



**Міністерство освіти і науки України**  
**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет енергетики та комп'ютерних технологій**  
**Кафедра електромеханіки, електротехніки, біомедичної**  
**інженерії та теоретичної електротехніки**

**МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ**  
**ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ З БІОЛОГІЧНИМИ**  
**ОБ'ЄКТАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ, ОЦІНКИ ЇХ СТАНУ ТА**  
**ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ**

**Методичні вказівки**  
**щодо проведення практичної та самостійної роботи**

**для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти**  
**спеціальності 163 «Біомедична інженерія»**

**Харків**  
**2025**

Міністерство освіти і науки України  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет енергетики та комп'ютерних технологій  
Кафедра електромеханіки, електротехніки, біомедичної інженерії та  
теоретичної електротехніки

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ  
ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ З БІОЛОГІЧНИМИ  
ОБ'ЄКТАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ, ОЦІНКИ ЇХ СТАНУ ТА ПІДВИЩЕННЯ  
ПРОДУКТИВНОСТІ

Методичні вказівки  
щодо проведення практичної та самостійної роботи

для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності  
163 «Біомедична інженерія»

Затверджено рішенням НМК ФЕРКТ

Протокол № 2 від 26 грудня 2024 р.

Харків 2025

УДК 519.87:577.3:637.8](072)

М 32

Схвалено на засіданні кафедри ЕРБМІЕ

Протокол № 6 від 4 грудня 2024 р.

**Рецензенти:**

*О. Г. Аврунін*, докт. техн. наук, проф., завідувач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки;

*О. М. Мороз*, докт. техн. наук, проф., професор кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Державного біотехнологічного університету.

**М 32**

Математичні методи, моделі взаємодії електромагнітного поля з біологічними об'єктами для контролю, оцінки їх стану та підвищення продуктивності: методичні вказівки щодо проведення практичної та самостійної роботи для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 163 «Біомедична інженерія». Держ. біотехнол. ун-т; уклад.: Н. Г. Косуліна, М. Л. Лисиченко. – Харків: [б. в.], 2025. – 33 с.

У методичних вказівках надано роз'яснення для проведення самостійних та практичних робіт до змістового модуля 2 для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 163 «Біомедична інженерія». Представлено теоретичне та практичне застосування математичного моделювання на основі електромагнітного випромінювання.

УДК 519.87:577.3:637.8](072)

Відповідальний за випуск: Н. Г. Косуліна

© Державний біотехнологічний університет, 2025

© Н. Г. Косуліна, М. Л. Лисиченко,  
2025



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕМИ САМОСТІЙНИХ ТА ПРАКТИЧНИХ РОБІТ ДО ЗМІСТОВОГО МОДУЛЯ 2.....	7
ТЕОРЕТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	7
ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	12
ТЕМИ НА САМОСТІЙНУ РОБОТУ.....	31

## ВСТУП

**Мета курсу** – формування професійних компетентностей з математичних методів, моделей взаємодії електромагнітного поля з біологічними об'єктами для контролю, оцінки їх стану та підвищення продуктивності у наукових дослідженнях.

**Завдання курсу** – формування аналітичного підходу до наукових досліджень в сфері біомедичної інженерії на основі використання математичного моделювання взаємодії електромагнітного поля з біологічними об'єктами.

У результаті вивчення курсу здобувачі повинні **знати**: основи побудови і оцінки математичних моделей, шляхи їх аналізу та удосконалення, методи використання інформаційних технологій у біомедичних дослідженнях; застосовувати математичні методи для опису процесів життєдіяльності біологічних об'єктів; основи методики моделювання функціонування біосистем органів та процесів в живих організмах. **вміти**: будувати математичні моделі процесів та явищ у науковому пошуку з використанням систем комп'ютерної математики, застосовувати ці навички у експериментальних дослідженнях, аналізувати одержані результати; застосовувати математичні методи для опису процесів життєдіяльності людини і тварин; розробляти моделі функціонування біотехнічних систем; створювати моделі, в тому числі імітаційні, різних органів, систем, які допомагають поглиблено вивчати процеси, що відбуваються в живих організмах на основі електромагнітних явищ.

### *Програмні компетентності:*

**ЗК1.** Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

**ЗК2.** Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

**ЗК3.** Здатність працювати в міжнародному контексті.

**ЗК4.** Здатність розв'язувати комплексні проблеми біомедичної інженерії на основі системного наукового світогляду та загального культурного кругозору з дотриманням принципів професійної етики та академічної доброчесності.

**СК1.** Здатність планувати та виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у біомедичній інженерії та дотичних до неї міждисциплінарних напрямках і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з біомедичної інженерії, біоінженерії, медицини та суміжних галузей.

**СК2.** Здатність усно і письмово презентувати та обговорювати результати наукових досліджень та/або інноваційних розробок в біомедичній інженерії українською та англійською мовами, глибоке

розуміння англомовних наукових текстів за напрямом наукових досліджень.

**СК3.** Здатність застосовувати нові технології та інструменти, сучасні цифрові технології, медичні бази даних та інші ресурси, спеціалізоване програмне забезпечення у науковій та навчальній діяльності.

**СК4.** Здатність ініціювати, розробляти і реалізовувати комплексні інноваційні проекти в сфері біомедичної інженерії та дотичні до неї міждисциплінарні проекти, лідерство під час їх реалізації.

**СК5.** Здатність обґрунтовувати та захищати методологію та результати досліджень і проекти у сфері біомедичної інженерії.

**СК6.** Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми дослідницького характеру в сфері біомедичної інженерії, оцінювати та забезпечувати якість виконуваних досліджень.

**СК7.** Здатність здійснювати науково-педагогічну діяльність у вищій освіті.

**СК8.** Здатність застосовувати електромагнітні поля для впливу на біологічні об'єкти для контролю, оцінки їх стану та підвищення продуктивності.

**СК9.** Здатність розробляти пристрої і систем на основі електромагнітного випромінювання.

#### *Програмні результати навчання:*

**РН1.** Мати передові концептуальні та методологічні знання у сфері біомедичної інженерії і на межі предметних галузей, а також дослідницькі навички, достатні для проведення наукових і прикладних досліджень на рівні світових досягнень з біомедичної інженерії, отримання нових знань та здійснення інновацій.

**РН2.** Глибоко розуміти загальні принципи та методи біомедичної інженерії, а також методологію наукових досліджень, застосувати їх у власних дослідженнях у сфері біомедичної інженерії та у викладацькій практиці.

**РН3.** Формулювати і перевіряти гіпотези; використовувати для обґрунтування висновків належні докази, зокрема, результати теоретичного і аналізу, експериментальних досліджень і математичного та/або комп'ютерного моделювання, наявні літературні дані.

**РН4.** Розробляти та досліджувати концептуальні, математичні і комп'ютерні моделі процесів і систем, ефективно їх використовувати для отримання нових знань та/або створення інноваційних продуктів у біомедичній інженерії та дотичних міждисциплінарних напрямках.

**РН5.** Планувати і виконувати експериментальні та/або теоретичні дослідження з біомедичної інженерії та дотичних міждисциплінарних напрямів з використанням сучасних інструментів та дотриманням норм професійної і академічної етики, критично аналізувати результати власних досліджень і результати інших дослідників у контексті усього комплексу

сучасних знань щодо досліджуваної проблеми.

**РН6.** Застосовувати сучасні інструменти і технології пошуку, оброблення та аналізу інформації, зокрема, статистичні методи аналізу даних великого обсягу та/або складної структури, спеціалізовані бази даних та інформаційні системи.

**РН7.** Розробляти та реалізовувати наукові та/або інноваційні інженерні проєкти, які дають можливість переосмислити наявне та створити нове цілісне знання та/або професійну практику і розв'язувати значущі наукові та технологічні проблеми біомедичної інженерії з врахуванням соціальних, економічних, екологічних та правових аспектів.

**РН8.** Досліджувати, розробляти, застосовувати, вдосконалювати та впроваджувати наукові та інженерні рішення, засоби, методи та технології для вирішення проблем медичної та біомедичної інженерії.

**РН9.** Вирішувати комплексні проблеми біоінженерії для створення або заміни клітин, тканин та органів людського тіла, для вдосконалення і корекції їх функцій, розробки на цій основі лікувальних і діагностичних технологій, засобів і систем.

**РН10.** Вільно презентувати та обговорювати з фахівцями і нефаківцями результати досліджень, наукові та прикладні проблеми біомедичної інженерії державною та іноземною мовами, оприлюднювати результати досліджень у наукових публікаціях у провідних наукових виданнях.

**РН11.** Складати пропозиції щодо міжнародного наукового співробітництва, а також щодо фінансування наукових досліджень у сфері біомедичної інженерії.

**РН12.** Організовувати і здійснювати освітній процес у сфері біомедичної інженерії, його наукове, навчально-методичне та нормативне забезпечення, застосувати ефективні методики викладання навчальних дисциплін.

**РН13.** Досліджувати і використовувати електромагнітні явища для контролю, оцінки й поліпшення стану біологічних об'єктів у агропромисловому комплексі, створення систем електромагнітного та електроакустичного впливу на них.

**РН14.** Вміти застосовувати знання принципів побудови сучасних пристроїв та систем на основі електромагнітного випромінювання, засобів автоматизації біомедичного обладнання, методів та принципів отримання та обробки сигналів та зображень біологічних об'єктів.



**ТЕМИ САМОСТІЙНИХ та ПРАКТИЧНИХ РОБІТ  
ДО ЗМІСТОВОГО МОДУЛЯ 2**

**ТЕОРЕТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ  
МАТЕМАТИНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

**№1. ЕЛЕМЕНТИ ВЕКТОРНОГО АНАЛІЗУ**

- 1.1. Основні теоретичні відомості
- 1.2. Розв'язання типових задач
- 1.3. Задачі для самостійного розв'язання

*Питання для контролю*

1. В який спосіб обчислюється градієнт
2. Формула Стокса.
3. Як обчислюють дивергенцію векторного поля  $A$
4. Як записується у декартовій системі координат оператор Гамільтона.
5. Як записується оператор Лапласа в різних координатних системах.

**№2. РІВНЯННЯ МАКСВЕЛЛА**

- 2.1. Основні теоретичні відомості
- 2.2. Розв'язання типових задач
- 2.3. Задачі для самостійного розв'язання

*Питання для контролю*

1. На чому базується класична теорія електромагнетизму.
2. Як записується система рівнянь Максвелла в диференціальній формі для вакуум.
3. Які фундаментальні фізичні константи містять рівнянь Максвелла.
4. Як розраховується вектор густини струму зміщення.
5. Як розраховується струм провідності з об'ємною густиною.
6. Як розраховується електричний струм поляризації з об'ємною густиною.
7. Як розраховується вектор намагніченості.
8. Як записуються рівняння Максвелла в диференціальній формі.
9. Як записуються рівняння Максвелла в інтегральній формі.
10. Як розраховується тангенси кутів діелектричних і магнітних втрат.
11. Як розраховується електричний струм з поверхневою густиною.
12. Запис теореми Пойнтінга.
13. Запис леми Лоренца.
14. Запис рівнянь Максвелла щодо комплексних амплітуд полів.

### №3. ПЛОСКІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХВИЛІ

3.1. Основні теоретичні відомості

3.2. Розв'язання типових задач

3.3. Задачі для самостійного розв'язання

*Питання для контролю*

1. Що таке плоскі електромагнітні хвилі.
2. Як визначають рівняння Гельмгольца.
3. Як визначають розв'язок рівняння Гельмгольца, який описує однорідну плоску хвилю.
4. Як визначають коефіцієнт поширення.
5. Як визначають коефіцієнт фази.
6. Як визначають коефіцієнт ослаблення.
7. Як визначають фазову швидкість.
8. Як визначають коефіцієнтом заломлення.
9. Як визначають характеристичний опір для немагнітних середовищ.
10. Як визначають характеристичний опір для вакууму.
11. Як визначається для гармонічних полів середнє значення вектора Пойнтінга.

### №4. ХВИЛЕВОДИ

4.1. Основні теоретичні відомості.

4.2. Розв'язання типових задач.

4.3. Задачі для самостійного розв'язання.

*Питання для контролю*

1. Що таке хвилевід.
2. Які хвилі можуть поширюватися в хвилеводі.
3. В якому випадку може у хвилеводі поширюватися конкретний тип хвилі.
4. Якою величиною визначається фазова швидкість хвилі у хвилеводі.
5. Як записується похідна від функції Бесселя.
6. Як визначається  $\lambda_{кр}$  – критична довжина хвилі, щодо розміру і форми поперечного перерізу хвилеводу.
7. Як визначається фазова швидкість хвилі у хвилеводі.
8. Як визначається довжина хвилі у хвилеводі.
9. Як визначається групова швидкість.
10. Який основний тип хвилі в прямокутному хвилеводі.
11. Якими рівняннями визначаються складові векторів поля основного типу хвилі.
12. Як визначається характеристичний опір  $Z_c$  для хвилі електричного типу.
13. Як визначається характеристичний опір  $Z_c$  для хвилі магнітного типу.

14. Як визначається потужність, яка переноситься хвилею типу  $H_{10}$  у прямокутному хвилеводі.

15. Як визначається потужність, яка переноситься хвилею типу  $H_{11}$  у круглому хвилеводі.

16. Як визначається коефіцієнт ослаблення внаслідок втрат у металевих стінках для будь-якої хвилі у хвилеводі довільного перерізу.

17. Як визначається коефіцієнт ослаблення внаслідок втрат у металевих стінках для хвиль типу  $H_{10}$  у прямокутному хвилеводі

## №5. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ХВИЛЕВОДИ

5.1. Основні теоретичні відомості.

5.2. Розв'язання типових задач.

5.3. Задачі для самостійного розв'язання.

*Питання для контролю*

1. Що називають поверхневими хвилями.

2. Що називають нескінченною діелектричною пластиною.

3. Як визначають складові векторів поля хвилі типу  $E$  поза пластиною ( $|x| > a$ ).

4. Як визначають складові векторів поля хвилі типу  $E$  усередині пластини ( $|x| < a$ ).

5. Як визначають характеристичні рівняння для парних хвиль типу  $E$ .

6. Як визначають характеристичні рівняння для непарних хвиль типу  $E$ .

7. Як визначають характеристичні рівняння для парних хвиль типу  $H$ .

8. Як визначають характеристичні рівняння для непарних хвиль типу  $H$ .

## №6. ЛІНІЇ ПЕРЕДАЧІ ІЗ ХВИЛЯМИ $T$ -ТИПУ

6.1. Основні теоретичні відомості.

6.2. Розв'язання типових задач.

6.3. Задачі для самостійного розв'язання.

*Питання для контролю*

1. Що називають поперечними електромагнітними хвилями.

2. Як визначають характеристичний опір хвилі типу  $T$  в лінії без втрат.

3. Як визначають фазову швидкість у лінії передачі із хвилею типу  $T$ .

4. Як визначають потужність, що переноситься хвилею через лінію передачі.

5. Як визначають коефіцієнт ослаблення  $\alpha$  хвилі.

6. Що називають коаксіальною лінією передачі.

7. Як визначають комплексну амплітуду вектора  $E$  біжучої хвилі в коаксіальній лінії передачі без втрат.

8. Як визначають параметри коаксіальної лінії передачі на одиницю довжини.

9. Як визначають хвильовий опір коаксіальної лінії передачі.

10. Як визначають потужність передачі.

11. Як визначають коефіцієнт ослаблення хвилі типу  $T$  у коаксіальній лінії передачі.
12. Що називають смужковою лінією передачі.
13. Як визначають питомі ємності для несиметричної смужкової лінії передачі.
14. Як визначають хвильові опори з урахуванням товщини струмонесучого провідника для несиметричної лінії передачі.
15. Як визначають хвильові опори без урахування товщини провідника визначаються співвідношеннями: для несиметричної лінії передачі.
16. Як визначають хвильові опори без урахування товщини провідника визначаються співвідношеннями для симетричної лінії передачі.
17. Як визначається через несиметричну смужкову лінію передачі потужність.
18. Як визначається коефіцієнт ослаблення, обумовлений втратами в провідних пластинах несиметричної смужкової лінії передачі.

## №7. ОБ'ЄМНІ РЕЗОНАТОРИ

- 7.1. Основні теоретичні відомості.
- 7.2. Розв'язання типових задач.
- 7.3. Задачі для самостійного розв'язання.

### *Питання для контролю*

1. Що називається об'ємним резонатором та основні характеризуючі величини.
2. Що називається прямокутним об'ємним резонатором та основні характеризуючі величини.
3. Що називається циліндричним об'ємним резонатором та основні характеризуючі величини.

## №8. ЗБУДЖЕННЯ ЗАМКНЕНИХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

- 8.1. Основні теоретичні відомості.
- 8.2. Розв'язання типових задач.
- 8.3. Задачі для самостійного розв'язання.

### *Питання для контролю*

1. Що називається збудженими хвилеводом.
2. Як визначається поле поза об'ємом у збудженому хвилеводі.
3. Як визначається коефіцієнт збудження.
4. Як визначається потужність.
5. Що називається збудженим об'ємним резонатором.
6. Як визначається електромагнітне поле, збуджене в резонаторі.
7. Як визначається амплітудні коефіцієнти для коливань типу  $p$ .
8. Як визначається власна частота за великих значень добротності  $Q_p$  об'ємного резонатора.

## №9. ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

9.1. Основні теоретичні відомості.

9.2. Розв'язання типових задач.

9.3. Задачі для самостійного розв'язання.

*Питання для контролю*

1. Як визначається поширення електромагнітних хвиль для локального опису властивостей середовища.

2. Що називається однорідними ізотропними іонізованими середовищами.

3. Як визначається діелектрична проникність і провідність плазми якщо електричне поле відсутнє.

4. Як визначається коефіцієнт поширення плоскої монохроматичної хвилі в середовищі.

5. Що називається однорідними анізотропними середовищами.

6. Що називається гіротропними середовищами та основні характеризуючі величини.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Тема: «ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ МОНОХРОМАТИЧНОЇ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛИ З МОЛОЧНОЮ  
ЗАЛІЗОЮ СВИНОМАТОК»

1. Постановка електродинамічного завдання метод її розв'язання.
2. Аналітичне розв'язання задачі проходження електромагнітного поля в плоскошарове середовище.
3. Аналітичне рішення задачі про взаємодію електромагнітного поля зі шаруватим діелектричним циліндром.
4. Чисельний аналіз отриманих результатів визначення біотропних параметрів електромагнітного поля для лікування маститу свиней.

Рішення завдання про розподілу ЕМП в молочній залозі свиноматок, представленій у вигляді двошарового діелектричного кругового циліндра, пов'язане з рішенням рівнянь Максвелла в полярній системі координат.

Представимо рівняння Максвелла в цій системі координат і врахуємо, що вісь  $x$  співпадає з віссю циліндра. Тоді маємо:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_x^\partial}{\partial \varphi} = i k_0 H_r^\partial ; \quad \frac{\partial E_x^\partial}{\partial r} = -i k_0 H_\varphi^\partial ; \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r H_\varphi^\partial \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r^\partial}{\partial \varphi} = -i k_0 \varepsilon E_x^\partial ,$$

де  $H_r^\partial$ ,  $H_\varphi^\partial$ ,  $E_x^\partial$  – дифракційні компоненти магнітного і електричного поля в полярній системі координат;  $k_0 = \omega / c$  – хвильове число;  $c$  – швидкість світла.

З виразу (1) одержуємо, що компонента ЕП задовольняє рівнянню Гельмгольца:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial E_x^\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_x^\partial}{\partial \varphi^2} + k_0^2 \varepsilon E_x^\partial = 0. \quad (2)$$

Рішення рівняння (2) було одержано методом часткових областей і методом розділення змінних. В результаті рішення рівняння (2) напруженість ЕП в області ділянки молочної залози, ураженої маститом, представлено у вигляді:

$$E_x^\partial = \mathcal{F} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-i)^n \frac{c_{2n} d_{1n} - c_{1n} d_{2n}}{b_{1n} c_{2n} - d_{2n} b_{2n}} \left( b_{1n} J_n(k_4 r) + b_{2n} H_n^{(1)}(k_4 r) \right) e^{in\varphi}, \quad (3)$$

$$\text{де } \mathcal{F} = -0,5i \pi k_0 \sqrt{\varepsilon_4} b e^{ik_0 \sqrt{\varepsilon_3} h_3} T.$$

$$T = \frac{2A}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos \gamma_+ + \sqrt{\varepsilon_3} \cos \gamma_- + i \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}} \sin \gamma_- - i \sqrt{\varepsilon_2} \sin \gamma_+};$$

$$\gamma_{\pm} = k_0 \left[ h_1 \left( \sqrt{\varepsilon_3} - \sqrt{\varepsilon_2} \pm \sqrt{\varepsilon_1} \right) + \sqrt{\varepsilon_3} h_2 \right];$$

$$d_{1n} = H_n^{(1)'}(k_4 b) J_n(k_3 b) - \frac{k_3}{k_4} H_n^{(1)'}(k_4 b) J_n'(k_3 b);$$

$$d_{2n} = H_n^{(1)'}(k_4 b) H_n^{(1)}(k_3 b) - \frac{k_3}{k_4} H_n^{(1)}(k_4 b) H_n^{(1)'}(k_3 b);$$

$$c_{1n} = \frac{k_3}{k_4} J_n(k_4 b) J_n'(k_3 b) - J_n'(k_4 b) J_n(k_3 b);$$

$$c_{2n} = \frac{k_3}{k_4} J_n(k_4 b) H_n^{(1)'}(k_3 b) - J_n'(k_4 b) H_n^{(1)}(k_3 b);$$

$$b_{1n} = J_n(k_5 a) H_n^{(1)'}(k_4 a) - \frac{k_5}{k_4} J_n'(k_5 a) H_n^{(1)}(k_4 a);$$

$$b_{2n} = \frac{k_5}{k_4} J_n(k_4 a) J_n'(k_5 a) - J_n'(k_4 a) J_n(k_5 a).$$

де  $H_n$  і  $J_n$  – функції Ханкеля і Бесселя.

Для визначення біотропних параметрів ЕМП, що приводить до знищення патогенних мікроорганізмів в молочній залозі, було визначено середнє значення напруженості ЕП в області залози з патогенними мікроорганізмами.

$$E_{сер} = \frac{i \delta a e^{ik_3 h_3} T J_0(k_5 a)}{(a+b) \pi^2 k_0 b \left[ \sqrt{\varepsilon_3} H_0^{(1)}(k_3 a) J_1(k_5 a) - \sqrt{\varepsilon_3} H_1^{(1)}(k_3 a) J_0(k_5 a) \right]}, \quad (4)$$

$$\text{де}$$

$$T = \frac{A}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos \gamma_+ + \sqrt{\varepsilon_3} \cos \gamma_- + i \sqrt{\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_2}} \sin \gamma_- - i \sqrt{\varepsilon_2} \sin \gamma_+};$$

$$\gamma_{\pm} = k_0 \left[ h_1 \left( \sqrt{\varepsilon_3} - \sqrt{\varepsilon_2} \pm \sqrt{\varepsilon_1} \right) + \sqrt{\varepsilon_3} h_2 \right],$$

де  $A$  – амплітуда хвилі збудження;  $\varepsilon_1$  – відносна діелектрична проникність (ДП) шару шерсті;  $\varepsilon_2$  – відносна ДП шару шкіри;  $\varepsilon_3$  – відносна ДП шару м'яса;  $\varepsilon_4 = \varepsilon_5$  – відносна ДП молочної залози;  $h_1$  – товщина шару шерсті;  $h_2$  – товщина шару шкіри;  $h_3$  – відстань від нижньої межі шару шкіри до молочної залози;  $b$  – радіус циліндра, що моделює молочну залозу;  $a$  – радіус циліндра, що моделює шар молочної залози, що не піддалася ураженню маститом.

$$k_3 = k_0 \sqrt{\varepsilon_3}, \quad k_5 = k_0 \sqrt{\varepsilon_5}, \quad k_0 = 2\pi f / c, \quad \text{де } f - \text{частота хвилі збудження.}$$

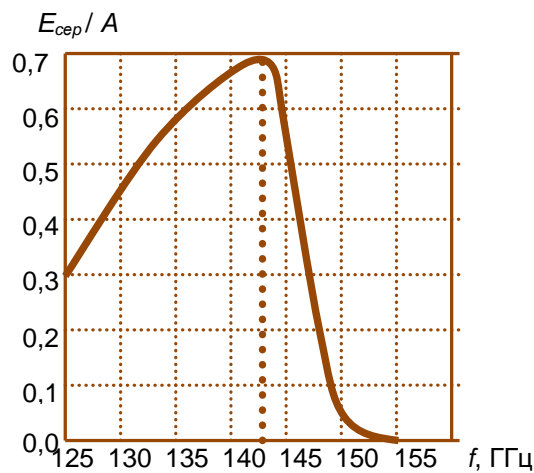


Рис. 1. Частотна залежність амплітуди ЕП, нормованої до амплітуди хвилі збудження

На основі (4) проведені числові розрахунки середнього значення ЕП, нормованого до амплітуди хвилі збудження. Залежність цієї величини від частоти хвилі збудження наведена на рис. 1.

Таким чином, для отримання максимального значення амплітуди ЕП, частота збудженої ЕМ хвилі була 142,8 ГГц. В цьому випадку значення амплітуди ЕП складає майже 70% від амплітуди хвилі збудження. Величину енергії ЕМП і час опромінювання ділянок молочної залози свиноматок для пригнічення патогенних мікроорганізмів у вимені визначали, використовуючи модель руйнування мембран мікроорганізмів під дією наведеного критичного потенціалу.

В результаті розрахунків було встановлено, що для руйнування мембран патогенних мікроорганізмів в молочній залозі свиноматок величина критичного потенціалу повинна бути не менше 110 мВ, величина енергії для утворення наскрізної пори в мембрані не менше  $0,7 \cdot 10^{-19}$  Дж, а орієнтовна потужність джерела випромінювання не менше 250 мВт при експозиції 72 с.

### Література

1. Физиологические особенности мастита свиней и методы его лечения / Л. Н. Михайлова, А. Н. Мороз // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях. – 2011. – № 33. – С. 31 – 35.
2. Обоснование биофизического действия электромагнитного поля для лечения мастита свиней / Л. Н. Михайлова, А. Н. Мороз // Вісник



Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2011. – Вип. 117. – С. 161 – 163.

3. Определение амплитуды электрического поля в молочной железе свиноматки, пораженной патогенными микроорганизмами / Л. Н. Михайлова, А. Д. Черенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2011. – Вип. 116. – С. 147 – 149.

4. Определение параметров электродинамической системы многодиодного генератора крайневисокочастотного диапазона / Л. Н. Михайлова // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Нові рішення в сучасних технологіях. – № 54. – 2011. – С. 138 – 141.

5. Применение электромагнитного поля крайневисокой частоты для лечения животных / Л. Н. Михайлова // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №1/6(55). – С. 36 – 39.

6. Электромагнитное поле в технологических процессах животноводства: тезисы за материалами научно-технической конференции научно-педагогических работников, аспирантов и ученых, 17 марта 2011 г. / Михайлова Л. Н. // М-во аграрной политики и продовольствия. – Каменец-Подольский: ПГАТУ. – 2011. – С. 572 – 574.

### Тема: «ДОСЛІДЖЕННЯ ДИФРАКЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА БІОЛОГІЧНОМУ ОБ'ЄКТІ З ШАРОМ МІКРООРГАНІЗМІВ»

1. Постановка завдання дифракції електромагнітних хвиль на поверхні яблука
2. Алгоритм побудови рішення задачі дифракції
3. Розрахунок середнього електричного поля в шарі мікроорганізмів

Для визначення біотропних параметрів ЕМП (частота, потужність, експозиція), що викликають пригніченість патогенних мікроорганізмів на поверхні яблука, були проведені дослідження з розподілу електричного поля усередині тонкого сферичного шару з мікроорганізмами на основі моделі, яка представлена кулею, заповненою ізотропним однорідним середовищем з діелектричною і магнітною проникністю. Завдання полягає у визначенні цього поля як усередині, так і поза біооб'єктом.

Оскільки біооб'єкт (яблуко) має сферичну симетрію, то розглядатимемо задачу про дифракцію в сферичній системі координат з початком в центрі біооб'єкту (рис. 1).

Для вирішення даної задачі були використані потенціали Дебая і метод розділення змінних в сферичній системі координат.

Загальне рішення системи рівнянь з розподілу електричного поля

усередині тонкого сферичного шару з мікроорганізмами було зведене до вирішення двох скалярних рівнянь Гельмгольца для електричного і магнітного потенціалів Дебая.

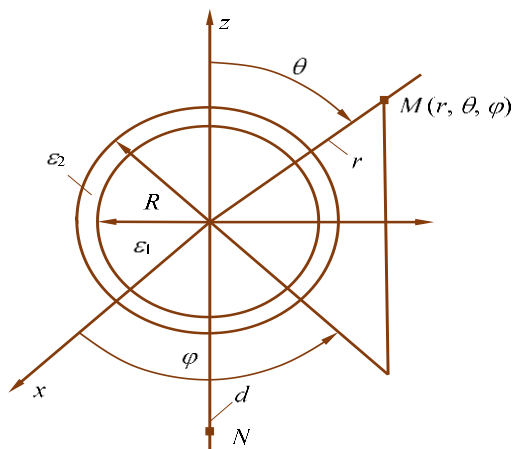


Рис. 1. Електродинамічна модель яблука з шаром мікроорганізмів

$$\Delta U_1 + k_1^2 U_1 = 0, \quad \Delta U_2 + k_2^2 U_2 = 0, \quad \Delta U_3 + k_3^2 U_3 = 0, \quad (1)$$

де  $\Delta$  – оператор Лапласа в сферичній системі координат:

$$\Delta = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right),$$

$U_1, U_2, U_3$  – електричні потенціали Дебая.  $U_1$  – описує поле дифракції усередині біооб'єкту при  $r < R$ ;  $U_2$  – описує поле дифракції усередині прошарку мікроорганізмів при  $R < r < R + h$ ; та  $U_3$  – описує поле дифракції поза біооб'єктом і прошарком мікроорганізмів при  $r > R + h$ . Тоді компоненти поля дифракції в цих трьох областях простору можна представити в наступному вигляді:

$$E_r^1 = \frac{1}{k_1} \left[ \frac{\partial^2 (rU_1)}{\partial r^2} + k_1^2 rU_1 \right], \quad E_\theta^1 = \frac{1}{k_1 r} \frac{\partial^2 (rU_1)}{\partial r \partial \theta},$$

при  $r < R$ : (2)

$$E_\varphi^1 = 0, \quad H_r^1 = H_\theta^1 = 0, \quad H_\varphi^1 = -\frac{1}{r} \frac{\partial (rU_1)}{\partial \theta},$$

$$E_r^2 = \frac{1}{k_2} \left[ \frac{\partial^2 (rU_2)}{\partial r^2} + k_2^2 rU_2 \right], \quad E_\theta^2 = \frac{1}{k_2 r} \frac{\partial^2 (rU_2)}{\partial r \partial \theta},$$

при  $R < r < R + h$ : (3)

$$E_\varphi^2 = 0, \quad H_r^2 = H_\theta^2 = 0, \quad H_\varphi^2 = -\frac{1}{r} \frac{\partial (rU_2)}{\partial \theta},$$

$$E_r^3 = \frac{1}{k} \left[ \frac{\partial^2 (rU_3)}{\partial r^2} + k^2 rU_3 \right], \quad E_\theta^3 = \frac{1}{k r} \frac{\partial^2 (rU_3)}{\partial r \partial \theta},$$

при  $r > R + h$ : (4)

$$E_\varphi^3 = 0, \quad H_r^3 = H_\theta^3 = 0, \quad H_\varphi^3 = -\frac{1}{r} \frac{\partial(rU_3)}{\partial\theta},$$

де  $k_1 = k\sqrt{\varepsilon_1}$ ,  $k_2 = k\sqrt{\varepsilon_2}$ .

Отже, вихідне векторне завдання дифракції зведене до рівнянь Гельмгольца для потенціалів Дебая. Рішення цієї задачі можна побудувати за допомогою методу розділення змінних. Цей метод полягає в тому, що спочатку будуються окремі вирішення рівнянь (1) що є добутком функцій, кожна з яких залежить лише від однієї змінної ( $r$  чи  $\theta$ ). Такі рішення добре відомі і мають вигляд:

$$V_n(r, \theta) = P_n(\cos\theta) R_{n+1/2}(k_p r), \quad n = 0, 1, 2, \dots, p = 1, 2, \quad (5)$$

де  $P_n(\cos\theta)$  – ортонормовані поліноми Лежандра,  
 $R_{n+1/2}(\dots)$  – циліндрові функції напівцілого індексу.

За допомогою цих окремих рішень можна побудувати загальні вирішення рівнянь (1) у вигляді нескінченних рядів по поліномах Лежандра.

Ці рішення для кожної з трьох областей ( $r < R$ ,  $0 < \theta < \pi$ ), ( $R < r < R + h$ ,  $0 < \theta < \pi$ ), ( $r > R + h$ ,  $0 < \theta < \pi$ ) можна представити у вигляді: область  $r < R$ :

$$U_1 = \frac{1}{k_1 r} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) a_n \psi_n(k_1 r) P_n(\cos\theta), \quad (6)$$

область  $R < r < R + h$ :

$$U_2 = \frac{1}{k_2 r} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (b_n \psi_n(k_2 r) + c_n \eta_n(k_2 r)) P_n(\cos\theta), \quad (7)$$

область  $r > R$ :

$$U_3 = \frac{1}{kr} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) d_n \eta_n(kr) P_n(\cos\theta). \quad (8)$$

Інтегральний ефект від дії збуджуючого поля на шар мікроорганізмів можна оцінити за допомогою усередненої за об'ємом шару напруженості електричного поля. В результаті перетворень для розрахунку середнього електричного поля було отримано рівняння:

$$E_{\text{сеп}} = \sqrt{|E_r^{\text{сеп}}|^2 + |E_\theta^{\text{сеп}}|^2}, \quad (9)$$

$$\text{де } E_r^{\text{сеп}} = \frac{E_0 e^{ik(d-R-h)}}{k_2 R \bar{A}_0} \left[ \bar{D}_0 (1 + ik_2 R) + \cos(k_2 R) - k_2 R \sin(k_2 R) \right], \quad (10)$$

$$E_\theta^{\text{сеп}} = \frac{E_0 e^{ik(d-R-h)}}{4k_2 R \bar{A}_1} \left[ \sin(k_2 R) - i\bar{D}_1 \right] \quad (11)$$

$$\bar{D}_0 = \frac{\sin(k_2 R) \cos(k_1 R) - \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_2 R) \sin(k_1 R)}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \sin(k_1 R) + i \cos(k_1 R)} \quad (12)$$

$$\bar{D}_1 = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_1 R) \sin(k_2 R) - \cos(k_2 R) \sin(k_1 R)}{i \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \cos(k_1 R) + \sin(k_1 R)} \quad (13)$$

$$\bar{A}_0 = i\bar{D}_0 e^{ik_2 h} \left( \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} - 1 \right) - i \cos(k_2(R+h)) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \sin(k_2(R+h)) \quad (14)$$

$$\bar{A}_1 = i \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \right) e^{ik_2 h} \bar{D}_1 - \sin(k_2(R+h)) - \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_2}} \cos(k_2(R+h)) \quad (15)$$

На підставі (9) були проведені чисельні розрахунки величини  $E_{\text{сеп}}$  нормованою на  $E_0$  – величину напруженості електричного поля збуджуючої сферичної хвилі.

Розрахунки проводилися в діапазоні частот  $50 \text{ ГГц} \leq f \leq 90 \text{ ГГц}$ . Вибір цього діапазону частот обумовлений тим, що при таких частотах електромагнітне поле збуджуючої хвилі практично не проникає в середину біооб'єкту.

На рис. 2 приведені результати розрахунків залежності величини  $E_{\text{сеп}} / E_0$  від частоти збуджуючої електромагнітної хвилі. Як видно з рис. 2, частотна залежність середнього поля має резонансну поведінку. Максимальне значення середнього поля досягається на частоті  $f = 75 \text{ ГГц}$ .

Для знищення шкідливих мікроорганізмів на поверхні яблук необхідними параметрами є не лише частота ЕМП, але і наведений потенціал на мембрані клітин.

В результаті розрахунків було встановлено, що експозиція складає  $t = 78 \text{ с}$ , напруженість  $E_{\text{сеп}} = 10,56 \text{ В/м}$ , наведений потенціал  $\varphi_{\text{нав}} = 185 \text{ мВ}$ , а  $E_0 = 6,26 \text{ В/м}$ .

Результати чисельного аналізу показали, що для знищення шкідливих мікроорганізмів на половині поверхні яблук слід використовувати джерело електромагнітного випромінювання в КВЧ діапазоні з потужністю  $0,7 \text{ Вт}$  на  $1 \text{ м}^2$ .

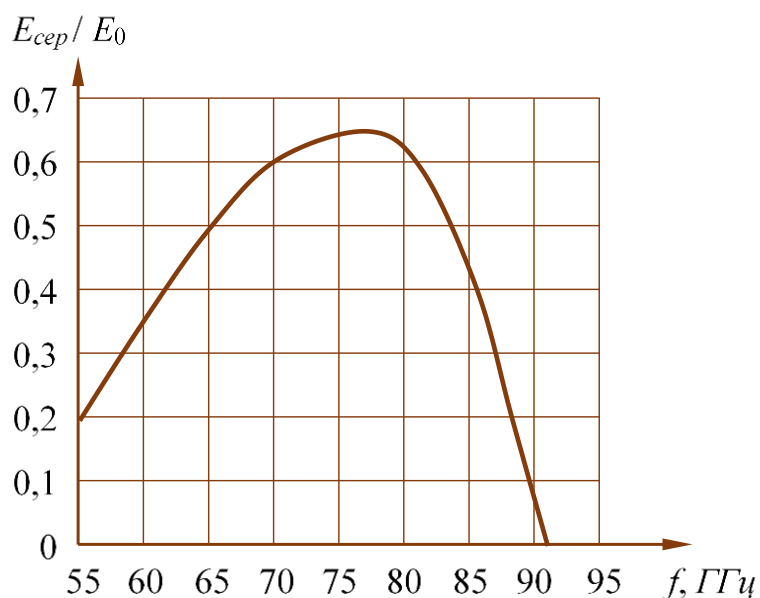


Рис. 2. Залежність нормованої середньої напруженості електричного поля від частоти збуджуючої хвилі

### *Література*

[1] А. Федюшко, «Анализ технологии хранения фруктоплодов», Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України, вип. 175, с. 160 – 162, 2016.

[2] А. Федюшко, «Биофизические предпосылки для уничтожения вредных микроорганизмов на плодах яблонь электромагнитной энергией», Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України, вип. 176, с. 93 – 95, 2016.

[3] А. Федюшко, «Анализ распределения электрического поля на поверхности яблок со слоем микроорганизмов», Вісник Нац. техн. ун-ту «ХП». б. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси, № 16 (1238), с. 141 – 146, 2017.

[4] А. Федюшко, «Определение параметров электромагнитного излучения для уничтожения микроорганизмов на поверхности яблок», Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України, вип. 187, с. 105 – 107, 2017.

[5] А. Федюшко та Н. Косуліна, «Определение параметров генератора на основе двухкольцевой фазовой подстройки частоты», Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», вип. 187, с. 142 – 144, 2017.

[6] А. Федюшко, «Опыт длительного хранения яблок, обработанных перед хранением электромагнитным излучением», Науково-технічний журнал. Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК. № 1(6), с. 67 – 73, 2017.

## Тема: «ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КОЛЬОРУ ШЕРСТНОГО ПОКРИВУ ОВЕЦЬ»

- 1 Загальні положення теоретичних досліджень.
- 2 Теоретичне обґрунтування спектрофотометричного методу визначення якості шерсті..
- 3 Обґрунтування вимог до реєстратора якості шерсті овець оптичним методом.
- 4 Аналіз джерел похибок при фотометричному визначенні кольору шерсті овець.
- 5 Визначення статистичних оцінок при одномірній задачі спектрального визначення кольору шерсті овець.

Для реалізації дистанційної технології вирішення задачі оптичним методом необхідно мати відомості про спектральні або колориметричні характеристики відбитого від поверхні вовни світлового потоку. В разі наявності зв'язку спектральних характеристик відбитого випромінювання з якістю (кольором) вовни задача може бути вирішена. Освітлення поверхні вовни передбачається здійснювати джерелами монохроматичного випромінювання. Знаючи геометрію поширення світлових променів, відбитих від поверхні вовни та індикатриси розсіяння, можна отримати достовірну інформацію про характер поверхні. Розглянемо модель представлену на рис. 2.

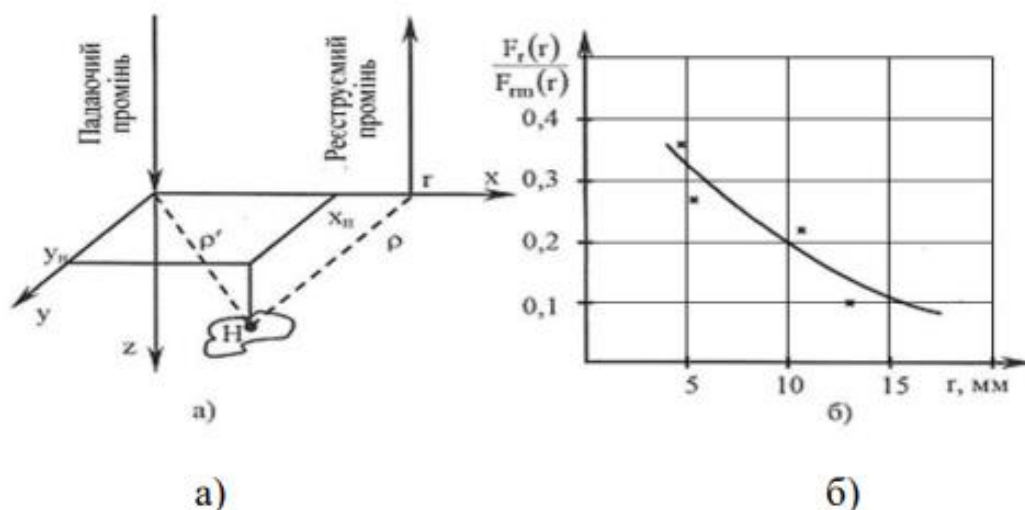


Рисунок 2 – Модель відбиття світла від локальних внутрішніх неоднорідностей: а) – модель, б) – розрахункові та експериментальні дані

Центр неоднорідності знаходиться на відстані від точки прийому  $(-\rho)$ , і точки опромінення  $(\rho')$ . Координати центру неоднорідності  $x_n$  і  $y_n$  представимо в нормованому значенні по  $r$ , тобто  $x'_n = x_n/r$ ;  $y'_n = y_n/r$ . Густина умовної ймовірності світлових променів, які виходять на поверхню середовища від неоднорідностей занурених на глибину  $Z'_n = Z_n/r$  на відстані  $r$  від точки входу, визначимо згідно:

$$W(z'|r) = \frac{2}{5\pi} \frac{4kz'}{1+(z')^2} \left(1 + \frac{1}{kr\sqrt{1+(2z')^2}}\right) \exp[kr - \sqrt{1+(2z')^2}] \quad (1)$$

Тоді, інтенсивність розсіяного у зворотному напрямку світлового потоку визначається виразом:

$$F_r(r) = \frac{2}{5\pi} F(r) f_{ob} W(z'_1|r_1)W(z'_2|r_2)(1+kr)^{-1} [(x'_n)^2 + (y'_n)^2]^{-1} \times [(1-x'_n)^2 + (y'_n)^2]^{-1} \times \exp \left[ -kr \left( \frac{\sqrt{[(1-x'_n)]^2 + (y'_n)^2} + \sqrt{(x'_n)^2 + (y'_n)^2} - 1}{\sqrt{(x'_n)^2 + (y'_n)^2} - 1} \right) \right]. \quad (2)$$

Функція  $f_{ob}$  в (2) враховує коефіцієнт дифузного відбиття об'єкту в середовище  $R_1$  і величину поверхні об'єкта  $S_{ob}$ :

$$f_{ob} = \frac{3 S_{ob} 1-R_1}{2 \ell_{tr} 1+R_1}$$

При реалізації приладів дослідження розсіюючих середовищ джерело і приймач розміщують таким чином, що центр внутрішньої неоднорідності знаходиться посередині відстані  $r$  і в площині  $xz$ , Тоді  $x'=0,5$ ,  $y'=0$  і добуток  $W(Z'_1/r_1)$  і  $W(Z'_2/r_2)$  може бути замінено на  $W_2(2Z'/(r/2))$ , а густина назад розсіяного потоку прагне до величини

$$f_{ob} = \frac{3 S_{ob} 1-R_1}{2 \ell_{tr} 1+R_1}$$

Проведений аналіз дозволяє сформулювати вимоги конфігурації і розташування джерел та фотоприймачів при визначенні якості вонни фотоелектричним методом. Загальний потік світла, що безпосередньо потрапляє на фотоприймач визначається як:

$$\Phi_{\phi n} = 2\pi \int_0^{R_{\phi n}} E(h) dh,$$

де  $R_{\phi n}$  – радіус фотоприймача, м.

З урахуванням моделі (рис.3) можна записати:

$$\Phi_{\phi n} = \frac{\pi^2 B}{2} \left[ 1 - \frac{R^2 + R_{\phi n}^2 + L^2}{\sqrt{L^4 + (R_{\phi n}^2 - R^2)^2 + 2L^2(R_{\phi n}^2 - R^2)}} \right].$$

Загальний потік світла, що відбивається від поверхні дорівнює:

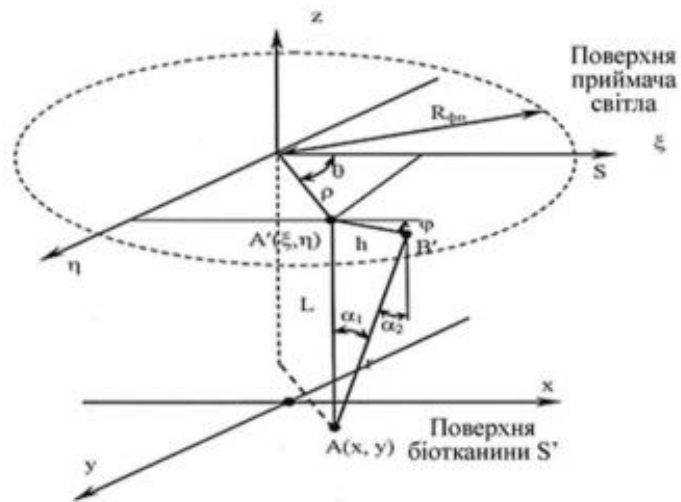


Рисунок 3 – Просторова модель збору потоку світла на фотоприймачі

Оскільки реальний фотоприймач має кінцеві розміри та збирає обмежену частину відбитого випромінювання ефективність збору потоку залежить від його конструктивних особливостей. Враховуючи в'язок між оптичними та геометричними характеристиками, що визначають величину відбитого потоку світла у вигляді:

$$\Phi_{fn} = A\Phi_0$$

де  $A$  – коефіцієнт ефективності збору енергії світла, відбитого від поверхні, який визначається виходячи із геометричних розмірів:

З метою оптимізації розмірів та конструктивних особливостей фотоприймача проаналізовано вплив означених вище факторів на величину вихідного сигналу. На рис. 4-6 приведено графіки залежності  $A$  від відстані між віссю фотоприймача, від радіуса плями, яка формується в площині фотоприймача в результаті відбиття потоку світла від поверхні, а також від кута розширення пучка.

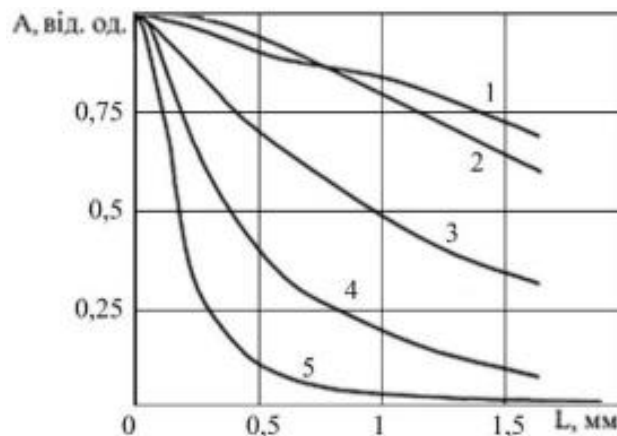
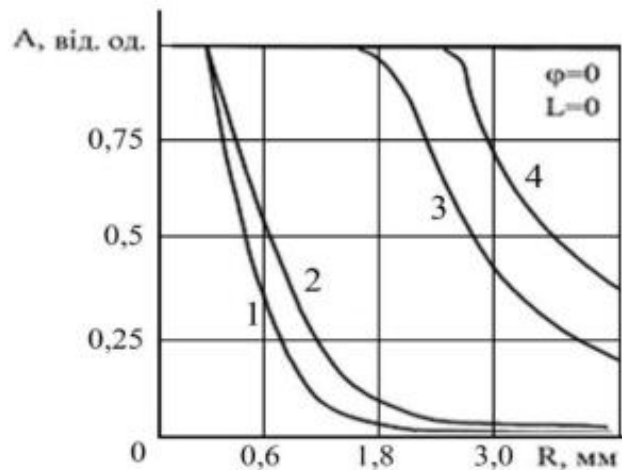
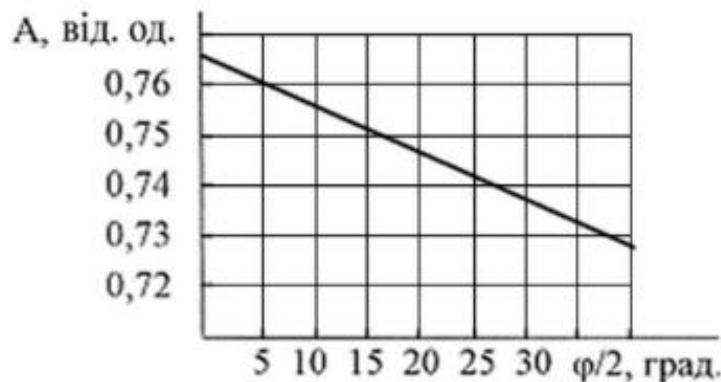


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта ефективності збору потоку світла  $A$  від відстані  $L$  між об'єктом і площиною фотоприймача





Як видно з рис. 6 при будь-якому співвідношенні  $R/R_{\phi n}$  максимальна ефективність збору інформації буде при  $L = 0$ . При  $R/R_{\phi n} > 1$  коефіцієнт ефективності  $A$  швидко зменшується (наприклад, при  $R/R_{\phi n} = 0,5$  при  $L = 0,6$  мм  $A$  становить близько 0,09 від максимального значення  $A = 1$  при  $L = 0$ ).



Таким чином, коефіцієнт ефективності збору інформації  $A$  збільшується з збільшенням  $R_{\phi n}$ , а при розширенні кута пучка світла відбитого світла. Отримані результати використані для оптимізації конструкції оптичного вузла для визначення кольору шерсті.

### Література

1. Аналіз застосування випромінювання в сільському господарстві / Цибух А. В. // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” – Х.: ХНТУСГ, 2010. – Вип.101. – С. 92 – 100.
2. Методи та засоби лазерної діагностики біологічних об’єктів і процесів / Цибух А. В. // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” – Х.: ХНТУСГ, 2011. – Вип. 116. – С. 84 – 85.
3. Схема приладу для вимірювання спектру дифузного відбиття / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко, Л. С. Скрипка // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка.

Технічні науки. “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” – Х.: ХНТУСГ, 2012. – Вип.129. – С. 51 – 52.

4. Методи визначення оптичних властивостей біотканин / А. В. Цибух, Л. С. Скрипка // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. – Х.: ХНТУСГ, 2014. – Вип. 153. – С. 88 – 89.

5. Аналіз умов математичного моделювання розповсюдження оптичного випромінювання в біологічних об’єктах сільського господарства / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. – Х.: ХНТУСГ, 2015. Вип. 164. – С. 144 – 147.

6. Визначення вимог до електроприводу установки для сортування овець перед стриженням / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко, Л. С. Скрипка // Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки. “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України” – Х.: ХНТУСГ, 2018. – Вип.195. – С. 110-113.

7. Пристрій для визначення кольору шерстного покриву тварин / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Modern Scientific Researches – №13, oktober 2020, Belarus – Minsk: Yolnat PE, 2020. – С. 56-63. Режим доступу: <https://www.modscires.pro/index.php/msr/issue/view/msr13-01/msr13-01>

8. Color detection device of animal wool cover / A. V. Tsybukh, M. L. Lysychenko // Modern engineering and innovative technologies. – 2021. – №15-03. – P. 17 – 28. Режим доступу:

<https://www.moderntechno.de/index.php/meit/issue/view/meit15-03/meit15-03>

9. Feasibility study for the implementation of a device for sorting sheep production / A. Tsybukh, O. Kravchenko, I. Pomitun, M. Lysychenko // Technology audit and production reserves – 2021. – №3/4(59). – P. 33 – 40. Режим доступу: <http://journals.uran.ua/tarp/issue/view/14237>

10. Патент на корисну модель №70157, Україна. МПК G01N 21/01 (2006.01), G01N 33/48 (2006.01) Прилад для вимірювання фізико-біологічних характеристик шерстного покриву на шкіри / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко, В.В. Холін (Україна) – № u 2011 14174; Заявлено 30.11.2011; Опубл. 25.05.2012. Бюл. № 10. – 6 с.

11. Патент на корисну модель №71015, Україна. МПК А61В 5/00 (2012.01) Спосіб визначення фізико-біологічних характеристик шерстного покриву та шкіри тварин / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко (Україна) – № u2012 01015; Заявлено 31.01.2012; Опубл. 25.06.2012. Бюл. № 12. – 6 с.

12. Патент на корисну модель № 128481, Україна. МПК С14В 17/06 (2006.01). Спосіб подачі овець на стриження / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко (Україна) – № u201800936; Заявл. 01.02.2018; Опубл. 25.09.2018. Бюл. № 18. – 3 с.

13. Застосування лазерного випромінювання в методах визначення меланіну в шерсті тварин / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко //

Матер. XXVII Межд. науч.-прак. конф. “Применение лазеров в

медицине и биології” (18 – 21 апреля 2007 г.) – Х.: НПМБК “Лазер и здоровье”, 2007. – С. 168 – 169.

14. Можливості застосування лазерного випромінювання для спрощення аналізу кількісних та якісних показників меланінів / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Матер. XXIX Межд. науч.-прак. конф. “Применение лазеров в медицине и биологии” (21 – 24 мая 2008 г.). – Х.: НПМБК “Лазер и здоровье”, 2008. – С. 308 – 309.

15. Удосконалення пристрою для визначення фізикобіологічних характеристик шерстного покриву та шкіри тварин / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Матер. XXXVI Межд. науч.-прак. конф. “Применение лазеров в медицине и биологии” (5 – 8 октября 2011 г.) – Судак: НПМБК “Лазер и здоровье”, 2011. – С. 163 – 164.

16. Method and equipment of the optical property’s diagnostics of the agricultural animals external cover / А. V. Tsybukh, N. L. Lysychenko // Матер. XXXVII Межд. науч.-прак. конф. “Применение лазеров в медицине и биологии” (23 – 25 мая 2012 г.) – Х.: НПМБК “Лазер и здоровье”, 2012. – С. 126.

17. Особливості формування спектру дифузного відбиття світла шерстиним покривом та шкірою тварин / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Матер. XXXVIII Межд. науч.-прак. конф. “Применение лазеров в медицине и биологии” (3-6 октября 2012 г.) – Ялта: НПМБК “Лазер и здоровье”, 2012. – С. 145.

18. Класифікація способів лазерної діагностики властивостей біологічних об’єктів / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Матер. III Міжн. науч.-прак. конф. «проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (17 – 18 грудня 2015 р.). – К.: НУБіП України, 2015. – С. 107 – 108.

19. Установка для сортування овець за кольором шерсті / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Матер. II Міжн. науч.-техн. конф «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування» (м. Харків, 6 – 7 грудня 2018 р.) – Х.: НТУ «ХП», 2018. – С. 105 - 106.

20. Device for determining the colour of animal coat / А. V. Tsybukh, M. L. Lysychenko // Eurasian scientific congress. Abstracts of XI international scientific and practical conference. Barca Academy Publishing (1 – 3 November, 2020) – Barcelona, Spain: 2020 – P. 205 – 207. Режим доступу: <https://sci-conf.com.ua/xi-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskayakonferentsiya-eurasian-scientific-congress-1-3-noyabrya-2020-goda-barselonaispaniya-arhiv/>

21. Моделювання процесу визначення кольору шерсті овець / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Матер. VI Всеукр. науч.-практ. конф. «Електронні та механотронні системи: теорія, інновації, практика» (6 листопада 2020 р.) – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2020. – С. 108 – 111.

22. Пристрій для визначення кольору шерстного покриву тварин / А. В. Цибух, М. Л. Лисиченко // Межд. науч. конф. «Современная научная идея – 2020» (7 – 8 октября 2020 г., г. Минск, Беларусь) – Минск: Едънать, 2020. – С.

Тема: «ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИГНОБЛЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ  
МІКРООРГАНІЗМІВ В РАНАХ ШКІРЯНОЇ ТКАНИНИ ТВАРИН  
НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ  
КРАЙВИСОКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ»

1. Визначення внутрішнього електромагнітного поля в одношарових біологічних об'єктах, що знаходяться під впливом зовнішнього електромагнітного поля.
2. Розподіл електромагнітного поля в ранах шкіряної тканини тварин.
3. Чисельний розрахунок електромагнітного поля всередині шкіряної тканини тварин за нормою і наявністю інфекційних ран.
4. Деструкція мембран кліток патогенних коків під дією низькоенергетичного електромагнітного поля крайвисокочастотного діапазону.
5. Чисельні розрахунки біотропних параметрів електромагнітного поля для пригноблення патогенних мікроорганізмів.

Дослідження механізму взаємодії ЕМП з мікроорганізмами неможливе без інформації поширення цього поля у середині клітини мікроорганізмів і місця їх існування. Це задача може бути розглянута, як завдання дифракції ЕМП на діелектричних тілах різної форми.

Для отримання початкового виразу була розглянута плоскопаралельна структура шкіряної тканини, яка складається з шерстяного покриву, шкіри і тканин м'язів. Колонія патогенних мікроорганізмів у ранах шкіряної тканини була подана у вигляді циліндричного тіла, що має поперечні розміри рівні довжині хвилі ЕМП.

У разі Е- поляризації поля падаючої, розсіяної хвилі та хвилі, що пройшла всередину циліндра, були розкладені за циліндричними координатами.

$$\begin{cases} E_z^{nad} = E_2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} i^n j_n(k_2 r) e^{i\omega t} \\ E_z^{poz} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n^{poz} H_n^{(2)}(k_2 r) e^{i\omega t} ; \\ E_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n j_n(kr) e^{i\omega t} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} H_z^{nad} = 0 \\ H_z^{poz} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n^{poz} H_n^{(2)}(k_2 r) e^{i\omega t} , \\ H_z = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n j_n(kr) e^{i\omega t} \end{cases} \quad (2)$$

де падаюча та розсіяна хвилі відмічені, відповідно, індексами *nad* і *poz*, внутрішні поля циліндра індексів не мають;  $k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu_0}$ ;  $k$  – хвильові числа;  $\mu_0$  – магнітна проникність повітря;  $\omega$  – частота ЕМП;  $\varepsilon_2$  – діелектрична стала шкіри;  $\varepsilon$  – діелектрична стала патогенних мікроорганізмів;  $H$  і  $E$  – амплітуди ЕМП;  $a_n^{poz}$ ,  $b_n^{poz}$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  – невідомі коефіцієнти;  $J_n(kr)$  – функція Бесселя 1-го порядку;  $H_n^{(2)}$  – функція Ханкеля 2-го порядку;  $E_2$  – амплітуда електричної складової поля в другому шарі шкіряної тканин.

З урахуванням граничних умов при  $r=a$  для тангенціальних складових поля були отримані вирази для невідомих коефіцієнтів:

$$a_n^{poz} = E_2 i^n \left\{ \frac{J_n(k_2 a)}{H_n^{(2)}(k_2 a)} - \frac{2i \left[ \frac{H_n^{(2)'}(k_2 a)}{k_2 a H_n^{(2)}(k_2 a)} - \frac{j_n'(ka)}{ka J_n(ka)} \right]}{\pi k_2^2 a^2 \left( H_n^{(2)}(k_2 a) \right)^2 D} \right\}; \quad (3)$$

$$b_n^{poz} = 0; \quad b = 0;$$

$$a_n \left[ E_0 i^n J_n(k_1 a) + a_n^{poz} H_n^{(2)}(k_2 a) \right] \frac{1}{J_n(ka)}, \quad (4)$$

$$D = \left[ \frac{H_n^{(2)'}(k_2 a)}{k_2 a H_n^{(2)}(k_2 a)} - \frac{J_n'(ka)}{ka J_n(ka)} \right] \left[ \frac{H_n^{(2)'}(k_2 a)}{k_2 a H_n^{(2)}(k_2 a)} - \frac{N^2 J_n(ka)}{ka J_n(ka)} \right]; \quad (5)$$

$$N^2 = \frac{k^2}{k_2^2} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_2}.$$

З рівняння Максвела було визначено і решта складових падаючої, розсіяної хвилі та хвилі, що пройшла всередину циліндра. Зрештою для нульової гармоніки ( $n = 0$ ) були отримані вирази для практичних розрахунків внутрішнього поля в об'ємі з патогенними мікроорганізмами в ранах шкіряної тканини тварин:

$$\begin{cases} E_z = a_0 j_0(kr) \\ H_\varphi = i \frac{a_0 k^2 j_1(kr)}{\omega \mu} \end{cases},$$

де

$$a_0 = \frac{J_0(k_2 a) + a_0^{poz} H_0^{(2)}(k_2 a)}{J_0(ka)} E_2; \quad (6)$$

$$a_0^{poz} = \frac{J_0(k_2 a)}{H_0^{(2)}(k_2 a)} - 2i \frac{\left[ \frac{J_1(ka)}{aJ_0(ka)} - \frac{H_1^{(2)}(k_2 a)}{aH_0^{(2)}(k_2 a)} \right]}{\pi k_1^2 a^2 \left( H_0^{(2)}(k_2 a) \right)^2 D}; \quad (7)$$

$$D = \left[ \frac{J_1(ka)}{aJ_0(ka)} - \frac{H_1^{(2)}(k_2 a)}{aH_0^{(2)}(k_2 a)} \right] \left[ \frac{k^2 J_1(ka)}{k_2^2 a J_0(ka)} - \frac{H_1^{(2)}(k_2 a)}{aH_0^{(2)}(k_2 a)} \right]. \quad (8)$$

Отримані вирази описують розподіл ЕМП усередині біологічних об'єктів циліндричної форми, коли їх характеристики не змінюються за об'ємом.

На основі теоретичних досліджень були проведені чисельні розрахунки розподілу ЕМП у ранах шкіряної тканини тварин з інфекційними мікроорганізмами. Розрахунки були проведені в діапазоні частот 30...40 ГГц і для діелектричних параметрів епідермісу та колоній коків:  $\varepsilon' = 5,4$ ;  $\varepsilon'' = 0,1$ ;  $\varepsilon' = 10$ ,  $\varepsilon'' = 1,2$  відповідно. З отриманих результатів (рис. 1) виходить, що оптимальна частота ЕМП для пригноблення патогенних мікроорганізмів у ранах шкіряної тканини тварин лежить у діапазоні частот 35...37 ГГц.

Розрахунки, приведені на рис. 2, показують, що всередині шару епідермісу амплітуда практично лінійно зменшується зі збільшенням глибини та лише на межі між шкірою та м'язами даний процес уповільнюється.

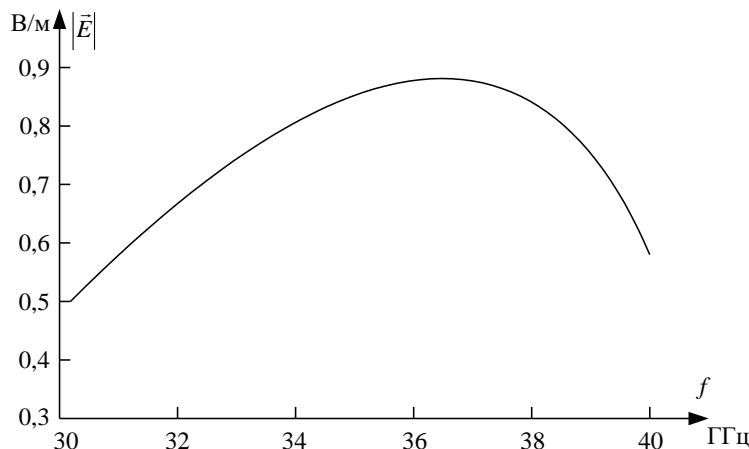


Рис. 1. Залежність амплітуди електричної складової ЕМП усередині циліндричної хворої ділянки шкіри від частоти падаючого поля

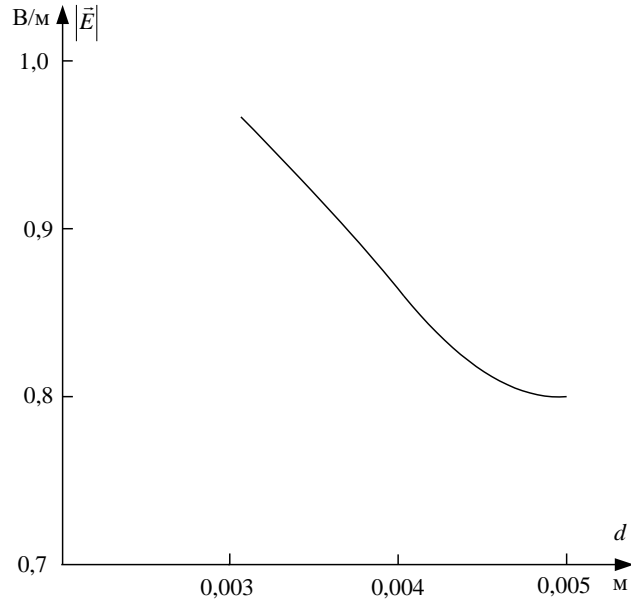


Рис. 2. Залежність амплітуди електричної складової ЕМП на осі циліндричної форми колонії патогенних коків у шкіряній тканині тварин від глибини проникнення поля

Для того, щоб обробити ЕМП глибші шари шкіряної тканини, необхідно збільшити потужність джерела випромінювання. Розробка методів пригноблення патогенних коків у ранах шкіряної тканини тварин за допомогою ЕМВ пов'язана зі зміною потенціалу на мембрані.

Найбільш визнаним у даний час є механізм руйнування мембран, обумовлений дефектами типу наскрізної пори. Величина критичного радіусу ( $r_0$ ) дефекту в мембрані, при якому наскрізна пора не закривається, описується співвідношенням:

$$r_0 = \frac{\tilde{\delta}}{\left( \delta + C \frac{\phi_{KP}^2}{2} \right)}, \quad (10)$$

де  $\tilde{\delta}$  – лінійне натягнення одиниці довжини периметра дефекту;  $\delta$  – поверхневе натягнення мембрани;  $C = C_1 \left( \frac{\epsilon_B}{\epsilon_m} \right)$ ;  $C_1$  – ємність одиниці площі мембрани;  $\epsilon_B$  – діелектрична проникність води;  $\epsilon_m$  – діелектрична проникність мембрани;  $\phi_{KP}$  – критичний потенціал, перевищення якого призводить до деструкції мембрани.

Величина критичного потенціалу пробою може бути визначена з виразу:

$$\phi_{KP} = \sqrt{0,376 E_{пружн} h^2 / \epsilon_m \epsilon_0}, \quad (11)$$

де  $E_{пружн}$  – модуль пружності мембрани;  $h$  – товщина мембрани;  $\epsilon_0$  – електрична стала. У даному випадку наведений потенціал на плазматичній мембрані інфекційних коків

визначався наступним виразом:

$$\varphi_{KP}^2 - \varphi_0 = P \frac{C_0 V_0 g^2 C_S}{(4\pi \varepsilon_m \varepsilon_0 h)^2} e^{-\frac{F\varphi_0}{RT} t} + P \frac{g C_S^2}{4\pi \varepsilon_m \varepsilon_0 \omega} E \sin \omega t, \quad (12)$$

де  $\varphi_0$  – потенціал на мембрані в початковий момент часу;  $P$  – проникність мембрани;  $C_0, C_S$  – концентрація іонів всередині та поза клітиною;  $g$  – заряд іона;  $F$  – число Фарадея;  $R$  – газова стала;  $T$  – абсолютна температура;  $t$  – час експозиції;  $V_0$  – об’єм клітини в початковий момент часу.

В результаті чисельних розрахунків було встановлено, що критичний потенціал ( $\varphi_{KP}$ ) для деструкції плазматичної мембрани патогенних коків у ранах шкіряної тканини тварин повинен бути не менше 110 мВ. При потенціалі 110 мВ на мембрані патогенних коків, критичний радіус дефекту ( $r_0$ ), при якому наскрізна пора не закривається, знаходиться в межах  $0,4 \cdot 10^{-10} \dots 0,5 \cdot 10^{-10}$  м. З проведених розрахунків виходить, що пригноблення патогенних коків у ранах шкіряної тканини тварин слід проводити з використанням ЕМП у діапазоні частот 35...37 ГГц з густиною потоку потужності не більше 5 мВт/см<sup>2</sup> і експозицією 3...5 хв.

### Література

1. Обоснование немедикаментозного способа восстановления поврежденных тканей кожного покрова животных / Калиниченко А. В., Гордийчук И. Й. // Збірник наукових праць. – Кам’янець-Подільський: ПДАТУ. – 2006. – Вип. 14. – С. 510 – 512.
2. Распределение внутренних электромагнитных полей в патогенных коках, находящихся под воздействием внешнего электромагнитного излучения / Калиниченко А. В. // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. Общегосударственный научно-производственный информационный журнал. – 2006. – № 11. – С. 31 – 36.
3. Теоретический анализ по угнетению инфекционных микроорганизмов в ранах кожного покрова животных низкоэнергетическими ЭМП КВЧ диапазона / Калиниченко А. В., Середа А. И. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 6. – С. 123 – 129.
4. Влияние электромагнитных полей на мембранный потенциал бактериальной клетки / Калиниченко А. В., Гордийчук И. Й. // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. Общегосударственный научно-производственный информационный журнал. – 2008. – № 1. – С. 9 – 13.
5. Обоснование кварцевых СВЧ генераторов / Калиниченко А.В., Гордийчук И. Й. // Вісник ХНТУСГ «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – 2007. – Т. 1, Вип. 57. – С. 227 – 237.



## ТЕМИ НА САМОСТІЙНУ РОБОТУ

### «ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ КРАЙВИСОКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ З БІООб'ЄКТАМИ РОСЛИННИЦТВА»

#### *Завдання*

1. Розподіл електромагнітного поля всередині насіння сільськогосподарських культур із перетином регулярної форми/
2. Розподіл електромагнітного поля всередині насіння сільськогосподарських культур неправильної форми.
3. Визначення діапазону біотропних параметрів електромагнітного поля, що впливає на насіння сої.
4. Вплив інформаційного поляризованого електромагнітного поля вкрай високочастотного діапазону на біофізику мембранних процесів у клітинах насіння сільськогосподарських культур.

### «МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ МОНОХРОМАТИЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ ІЗ ЕМБРІОНАМИ ТВАРИН»

#### *Завдання*

1. Постановка електродинамічного завдання та метод вирішення/
2. Розв'язання задачі щодо розподілу електромагнітної енергії в ембріонах тварин.
3. Чисельний аналіз отриманих результатів визначення біотропних параметрів електромагнітного поля.

### «МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ЯЄЧНИКАМИ КОРІВ»

#### *Завдання*

1. Постановка електродинамічного завдання взаємодії електромагнітного випромінювання з яєчниками корів
2. Обґрунтування інтегрального рівняння для розподілу електричного поля усередині яєчників корів
3. Теоретичне визначення середньої величини електричного поля усередині яєчників корови
4. Розрахунок залежності середнього значення нормованого електричного поля від частоти хвилі.

### «ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ІМПУЛЬСІВ З НАСЕКОМИМИ ШКІДНИКАМИ»

#### *Завдання*

1. Формулювання завдання взаємодії електромагнітних імпульсів з біологічним об'єктом.
2. Розв'язання задачі дифракції методом інтегральних рівнянь.
3. Розрахункові формули для середнього поля у біологічному об'єкті.

«МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО  
КОМПЛЕКСУ ОПРОМІНЮВАННЯ ПОВЕРХНІ ОБ'ЄКТУ  
ЕЛІПСОЇДНОЇ ФОРМИ ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ  
ПАРАМЕТРІВ»

*Завдання*

1. Синхронний рух двох джерел випромінювання по лінії раціонального розміщення.
2. Рівняння лінії раціонального розміщення джерел випромінювання в полярних координатах.
3. Координати точок дотику еліпсоїда променями, що виходять з двох симетрично розташованих джерел.
4. Доза опромінювання еліпсоїда двома джерелами при їх синхронному русі по лінії раціонального розміщення.
5. Оцінка параметрів процесу опромінювання за мінімальним перевищенням середнього значення дози.
6. Вибір просторового розміщення джерел, часу опромінювання і частоти обертання еліпсоїда
7. Вибір кута установки насадки лазера

Навчальне видання

**МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ  
ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ З БІОЛОГІЧНИМИ  
ОБ'ЄКТАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ, ОЦІНКИ ЇХ СТАНУ  
ТА ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ**

Методичні вказівки  
щодо проведення практичної та самостійної роботи

для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти  
спеціальності 163 «Біомедична інженерія»

Укладачі:  
**Косуліна Н. Г., Лисиченко М. Л.**

Підписано до друку 5.02.2025 р.  
Формат 60 x 84 1/16. Гарнітура Garamond. Умовн. друк. арк. – 1,5.  
Наклад – 100 прим.  
Державний біотехнологічний університет 61002,  
м. Харків, вул. Алчевських, 44