектор  $Y$ . Поразка біологічного середовища характеризується вектором  $\Phi$ .

Вектори  $X$ ,  $X'$ ,  $U$ ,  $U'$ ,  $Y$ ,  $\Phi$  мають випадковий характер, обумовлений кінцевою точністю роботи СКК, які характеризуються вектором  $Z'$ , а також діючими на джерело випадковими обуреннями  $Z$ .



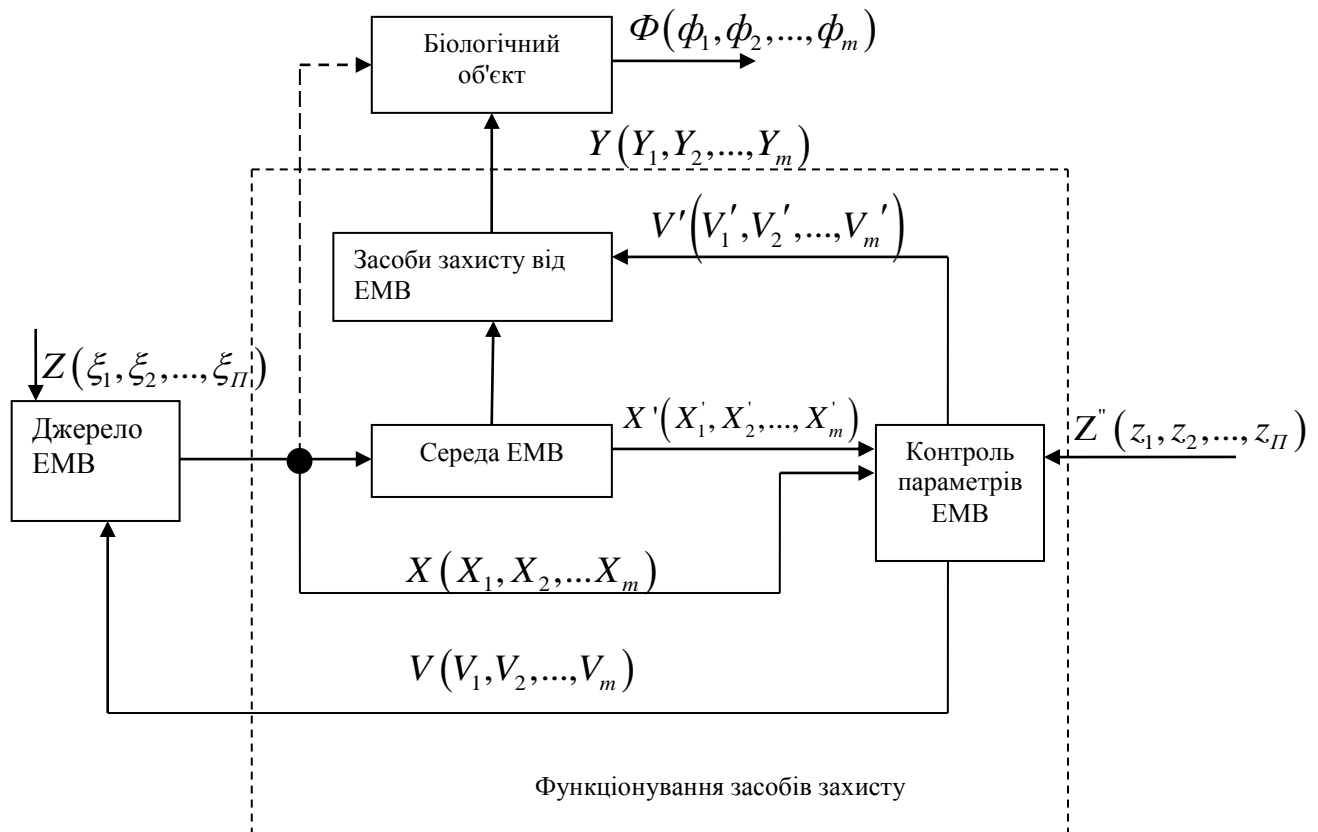


Рисунок 3.1 – Функціональна модель БСЖ

На розглянутій функціональній моделі відображені основні зв'язки між елементами процесу контролю та керування, який дозволяє побудувати узагальнені математичні моделі.

Розгляд більш дрібних деталей може привести до значних ускладнень математичних моделей без зміни їх ества.

### 3.3 Потенційна модель системи біологічного захисту від електромагнітного випромінювання

Побудову потенційної моделі БСЖ зручніше почати з розгляду роботи основної СКК. Для спрощення написання розглянемо одновимірні рішення, які не складно узагальнити на багатовимірні.

Припустимо, що вимірювальна система захисту виміряє координату  $x_i$  і виводить результат вимірювання в деякий результат рішення  $y_i$ .

В цьому випадку умовна вірогідність того, що вихідна координата знаходиться, наприклад, в нормі (індекс 1), тобто система захисту захищає біологічне середовище, може бути визначений по формулі

$$P_{in}(x_{1i}|y_i) = \frac{P_{in}(y_i|x_{1i})P_i(x_{1i})}{P_{in}(y_i)} \quad (3.12)$$

де  $in$  – вихідна координата знаходиться в межах норми;

$i$  – номер вимірювання (координати);

$P_{in}(y_i|x_{1i})$  – умовна вірогідність отримання  $y_i$  при знаходженні на вході події  $x_{1i}$ ;

$P_{in}(x_{1i})$  – вірогідність появи  $x_{1i}$ ;

$P_{in}(y_i)$  – вірогідність появи  $y_i$ .

Або з урахуванням закону розподілу  $f(y_i|x_{1i})$

$$P_{in}(x_{1i}|y_i) = \frac{f_n(y_i|x_{1i})P_{in}(x_{1i})}{P_{in}(y_i)} \quad (3.13)$$

Умовна вірогідність того, що вихідна координата перевищила норму (індекс 0), тобто СЗ не захищає біологічне середовище.

$$P_{in}(x_{0i}|y_i) = \frac{P_{in}(y_i|x_{0i})P_i(x_{0i})}{P_{in}(y_i)}, \quad (3.14)$$

де

$P_{in}(x_{0i}|y_i)$  – умовна вірогідність при вимірюванні появи  $y_i$ ;

$P_{in}(x_{0i})$  – вірогідність появи події  $x_{0i}$

З урахуванням закону розподілу  $f_n(y_i|x_{0i})$

$$P_{in}(x_{0i}|y_i) = \frac{f_n(y_i|x_{0i})P_{in}(x_{0i})}{P_{in}(y_i)}. \quad (3.15)$$

Система захисту ухвалює рішення і переводить  $x_i$  в  $y_i$  по певному алгоритму, в основу якого можна покласти функцію і відношення правдоподібності відповідно

$$\frac{P_{in}(x_{1i}|y_i)}{P_{in}(x_{0i}|y_i)} = \frac{f_n(y_i|x_{1i})P_{in}(x_{1i})}{f_n(y_i|x_{0i})P_{in}(x_{0i})}, \quad (3.16)$$

$$f_n = \frac{f_n(y_i|x_{1i})}{f_n(y_i|x_{0i})}. \quad (3.17)$$

При  $P_{in}(x_{1i}|y_i) > P_{in}(x_{0i}|y_i)$  – ухвалюється рішення 1. (3.18)

При  $P_{in}(x_{1i}|y_i) < P_{in}(x_{0i}|y_i)$  – ухвалюється рішення 0.

Іншими словами, якщо  $\frac{P_{in}(x_{1i}|y_i)}{P_{in}(x_{0i}|y_i)} > 1$  – ухвалюється рішення 1.

При  $\frac{P_{in}(x_{1i}|y_i)}{P_{in}(x_{0i}|y_i)} < 1$  – ухвалюється рішення 0.

З урахуванням 3.16 і 3.17 можна написати, що

при  $f_{ni} > \frac{P_{in}(x_{0i})}{P_{in}(x_{1i})} = f_{0i} = \frac{q_{ni}}{p_{ni}}$  – ухвалюється рішення 1; (3.19)

при  $f_{ni} < f_{0i}$  – ухвалює рішення 0.

Для потенційної системи при двох альтернативних рішеннях

$$P_{in}(x_{0i}) = P_{in}(x_{1i}) = \frac{1}{2}, \quad (3.20)$$

при багато альтернативних рішеннях

$$P_{in} = P_{2n} = \dots = P_{mn} = \frac{1}{m}, \quad (3.21)$$

вирішальна система є ідеальним спостерігачем.

У випадку, якщо рішення ухвалюється щодо безперервної координати, то вважається, що вона розподілена по нормальному закону.

Вирішальна система потенційної системи робить помилки 1–го і 2–го роду.

За помилку першого роду приймається вірогідність події, коли координата знаходиться в заданому допуску, а аналізатор помиляється і приймає рішення, що він вийшов за допустиму межу –  $P_{лопi}$  (помилкове рішення).

$$P_{лопi} = P_{ni} (y_i \supset V_0 | x_{1i}) \quad (3.22)$$

За помилку другого роду приймається вірогідність події, коли координата знаходиться за допуском, а аналізатор помиляється і ухвалює рішення, що координата в допустимих межах  $P_{нопi}$  (норма)

$$P_{нопi} = P_{ni} (y_i \supset V_1 | x_{0i}) \quad (3.23)$$

Оскільки потенційна система ухвалює рішення по критерію ідеального спостерігача, то вона мінімізує сумарну помилку

$$P_{лопi} + P_{нопi} = \min \quad (3.24)$$

В результаті здійснення процесу ухвалення рішення і управління потенційна система переводить, стан джерела випромінювання, що характеризу-

ється вірогідністю  $P(x_i|y_i)$  в деякий більш певний стан, що характеризується апостеріорною вірогідністю  $P'_{in}$ .

$$P'_{in} = \frac{P_{in} \bar{P}_{лопі}}{P_{in} \bar{P}_{лопі} + \bar{P}_{in} P_{нопі}}, \quad (3.25)$$

де

$P_{in}$  – ймовірність  $x_i$  – в нормі,

$\bar{P}_{in}$  – вірогідність  $x_i >$  норми.

одержуючи при цьому певну кількість інформації

$$I_{max} = H_{ion} - P_{in} \quad (3.26)$$

де 
$$H_{ion} = -P_{ni} \log_2 P_{ni} - \bar{P}_{ni} \log_2 \bar{P}_{ni}, \quad (3.27)$$

$$H_{in} = -P'_{ni} \log_2 P'_{ni} - \bar{P}'_{ni} \log_2 \bar{P}'_{ni}. \quad (3.28)$$

відповідно ентропія стану ЕМВ до і після рішення керування.

Загальна кількість інформації, одержувана потенційною системою, яка складається з  $m$  аналізаторів

$$I_{max10} = \sum_i^m I_{imax10} \quad (3.29)$$

Потенційна система є ідеальною не тільки в значенні мінімальних помилок, вона є ідеальною також в значенні простоти, оскільки в ній не передбачене комплексування для отримання потрібної швидкодії, надійності роботи і т.п. Отже, потенційна система при виконанні вказаних умов матиме мінімальні витрати.

$$C_{\min} = \sum_{i=1}^m C_{i\min}. \quad (3.30)$$

Ефективність потенційної системи оцінюється коефіцієнтом

$$K_{I0} = \frac{I_{\max I0}}{C_{\min}}. \quad (3.31)$$

Це відношення ступеня підвищення достовірності отриманої інформації про стан ЕМВ до мінімальних витрат.

### 3.4 Реальна модель системи біологічного захисту від електромагнітного випромінювання

Реальна математична модель СБЗ будується аналогічно потенційній математичній моделі, при цьому приймаються реальні закони розподілу вірогідності і різні алгоритми ухвалення рішень, обумовлені вибраним критерієм.

Умовна вірогідність того, що координата знаходиться в нормі

$$P_i(x_{1i}|y_i) = \frac{P_i(y_i|x_{1i})P_i(x_{1i})}{P_i(y_i)} \quad (3.32)$$

Або з урахуванням закону розподілу вірогідності  $f(y_i|x_{1i})$

$$P_i(x_{1i}|y_i) = \frac{f(y_i|x_{1i})P_i(x_{1i})}{P_i(y_i)}. \quad (3.33)$$

Умовна вірогідність того, що координата відхилилася від норми

$$P_i(x_{0i}|y_i) = \frac{P_i(y_i|x_{0i})P_i(x_{0i})}{P_i(y_i)} \quad (3.34)$$

або з урахуванням закону розподілу вірогідності

$$P_i(x_{0i}|y_i) = \frac{f(y_i|x_{0i})P_i(x_{0i})}{P_i(y_i)}. \quad (3.35)$$

Функція і відношення правдоподібності можуть бути визначені відповідно по формулі

$$\frac{P_i(x_{1i}|y_i)}{P_i(x_{0i}|y_i)} = \frac{f(y_i|x_{1i})P_i(x_{1i})}{f(y_i|x_{0i})P_i(x_{0i})} \quad (3.36)$$

$$f = \frac{f(y_i|x_{1i})}{f(y_i|x_{0i})}. \quad (3.37)$$

Якщо рішення ухвалюється по критерію правдоподібності, то при

$$f = \frac{P_i(x_{0i})}{P_i(x_{1i})}, \text{ приймається } -1. \text{ Если } f < f_0 - \text{приймається } 0.$$

Вирішальна система може бути побудований з урахуванням різних критеріїв:

– для критерія ідеального спостерігача  $f_0 = 1$ ;

– для критерія нормального ризику  $f_0 = \frac{L_1q}{L_2P}$ ,

де  $L_1$  і  $L_2$  – вагові коефіцієнти;

– для критерія Неймана – Пірсона  $L_1=L_2$ .

Помилками першого і другого роду є відповідно вірогідність при помилковому і нормальному ухваленні рішення

$$P_{\text{лоі}} = P_i(y \supset V_0x_{1i}); \quad (3.38)$$

$$P_{\text{ноі}} = P_i(y \supset V_1x_{0i}), \quad (3.39)$$

які розраховуються з урахуванням всіх можливих помилок.

Після ухвалення рішення вірогідність стану джерела випромінювання по  $i$  – й координаті дорівнює

$$P'_i = \frac{P_i \bar{P}_{\text{лоі}}}{P_i \bar{P}_{\text{лоі}} + \bar{P}_i P_{\text{ноі}}} \quad (3.40)$$

Кількість інформації, отримана при ухваленні рішення по  $i$  – ой координаті

$$I_{\text{imax}} = H_i - H'_i, \quad (3.41)$$

де 
$$H_i = -P_i \log_2 P_i - \bar{P}_i \log_2 \bar{P}_i, \quad (3.42)$$

$$H'_i = -P'_i \log_2 P'_i - \bar{P}'_i \log_2 \bar{P}'_i, \quad (3.43)$$

відповідно ентропія стану ЕМВ до  $i$  після ухвалення рішення керування рівнем джерела випромінювання.

Загальна кількість інформації відповідно дорівнює

$$I_{\text{max}} = \sum_i^m I_{\text{imax}} \quad (3.44)$$

Загальні витрати, з урахуванням витрат на отримання потрібних надійності, швидкодії і т.п. будуть дорівнювати

$$C = \sum_i^m C_i, \quad (3.45)$$

де 
$$C_i = C_{i\text{min}} + \Delta C_{it} + \Delta C_{ip} + \dots, \quad (3.46)$$

$\Delta C_{it}$  – додаткові витрати на отримання потрібної швидкодії;

$\Delta C_{ip}$  – додаткові витрати на отримання потрібної надійності.

Ефективність роботи реальної СБЗ



$$K_I = \frac{I_{\max}}{C}. \quad (3.47)$$

Узагальненим статистичним критерієм  $E$ , з урахуванням потенційної і реальної моделей, можна оцінити ефективність СБЗ

$$E = \frac{K_I}{K_{I0}} = \frac{I_{\max}}{I_{\max I0}} = \frac{C_{\min}}{C} \quad (3.48)$$

Використовування узагальненого критерію  $E$ , отриманого на основі потенційної і реальної математичних моделей, системи біологічного захисту дозволяє одним числом характеризувати як всю систему, так і по частинах, що включають складні і прості пристрої.

При цьому діапазон зміни критерію для практичних систем

$$0 \leq E \leq 1.$$

Недосконалі СБЗ мають  $E$  близький до нуля, а зроблені – до одиниці.

Узагальненої критерій при цьому використовується як основа для узагальнення методології аналізу і синтезу СБЗ.

### 3.5 Моделювання джерел паразитних випромінювань медичних приладів

Для вибору і розробки конкретних технічних засобів захисту людини від електромагнітного випромінювання медичних пристроїв, необхідна оцінка рівнів їх електромагнітного випромінювання. Такі оцінки можна отримати шляхом вивчення амплітудно–фазових характеристик певних електродинамічних моделей реальних приладів і пристроїв – хвилеводів різного поперечного перетину з прорізаючими у їх бічних стінках щілинами, різного виду ліній поверхневих хвиль, смушкових ліній і т.п.

Підрозділ присвячений дослідженню непрямих випромінювань, тобто так званих «паразитних випромінювань» з електрично не щільних стиків генераторів і хвилеводів і бічних пелюсток діаграм випромінюючих систем.

Метою даного підрозділу є отримання придатних в інженерній практиці співвідношень для розрахунку амплітудних і фазових характеристик, зокрема, діаграм спрямованості і коефіцієнта передачі, широко найуживаніших видів випромінюючих систем.

Розрахунок шкідливих випромінювань в ближній зоні випромінювання не може бути отриманий аналітично, оскільки інтенсивність випромінювань залежить від дуже багатьох чинників. Проте, з погляду захисту біологічного об'єкту, ця ситуація не критична, оскільки довжина хвилі мала і цілком достатньо захисту відстанню.

Тому далі обмежимося аналізом випромінювання в дальній зоні випромінювання за допомогою отримання діаграм спрямувань (ДС).

### 3.5.1 Моделювання джерел на стінках прямокутного хвилеводу медичного приладу

Одиночна щілина, яка прорізає у стінці прямокутного хвилеводу, є випромінюючою, якщо своєю широкою стороною вона перетинає лінії розповсюдження поверхневих струмів, поточних по внутрішніх стінках хвилеводу [94].

Поперечна щілина на широкій стінці хвилеводу збуджується подовжніми струмами, причому інтенсивність її збудження зменшується при зсуві центру щілини від середини широкої стінки. Подовжня щілина II перетинає поперечний струм, якщо вона зсунута щодо середини широкої стінки хвилеводу. Її випромінювання зростає з наближенням щілини до краю широкої стінки і повністю відсутній при  $x_0 = \frac{a}{2}$ .

Похила щілина у вузькій стінці збуджується поперечним струмом постійної величини. Тому інтенсивність її збудження регулюється підбором кута нахилу  $\delta$ . При  $\delta = 0$  ця щілина не збуджується, при  $\delta = 90^\circ$  випромінювання максимально.

Подовжня щілина, розташована точно по середній лінії широкої стінки хвилеводу, і поперечна щілина на вузькій стінці не випромінюють. Проте, в певних умовах, ці щілини можуть стати випромінюючими, якщо поблизу від них порушиться симетрія поверхневого струму стінки хвилеводу.

Не дивлячись на вказані відмінності щілини в стінці хвилеводу від ідеальної, розрахунки і вимірювання показують, що діаграма спрямованості (ДС) в площині, що проходить через подовжню вісь хвилеводу  $z$ , можна із задовільною для інженерної практики точністю визначати на підставі принципу подвійності по формулі ДС щілистого вібратора, поміщеного на нескінченній площині

Для подовжньої щілини вказана формула має вигляд:

$$F(\theta) = \frac{\cos(kl \sin \theta) - \cos kl}{\cos \theta} \cdot \frac{1}{F_m}, \quad (3.49)$$

де  $kl$  – довжина щілини;

$\theta$  – кут, утворений напрямом променя і нормаллю до площини, в якій прорізає щілина;

$F_m$  – постійний множник, що нормує функцію до одиниці у напрямі головного максимуму.

Для напівхвильової щілини ( $2l = 0,5\lambda$ ) формула (3.49) приймає вигляд

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin \theta\right)}{\cos \theta} \approx \cos \theta. \quad (3.50)$$

Для поперечної щілини маємо

$$F(\theta) = 1. \quad (3.51)$$

За допомогою формул ДС щілини в нескінченному екрані можна також орієнтовно оцінити ДС в площині, нормальній осі хвилеводу, для випадків поперечної щілини у вузькій стінці. Це пояснюється тим, що упродовж від щілини випромінювання відсутнє і тому розміри екрану в цьому напрямі мало впливають на ДС як в Е – площині щілини, так і в Н – площині.

При визначенні ДС в площині, нормальній осі хвилеводу, для подовженої щілини в широкій стінці слід враховувати, що кінцеві розміри хвилеводу в напрямі, перпендикулярному від щілини, істотно впливають на ДС. Це зв'язано з тим, що в цій площині яскраво виражено явище дифракції хвиль на краю екрану, роль якого грає стінка хвилеводу. Якщо екран кінцевий у напрямку, перпендикулярному щілині, то на його краях виходить різка неоднорідність розподілу електричного поля, оскільки нормальна складова поля розривна під час переходу через поверхню екрану і безперервна у просторі, безпосередньо близькому до екрану. Внаслідок цього хвилі від країв екрану відображатимуться і інтерферуватимуть з полем, безпосередньо випромінюваним щілиною. Таким чином, на власне випромінювання щілини накладається додаткове випромінювання, що з'являється за рахунок збудження країв екрану, що приводить, з одного боку, до появи поля за тіньовою стороною екрану, і, з другого боку, до спотворення діаграми спрямованості в передньому на півпросторі. Унаслідок інтерференції хвиль, випромінюваних безпосередньо щілиною і випромінюваних при дифракції у країв екрану, з'являється мінімуми і максимуми випромінювання, кількість яких тим більше, чим більше розмір екрану в порівнянні з довжиною хвилі.

Потужність випромінювання можна визначити, знаючи коефіцієнти передачі і відображення.

По відношенню до хвилеводу щілина є навантаженням, у якому затрачується енергія. Роль щілини як навантаження хвилеводу характеризують її внутрішньою провідністю (або опором), приведеною до хвильової провідності хвилеводу.

На підставі теореми взаємності Лема Лоренца і принципу подвійності [95], отримані наближені формули для розрахунку коефіцієнта передачі нерезонансних щілин, розташованих на стінках прямокутного хвилеводу [96].

Коефіцієнт передачі можна визначити з рівняння енергетичного балансу: потужність падаючої хвилі дорівнює сумі потужностей хвилі, що пройшла за щілину, відображеної хвилі і потужності випромінювання, тобто

$$\frac{S_g}{2} \frac{E_0^2}{W_{10}} = \frac{S_g}{2} \frac{(E_0 + B)^2}{W_{10}} + \frac{S_g}{2} \frac{A^2}{W_{10}} + \frac{1}{2} U_n^2 G_\Sigma, \quad (3.52)$$

де  $S_g$  – площа поперечного перетину хвилеводу;

$$W_{10} = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{кр})^2}} - \text{хвильовий опір хвилеводу для хвилі } H_{10};$$

$\lambda$  – довжина хвилі у вільному просторі;

$\lambda_{кр} = 2a$  – критична довжина хвилі  $H_{10}$ ;

$A, B$  – комплексна амплітуда електричного поля хвиль, порушуваних зліва і праворуч від щілини на осі хвилеводу у перетині центру щілини;

$U_n$  – напруга на щілині в пучності струму;

$G_\Sigma$  – провідність випромінювання щілини.

З рівняння енергетичного балансу отримаємо

$$\left(\frac{E_0 + B}{E_0}\right)^2 = 1 - \frac{A^2}{E_0^2} - \frac{W_{10}}{S_g} \frac{U_n^2 G_\Sigma}{E_0^2}. \quad (3.53)$$

Таким чином, для визначення коефіцієнту передачі необхідно знайти амплітуди хвиль, випромінюваних щілиною у хвилевід, і амплітуду напруженості пучності.

Коефіцієнт випромінювання по потужності

$$\left(S_\Sigma\right)^2 = \frac{P_{\text{изл}}}{P_{\text{пад}}} = \frac{UG_\Sigma}{P_{\text{пад}}} = \frac{2\rho \cos^2 \psi}{(1+\rho)^2}. \quad (3.54)$$

В окремих випадках подовжньої і поперечної щілин в хвилеводі структура формул не змінюється. При цьому значно спрощується вираз для  $\rho$ .

Так, у разі подовжньої щілини  $\delta = 0$ ,  $\alpha = 0$ ;

$$\rho = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 S_g W_{10} G_\Sigma}; \quad \beta = \frac{4l\alpha}{\pi} F(\gamma l) \frac{\lambda_g}{\lambda_{\text{кр}}} \sin \frac{\pi x_1}{a}; \quad \varphi = \frac{\pi}{2}. \quad (3.55)$$

У разі поперечної щілини, яка прорізана симетрично щодо подовжньої осі хвилеводу ( $\delta = 90^\circ$ ,  $x_1 = 0$ ), виявляється що

$$\beta = 0; \quad \rho = \frac{\alpha^2}{a^2 S_g W_{10} G_\Sigma}; \quad \alpha = \frac{Hl\alpha}{\pi} F\left(\frac{\pi l}{a}\right). \quad (3.56)$$

По формулах (3.49) – (3.56) розраховані залежно від довжини щілини  $2l$  коефіцієнти відображення  $S_{11}$  передачі  $S_{12}$  і випромінювання  $S_\Sigma^2$ , а також зсув фази минулої хвилі  $\Delta$  для двох випадків: подовжньої і поперечної щілин, що прорізають в широкій стінці прямокутного хвилеводу. Перетин хвилеводу  $23 \times 10 \text{ мм}^2$ , довжина хвилі  $\lambda = 30 \text{ мм}$ . Центр подовжньої щілини зміщен-

ний щодо подовжньої осі широкої стінки на відстань  $X_1 = 9\text{мм}$ , поперечна щілина розташована симетрично ( $x_1 = 0$ ). Аргумент опору еквівалентного щілині вібратора розрахований у наближенні довгої лінії.

При збільшенні довжини щілини аж до половини довжини хвилі коефіцієнти випромінювання і відображення зростають. У міру збільшення ширини щілини максимуми вказаної залежності зміщуються у бік великих довжин щілини. Залежність коефіцієнта передачі від довжини щілини носить суперечливий характер: при збільшенні довжини щілини аж до резонансної, коефіцієнт передачі зменшується, досягаючи мінімуму поблизу крапок, відповідних максимуму коефіцієнтів випромінювання і відображення.

### 3.5.2 Моделювання випромінювань на круглих циліндрових поверхнях медичних приладів

Умови роботи щілини, яка прорізана в круглій циліндровій поверхні, ще більшою мірою, у порівнянні з щілиною в прямокутному хвилеводі, відрізняються від умов роботи ідеального щілистого випромінювання, тобто щілини, розташованої на нескінченному плоскому екрані. Це пов'язано, по-перше, з криволінійністю поверхні, у якій прорізана щілина, і по-друге, з обмеженістю розмірів цієї поверхні. Вплив обох цих чинників особливо зростає при малих, у порівнянні з довжиною хвилі, діаметрах циліндру. При цьому криволінійність поверхні, приводить до розширення ДС, обмеженість розмірів поверхні – до зміни резонансної довжини щілини [97].

Пряме вирішення задачі визначення електромагнітного поля для циліндра довільної довжини зустрічає великі математичні труднощі. Тому обмежуються рішенням для ідеально провідного циліндра нескінченної довжини у вільному просторі. Досвід показує, що у більшості випадків результати рішення можливо практично використовувати і для циліндрів кінцевої довжини [98]. Не дивлячись на згадану ідеалізацію, і у такому разі, рішення вихо-

дить досить складним, а вираз для напруженості поля є нескінченними рядами, спеціальними функціями.

Для розрахунку характеристик випромінювання щілин на круговому циліндрі можуть бути застосовані результати, отримані для щілин на еліптичному циліндрі [99].

ДС напівхвильової поперечної щілини у площині, яка перпендикулярна осі круглого циліндра, визначається виразом [100]

$$E_{\varphi} = \left( \frac{1}{(ka)^2 H_0^{(2)}(ka)} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{\cos \frac{n\pi}{2ka} \cos n\varphi}{((ka)^2 - n^2) H_n^{(2)}(ka)} \right), \quad (3.57)$$

де  $\varphi$  – азимутний кут, відлічуваний від нормалі до середини щілини;

$a$  – радіус циліндра;

$H_n^{(2)}(ka)$  – функція Ганкеля  $n$ -го порядку другого роду.

Якщо діаметр циліндра достатньо великий, то кривизна поверхні, у якій прорізає щілина, мало впливає на ДС навіть у площині, яка перпендикулярна від циліндра. У площині, яка проходить через вісь циліндр, у передньому напівпросторі випромінювання щілини залишається ненаправленим.

У разі подовжньої щілини істотний вплив надає обмеженість розмірів поверхні. У цьому випадку меридіальна складова електричного вектору  $E_{\theta} = 0$ . Для азимутної складової електричного вектору  $E_{\varphi}$  на великій відстані  $r$  від циліндра А Пістолькорс [100] приводить наступну формулу

$$E_{\varphi} = -\frac{U_0}{\pi^2 a} \frac{f_0(\theta)}{\cos \theta} \frac{1}{r} \left( \frac{1}{H_1^{(2)}(k a \cos \theta)} - 2 \sum_{p=1}^{\infty} \frac{1}{H_p^{(2)'}(k a \cos \theta)} \frac{\pi}{2} \cos^p \varphi \right), \quad (3.58)$$

де  $U_0$  – максимальна напруга в щілині;

$\theta$  – меридіальний кут, відлічуваний від осі циліндра;



$f_0(\theta)$  – ДС ідеального щілистого випромінювача такого ж розміру; штрих означає похідну Гангелевой функції по аргументу.

Ряд у формулі (3.58) сходиться тим швидше, чим менше радіус циліндра. Якщо діаметр циліндра  $2a$  рівний довжині хвилі  $\lambda$ , тобто  $ka = \pi$ , то для розрахунку ДС з точністю 1% достатньо узяти сім членів. При менших діаметрах можна обмежитися ще меншим числом членів.

Відзначимо, що з погляду захисту від паразитних випромінювань біологічних об'єктів, необхідно вибрати для кожного конкретного об'єкту його фізичний аналог – щілину в хвилеводах різної конфігурації. При цьому, розподіл фаз інтересу не уявляє, а тільки оцінка інтенсивності (потужності) випромінювання. Це відбувається через те, що приміщення персоналу усередині об'єкту можна вважати «вільним простором» лише дуже умовно. Внутрішність приміщення сильно, а часто і випадковим чином, і навіть не стаціонарно, спотворює інтерференційну картинку. Тому для мети захисту від ЕМВ цікава лише потужність.

### 3.5.3 Моделювання випромінювань у зовнішньому провіднику коаксіальної лінії медичних приладів

Розглянемо нескінченно-тонкий поздовжньо-щілистий циліндр з круглим аксіальним металевим стрижнем. Вісь структури співпадає з віссю  $OZ$  декартової (і циліндрової) системи координат. Радіус циліндра з подовжньою щілиною –  $a$ , радіус стрижня –  $b$ . Середина щілини, кутовий розмір якої співпадає з площиною  $XOZ$ . Вважаємо, що стінки хвилеводу нескінченно тонкі і виконані з ідеально провідного металу.

Дана структура збуджується плоскою хвилею, причому, як і для круглого циліндра, компоненти вектор – функцій  $\vec{E}_n(r), \vec{H}_n(r)$  повинні задовольняти рівнянню Бесселя. Це дозволяє отримати для вектор – функцій поля у внутрішній області  $b < r < a$ :

$$E_{\text{HZ}}^{\text{pl}} = \sin\alpha \cos\gamma [A_n j_n(kr \sin\alpha) + D_n Y_n(kr \sin\alpha)] \quad (3.59)$$

$$H_{\text{NZ}}^{\text{pl}} = \sin\alpha \sin\gamma [a_n j_n(kr \sin\alpha) + \alpha_n Y_n(kr \sin\alpha)],$$

де  $j_n(kr \sin\alpha)$ ,  $Y_n(kr \sin\alpha)$  – функція Бесселя і Неймана;

$\alpha$  – кут між  $\vec{n}$  і віссю OZ;

$\gamma$  – кут між  $\vec{n}$  і лінією перетину хвильового фронту;

$\beta$  – кут між проекцією  $\vec{n}$  на XOY і віссю OX.

Задовольнивши граничною умовою на металі і щілині, отримуємо дві пари функціональних рівнянь на металі і щілині. Застосувавши до останніх метод задачі Римана–Гильберта, отримуємо нескінченну систему лінійних рівнянь алгебри, яка для E – поляризації має вигляд

$$x_m = \frac{i}{\pi} \frac{g_0 V_{m-1} \Gamma_0}{J_0(k a \sin\alpha) H_0^{(2)}(k a \sin\alpha)} + \sum_{n \neq 0} x_n \frac{(n)}{n} \varepsilon_n V_{m-1} - \frac{i}{\pi} \sum_n i^n \frac{V_{m-1} e^{-in\beta}}{H_n^{(2)}(k a \sin\alpha)}; \quad (3.60)$$

$$g_0 = \frac{i}{\pi} \frac{g_0 W_0 \Gamma_0}{J_0(k a \sin\alpha) H_0^{(2)}(k a \sin\alpha)} + \sum_{n \neq 0} x_n \frac{(n)}{n} \varepsilon_n W_n - \frac{i}{\pi} \sum_n i^n \frac{W_n e^{-in\beta}}{H_n^{(1)}(k a \sin\alpha)}.$$

Коефіцієнти цієї системи виражаються через поліноми Лешандра від  $u = \cos\delta$ .

$$\text{При цьому } \Gamma_n = \left[ 1 - \frac{J_n(k b \sin\alpha) H_n^{(1)}(k a \sin\alpha)}{J_n(k a \sin\alpha) H_n^{(1)}(k b \sin\alpha)} \right]^{-1},$$

$$(A_n + i^n) \frac{n k_n(ab) e^{-in\beta}}{Y_n(k b \sin\alpha)} = x_n, n \neq 0; (A_0 + 1) \frac{k_0(ab)}{Y_0(k b \sin\alpha)} = g_0; \quad (3.61)$$

$$k_n(ab) = J_n(k a \sin\alpha) Y_n(k b \sin\alpha) - J_n(k b \sin\alpha) Y_n(k a \sin\alpha);$$

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{\Gamma_n}{J_n(ka \sin \alpha) H_n^{(1)}(ka \sin \alpha) i \pi(n)}.$$

Оскільки параметр  $\varepsilon_n$  зменшується при  $n \rightarrow \infty$  як  $\frac{1}{n^2}$ , то для дослідження системи (3.46) можна застосувати методи добре вивчені і строго обґрунтовані. При цьому метод усікання є універсальним для вирішення нескінченних лінійних неоднорідних систем, оскільки дозволяє отримати рішення для довільних параметрів задачі.

За допомогою методу послідовних наближень конкретні величини можна записати в аналітичній формі, що дозволяє провести якісний аналіз розсіяного поля.

У випадку Е – поляризації параметр  $\gamma = 0$ , при цьому  $H_z^{\text{пад}} = 0, H_z^{\text{дифр}} = 0$ , а решта компонентів у вигляді:

$$\begin{aligned} E_z^1 &= \sin \alpha e^{ik \cos \alpha z} g_0 \frac{k_0(r1)}{k_0(ab)} + v(\delta); \quad H_z^1 = ie^{ik \cos \alpha z} g_0 \frac{k_0'(rb)}{k_0(ab)} + v_{(\delta)}; \\ E_r^1 &= -\frac{\text{ctg} \alpha}{kr} e^{ik \cos \alpha z} g_0 \frac{k_0(r1b)}{k_0(ab)} + v(\delta); \\ E_r^1 &= i \cos \alpha e^{ik \cos \alpha z} g_0 \frac{k_0^1(rb)}{k_0(ab)} + v(\delta); \quad H_z^1 = \frac{ie^{ik \cos \alpha z}}{kr \sin \alpha} g_0 \frac{k_0(rb)}{k_0(ab)} + v_{(\delta)}. \end{aligned} \quad (3.62)$$

Якщо проаналізувати структуру полів усередині коаксіального хвилеводу з вузькою подовжньою щілиною, то можна вказати на ефект резонансу по куту падіння  $\alpha$ . Це витікає з формул (3.50).

### Висновки по третьому розділу

1. Проведена оцінка ефективності роботи біологічної системи життєдіяльності на основі оцінки дози шкідливої дії електромагнітного випромінювання, яка дозволяє порівняти існуючі технічні системи по рівню їх безпеки.

2. Розроблено функціональну модель біологічної системи життєдіяльності з усіма джерелами електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону на основі детерміністських критеріїв, які дозволяють з певною вірогідністю оцінити виконання задачі функціонування системи життєдіяльності.

3. Розроблено узагальнений критерій біологічної системи життєдіяльності, який дозволяє характеризувати як всю систему, так і її окремі частини.

4. Критерій побудований з урахуванням вартості системи, що дозволяє при побудові систем біологічного захисту на підставі загальних моделей, отримати розрахункові формули, які зв'язують знов визначений критерій якості системи з параметрами, які можна порівняно легко вимірювати і нормувати виходячи з біологічних і санітарних підходів, що і визначає практичну цінність роботи.

5. Проведено моделювання джерел паразитних випромінювань медичних приладів. Показано, що напруженість електромагнітного поля у разі екранування робочого місця розподілена по узагальненому закону Релея, у разі відсутності екранування – по простому закону Релея.

Список використаних джерел у даному розділі наведені у повному списку використаних джерел під номерами:[68, 72 – 101]

## РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ СТРУКТУРНОГО ЗАХИСТУ  
БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

## 4.1 Вимоги, що пред'являються до захисних поглинаючих матеріалів

Поглинаючі, що розробляються, матеріали для захисту біологічної системи життєдіяльності, повинні відповідати наступним вимогам [102 – 103].

1. Величина енергії коливань надвисоких частот, відображена від поверхні поглинаючих екранів, повинна бути вельми незначною в широкому діапазоні частот.

2. Коливання надвисоких частот (НВЧ), падаючі на поверхню матеріалу, повинні поглинатися достатньою мірою, для чого величина загасання проникаючих всередину матеріалу коливань повинна бути високою.

3. Складова розсіяних НВЧ–коливань при віддзеркаленні від поверхні поглинаючого екрану повинна бути незначною.

4. СВЧ коливання, відображені від поверхні поглинаючих екранів, не повинні перетворюватися в коливання іншого виду поляризації.

5. Зміна величини відображення НВЧ–коливань залежно від кута падіння радіохвиль повинна бути незначною.

З погляду хімічних характеристик поглинаючий матеріал повинен не пропускати вологу у внутрішню частину поглинаючої поверхні екрану, зберігати стабільність своїх характеристик при нормальній температурі, бути вогнестійким і не спалахувати мимовільно, не змінювати своїх характеристик під дією опромінювання. Природно, що застосування поглинаючих матеріалів не повинне погіршувати санітарно–гігієнічних умов. Поглинаючий матеріал повинен бути стійкий по відношенню до комах, грибків і т.д. В процесі виготовлення – легко скріплюватися і вмонтовуватися. При цьому мати незначний період закріплення, необхідний для висихання адгезійного засобу, що вживається при

склеюванні і інших операціях. Однією з основних його переваг повинне бути збереження властивостей протягом довгого часу.

## 4.2 Експериментальне дослідження поглинаючих матеріалів

### 4.2.1 Технологія виготовлення радіопоглинаючих матеріалів на основі пінополістиролу

При проходженні електромагнітної енергії крізь конструктивні матеріали будівель, електромагнітна хвиля має таку особливість, як сковзне затування. В таблиці 4.1 наведені матеріали, які найчастіше застосовуються у будівельних конструкціях

Таблиця 4.1 – Величина затування ЕМХ у матеріалах та конструкціях

Матеріал або конструкція	Товщина, см	Сковзне затування (дБ) на частоті		
		3,0 ГГц	10,0 ГГц	37,5 ГГц
Кірич	12	15	15	15
Металізований скляний кірич	–	25	25	25
Штукатурка	1,8	–	8	12
Дошка	1,6	2,8	–	–
Фанера	0,4	–	1	2
Древесностружечна плита	1,8	3,2	–	–
Шлакобетонна стіна	46	14,5	20,5	–
Капітальна стіна будівля	70	16	21	–
Обштукатурена стіна	15	8	12	–

Існуючі поглинаючі матеріали на основі пінополістиролу (EPS) мають складні захисні механізми дії, що зменшує їх захисні властивості. [104, 105].

Пропонується досліджувати захисні властивості матеріалу на основі

пінополістиролу (EPS) з додаванням в його склад подрібнених частинок графіту з різними розмірами частинок в шарі, що погоджує.

Основою для виготовлення поглинаючого матеріалу служить пінополістирол (EPS), отриманий з полістиролу (PS) марки ПСБС. Єство процесу виробництва пінополістиролу полягає в тому, що при нагріві вище  $80^{\circ}\text{C}$ , полістирол переходить із скловидного стану в еластичний, а ізопентан, рівномірно розподілений в масі полістиролу, а при нагріві вище  $28^{\circ}\text{C}$  переходить в газоподібний стан. В результаті розм'якшені гранули полістиролу розміром  $0,5 - 1$  мм спінюються, збільшуючись у об'ємі в  $10 - 12$  разів. Інтенсивне спінювання полістиролу починається при температурі  $95 - 96^{\circ}\text{C}$ .

Раціональніше проводити двох стадійне спінювання бісерного полістиролу, тобто попереднє (без форм) і остаточне (у формах). Це скорочує час спінювання у формах і сприяє зменшенню об'ємної ваги пінополістиролу. Для попереднього спінювання гранули полістиролу нагріваються у воді, температура якої  $t = 95 - 100^{\circ}\text{C}$ . Залежно від часу перебування гранул у гарячій воді можна отримати пінополістиролу різній густині, яка прямо пропорційно пов'язана з діелектричною проникністю і може приймати значення від 1 до 2,5.

Унаслідок того, що діаметр частинок полістиролу і довжина хвилі в міліметровому діапазоні, стають досить близькими, виникає небезпека збільшення відображення. З метою запобігання подібних явищ розміри гранул полістиролу вибиралися рівними  $2 - 5$  мм

При виготовленні поглинаючого матеріалу з використанням графіту, що забезпечує загасання електромагнітних хвиль у напрямі їх розповсюдження, досліджувався вплив розміру частинок графіту в аквадагу на його поглинаючі властивості.

Вихідним матеріалом при виготовленні аквадагу був лусковий графіт з початковим розміром частинок  $0,5 - 2$  мм. Для отримання різних фракцій графіту розміром від 10 до 240 мкм, він роздрібнюють в кульовому млині протягом 96 годин. З цих фракцій графіту було виготовлено сім типів аквада-

гу, відмінних величиною зерна.

Приготований аквадаг наносився рівномірним шаром на плоскі пластини з пінополістиролу розміром 75 – 45 см, причому на кожен пластину наносилася строго однакова кількість аквадагу по вазі. Після просушування пластини досліджувалися на експериментальній установці, що дозволяє визначити характеристики матеріалу в діапазоні частот 10 – 75 ГГц. Якнайкращими характеристиками для даного діапазону частот володіє аквадаг з розміром частинок графіту 30 – 70 мкм, який використовувався при виготовленні поглинаючого матеріалу.

Гранули пінополістиролу після першого спінювання покриваються рівномірною плівкою аквадагу з певною концентрацією. Після цього гранули просушуються. Наступна стадія виготовлення поглинаючого матеріалу – його формування. Гранули, покриті аквадагом, завантажуються в прес форму, причому заповнення її за об'ємом повинне бути 100 %. Для вільного проникнення гарячої води в прес-форму і для виходу газу з неї необхідно робити стінки перфорованими. Щоб уникнути прилипання матеріалу до форми внутрішні поверхні її повинні бути ретельно відшліфовані і перед завантаженням гранул покритий тонким шаром аквадагу, який служить мастилом.

Для скорочення тривалості теплової обробки блоку прес-форма прогрівається у киплячій воді і втримується в ній певний час. Гранули пінополістиролу, що зберігають ще достатню кількість перетворювача, знову спінуються. У середині прес-форми створюється ще достатній тиск, під дією якого гранули спекаються, утворюючи матеріал з однорідною по товщині структурою. Потім прес-форма витягується з води і охолоджується до температури 45–50°C. Після цього, матеріал звільняється від форми. Оскільки час витримки у киплячій воді залежить від товщини матеріалу і теплових характеристик прес-форми, то воно визначається досвідченим шляхом. За даною технологією були розроблені РПМ, відмінні між собою принципом узгодження з вільним простором, геометрією передньої поверхні, законом зміни втрат в матеріалі і методами поліпшення характеристик структури.



#### 4.2.2 Установка для дослідження поглинаючих матеріалів

Поглинаючі матеріали виготовляються у вигляді листів з плоскою, хвилястою, ребристою, комірчастою і іншими формами передньої поверхні і різними законами розподілу електромагнітних параметрів в об'ємі поглинача. Вони характеризуються коефіцієнтом відображення і поглинання, а також залежністю діаграми дифузного або розсіяного відображення, від частоти, кута падіння і поляризації електромагнітної хвилі.

Хвилеводні методи не дозволяють визначити більшість цих характеристик (особливо кутових і дифузних). Тому їх вимірювання проводяться у вільному просторі [106].

Для дослідження амплітудно–кутових характеристик розсіяного поля і визначення параметрів поглинаючого матеріалу у вільному просторі необхідне з'ясувати оптимальні співвідношення між електродинамічними, геометричними і частотними характеристиками експериментальної установки, необхідні для отримання достовірних результатів вимірювань.

При дослідженні характеристик поглинаючих матеріалів у вільному просторі вимірювальна установка повинна забезпечити зміну кута падіння, частоти генератора і поляризації електромагнітної хвилі, падаючої на поглинаюче покриття. Відстань в співвідношенні: «передаюча система – досліджуваний зразок і приймач» – повинні відповідати умовам, при яких хвилі в області досліджуваного матеріалу можна розглядати як плоскі. В даному експерименті необхідно забезпечити зняття залежності діаграми спрямованості розсіяного поля від кута падіння електромагнітної хвилі, також забезпечити мінімальний зв'язок антен і паразитних перевипромінювань і їх взаємний багатократний зв'язок безпосередньо через досліджуваний зразок. Для забезпечення достовірних результатів експерименту, перешкоди прийому хвилі за рахунок сторонніх випромінювань повинні бути малий, а чутливість приймача велика. Важливий врахувати метеорологічні умови під час експерименту.

Вони повинні відповідати нормативним значенням, визначеним для даного виду робіт. Змінювати кут падіння електромагнітної хвилі на досліджуваній матеріал можна поворотом випромінювача або досліджуваного зразка навкруги осі. Практично простіше, надійніше і точніше повертати досліджуваний зразок.

Зміну поляризації електромагнітної хвилі можна здійснити при використуванні випромінювача з круговою поляризацією або з лінійною при двох ортогональних поляризаціях. Отримання більшої точності при порівняно простій конструкції забезпечується в другому випадку.

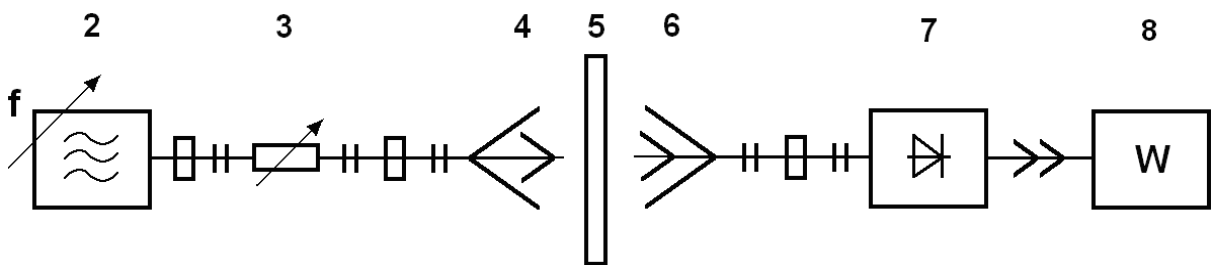


Рисунок 4.1 – Функціональна схема експериментальної установки: 2 – генератор НВЧ, 3 – атенюатор, 4 – передаюча антена 5 – досліджуваний матеріал, 6 – приймальна антена, 7 – приймальний перетворювач, 8 – індикаторний блок

При проведенні великого об'єму експериментальних робіт по вимірюванню коефіцієнта відображення доцільно використовувати установку в автоматичному режимі. При цьому повинен синхронно обертатися досліджуваний зразок і приймальна система, причому кутова швидкість останньої повинна бути удвічі більше кутової швидкості досліджуваного об'єкту.

Зняття залежності діаграми спрямованості розсіяного поля від кута падіння електромагнітної хвилі можна виконувати, переміщаючи приймач навколо досліджуваного зразка при незмінному положенні останнього. Пропонувана вимірювальна установка значною мірою задовольняє вищевикладе-

ним вимогам. В приміщенні, для усунення паразитних пері випромінювань між антенами, за допомогою поглинаючих матеріалів з рівнем відображення сигналу 50дБ, імітувалася безехова камера.

Застосування рупорних антен з достатньо малим рівнем бічних пелюсток і добрим узгодженням з передаючим трактом забезпечило мінімальний багатократний зв'язок антен. Величина відображення усувалася застосуванням трансформаторів, що погоджують, на вході антен.

Умови отримання плоскої хвилі виконувалися при відстанях передаюча антена – досліджуваний зразок і приймальна антена досліджуваний зразок, рівних

$$L = \frac{2D^2}{\lambda},$$

де  $D$  – розмір випромінюючого пристрою.

При цьому погрішність, обумовлена лінзовими властивостями матеріалу в досліджуваній області вимірювання його параметрів, не перевищувала 2 %.

Коефіцієнт відображення визначається порівнянням сигналів, відображених зразком і еталоном, вимірюваних за таких умов, коли множники послаблення однакові. Як етальонний відбивач застосовувався полірований мідний лист однакової із зразком розмірів. Коефіцієнт відображення

$$R^{-1} = \text{anti} \lg \frac{A_1}{20},$$

де  $A_1$  відлік по атенюатору.

У зв'язку з тим, що досліджувані матеріали поглинають потужність набагато більше, ніж відображають, можливо, вимірювання коефіцієнта екранування методом заміщення без урахування відображення. Модуль коефіцієнта екранування зразка визначається шляхом порівняння сигналів, які прий-

шли у приймальну антену у відсутності і за наявності зразка, що вимірюється.  
Коефіцієнт екранування

$$S^{-1} = \text{anti} \lg \frac{A_2}{20},$$

де  $A_2$  – відлік по атенюатору.

Для визначення геометричних розмірів зразків при вимірюванні коефіцієнтів відображення і екранування на експериментальній установці знімалися діаграми розподілу електромагнітного поля. Це дозволило вибрати розмір досліджуваного зразка і визначитися з величиною дифракційних поправок, рівню сигналу небажаних відображень і просочувань енергії в приймальну антену.

#### 4.2.3 Експериментальні дослідження неоднорідних радіопоглинаючих матеріалів

В поглинаючому матеріалі величина комплексної діелектричної проникності змінюється тільки у напрямі розповсюдження електромагнітних хвиль і залишається постійною в перпендикулярній площині.

Для експериментальних досліджень застосовувалися прилади ПЗ–19, МЗ–63, МЗ–64, працюючі в діапазоні 3–75 ГГц.

Матеріал виготовлявся двох типів, відмінних між собою принципом узгодження з вільним простором, діелектричною проникністю підстави, законом розподілу графіту в матеріалі і геометрією передньої поверхні.

Перший тип є блоком з плоскою передньою поверхнею. Він складається з неоднорідного діелектрика без втрат, як шар, який погоджує, і неоднорідного діелектрика з втратами, який забезпечує гасіння електромагнітних хвиль при їх розповсюдженні у матеріалі.

В діапазоні частот 10ГГц до 75ГГц і кутів падіння електромагнітної хвилі в межах  $0 - 70^\circ$  діелектрична проникність змінювалася від 1 до 2,0.

Шар, який погоджує, виготовлявся з п'яти окремих пластин пінополістиролу з різною діелектричною проникністю, що зростає від першого шару до останнього.

Неоднорідний діелектрик з втратами, який виготовлявся багатошаровим, також з пінополістиролу з  $\epsilon_1 = 2,0$ . В кожний шар як поглинаючий матеріал додавався аквадаг різній концентрації. Отримані таким чином шари в певній послідовності з'єднувалися у монолітний блок і разом з шаром, який погоджує, склали поглинаючий матеріал першого типу.

Другий тип матеріалу представляє таку ж структуру, як і матеріал першого типу, але без шару, який погоджує. Для цього типу матеріалу діелектрична проникність підстави шарів близька до одиниці. В кожний шар додавалася певна кількість аквадагу, розрахована по виразу

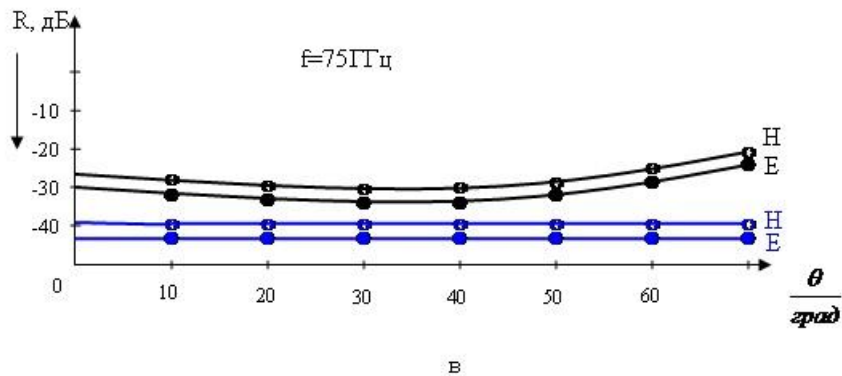
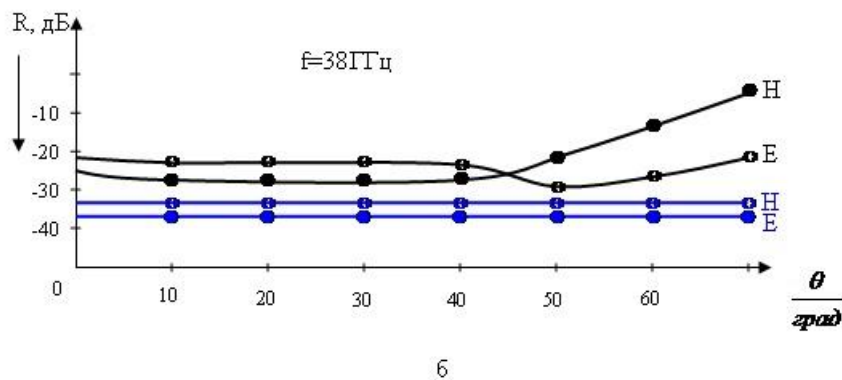
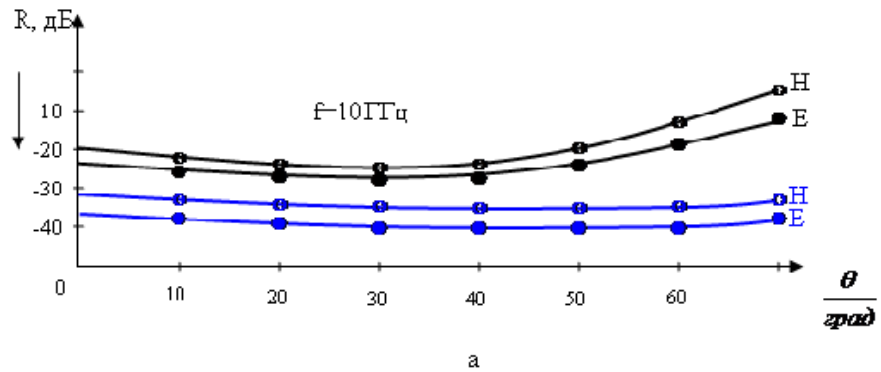
$$\epsilon_1 = 1 + \frac{3}{4} G, \quad \epsilon_2 = \frac{3}{4} G,$$

де  $G$  – вага графіту на 1 г пінополістиролу після першого спінювання.

Для кращого узгодження поглинаючого матеріалу з вільним простором на першу поверхню накладався лист пінополістиролу з  $\epsilon_1 \approx 1$ .

Безперервна зміна  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  реалізувати на практиці важко. Тому РПМ виготовлявся багатошаровою зміною  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$ , значення, яких найбільшим чином наближені до розрахункових значень. На рисунку 4.2 представлена залежність коефіцієнта відображення електромагнітної хвилі від поглинаючого матеріалу першого типу з шаром, який погоджує, і без нього у функції кута падіння для різних частот в досліджуваному діапазоні. Аналізуючи графіки, можна укласти, що поглинаючий матеріал без шару, який погоджує, має коефіцієнт відображення більше, ніж з шаром, який погоджує. Крім того, видно, що коефіцієнт відображення матеріалу з шаром, який погоджує, майже не залежить від кута падіння електромагнітної хвилі. Для досліджуваного частотного діа-

пазону коефіцієнт відображення перевищує  $-30$  дБ і на частоті  $75$  ГГц досягає  $40$  дБ.



Н- поляризація } РПМ I типу
     
 

 Н- поляризація } РПМ II типу  


 Е- поляризація }
     
 

 Е- поляризація }

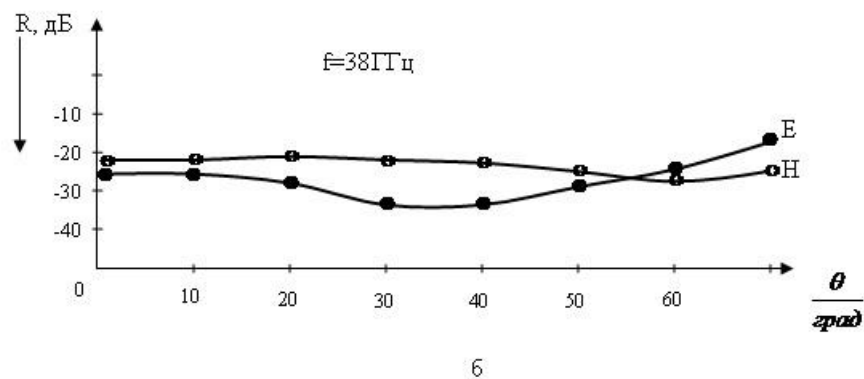
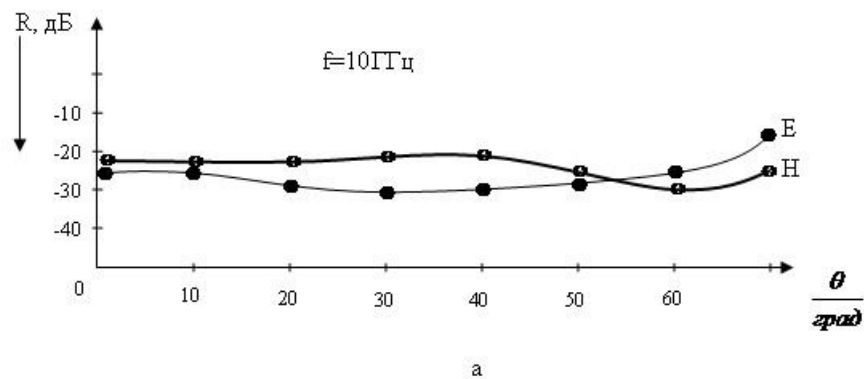
Рисунок 4.2 – Залежність коефіцієнта відображення від кута падіння електромагнітної хвилі на РПМ; а – на частоті  $10$  ГГц; б – на частоті  $38$  ГГц; в – на частоті  $75$  ГГц

Коефіцієнт відображення матеріалу першого типу залежить як від частоти, так і від кута падіння електромагнітної хвилі. Для обох типів матеріалу коефіцієнт відображення залишається практично постійним для будь-якого виду поляризації електромагнітних хвиль.

Для кращого узгодження РПМ з вільним простором, першу поверхню виконують у вигляді конусів, пірамід та ін. геометричних фігур [107 – 108].

Дослідження РПМ проводилося на частотах 10 – 75 ГГц у залежності від кута падіння ЕМХ. Результати досліджень характеристик поглинаючого матеріалу з фігурною передньою поверхнею представлені на рисунку 4.3.

При більш глибокому дослідженні загальних закономірностей, змін коефіцієнта відображення досліджуваного матеріалу з аналогічною поверхнею, але з різними параметрами, такими, як висота конуса, кут при його вершині і т. д., можна отримати РПМ з поліпшеними характеристиками, як коефіцієнта відображення, так і поглинання.



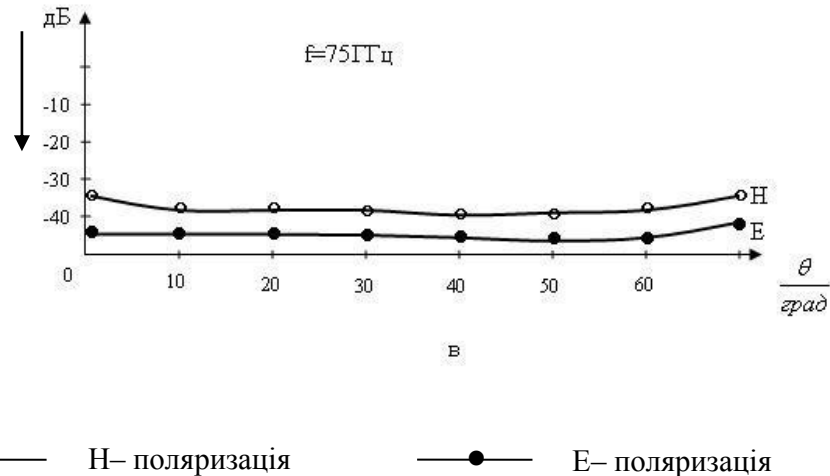


Рисунок 4.3 – Залежність коефіцієнта відображення від кута падіння електромагнітної хвилі на РПМ з рельєфною поверхнею; а – на частоті 10 ГГц; б – на частоті 38 ГГц; в – на частоті 75 ГГц

Для матеріалу з рельєфною передньою поверхнею коефіцієнт відображення істотно залежить від кута падіння ЕМХ і площини її поляризації на частоті 75ГГц. Із збільшенням довжини електромагнітної хвилі, поглинаючі властивості РПМ значно погіршуються.

### 4.3 Експериментальні дослідження захисного одягу

#### 4.3.1 Експериментальні дослідження радіозахисного костюму і визначення слабо захищених областей тіла людини при дії електромагнітного випромінювання

На підставі теоретичних висновків, отриманих в розділі 2, нижче представлені експериментальні дослідження фокусуєчих властивостей реальних екрануючих матеріалів, а також дослідження по ефективності захисту людини.



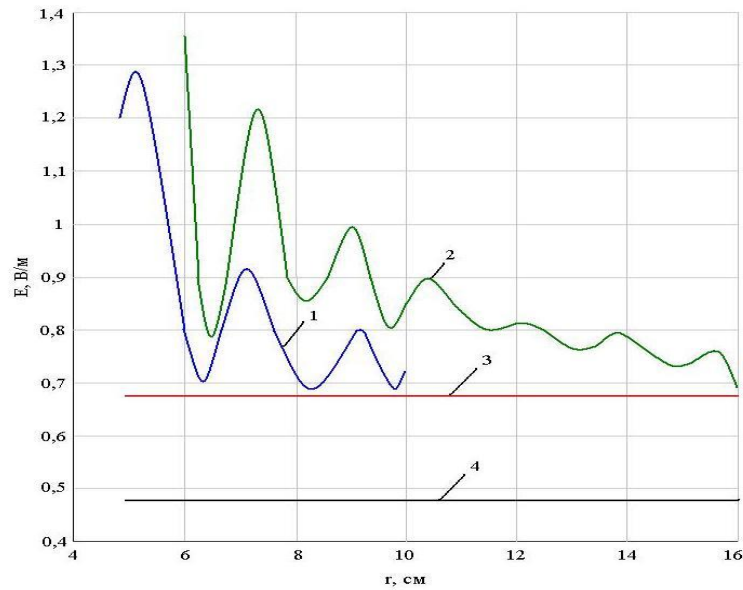


Рисунок 4.4 – Розподіл напруженості поля усередині циліндра уздовж його радіусу (E-поляризація) при  $\lambda = 3$  см

1 –  $a = 17$  см,  $b = 19$  см,  $\varepsilon'_{r1} = 2$ ,  $\varepsilon''_{r1} = 0,3$ ,  $\varepsilon_{r2} = 1$ ;

2 –  $a = 10$  см,  $b = 10,8$  см,  $\varepsilon'_{r1} = 3,27$ ,  $\varepsilon''_{r1} = 1,38$ ,  $\varepsilon_{r2} = 1$ ;

3 –  $a = 2$  см,  $\varepsilon'_r = 2$ ,  $\varepsilon''_r = 0,3$ , 4 –  $a = 0,8$  см,  $\varepsilon'_r = 3,24$ ,  $\varepsilon''_r = 1,38$ .

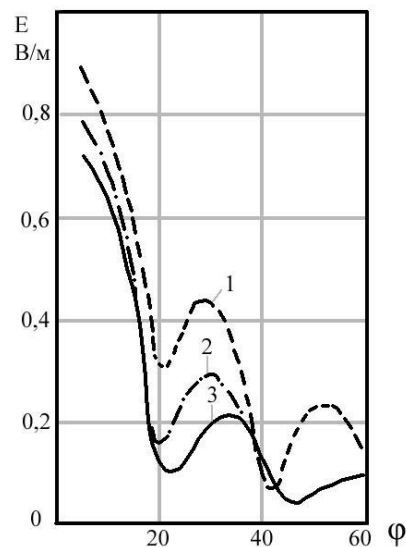


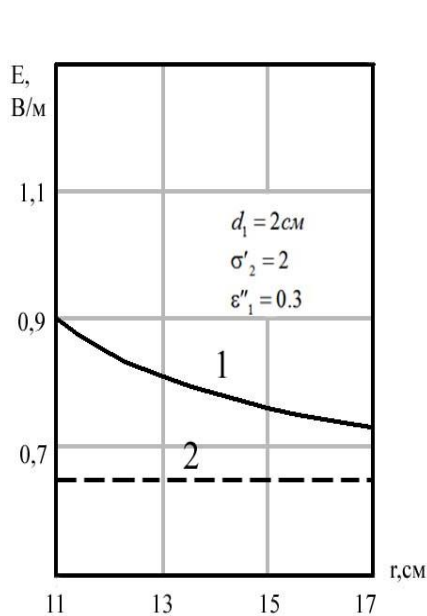
Рисунок 4.5 – Розподіл 1-го максимуму напруженості поля усередині циліндра по азимуту (E-поляризація)

$\lambda = 3$  см. 1 –  $a = 11$  см,  $b = 13$  см; 2 –  $a = 14$  см,  $b = 16$  см; 3 –  $a = 11$  см,  $b = 19$  см.

Залежність 1 – го максимуму напруженості поля усередині циліндра від його внутрішнього радіусу (Е–поляризація,  $\lambda = 3$  см) представлена на рис.4.6.

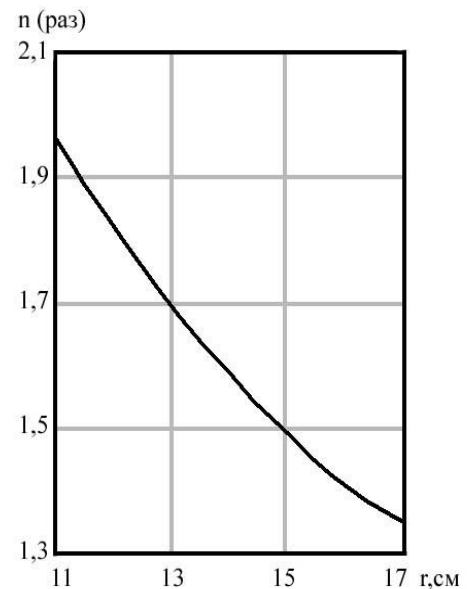
Зростання потужності, що пройшла через циліндровий екран в порівнянні з плоским залежно від радіусу циліндра (Е–поляризація,  $\lambda = 3$  см  $\varepsilon'_1 = 3$   $\varepsilon''_1 = 0,3$ ) представлено на рисунку4.7.

Як було вже показане раніше, чим менший радіус циліндрового екрану, тим вище його фокусуєчі властивості. В захисному костюмі можна виділити наступні області, що мають найбільшу кривизну: область боків, область рукавів і область колін. Дані області можуть бути описаний циліндрами з радіусами 10 см, 13см і 16 см відповідно.



1–циліндровий екран

Рисунок 4.6 – Залежність 1 – го максимуму напруженості поля усередині циліндра від його внутрішнього радіусу



2–плоский екран

Рисунок 4.7 – Ступінь зростання потужності, що пройшла через циліндровий екран залежно від радіусу циліндра

Моделі для досліджень були виконані з пінопласту  $\epsilon=1$  з подальшим нанесенням екрануючого матеріалу з кінцевою об'ємною провідністю (об'ємна сітка з бікарбоноловою нитки з опором 2 кОм/см).

Проаналізуємо експериментальні результати, отримані на випробовуваних моделях. На рисунку 4.8 представлена картина розподілу поля усередині циліндра з внутрішнім радіусом  $R_{en}=10$  см і товщиною стінок діелектрика яка дорівнює 0,12 см. Експеримент показує, що величина минулої потужності зростає у напрямі до центру екрану, при цьому знижується ступінь його екранування.

Зміна минулої потужності по азимуту представлена на рисунку 4.9 і повністю відповідає теоретичним висновкам.

Наступна залежність рисунку 4.10 і рисунку 4.11 показує вплив радіусу кривизни на фокусуючі властивості екрану. Рисунок 4.10 відповідає Н – поляризованому випромінюванню, при цьому порівнювалися потужності випромінювання для випадку плоского і циліндрових екранів, які мають однакову товщину стінок, яка дорівнює 0,8 см. З рисунку 4.10 видно, що при  $R_{en}=10$  см величина минулої потужності в 1,3 рази більше, ніж для плоского екрану. Хоча, як і для випадку на рисунку 4.8, картина поля усередині екрану носить інтерференційний характер, якісна характеристика фокусування від радіусу кривизни не змінюється. Рисунок 4.11 відповідає Е – поляризованому випромінюванню і, окрім попередніх результатів, показує, що збільшення товщини стінки екрану посилює ефект фокусування падаючого випромінювання (при  $d=1,6$  см величина минулої потужності зростає в 2 рази у порівнянні з плоским екраном такої ж товщини).

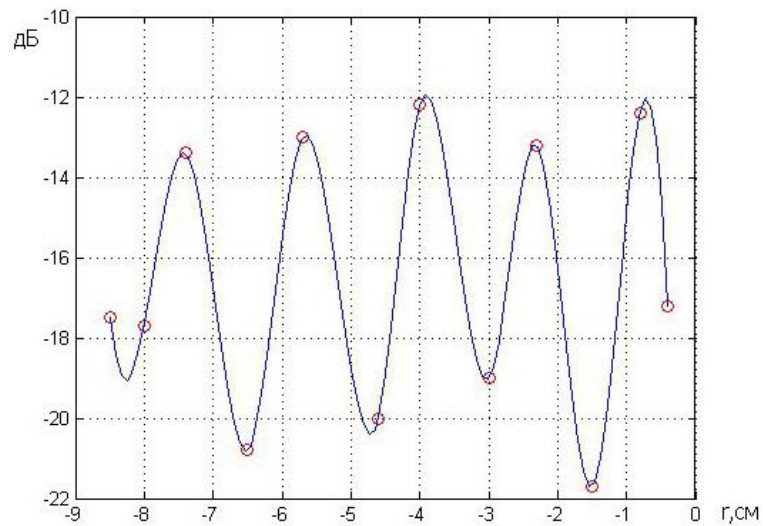


Рисунок 4.8 – Залежність коефіцієнта екранування від радіусу циліндра при  $\lambda = 3,2\text{см}$

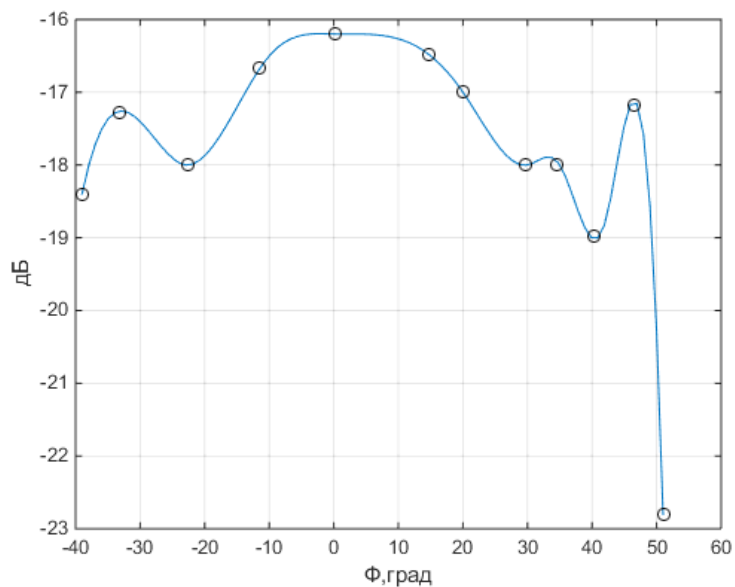


Рисунок 4.9 – Послаблення потужності циліндрового екрану по азимуту (Е-поляризація)

Залежність минулої потужності через циліндровий екран (в порівнянні з плоским екраном) від радіусу представлена на рисунку 4.10 і 4.11.

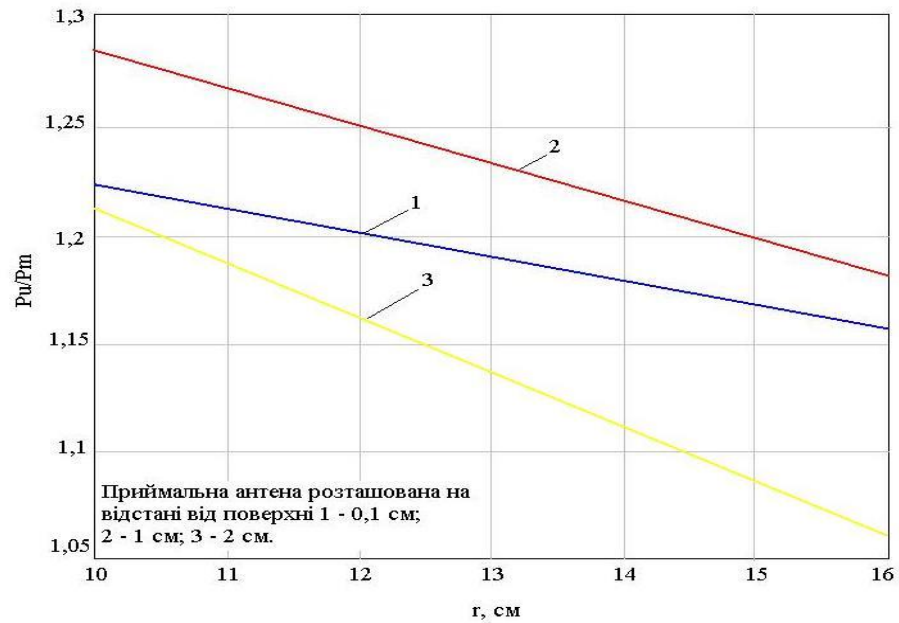


Рисунок 4.10 – Н- поляризація

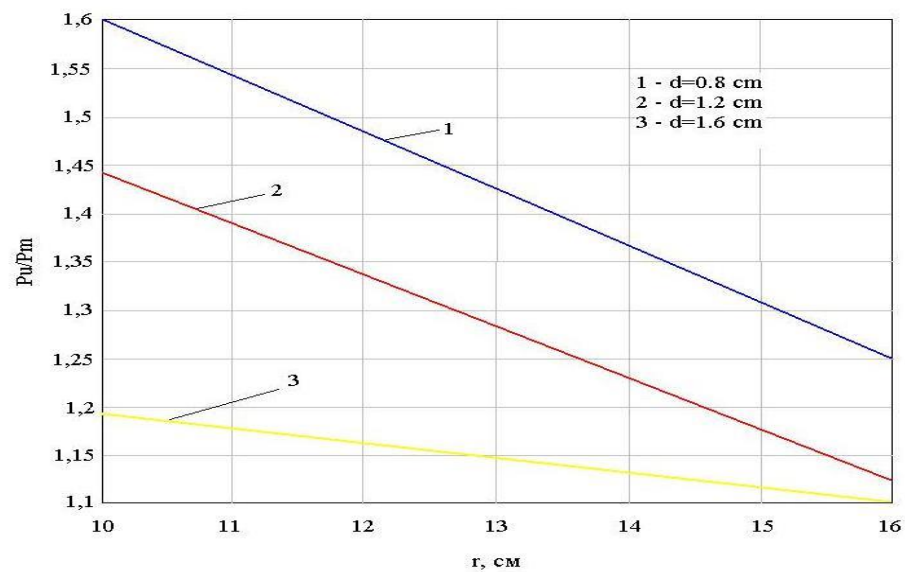


Рисунок 4.11 – Е – поляризація

Захисний одяг є двошаровою структурою із струмопровідними шарами з опорами  $400 \text{ Ом/см}^2$  і  $1500 \text{ Ом/см}^2$ , відповідно.

Експеримент полягає у визначенні ступеня екранування різних ділянок захисного одягу. Останній одягався на циліндровий каркас, усередині якого знаходився датчик, який реєстрував перейдену потужність.

На рисунку 4.12 показана система координат, щодо якої проводилися вимірювання, тут же показана величина ослаблення падаючої ЕМХ по висоті захисного костюму для випадку фронтального падіння ЕМХ в області капюшона і нижньої частини костюма, пояснюється явищем дифракції ЕМХ на краях.

Якості захисних властивостей костюму при опромінюванні його збоку показані на рисунку 4.13. Слід відзначити, що найбільш, з погляду захисту, уразливий рукав костюму (послаблення складає всього лише 3 дБ), а максимальне послаблення спостерігається в пахвовій області, у якій утворюється подвійний екран рукав–костюм.

На рисунку 4.14 показана ступінь екранування костюму позаду при падаючій ЕМХ. Середній ступінь ослаблення ЕМХ в цьому випадку складає ~ 9 дБ.

Наявність перекриття костюму в області застібки пояснює більш високий ступінь ослаблення падаючої ЕМХ, коли джерело випромінювання знаходиться спереду.

Азимутний розподіл ступеня ослаблення ЕМХ показаний на рисунку 4.15, який повністю співпадає з теоретичними висновками (ефективність екранування мінімальна у напрямку падаючої ЕМХ), за винятком області подвійного екранування. Ефективність екранування падаючої потужності по висоті одягу

(Е – поляризація) представлена на рисунку 4.12 і рисунку 4.13.

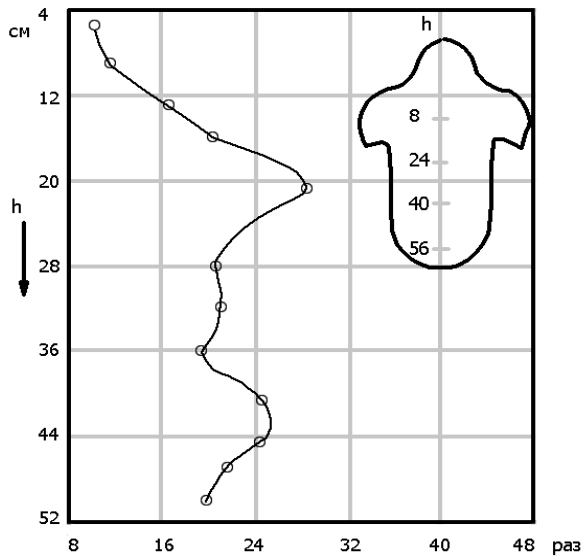


Рисунок 4.12 – Опромінювання спереду

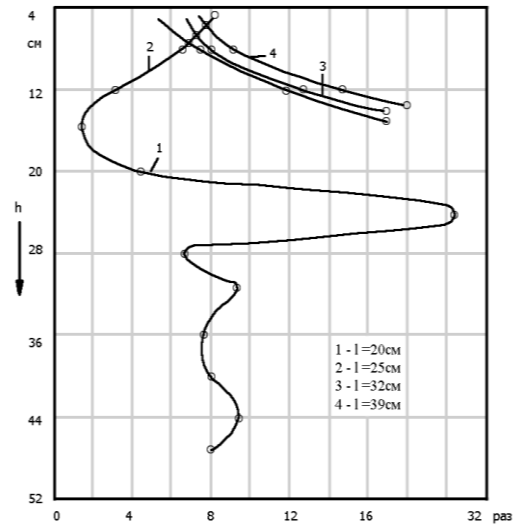


Рисунок 4.13 – Опромінювання збоку

Ефективність екранування падаючої потужності по висоті представлена на рисунку 4.14. Азимутний розподіл падаючої потужності на рисунку 4.15.

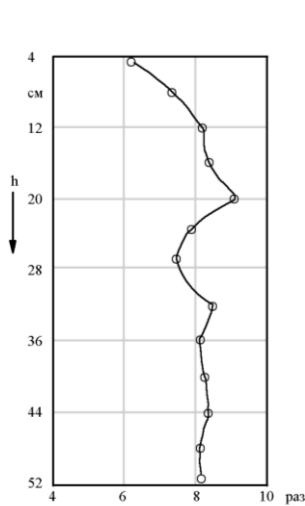


Рисунок 4.14 – Ефективність екранування падаючої потужності по висоті костюма (випадок Е – поляризованого опромінювання костюма позаду)

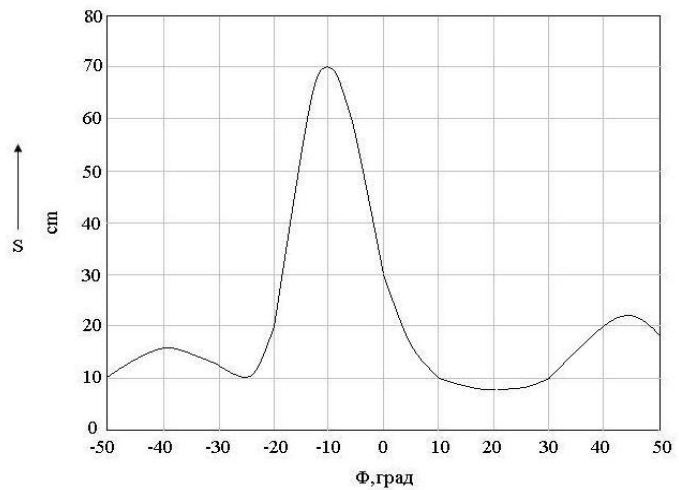


Рисунок 4.15 – Азимутний розподіл падаючої потужності (випадок Е – поляризованого опромінювання костюма спереду)

### 4.3.2 Засоби підвищення ефективності екранування захисного одягу. Вироблення рекомендацій

Питання, розглянуті у попередніх підрозділах, дозволили як в теоретичному плані, так і в експериментальному визначити «слабі захисні місця» костюма. В даному підрозділі ми проаналізуємо способи підвищення ефективності екрануючих властивостей костюма і дамо рекомендації по їх реалізації.

Як було вже сказане, унаслідок фокусування падаючої ЕМХ ряд областей костюма має знижений ступінь екранування. Очевидно, збільшивши товщину екрану даних областей, можна добитися однакового ступеня ослаблення 9 дБ ЕМХ на всіх ділянках костюма.

По методиці, висловленій в [108], були зміряні  $\varepsilon'$  і  $\varepsilon''$  матеріалу з бікарбоноловой нитки при  $\lambda = 3,2$ . Використовуючи розрахункові співвідношення (2.17), були розраховані коефіцієнти ослаблення падаючої ЕМХ для плоского екрану від його товщини, і побудовані номограми (рисунку 4.16). При цьому, як видно, експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними.

Як базова товщина вибрана товщина  $d=0,8$  см плоского екрану, який має коефіцієнт послаблення такий, як і встановлений для костюма, тобто 9 дБ. Позначимо базову товщину  $d=d_2=0,8$  см.

Таким же чином можна побудувати залежність (щодо базового циліндрового екрану  $d_2=0,8$  см) минулої потужності від товщини циліндрового екрану, відповідні Е– та Н– поляризованому ЕМХ.

Побудуємо номограму, залежність компенсації ефекту фокусування падаючої ЕМХ, яка відображає, від товщини стінок циліндрового екрану та його радіусу. Дані номограми представлені на рисунку 4.17.

У ряді випадків від радіозахисних костюмів потрібне зниження минулої потужності ЕМХ на 17–20 дБ. З рисунку 4.16 видно, що якщо використо-



увати екрануючий матеріал з бікарболоновою нитки, послаблення ЕМХ на 17 дБ забезпечується матеріалом завтовшки  $d=1,2$  см, яка буде базовою  $d_3$ .

Експериментальні дослідження, проведені вище, показують, що найбільш слабо захищена область рукавів, причому в робочому положенні дана область співпадає з областю серця людини.

Мале послаблення перебутої потужності ЕМХ у цьому випадку викликана явищем дифракції на отворі рукава, яке приводить до проникнення ЕМХ всередину костюму. Для поліпшення захисних властивостей костюма було запропоноване[109] подовжити рукав, криві 2, 3, 4. На рисунку 4.13 показана ступінь послаблення падаючої ЕМХ костюму в області рукава у залежності від його довжини. Ступінь зростання товщини екрану залежно від його радіусу кривизни  $d_2=0.8$  см.

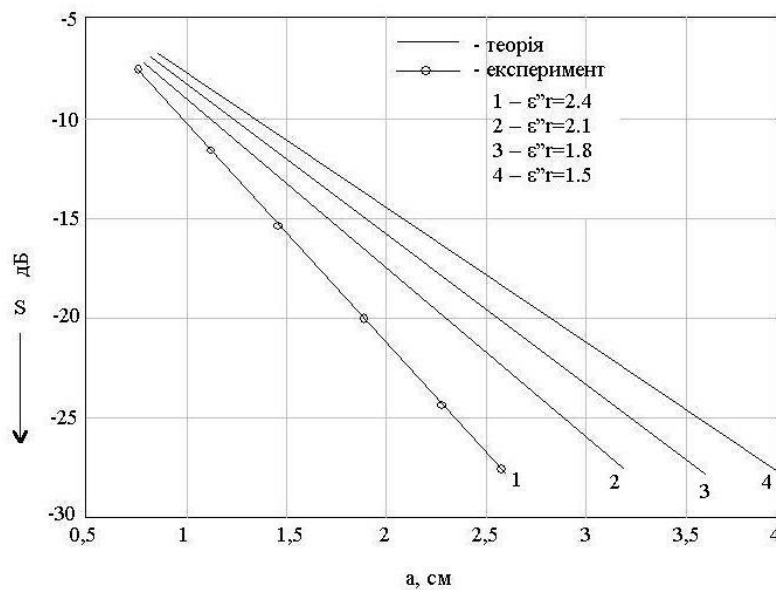


Рисунок 4.16 – залежність коефіцієнта екранування плоского екрану від товщини  $\epsilon'_r=3,27, \lambda=3.27$  см

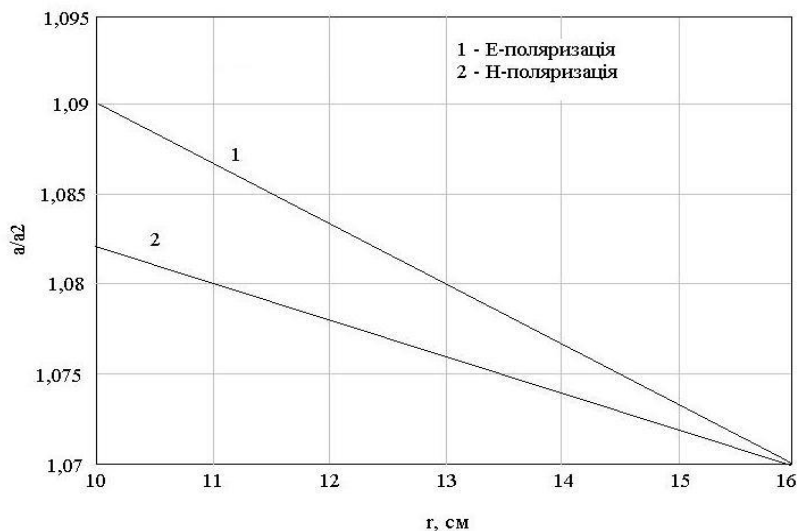


Рисунок 4.17 – Ступінь зростання товщини екрану у залежності від його радіусу кривизни  $d_2=0.8$  см.

Таким чином, для збереження середнього послаблення 9 дБ, довжину рукава повинно збільшити на 19 см (вся довжина складе 39 см), товщина матеріалу при цьому дорівнює 0,8 см.

Поверхня боків і рукавів, які мають радіус кривизни  $\sim 10$  см, вимагають також збільшення товщини матеріалу в даних областях в 1,1 рази (рисунок 4.17).

Стисло практичні рекомендації по поліпшенню захисних властивостей костюма можна сформулювати таким чином.

1. Поверхні костюма, що мають радіус кривизни 10 – 16 см, вимагають збільшення товщини матеріалу в 1,1 – 1,06 разів.

2. В областях рукавів, капюшона та боків товщина матеріалу вимагає збільшення у 1,1 разів.

3. При екрануванні електромагнітного випромінювання плоскими електропровідними матеріалами ефективність екранування визначається відображенням та поглинанням електромагнітних хвиль [110].

При використуванні сітчастих матеріалів їх слід перевіряти аналогічно суцільним з урахуванням еквівалентної товщини [111]

$$a_3 = \frac{\pi r_c^2}{1} \quad . \quad (4.1)$$

Екранне загасання різних форм екранів можливо представити наступним виразом:  $S \approx S_n - S_\phi$ , де  $S_\phi$  – складова екранного загасання, обумовлена формою екрану і дорівнює 0;6,0;9,6 дБ відповідно для плоского, циліндрового і сферичного екранів [111,112]. Звідси витікає, що для того, щоб ефективність екранування циліндрового екрану була такою ж, як і для плоского екрану, необхідно вибрати екрануючий матеріал для циліндрового екрану таким, щоб він компенсував зменшення ефективності екранування на 6 дБ. Це, наприклад, можна зробити за рахунок збільшення товщини матеріалу на величину, що забезпечує збільшення ефективності екранування на величину 6 дБ.

Приріст товщини матеріалу визначаємо:

$$\Delta a_{\text{ц}} = \frac{20 \lg 2}{0,132 \sqrt{fG\mu}} \quad (4.2)$$

Аналогічно для матеріалу, з якого виготовляється сферичний екран:

$$\Delta a_{\text{сф}} = \frac{20 \lg 3}{0,132 \sqrt{fG\mu}} \quad (4.3)$$

Якщо екрануючий матеріал виконаний з міді, то  $G = 1$  і  $\mu = 1$ .

В діапазоні НВЧ  $f = 300$  МГц –  $300$  ГГц максимальне збільшення товщини буде при  $f = 300$  МГц.

В цьому випадку, як слід з (4.2) і (4.3)

$$\Delta a_{\text{ц}} = 2,63 \text{ мкм}; \quad \Delta a_{\text{сф}} = 4,2 \text{ мкм}.$$

При використуванні у якості екрануючого матеріалу мідної сітки збільшення товщини матеріалу на величину  $\Delta a$  еквівалентно, як впливає з формули (4.1), зменшення кроку сітки на величину  $\Delta l$ , тобто

$$\Delta a = \frac{\pi \epsilon^2}{1 - \Delta l} \cdot \frac{\pi \epsilon^2}{1}$$

Відносне зменшення кроку сітки визначається виразом

$$\frac{\Delta l}{1} = \frac{\Delta a}{\Delta a + \frac{\pi \epsilon^2}{1}}$$

Звідси з урахуванням (4.2) і (4.3) при виготовленні циліндрового екрану з мідної сітки відносне зменшення кроку сітки для збереження її екрануючих властивостей дорівнює

$$\frac{\Delta l}{1} = \frac{2,63}{2,63 + \frac{\pi \epsilon^2}{1_{\text{ц}}}}$$

а при виготовленні сферичного екрану

$$\Delta l_{\text{сф}} = \frac{4,2}{4,2 + \frac{\pi \epsilon^2}{1_{\text{сф}}}}$$

Якщо дріт латунний, то  $G = 0,26$ .

В цьому випадку

$$\Delta a_{\text{ц}} = \frac{45,6}{\sqrt{0,26f}}; \quad \Delta a_{\text{ф}} = \frac{72,3}{\sqrt{0,26f}},$$

а для діапазону НВЧ їх максимальні величини рівні

$$\Delta a_{\text{ц}} = 5,16; \quad \Delta a_{\text{ф}} = 8,18,$$

тоді

$$\Delta l_{\text{ц}} = \frac{5,161}{5,16 + \frac{\pi \epsilon^2}{1}};$$

$$\Delta I_{\text{ц}} = \frac{8,181}{8,18 + \frac{\pi \epsilon^2}{1}}$$

Розроблений екрануючий одяг дозволяє забезпечити постійний коефіцієнт екранування по всій поверхні тіла людини [68].

#### 4.3.3 Розробка захисного одягу з рівноективними захисними властивостями

Вибраний крок сітки в підрозділі 4.2 забезпечує постійний коефіцієнт екранування падаючого на людину випромінювання, але не забезпечує рівноективний захист тіла. Теоретичні і експериментальні дослідження показали, що такі області тіла людини, як шия і область ліктя, колін і гомілки мають так звані «гарячі ділянки», якими падаюче електромагнітне випромінювання поглинається в 5 – 10 разів більше, ніж в середньому всім тілом людини [113].

Розроблений радіозахисний костюм забезпечує підвищення ефективності захисних властивостей одягу шляхом створення таких же доз поглинання електромагнітних хвиль тілом людини в областях шиї, ліктя, колін і гомілки, як і в середньому по всьому тілу. Це досягається тим, що в екрануючому одязі, описаному в розділі 4.2, частину одягу в області «гарячих ділянок» виконана з тканини, сітка якої має крок, менший, ніж крок сітки тканини в області бічних частин куртки, штанини брюк і засобу захисту голови. При цьому при використуванні в тканині мідних ниток зменшення кроку сітки для тканини, з якої виконані області шиї, ліктя, коліна і гомілки, визначається із співвідношення

$$\Delta l = \frac{71}{7 + \frac{\pi \epsilon^2}{1}},$$

при використуванні в тканині напівпровідних ниток, наприклад, марки 4У7 – 2С зменшення кроку сітки визначається із співвідношення

$$\Delta l = \frac{1241,8l}{1241,8 + \frac{\pi \Gamma_e^2}{1}},$$

а при використуванні в тканині латунних ниток зменшення кроку сітки для вказаних частин одягу відповідно визначається як

$$\Delta l = \frac{13,74l}{13,74 + \frac{\pi \Gamma_e^2}{1}}.$$

В процесі дослідження не знайдений радіозахисний одяг з таким виконанням кроку сітки із струмопровідного дроту, яка давала б можливість зменшити дозу поглиненої енергії в області ліктя, коліна, гомілки і шиї (верхньої частини спинного мозку), і тим самим створити рівноеквівалентний захист. На рисунку 4.17 представлений загальний вид одягу із заштрихованими частинами частин тіла, для яких необхідний додатковий захист [114 – 115].

Екрануючий одяг (рисунок 4.17) є виготовлений з радіозахисної тканини комплектом одягу з куртки 1, брюк 2, засобів захисту голови 3. Такі частини костюма як область ліктя 4, коліна і гомілки 5, а також засобів захисту шиї 6 виготовляються з тканини, що містить струмопровідну сітку з меншим кроком (у порівнянні з тканиною на решті частин костюму).

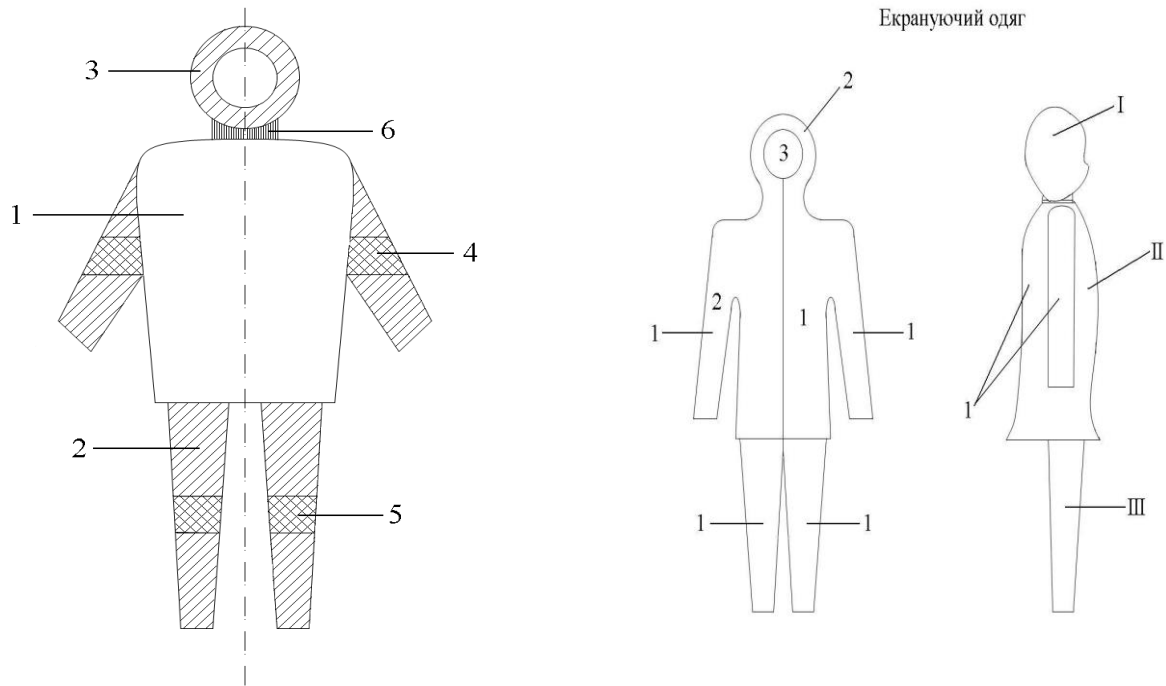


Рисунок 4.18 – Екрануючий одяг

Принцип роботи екрануючого одягу полягає в наступному. Для того, щоб досягалася ослаблення електромагнітного випромінювання довільної поляризації, струмопровідна нитка в тканині встановлюється так, щоб утворилася металева сітка. Для виготовлення екрануючого одягу використовуються звичайно мідні і латунні дроти, а для підвищення електробезпеки – напівпровідні дроти.

#### Висновки до четвертого розділу

1. Проведено експериментальне дослідження поглинаючих матеріалів при дії електромагнітного випромінювання. Показано, що резистивний поглинаючий матеріал на основі пінополістиролу (EPS) з додаванням графіту, володіє тією особливістю, що дозволяє реалізувати розрахункові закони зміни комплексної діелектричної проникності. Зокрема, поглинаючий матеріал без шару, що погоджує, з додаванням в кожний шар аквадагу різної концентрації, має коефіцієнт відображення більше, ніж що погоджує. Поглинаючі

властивості матеріалу практично не залежать від кута падіння електромагнітної хвилі.

2. Експериментально доведено, що можна створити матеріал з якнайкращими коефіцієнтами відображення і поглинання в широкому діапазоні кутів падіння електромагнітної хвилі в нижній частині частотного діапазону. Застосування в матеріалі елементів конусоподібної форми, що відображають, приводить до істотного зростання коефіцієнта поглинання. Це, у свою чергу, дозволяє отримати матеріал малої товщини в широкому діапазоні довжин хвиль.

3. Експериментально встановлено, що матеріал для екранування ЕМІ на основі пінополістиролу (EPS) з додаванням графіту, володіє високими екрануючими властивостями без використання складної технології виготовлення. Якнайкращими характеристиками в досліджуваному діапазоні частот володіє аквадаг з розміром частинок графіту 30 – 70 мкм.

4. Встановлено експериментальним шляхом, що ефективність захисту всіх частин тіла людини залежить від властивості тканини, що містить струмопровідну сітку і від кроку сітки. Чим крок сітки менше, тим вище ефективність екранування. Встановлено, що якщо радіозахисний одяг виконати з тканини, в якій змінний крок сітки, то рівень що пройшла через екран потужності буде однаковим для всіх ділянок тіла людини, тобто падаюче на тіло людини випромінювання буде постійним.

Список використаних джерел у данному розділі наведені у повному списку використаних джерел під номерами:[68, 102 – 115]



## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. В результаті аналізу встановлено, що при використанні сучасної електронної медичної апаратури, медичний персонал підвергається впливу різних джерел ЕМВ. Це потребує проведення оцінки ефективності захисту, яка б підтвердила доцільність використання існуючих захисних методів та дозволила більш якісно провести заходи по поліпшенню властивостей захисних матеріалів. Тому в роботі вирішується завдання оцінки ефективності захисту медичного персоналу, яке базується на розробці методу, який дозволяє якісно оцінити ефективність захисту медичного персоналу.

2. Вдосконалена модель визначення рівня електромагнітного випромінювання, яке впливає на біологічні об'єкти. В цій моделі на відміну від відомих враховуються як паразитні випромінювання, число відображених хвиль так і число зовнішніх джерел, що мають випадкові амплітуди і фази. Це дозволило визначити показники електромагнітного випромінювання для різних типів джерел випромінювання і їх інтенсивності в медико–діагностичних, лікувальних, хірургічних приладах і системах, а також в їх окремих частинах.

3. Розроблений метод оцінки ефективності захисту медичного персоналу на основі оцінки дози шкідливої дії електромагнітного випромінювання, який дозволяє більш якісно провести порівняння існуючі технічних систем по рівню їх безпеки, враховуючи при цьому «критерій ефективності» системи захисту, який базується на використанні аналізу всіх можливих джерел ЕМВ.

4. Розроблена функціональна модель біомедичної системи життєдіяльності з різними джерелами електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону на основі детерміністських критеріїв, які дозволяють з певною вірогідністю оцінити виконання задачі функціонування системи життєдіяльності.

5. Розроблений узагальнений критерій біологічної системи життєдіяльності, який дозволяє характеризувати як всю систему, так і її окремі частини. Критерій побудований з урахуванням вартості системи, який дозволяє при побудові систем біологічного захисту на підставі загальних моделей, отрима-

ти розрахункові формули, що зв'язують визначений критерій якості системи з параметрами, які можна порівняно легко зміряти і нормувати з біологічних і санітарних підходів, що і визначає практичну цінність роботи.

6. Отримано подальше вирішення задачі визначення параметрів багаточарових покриттів, які слабо відображають, при довільних кутах падіння електромагнітної хвилі і поляризації в широкому частотному діапазоні застосування медичних приладів і систем (10– 75 ГГц), що дозволило розрахувати коефіцієнт поглинання при різній товщині поглинача.

7. Проведено експериментальне дослідження поглинаючих матеріалів при дії електромагнітного випромінювання. Показано, що резистивний поглинаючий матеріал на основі пінополістиролу (EPS) з додаванням графіту, володіє тією особливістю, що дозволяє реалізувати розрахункові закони зміни комплексної діелектричної проникності. Зокрема, поглинаючий матеріал без шару, що погоджує, з додаванням в кожний шар аквадагу різної концентрації, має коефіцієнт відображення більше, ніж що погоджує. Поглинаючі властивості матеріалу практично не залежать від кута падіння електромагнітної хвилі.

8. Експериментально доведено, що можна створити матеріал з якнайкращими коефіцієнтами відображення і поглинання в широкому діапазоні кутів падіння електромагнітної хвилі в нижній частині частотного діапазону. Застосування в матеріалі елементів конусоподібної форми, що відображають, приводить до істотного зростання коефіцієнта поглинання. Це, у свою чергу, дозволяє отримати матеріал малої товщини в широкому діапазоні довжин хвиль.

9. Експериментально встановлено, що матеріал для екранування ЕМВ на основі пінополістиролу (EPS) з додаванням графіту, володіє високими екрануючими властивостями без використання складної технології виготовлення. Якнайкращими характеристиками в досліджуваному діапазоні частот володіє аквадаг з розміром частинок графіту 30– 70 мкм.

10. Отримав подальший розвиток метод розрахунку рівноективних захисних властивостей матеріалів від дії електромагнітного випромінювання на організм людини, що знаходиться в захисному середовищі. Це дозволить за рахунок створення різного шагу сітки захисного одягу, розробити систему захисту людини, яка забезпечить рівноективний допустимий рівень опромінювань по всьому об'єму тіла людини при обслуговуванні, ремонті і експлуатації медичних приладів і систем.

11. Встановлено експериментальним шляхом, що ефективність захисту всіх частин тіла людини залежить від властивості тканини, що містить струмопровідну сітку і від кроку сітки. Чим крок сітки менше, тим вище ефективність екранування. Встановлено, що якщо захисний одяг виконати з тканини, в якій змінний крок сітки, то рівень що пройшла через екран потужності буде однаковим для всіх ділянок тіла людини, тобто падаюче на тіло людини випромінювання буде постійним.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Влияние различных видов излучений на здоровье работников / Федорович С. В. и др. // Проблемы общественного здоровья и здравоохранения. – 2004. – 111 с.
2. Пресман А. С. Электромагнитные поля и живая природа / Пресман А. С. – Рипол Классик. – 2013. – С.33–60 .
3. Яшин С. А. Система регистрации собственных низкоинтенсивных электромагнитных полей на организм человека / С. А. Яшин // Весник новых медицинских технологий. – 2013. – Т. 20. – № 3. – 158 с.
4. Цветкова Е. А. Взаимодействие электромагнитных полей с биополем человека / Е. А. Цветкова, В. А. Гольдаде // Проблемы физики, математики, техники. – 2012. – № 1(10). – С. 51 – 58.
5. Павлов С.В. Механізм дії електромагнітного випромінювання, на об'єкти, що знаходяться в водному середовищі / С.В.Павлов, А.Ю. Клапоущак, Н.В. Тітова, Д.М. Барановський // Фото біоніка та фотомедицина. – 2016. – Т.12. – Вип. 1,2. – С. 139 – 141.
6. Шибкова Д. З., Эффекты воздействия электромагнитных излучений на разных уровнях организации биологических систем / Д. З. Шибкова, А. В. Овчинникова // Успехи современного естествознания. – М.: 2015. – № 5.
7. Девятков Н. Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты / Н. Д. Девятков // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110. – № 7. – С. 453 – 454.
8. Biomedical and biosocial anthropology 22 70 – 75 International academy of integrative anthropology / Богомольний Б. Р., Барзинський В. П., Грідіна Т. Л., Федчук АСА, Лозицький В. П., Мудрик Л. М., Шитікова Л. І., Сочесло Л. В. – 2014.
9. Электромагнитные загрязнения биосферы автотранспортом (автомобили, электромобили, гибридные автомобили) / С. Е. Селиванов,

В. В. Жиленко, А. В. Бажинов, С. Н. Будянская // Автомобильный транспорт: сб. науч. трудов. – 2009. – № 25. – С. 24 – 32.

10. Дзюндзюк Б. В. Безопасность работы при использовании различных видов мониторов / Б. В. Дзюндзюк, И. И. Хондак, Т. Е. Стыценко // Вестник национального университета ХПИ. – 2008. – № 43. – С. 94 – 98.

11. Обеспечение электромагнитной безопасности / Б. В. Дзюндзюк, Т. Е. Стыценко // Сборник тезисов доклада по материалам международной научной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». – Туапсе. – 2004 г. – С. 277 – 278.

12. Подобед І. М. Про протилежності властивості одного й того ж випромінювання та його вплив на працівника / І. М. Подобед // Проблеми охорони праці в Україні: зб. наук. праць. – Київ, 2012. – №23. – С. 90 – 95

13. Грачев Н. Н. Медико–биологические аспекты воздействия ЭМИ / Н.Н. Грачев, Л.О. Мырова – Москва. БИНОМ., Лаборатория знаний, 2005. – 317 с.

14. Гордон З. В. Вопросы гигиены труда и биологического действия, электромагнитных полей сверхвысоких частот / Гордон З. В. – Л.: Медицина, 1996. – 163 с.

15. Чукова Ю. П. Слабые взаимодействия: нормирование вредного действия и парапсихологические феномены (общность научной проблемы) / Ю. П. Чукова // Парапсихология и психофизика. – 1998. – № 2. – С. 9 – 10

16. Й.І. Стендель Физические и математические модели реологических переходов в биологическом организме / Й.І. Стендель, С.В. Павлов, О.Д. Азаров, Л.І. Петросян // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2013. – Вип.. 3 , С. 55 – 63.

17. Попович Б. М. Врачебное дело / Б. М.Попович, И. П. Козярин. – 1977. – № 6. – С. 128 – 131.

18. Влияние различных видов излучений на здоровье медицинских работников / С. В. Федорович и др. // Проблемы общественного здоровья и здравоохранения. – 2003. – С. 111 – 116.

19. Электромагнитные излучения и здоровье человека / Ф. И. Одинаев [и др.] // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – Т. 20. – №. 6. – С. 1714 – 1716
20. Холодов Ю. А. Реакция нервной системы человека на электромагнитные поля / Ю. А. Холодов, Н. Н. Лебедева. – Москва, 1991. – 174 с.
21. Kholodov Yu. Biological effects of electric and magnetic fields /In: Nonionizing Radiation and Neuroscience. USA, 1994
22. Черепнев И. А. Биологические эффекты при воздействии электромагнитных волн / И. А. Черепнев // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2007. – № 3. – С. 118 – 124.
23. Рубцова Н. Б. Электромагнитные поля физиотерапевтического оборудования как источник потенциальной опасности для медицинского персонала / Рубцова Н. Б., Марков Д. В., Шеина А. Н. // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. – 2012. – № 4. – С. 48 – 54.
24. Влияние сверхнизкочастотных электромагнитных полей на биоэлектрическую активность мозга / Litvinenko L. M. [et al.] // Радиофизика и радиоастрономия. – 2013. – Т. 3. – № 3. – 312 с.
25. Сучасний стан досліджень впливу електромагнітних випромінювань на організм людини / Чорний О. П. [и др.] // Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах. – 2013. – № 2. – С. 116 – 129.
26. Белокриницкий В. С. Механизмы нарушения корково-подкорковых взаимоотношений головного мозга при действии СВЧ-излучений /В. С. Белокриницкий // Гигиена населенных мест. – 2008. – № 52. – С. 249 – 256.
27. Черепнев И. А. Биологические эффекты при воздействии электромагнитных волн / И. А. Черепнев // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2007. – № 3. – С. 118 – 124.
28. Вуйчик П. А. Экспериментальное изучение влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на функциональное состояние ре-

продуктивной системы / П. А. Вуйцик // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – № 5 – 2. – С. 674 – 676.

29. Крюков В. И. Генетические эффекты электромагнитных полей / В. И. Крюков // Вестник новых медицинских технологий. – 2000. – Т. 7. – № 2 – С. 8 – 13.

30. . S. V. Pavlov; V. B. Vassilenko; I. R. Saldan; D. V. Vovkotrub; A. A. Poplavskaya, et al Methods of processing biomedical image of retinal macular region of the eye, *Proc. SPIE* 9961, Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces V, 99610X (September 26, 2016); doi:10.1117/12.2237154; Index SNIP – 0,37

31. Директоренко М. А. СВЧ гипертермия в медицине: реализация и применение / М. А. Директоренко, А. А. Димитрюк, А. А. Директоренко // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 4. – № 1. – С. 156 – 160

32. Крюков В. И. Генетические эффекты электромагнитных полей / В. И. Крюков // Вестник новых медицинских технологий. – 2000. – Т. 7. – № 2 – С. 8 – 13.

33. Румпель О. А. Коррекция нарушений генеративной функции семенников крыс, вызванных цитостатическим воздействием / О. А. Румпель, А. В. Пахомова, А. В. Вычужанина // Сибирский онкологический журнал. – 2010. – № Приложение 1. – 86 с.

34. Ronald H. Rovira; Stanislav Ye. Tuzhansky; Sergii V. Pavlov; Sergii N. Savenkov; Ivan S. Kolomiets, et al. Polarimetric characterisation of histological section of skin with pathological changes, *Proc. SPIE* 10031, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2016, 100313E (September 28, 2016); doi:10.1117/12.2249373; Index SNIP – 0,37.

35. Трибрат Н. С. Влияние электромагнитных излучений различного диапазона на процессы микроциркуляции / Н. С. Трибрат, Е. Н. Чуйн,

М. Ю. Раваева // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2010. – Т. 9. – № 35. – С. 15 – 27.

36. Никитин О. Р. СВЧ–излучатели для гипертермии Методы и устройства передачи и обработки информации / О. Р.Никитин, О. А. Мекко. – 2008 г. Вып. 10. – С. 3 – 7

37. Орел В. Э. Радиочастотная терапия в онкологии (обзор литературы и собственных исследований) / В. Э. Орел, И. И. Смоланка, И. И. Дзятковская // Теоретическая медицина. – 2009. – Т. 15. – № 2. – С. 289 – 309.

38. Девятков Н. Д. Применение электроники в медицине и биологии / Н. Д. Девятков // Электронная техника. Сер. СВЧ–техника. – 1993. – № 1 (455). – С. 66 – 76 .

39. Влияние особенностей мелкомасштабной структуры молочной железы на распределение глубинной температуры при использовании радиотермометрической диагностики / А. В. Хоперсков [и др.] // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 1: Математика. Физика. – 2014. – № 6. – С. 60 – 68

40. Еськов Е. К. Воздействие искусственно генерируемых электромагнитных полей на биологические объекты / Е. К. Еськов, В. А. Тобоев // Вестник Чувашского университета. – 2008. – № 2. – <http://cyberleninka.ru/article/n/vozdeystvie-iskusstvenno-generiruemyh-lektromagnitnyh-poley-na-biologicheskie-obekty>.

41. Влияние сверхвысокочастотного излучения нетепловой интенсивности на выраженность адреналинового отека легких и выживаемость крыс в эксперименте / Терехов И. В. [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. НИ Лобачевского. – 2011. – № 1. – С. 389 – 392

42. Холманский А. С. Моделирование физики мозга / А. С. Холманский // Математическая морфология. Электронный математический и медико–биологический журнал. – 2006. – Т. 5. – № 4. – С. 23 – 38.



43. Гуль Е. В. Поведение и функциональное состояние ЦНС крыс после пребывания в моделируемых гипогеоманитных условиях / Е. В. Гуль.– <http://ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/cosearchers.nsf/>.

44. Теоретические модели волновой генетики и воспроизведение волнового иммунитета в эксперименте / В. Д. Артюх [и др.]. – 2007.– <http://trinitas.ru/rus/doc/>.

45. МПР1 (SWEDAC — Swedish National Board for Measurement and Testing) 1987

46. МПР2 (SWEDAC — Swedish National Board for Measurement and Testing) 1990

47. TCO2007 Naturskyddforeinegen—The Swedish Society for Nature Conservation)

48. OHSAS 18001:2007 Occupational health and safety management systems – Requirement // Системы менеджмента охраны здоровья и обеспечение безопасности труда. Требования.

49. Крылов В. А. Защита от электромагнитных излучений / В. А. Крылов, Т. В. Юченкова // Советское радио. – М.: Сов. радио. 1976. – 216 с.

50. Дзюндзюк Б. В. Методы расчета радиопоглощающих материалов / Б. В. Дзюндзюк // Зарьк. ин-т радиоэлектроники. – Харьков, 1987. – 150 с. Депон. Укр.НИИТИ 22.01.87, №458–Ук.87.

51. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. – 2004. – Т. 2. – № 5. – С. 152 – 167.

52. Уменьшение влияния электромагнитных полей на человека за счет применения поглощающих экранов/ Т. Е. Стыценко, Б. В. Дзюндзюк // Тезисы докладов 7– й региональной научно– методической конференции «Безпека життєдіяльності», Харьков. – 2007. – НТУ ХПИ, С. 51 – 52.

53. Дзюндзюк Б.В. Разработка системы защиты от воздействия СВЧ излучений радиотехнического комплекса / Б. В. Дзюндзюк, И. В. Наумейко,

И. Ю. Рябокони, В. В. Старостенко // Харьк. ин-т радиоэлектроники. – Харьков, 1989. – 31 с. № 32 – Деп.НИИЭИР.

54. Довбыш В.Н. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография / В.Н. Довбыш, М. Ю. Маслов, Ю. М. Сподобаев. – Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009. – 198 с.

55. Володина Н. А. Основы электромагнитной совместимости: учебник для вузов / Н. А. Володина, Р. Н. Карякин, Л. В. Куликова и др.; под ред. Р. Н. Карякина; Алт. гос. тех. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул: ОАО «Алтайский полиграфический комбинат», 2007. – 480 с.

56. Golestani–Rad, L. Rigorous analysis of EM– wave penetration into a typical room using FDTD method: The Transfer Function concept / L. Golestani–Rad, J. Rashed–Mohassel, Danaie // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 913 – 926.

57. Антенны и устройства СВЧ. Расчет и проектирование антенных решеток и их излучающих элементов / Д. И. Воскресенский, Р. А. Грановская, В. Л. Гостюхин, В. С. Филиппов и др., учеб. пособие для вузов; под ред. Д. И. Воскресенского. – М. : Сов. радио, 1972. – 320 с.

58. Определение комплексного коэффициента отражения электромагнитных волн внутри помещений / П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова, О. В. Москвитина // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2013. – Т. 2.

59. Андреев П. Г. Разработка базовой модели распространения электромагнитных волн в помещениях / Андреев П. Г., Ширшов М. С., Якимов А. Н. // ББК 32я43 Р. 45. – 2012. – С.220.

60. Неганов В. А. Устройства СВЧ и антенны. Ч. 1: проектирование, конструктивная реализация, примеры применения устройств СВЧ / В. А. Неганов, Д. С. Ключев, Д. П. Табаков; В. А. Неганов (ред.). — М.: URSS, 2013. — С. 602.

61. Герасимов С.В. Методика оценки точности измерения при измерительном контроле параметров сложных технических комплексов /

С.В. Герасимов, В.В. Стадник, М.Ю.Яковлев // Зб.наук.пр.Національна академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці. – К.:ІПМ, 2004. – Вип.26. – С. 30 – 35.

62. Яманов Д.Н. Электродинамика и распространение радиоволн / Д.Н. Яманов. – Часть 2, 2011. – С.172.

63. Воробйов Г. С. Радіофізичні методи діагностики матеріалів і середовищ: Монографія / Г. С. Воробйов [и др.]. Суми: Сумський державний університет. – 2014, 171с.

64. Ваентцель Е. С. Прикладные задачи теории вероятности / Е. С. Ваентцель, Л. А. Овчаров // М.: Радио и связь, 1983. – С. 416.

65. Электромагнитные поля и волны вблизи апертурных антенн больших электрических размеров / Н. Н. Горобец, Е. Е. Овсянникова // Вестник ХНУ им. В.Н.Каразина, Вып.24. – № 1115. – 2014. – С. 111 – 118.

66. Хансен Р. Сканирующие антенны системы СВЧ / Хансен Р. – М.: Сов. радио, 1966.

67. Фельд Я. Н. Бененсон.С. Основы теории антенн / Я. Н. Фельд, С. Бененсон. – М.: Дрофа, 2007. – 491 с.

68. Дзюндзюк Б.В., Маслов П.Н., В.Б.Дзюндзюк Теория и практика электромагнитной обстановки эргатических систем / Б.В. Дзюндзюк, П.Н.Малов, В.Б.Дзюндзюк.: Учебн.пособие – Харьков: ХТУРЕ, 1998. – 176 с.

69. Айзенберг Г. З. Антенны УКВ / Г. З. Айзенберг. – М., 1977, 384 с.

70. Герасимов С. В. Методика оценки точности измерения при измерительном контроле параметров сложных технических комплексов / С. В. Герасимов, В. В. Стадник, М. Ю. Яковлев // Зб. наук. пр. Національна академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці. – К.:ІПМ, 2004. – Вип.26. – С .30 – 35

71. Загоскин В. В. Влияние профильных распределений диэлектрических характеристик почво – грунтов и тонких слоев сред на коэффициент отражения при зондировании плоскими горизонтально– поляризованными вол-

нами в СВЧ диапазоне / В. В. Загошкин, А. С. Шостак, С. П. Лукьянов. – № 8. – 2009. <http://jre.cplire.ru/koi/aug99/4/text.html>

72. Керимов М. К. Вычисление комплексных нулей функции Бесселя II рода и её производных / М. К. Керимов, С. Л. Скороходов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1985. – Т. 25. – № 10. – С. 1457 – 1473.

73. Иваницкий А. М. Наилучший вариант принципа перестановочной двойственности в классической электродинамике / А. М. Иваницкий // Наукові праці ОНАЗ ім. ОС Попова. – 2013. – № 2. – С. 3 – 9.

74. Дзюндзюк Б.В. Основы безопасности эргатических систем / Дзюндзюк Б.В. // Учебное пособие. – Киев: УМК ВО, 1990. – 56 с.

75. Sean E. Maximally Reliable Markov Chains Under Energy Constraints/ E. Sean, S.Escolay, M. Eisele, K.Miller, L.Paninski// Neural Computation. – 2009. – Vol.21, Issue7. – PP. 1863 – 1912.

76. Watanabe O. Analysis of a randomized local search algorithm for LDPC decoding problem/ O.Watanabe, T.Sawai, H.Takahashi// Lecture Notes in Comp. – 2003. – Vol. 2827. – PP. 50– 60.

77. Бубнов В. П. Нестационарная модель оценки функциональной безопасности средств железнодорожной автоматики: доклад / В. П. Бубнов, К. И. Бурцева // Проблемы математической и естественно–научной подготовки в инженерном образовании: исторический опыт, современные вызовы: труды межд. науч.– метод. конф., 11–12 нояб. 2010г.; под общ. ред. В. А. Ходаковского. – СПб.: ПГУПС. – 2011. – С. 25 – 32.

78. Grendar M. What is the question that MaxEnt answers? / M.Grendar: 20th International Workshop. – 2001. – Vol. 568. – PP. 83 – 93.

79. Jaakkola T. Maximum entropy discrimination/ T.Jaakkola// Journal of Machine Learning Research. – 2009. – № 10. – PP. 2531 – 2569.

80. Frontini M. The moment problem and maximum entropy: numerical investigation / M. Frontini, A. Tagliani // Appl. Math. – 1995. – № 32. – PP. 339 – 346.

81. Glansdorff P. On the differential properties of the entropy production/ P.Glansdorff, I. Prigogine// *Physica*. – 1968. – №20.– PP. 773 – 780.
82. Bandyopadhyay K. Maximum entropy and the problem of moments: A stable algorithm/ K Bandyopadhyay, A.K.Bhattacharya // *Phys. Rev.* – 2005. – Vol.71. – PP. 5 – 10
83. Macke J. How biased are maximum entropy models? / J.Macke, I. Murray, P. Latham// *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2011. – Vol.24. – PP. 2034 – 2042
84. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий [пер. с англ.] / Т. Саати. – М.: «Радио и связь», 1993. – С. 278.
85. Fouss F. A maximum entropy approach to multiple classifiers combination / F. Fouss, M. Saerens // *Technical report, IAG, University of catholique*. – 2004. – PP. 110 – 125.
86. Freire N. Entity Recognition and Resolution in Semi-structured Data / N. Freire // *JCDL*. – 2011. – PP.12 – 17.
87. Gorban A.N. Entropy: The Markov Ordering Approach / A. N. Gorban, P. A. Gorban, G. Judge // *Entropy*. – 2010. – Vol.12. – PP. 1145 – 1193.
88. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования / И.В.Кузьмин, Кедрус В.А. – К.: Вища шк., - 1986. – 238 с.
89. Rosenfeld R. A Maximum Entropy Approach to Adaptive Statistical Language Modeling/ R Rosenfeld// *Computer Speech & Language*. – 1996. – Vol.10, Issue3. – PP. 187 – 228.
90. Стыценко Т. Е. Разработка биомедицинской системы жизнедеятельности при воздействии электромагнитных излучений / В. В. Семенец, Т. Е. Стыценко // *Системи обробки інформації*. – 2016. – № 8(145). – С. 139 – 144.
91. Дзюндзюк Б. В. Оценка дозы вредного воздействия при испытании и настройке РЭА / Б. В. Дзюндзюк, Т. И. Степанова // *АСУ и приборы автоматизации*. – Высшая школа. – 1988. – № 88. – 6 с.

92. Стыщенко Т. Е. Критерии и методы оптимизации систем с защитой / Т. Е. Стыщенко, Б. В. Дзюндзюк // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – 2/3(32). – С. 10 – 13.

93. Стыщенко Т. Е. Анализ электромагнитной обстановки и моделирование источников паразитных излучений / В. В. Семенец, Т. Е. Стыщенко // Радиотехника. – 2016. – № 184. – С. 155 – 163.

94. Герасимов С.В. Методика оценки точности измерения при измерительном контроле параметров сложных технических комплексов / С. В. Герасимов, В. В. Стадник, М. Ю. Яковлев // Зб. наук. пр. Національна академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці. – К.: ІПМ, 2004. – Вип.26. – С. 30 – 35

95. Шубарин Ю. В., Яцук Л. П. Параметры нерезонансных щелей в прямоугольном волноводе. – Радиотехника. – 1966. Вып.2. – С. 30 – 36.

96. Фрадин А. З. Антенны сверхвысоких частот / А. З. Фрадин. – М.: Сов. радио, 1957. – С. 646.

97. Жук М. С. Проектирование антенно–фидерных устройств / М. С. Жук, Ю. Б. Молочков. – М.: Энергоиздат. – Т. 1 – 1966. – 648 с., Т. 2 – 1974. – С. 440 с.

98. Драбкин А. Л. Антенно–фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. А. Зузенко. – М.: Сов. радио, 1961. – С. 616.

99. Уэйт Д. Электромагнитное излучение из цилиндрических систем / Уэйт Д. – М.: Сов. радио, 1963. – С. 239.

100. Пиктолькорс А. А. Введение в теорию адаптивных антенн / А. А. Пиктолькорс, О. С. Литвинов. – Наука, 1991 г.

101. Пистолькорс А. А. Излучение из поперечных щелей на поверхности круглого цилиндра / Пистолькорс А. А. – ЖТФ. – 1947, .Т. 17, № 3, С. 377 – 385

102. Защита медицинского и промышленного персонала от воздействия патогенных полей с использованием матричного экрана /

Л. М. Погорелая [и др.] // Вестник новых медицинских технологий. – 2014. – Т. 21. – № 1.

103. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.] // Доклады БГУИР. – 2004. – Т. 2. – № 5. – С. 152 – 167.

104. Wallace J.L. Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations // IEEE Trans. Magn. – 1993. – 29, №6, Pt 3. – P. 4209 – 4214.

105. A. Alu, A. D. Yaghjian, R. A. Shore, and M. G. Silveirinha, “Causality relations in the homogenization of metamaterials,” Phys. Rev. B, vol.84, no. 5, pp. 1– 16, Aug. 26, 2011.

106. Александров Ю. К. Измерительное устройство для определения электромагнитных свойств материалов в НЧ диапазоне электромагнитных волн / Ю. К. Александров, В. М. Хохлов, А. С. Тюменева // Технология ЭМС. – 2013. – № 2(45). – С. 35 – 48.

107. Hatakeyama K., Inui T. Electromagnetic Wave Absorber Using Ferrite Absorbing Material Dispersed with Short Metal Fibers // IEEE Trans. – 1984. – Vol. MAG–20, №3. – P. 1261 – 1263. 49. Jha Vandana, Banthia Ajit K. Composites Based on Waste–Ferrites as Microwave Absorbers // Indian J.

108. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Физматгиз. 1959. – 532 с.

109. Дзюндзюк Б.В. Методы расчета радиопоглощающих материалов / Б.В. Дзюндзюк // Зарьк. ин-т радиоэлектроники. – Харьков, 1987. – 150 с. Депон. Укр. НИИНТИ 22.01.87. № 458 – Ук.87.

110. Фельд Я. Н. Основы теории антенн / Я. Н. Фельд, С. Бененсон. – М.: Дрофа. – 2007. – С. 491.

111. Дзюндзюк Б.В. Методы расчета радиопоглощающих материалов / Б. В. Дзюндзюк. – Харьков, 1987. – 150 с. – Деп.в УкрНИИНТИ 22.01.87, № 458, Ук.87.

112. А.с.1501325 СССР МКИ Н010. Экранирующая одежда / Б. В. Дзюндзюк, Э. И. Куликовский, В. И. Багров, А. А. Никитин, В. Д. Сахацкий (СССР). – № 4289037; заявл. 2.06.87.

113. Дзюндзюк Б.В. Основы безопасности эргатических систем / Б.В. Дзюндзюк. – Киев: УМКВО, 1990. – 56 с.

114. Сахацкий В.Д. О новых принципах конструирования и контроля качества средств индивидуальной защиты от электромагнитных излучений / В. Д. Сахацкий // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – 52/2(35). – С. 4 – 6 .

115. Стыценко Т.Е. Исследование характеристик радиозащитного костюма с постоянным коэффициентом защиты / Т. Е. Стыценко // Вестник НТУ ХПИ. – 2010. – № 44. – С.101 – 104.




ДОДАТОК А  
Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Начальник Головного центру  
спеціального контролю  
Голчонов І.В.

«18» 09 2016 р.



**АКТ**  
**про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового**  
**ступеня кандидата технічних наук**  
**Стиценко Тетяни Євгенівни**

Комісія у складі заступника начальника Головного центру (начальника центру застосування засобів спеціального контролю та науково-дослідної випробувальної роботи) Шапка В.М., завідувача автономного пункту сейсмічного контролю №5 «Харків», к.т.н., доц. Кошеля А.В., начальника відділу науково-дослідного, випробувального Головного центру спеціального контролю, к.ф.-м.н. Лящука О.І., наукового керівника здобувача, професора кафедри метрології та вимірювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки Семенця В.В. виконала перевірку і склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Стиценко Т.Є. «Розробка методів, засобів оцінки ефективності захисту людини від впливу випромінювань надвисокої частоти», забезпечують високі екрануючі властивості, а також дозволяють зменшити вимоги до параметрів у широкому діапазоні довжини хвилі.

Розробка резистивних поглинаючих матеріалів може бути використана для ефективного захисту людини від впливу електромагнітного випромінювання надвисокої частоти (на основі пінополістирола (EPS) з додаванням графіту). Це дозволяє реалізувати розрахункові закони зміни комплексної діелектричної проникності.

Розроблений Стиценко Т.Є. матеріал забезпечує найкращі коефіцієнти відбиття та поглинання у широкому діапазоні кутів падіння електромагнітної хвилі у нижній частині частотного спектру (10 ГГц – 75 ГГц).

Результати наукових досліджень Стиценко Т.Є. плануються до використання у Головному центрі спеціального контролю Державного космічного агентства України для розв'язання перспективних задач стосовно

впливу електромагнітного поля на біологічні системи в екстремальних умовах, а також у дослідженнях щодо створення адекватної за критерієм «ефективний захист/якість», системи захисту людини від негативних чинників електромагнітного випромінювання у різноманітних умовах життєдіяльності людини.

Акт складено для подання до спеціалізованої вченої ради, він не є підставою для фінансових розрахунків.

**Голова комісії**

Заступник начальника Головного центру  
(начальник центру застосування засобів  
спеціального контролю та науково-дослідної  
випробувальної роботи)

Шапка В.М.

**Члени комісії:**

Завідувач автономного пункту  
сейсмічного контролю №5 «Харків»,  
к.т.н., доц.

Кошель А.В.

Начальник відділу науково-дослідного,  
Випробувального Головного центру  
спеціального контролю  
к.ф.-м.н.

Лящук О.І.

Професор кафедри метрології та вимірювальної техніки  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки,  
д.т.н., проф.

Семенець В.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора з наукової роботи та маркетингу наукових досліджень д-р екон. наук, с.т.с. Дмитрієва О.О.

« 10 » 10



## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
 Стиценко Тетяни Євгенівни

Комісія у складі: наукового співробітника Лисова В.І., інженера І к. Колдоби І.В., наукового керівника здобувача, професора кафедри метрології та вимірювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки Семенця В.В. виконала перевірку і склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Стиценко Т.Є «Розробка методів, засобів оцінки ефективності захисту людини від впливу випромінювань надвисокої частоти», забезпечують високі екрануючі властивості, а також дозволяють зменшити вимоги до параметрів у широкому діапазоні довжини хвилі.

Розробка резистивних поглинаючих матеріалів може бути використана для ефективного захисту людини від впливу електромагнітного випромінювання надвисокої частоти (на основі пінополістирола (EPS) з додаванням графіту). Це дозволяє реалізувати розрахункові закони зміни комплексної діелектричної проникності.

Розроблений Стиценко Т.Є. матеріал забезпечує найкращі коефіцієнти відбиття та поглинання у широкому діапазоні кутів падіння електромагнітної хвилі у нижній частині частотного спектру (10ГГц – 75ГГц).

Результати наукових досліджень Стиценко Т.Є. плануються до використання у НАУКОВО – ДОСЛІДНІЙ УСТАНОВІ „Український науково-дослідний інститут екологічних проблем” (УкрНДІЕП) для розв’язання перспективних задач стосовно впливу електромагнітного поля на біологічні системи в екстремальних умовах, а також у дослідженнях щодо створення

адекватної за критерієм «ефективний захист/якість», системи захисту людини від негативних чинників електромагнітного випромінювання у різноманітних умовах життєдіяльності людини.

Акт складено для подання до спеціалізованої вченої ради, він не є підставою для фінансових розрахунків.

**Голова комісії**

Науковий співробітник



Лисов В.І.

**Члени комісії:**

Інженер I кат.



Колдоба І.В.

Професор кафедри метрології та вимірювальної техніки  
Харківського національного  
університету радіоелектроніки,  
д.т.н., проф.



Семенець В.В.

ЗАТВЕДЖУЮ

Начальник Національної академії  
Національної гвардії України  
к.пед.н., доцент

В.І. Пеньков

20 листопада 2016 р.

Код 08610502

**АКТ****впровадження результатів дисертаційних досліджень  
Стиценко Тетяни Євгенівни  
у Національній академії Національної гвардії України**

Комісія у складі голови комісії к.т.н., доцента А.П. Горбунова і членів комісії к.військ.н., доцента І.М. Майбороди, к.т.н., доцента В.П. Бабенка встановила, що у навчальному процесі Національної академії Національної гвардії України використаний наступний результат, який одержаний здобувачем кафедри «Охорона праці» Харківського національного університету радіоелектроніки Стиценко Тетяною Євгенівною у процесі виконання дисертаційних досліджень за темою «Розробка методів, засобів оцінки ефективності захисту людини від впливу випромінювань надвисокої частоти», а саме:

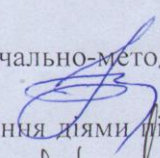
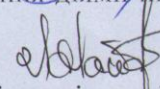
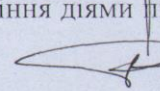
1. Резистивний поглинаючий матеріал на основі пінополістирола з додаванням графіту, який дозволяє реалізувати розрахункові закони зміни комплексної діелектричної проникненості.

Резистивний поглинаючий матеріал використовується при проведенні практичних видів занять з навчальних дисциплін «Технічна електроніка» та «Антенни та поширення радіохвиль».

Розроблений Стиценко Т.Є. матеріал забезпечує найкращі коефіцієнти відбиття та поглинання у широкому діапазоні кутів падіння електромагнітної хвилі у нижній частині частотного спектру (10-75 ГГц).

Крім того, матеріал забезпечує високі екрануючі властивості, а також має малу товщину у широкому діапазоні довжини хвилі.

Розроблений матеріал може бути використаний для ефективного захисту людини від впливу електромагнітного випромінювання надвисокої частоти.

Голова комісії –	заступник начальника навчально-методичного центру		А.П. Горбунов
Члени комісії:	завідувач кафедри управління діями підрозділів із засобами військового зв'язку		І.М. Майборода
	професор кафедри управління діями підрозділів із засобами військового зв'язку		В.П. Бабенко



10.06.16 № 426/003

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Директор ДП «ЦКБ «Протон»



О.І. Вотяков

10 червня 2016р.

### АКТ

реалізації результатів дисертаційних досліджень

Стиценко Тетяни Євгенівни

Комісія в складі: голови – заступника директора ДП «ЦКБ«Протон» Герасименко В.В., і членів комісії – заступника головного інженера Осипчука А. А., інженер з охорони праці Бутко В.П., встановила, що в ДП «ЦКБ«Протон» при виконанні науково-дослідних робіт, щодо розробки перспективних засобів зв'язку та телекомунікації, визначення шляхів модернізації розроблених засобів, вивчення напрямків удосконалення виробничої бази підприємства використані наступні результати наукових досліджень Стиценко Т.Є. за темою „ Розробка методів, засобів оцінки ефективності захисту людини від впливу випромінювання надвисокої частоти”, а саме :

- розроблений засіб виготовлення матеріалу з використанням багат шарових погливачів, які складаються з комбінацій однорідних та неоднорідних шарів та надають можливість збільшення коефіцієнта поглинання у спектрі частот (10ГГц - 75ГГц) при малих розмірах товщини поглинаючого матеріалу, що дозволяє підвищити ефективність захисту людини від впливу випромінювання надвисокої частоти;

- удосконалений захисний одяг, розроблений з урахуванням слабо захищених частин тіла людини завдяки збільшенню товщини екранування даних частин, що забезпечує однакову ступінь ослаблення електромагнітного випромінювання 9 дБ на всіх частинах захисного одягу.

Голова комісії:

Заступник директора з виробництва

Члени комісії:

заступник головного інженера

інженер з охорони праці



Герасименко В.В.

Осіпчук А.А.

Бутко В.П.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Харківського  
національного університету  
радіоелектронікиКлючник І.І.  
2016р.

щодо впровадження в учбовий процес Харківського національного університету радіоелектроніки результатів наукових досліджень кандидатської дисертаційної роботи Стиценко Тетяни Євгенівни за темою «Розробка методів, засобів оцінки ефективного захисту людини від впливу випромінювань надвисокої частоти»

Комісія у складі:

Голова комісії:

доцент кафедри охорони праці,  
к.т.н.Березуцька Н.Л.

Члени комісії:

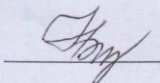
доцент кафедри охорони праці,  
к.т.н.Пронюк Г.В.  
доцент кафедри охорони праці,  
к.т.н. Фролов А.В.  
старший викладач кафедри охорони праці  
Хондак І.І.

розглянула результати наукових досліджень та прийняла рішення щодо впровадження їх в учбовий процес кафедри охорона праці, а саме при викладанні дисциплін «Безпека життєдіяльності», «Охорона праці в галузі та безпека в надзвичайних ситуаціях» для спеціалістів та магістрів спеціальності біомедичних електронних пристроїв.

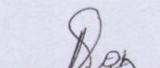
Отримані в роботі нові результати, які стосуються колективних методів та засобів захисту людини від дії електромагнітного випромінювання надвисокої частоти (в т.ч. медичних працівників), а саме використанню для екранування багат шарових поглинаючих матеріалів, які складаються з комбінацій однорідних та неоднорідних шарів . З індивідуальних засобів захисту – захисний одяг, виготовлений з матеріалу який зменшує поглинаючу дозу випромінювання найбільш уразливих частин організму людини.

Отримані результати дозволяють суттєво підвищити рівень викладання матеріалу за вказаними вище дисциплінами.

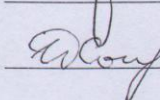
Голова комісії:


 \_\_\_\_\_ Н.Л.Березуцька

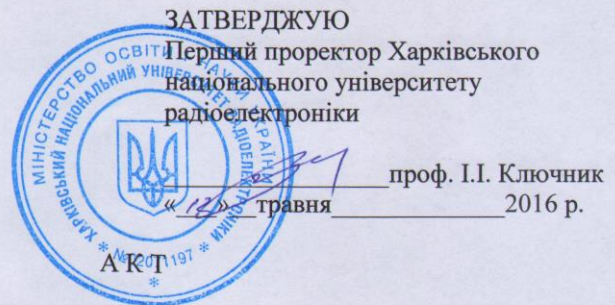
Члени комісії:


 \_\_\_\_\_ Г.В.Пронюк


 \_\_\_\_\_ А.В.Фролов


 \_\_\_\_\_ І.І.Хондак





ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Харківського  
національного університету  
радіоелектроніки

проф. І.І. Ключник

12 травня 2016 р.

щодо впровадження в навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки результатів досліджень кандидатської дисертаційної роботи Стіценко Тетяни Євгенівни за темою «Розробка методів, засобів оцінки ефективного захисту людини від впливу випромінювань надвисокої частоти»

Комісія у складі:

Голови комісії:

Членів комісії:

Завідувача кафедри біомедичної інженерії  
д.фіз.-мат.н., професора А.І. Биха,  
професора кафедри біомедичної інженерії  
д.т.н., професора І.В. Прасола,  
доцента кафедри біомедичної інженерії  
к.т.н., доцента О.М. Величко,  
доцента кафедри, біомедичної інженерії  
к.т.н., доцента Л.О. Авер'янової

розглянула результати наукових досліджень та прийняла рішення щодо впровадження їх в навчальний процес кафедри біомедичної інженерії, а саме при викладанні дисциплін «Основи взаємодії фізичних полів з біологічними об'єктами» (застосування методики розрахунку поглинаючої дози для багаточислової моделі та забезпечення заданого рівня потужності поглинання електромагнітного випромінювання), «Діагностичні та терапевтичні прилади» (обґрунтування та розрахунок параметрів електромагнітного поля при розробці фізіотерапевтичної та діагностичної техніки).

В роботі отримані нові результати, які стосуються колективних та індивідуальних засобів захисту людини від впливу електромагнітного випромінювання надвисокої частоти, а саме зменшенню поглинаючої дози найбільш вразливих органів організму людини до допустимих середніх рівнів з рівноеквівалентним захистом. Даний ефект досягається використанням захисного матеріалу, який зменшує поглинаючу дозу органів людини до допустимих значень за рахунок кінцевої провідності, а також застосуванням багаточислових поглиначів, які складаються з комбінацій однорідних та неоднорідних шарів. Такі поглиначі показали можливість збільшення коефіцієнта поглинання при досить малій товщині матеріалу.

Отримані результати дозволяють суттєво підвищити рівень викладання фахових дисциплін для студентів та аспірантів спеціальності «Біомедична інженерія», а також можуть бути використані при виконанні бакалаврських та магістерських атестаційних робіт.

Голова комісії:

Члени комісії:

А.І. Бих

І.В. Прасол

О.М. Величко

Л.О. Авер'янова



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНИКИ

61166, пр. Леніна, 14, м. Харків, тел. 7021-413

02.06.2010 № 54.06/27-1025  
на № \_\_\_\_\_

Утверждаю

Проректор ХНУРЕ  
по научной работе  
проф. Слипенко Н.И.



2010

## ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

на техническое решение по разработке микроволновой установки восстановления сыпучести дисперсного смерзающегося сырья, транспортируемого в зимнее время в железнодорожных вагонах.

Настоящее экспертное заключение составлено экспертами Харьковского Национального университета радиоэлектроники (ХНУРЕ)

Дзюндзюк Борис Васильевич, д.т.н. проф. - заведующий кафедрой охраны труда,

доц. Наумейко Игорь Владимирович,

ст.пр. Стыщенко Татьяна Евгеньевна

в соответствии с договором на выполнение научно-технических услуг „Проведения експертизи технічних рішень системи захисту персоналу та навколишнього середовища від впливу електромагнітного випромінювання надзвичайно високих частот промислового устаткування по конструкторській документації комплексу відновлення сипучості змерзлої руди у залізничних вагонах на СхідГок” от « 3 »\_06\_2010г. Организация заявитель ООО «НПП ВЕПОЛ» г.Днепропетровск.

1. Перечень документации, представленной на экспертизу:

- 1.1. Техническое предложение исполнителя ООО «НПП ВЕПОЛ»;
- 1.2. Технические требования Заказчика ГМЗ ГП «ВостГОК»;



- 1.3. Копия патента № 66022А авторов Буртового Д.П., Хохули Д.Ю. и др. «Спосіб відновлення сипучості матеріалів, що змерзлися»;
- 1.4. Протокол намерений о совместном выполнении предпроектных работ ООО «НПП ВЕПОЛ» и ОАО «Днепротяжмаш»;
- 1.5. Технические данные установки и комплект рабочей конструкторской документации.

2. Общие технические характеристики и функциональные показатели продукции (оборудования), документация по которой представлена на экспертизу:

2.1. Микроволновая установка восстановления сыпучести (МУВС) предназначена для обработки навалочных сыпучих материалов, находящихся в железнодорожных вагонах (ж.д.в.) в смерзшемся состоянии, микроволновым (МВ) электромагнитным полем (ЭМП) с целью восстановления его сыпучести для выгрузки из ж.д.в.

2.2. Исходные данные для выполнения работы

2.2.1. Количество разгружаемых вагонов в сутки – 80 ваг.

2.2.2. Масса загрузки 1-го вагона – 67 т, влажность – 5 %.

2.2.3. Дисперсность загружаемого рудного материала – 0÷300 мм.

2.2.4. Минимальная температура рудного сырья – -25°С.

2.2.5. Максимальное время от загрузки до выгрузки вагона – 48 час.

2.3. МУВС располагается до зоны работы роторного вагоноопрокидывателя.

2.4. Виды обрабатываемого сырья

2.4.1 Ураносодержащая руда.

3. Функциональные показатели оборудования и документация, требующие подтверждения соответствия отраслевым требованиям и требованиям пользователя оборудования:

3.1. Установка должна обеспечивать бесперебойное освобождение железнодорожных вагонов от МС при необходимом грузопотоке, проходящего через роторный вагоноопрокидыватель. Максимальное время размораживания не более 15 минут при  $t^{\circ}$  до -25 °С.

3.2. Основные технические характеристики МУВС

3.2.1. Рабочая частота микроволнового генератора, МГц

915;

3.2.2. Мощность установленная электрическая, кВт.

200...300;

3.2.3. Мощность установленная микроволновая, кВт

150

3.2.4. Режим работы

круглосуточный.

4. Перечень отраслевых документов, содержащих требования к функциональным показателям оборудования и дополнительные требования пользователя оборудования, на соответствие которым проводится экспертиза:

4.1. Предельно допустимое значение плотности потока мощности электромагнитного излучения при работе МУВС должно удовлетворять требованиям ГОСТ 12.1.006-84 «СИСТЕМА



СТАНДАРТОВ БЕЗОПАСНОСТИ ТРУДА. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ РАДИОЧАСТОТ. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля», а также Наказу Министерства охраны здоров'я № 476 от 18.12.2002 «Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів».

4.2. Ввиду возможного использования данной технологии на аналогичных производствах вне Украины, и согласно приказа Державного комітету України з питань технічного регулювання та споживчої політики № 376 от 15-10-2009 „Про надання чинності в Україні міждержавним стандартам, змінам до міждержавних стандартів та скасування нормативних документів” и приложений к нему, проводилась экспертиза соответствия международному стандарту IEC 60519-6:1982 "Safety in electro-heat installations. Part 6: Specifications for safety in industrial microwave heating equipment" и российскому: «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА (ЭМИ РЧ) RADIOFREQUENCY ELECTROVAGNETIC RADIATION (RF EMR) UNDER OCCUPATIONAL AND LIVING CONDITIONS Санитарные правила и нормы» СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96.

4.3. По характеру условий труда следует также использовать : «Система стандартов безопасности труда Средства защиты работающих» ГОСТ 12.4.011-89.

5. Краткое описание методов, использованных при проведении экспертизы.

При проведении экспертизы выполнялась проверка предоставленной документации на актуальность и новизну технического решения, и соответствие условий труда и норм защиты окружающей среды требованиям документов, перечисленных в пп.4.1.-4.3.

6. На основании изучения представленных документов и анализа технических возможностей современной микроволновой технологии эксперты пришли к следующим выводам:

6.1. Восстановление сыпучести дисперсного смёрзшегося сырья при разгрузке его из железнодорожных вагонов с использованием микроволновой энергии без фазового перехода лёд-жидкость является технически реализуемым.

6.2. Данная технология не требует тепляков, газа, пара, расхода горячего воздуха, невынужденных простоев и зачистки вагонов, других непроизводственных потерь. Для внедрения технологии требуется установка микроволнового оборудования перед роторным вагонопрокидывателем. Для разгрузки 1000 вагонов в месяц при температуре до -25°C достаточно установить 1 микроволновой генератор мощностью 75 кВт на 1 роторный вагонопрокидыватель. Для увеличения количества разгружаемых вагонов достаточно пропорционально увеличить мощность микроволновых генераторов.

6.3. Предлагаемое техническое решение обладает патентной новизной, является ресурсо-энерго-сберегающим и экологичным.

6.4. При выполнении предпроектных работ необходимо выполнить требования ГОСТ 12.1.006-84, IEC60519-6.02 и СНИП №848-70.

6.5. Конструкции, применяемые для обеспечения замкнутости объема аппликаторов (гибкие скользящие контакты, четвертьволновые дроссели, формирование запредельных участков) автоматически выполняют роль защитных элементов.

6.6. Использование поглощающих покрытий экранов настоятельно рекомендуется, поскольку является преимущественно защитной мерой. В этом случае конструктивы в предлагаемом исполнении обеспечат требуемые уровни ЭМ излучений не только на рабочем месте оператора и в зонах возможного появления людей, но и в непосредственном окружении МУВС.



6.7. Выбор оптимальных режимов работы опытно-промышленного образца МУВС осуществляется в реальных условиях производства.

Зав.кафедрой охраны труда  
д.т.н., проф. Дзюндзюк Б.В.

к.т.н., доцент Наумейко И.В.

ст.пр. Стыщенко Т.Е.

*Б. Дзюндзюк*

*И. Наумейко*

*Т. Стыщенко*

## ДОДАТОК Б

## Список публікацій здобувача

1. Стыценко Т.Е. Критерии и способы оптимального размещения датчиков контрольно–измерительной аппаратуры / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк, М.И. Пацера // Вестник национального технического университета ХПИ. –2006.– №10.–С.47–51.
2. Стыценко Т.Е. Структуры и типы моделей систем «человек–машина–среда» / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк, И.В. Наумейко, Н.Н. Сердюк. // АСУ и приборы автоматики. – 2007.– № 138.– С.47–50.
3. Стыценко Т.Е. Безопасность работы при использовании различных видов мониторов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк, И.И. Хондак // Вестник национального университета ХПИ. – 2008.–№ 43.– С.94–98.
4. Стыценко Т.Е. Критерии и методы оптимизации систем с защитой / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Восточно–Европейский журнал передовых технологий. – 2008.– 2/3(32).– С.10–13.
5. Стыценко Т.Е. Исследование характеристик радиозащитного костюма с постоянным коэффициентом защиты // Т.Е. Стыценко Вестник НТУ ХПИ. –2010.– № 44.– С. 101–104.
6. Стыценко Т.Є. Системний підхід до інформаційного забезпечення охорони праці // Т.Є. Стыценко Вестник Харьковского национального автомобильно–дорожного университета. – 2012.– Вып. 59.– С. 155 – 157.
7. Стыценко Т.Е. Подходы к обеспечению безопасности жизнедеятельности в современных условиях // Т.Е. Стыценко Збірка наукових статей, що видана за матеріалами VII–ї міжнародної науково–методичної конференції НТУ «ХПІ» та 105–ї міжнародної конференції EAS «Безпека людини в сучасних умовах». – 2015.– С. 76 – 80.
8. Стыценко Т.Е. Разработка материала для защиты медицинского персонала от воздействия излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Во-

- сточно–Европейский журнал передовых технологий – 2016. – № 2/5(80).– С. 30–37.
9. Стыценко Т.Е. Анализ электромагнитной обстановки и моделирование источников паразитных излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Радиотехника. – 2016.– № 184.– С. 155–163.
  - 10.Стыценко Т.Е. Разработка биомедицинской системы жизнедеятельности при воздействии электромагнитных излучений / В.В. Семенец, Т.Е. Стыценко // Системи обробки інформації. – 2016.– № 8(145).– С. 139–144.
  - 11.Stytsenko T.E, Semenets V.V Analysis of electromagnetic and modeling of spurious radiation sources / T.E.Stytsenko, V.V.Semenets // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016, Vol. 75, Issue 15. – PP. 1385–1396.
  12. Стыценко Т.Е. К вопросу о проектировании систем защиты от воздействия вредных факторов / Б.В. Дзюндзюк, П.Н. Маслов // Научно–методическая конференция по БЖД, 27–28 ноября 2001г., материалы конф. – Х., 2001. – С. 68 – 70.
  - 13.Стыценко Т.Е. Обеспечение электромагнитной безопасности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Сборник тезисов доклада по материалам международной научной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации», г. Туапсе, 2004. – С. 277 – 278.
  - 14.Стыценко Т.Е. Воздействие электромагнитных излучений на зрительный анализатор человека, средства защиты / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Тезисы докладов на научно–методическую конференцию по БЖД, ноябрь 2005 г.: материалы конф. – Харьков, 2005. – С. 113 – 114.
  - 15.Стыценко Т.Е. Оперативная система управления условиями труда / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Межвузовская научно–техническая конференция «Психологічні та технічні проблеми безпеки праці, життя та здоров'я людини» 2005 г.: матеріали конф. – Полтава, 2005 г.– С. 18 – 19.



- 16.Стыценко Т.Е. Безопасность человека при работе с компьютерами // Т.Е. Стыценко 6 региональная методическая конференция НТУ ХПИ «Безопасность жизнедеятельности человека», г. Харьков, 06.12.2006 г. – С.76–77.
17. Стыценко Т.Е. Расчет эффективности экранирования сплошными металлическими экранами// Т.Е. Стыценко Тезисы докладов 7–й региональной научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. – 2007. – НТУ ХПИ, 41 с.
- 18.Стыценко Т.Е. Структура экспертной системы контроля и управления условиями труда / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Тезисы докладов 8–й региональной научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. – 2008. – НТУ ХПИ, г. Харьков. – 2008. – С. 132 – 133.
- 19.Стыценко Т.Е. Уменьшение влияния электромагнитных полей на человека за счет применения поглощающих экранов // Т.Е. Стыценко Тезисы докладов 7–й региональной научно–методической конференции «Безпека життєдіяльності», г. Харьков. –2007. – НТУ ХПИ, С. 51 – 52.
- 20.Стыценко Т.Е. Уменьшение влияния электромагнитных полей при помощи радиопоглощающих экранов // Т.Е. Стыценко Тези доповідей 8–ї Міжвузівської науково–методичної конференції «Безпека людини в сучасних умовах» 4–5 грудня, НТУ ХПИ, м. Харків. – 2008 р.– 55с.
- 21.Стыценко Т.Е. Определение плотности потока энергии в специальных помещениях / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк //Міжнародно–науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», м. Харків, НТУ ХПИ 3 – 4 грудня, 2009 р.– С. 85 – 86.
22. Стыценко Т.Е. К вопросу о разработке радиозащитных костюмов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк //Міжнародно–науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», м. Харків, НТУ ХПИ 3–4 грудня, 2009 р. – С. 65 – 66.

- 23.Стыценко Т.Е. К вопросу о нормировании комплекса вредных производственных факторов / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // II Міжнародна науково– методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 2 – 3 грудня, 2010 р.– м. Харків. – С. 273 – 274.
- 24.Стыценко Т.Е. Некоторые вопросы защиты от воздействия электромагнитных полей / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // II Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 2 – 3 грудня, 2010 р.– м. Харків. – С. 229 – 231.
- 25.Стыценко Т.Е. Эффективность экранирования – как средство обеспечения безопасности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // III Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 8 – 9 грудня, 2011р.– м. Харків. – С. 166 – 168.
- 26.Стыценко Т.Е. Безопасность человека – главная составляющая здоровья // Т.Е. Стыценко VI Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 6 – 7 грудня, 2012р.– м. Харків. – С. 106 – 107.
- 27.Стыценко Т.Е. Экономико–математическое моделирование систем безопасной жизнедеятельности / Т.Е. Стыценко, Б.В. Дзюндзюк // Международная научно–практическая конференция «Математическое моделирование процессов в экономике и управлении инновационными проектами» (ММП – 2013), г. Харьков. – С. 54 – 55.
- 28.Стыценко Т.Е. Безопасность жизнедеятельности при использовании радиотехнических систем // Т.Е. Стыценко VI Міжнародна науково–методична конференція «Безпека людини в сучасних умовах», 4 – 5 грудня, 2014р.– м. Харків. – С. 285 – 287.