

Є.Т. Мельник, магістрант  
О.П. Яненко, проф., д.т.н.

Національний технічний університет України "КПІ"

### МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗОНАНСНОЇ ВЗАЄМОДІЇ МІКРОХВИЛЬОВИХ СИГНАЛІВ З КЛІТИНАМИ ЖИВОГО ОРГАНІЗМУ

*Проведено аналіз літературних джерел об'єкта дослідження. Розроблена еквівалентна схема заміщення біологічної клітини при проходженні через неї мікрохвильового сигналу. Проведено моделювання та отримано аналітичний вираз для розрахунку резонансних частот. За допомогою програми MathCad визначені дві резонансні частоти мікрохвильового діапазону.*

**Вступ.** На даний час накопичено достатньо великий експериментальний матеріал, що вказує на існування впливу на біологічні об'єкти електромагнітного поля нетеплової інтенсивності НВЧ-діапазону (цим випромінюванням вважається потужність сигналу, яка відповідає значенню  $P_c \ll 10 \text{ мВт/см}^2$ ). Відомо також отримання лікувального ефекту при використанні апаратури з вихідною потужністю  $10^{-6} - 10^{-12} \text{ Вт/см}^2$  [1]. Основна технологія при цьому, мікрохвильова резонансна терапія, використовує резонансний вплив на організм людини.

Проте до сьогодні не зовсім зрозумілим є сам процес такого впливу, оскільки, по-перше, інтенсивність електромагнітного випромінювання (ЕМВ) достатньо мала, а по-друге, не зовсім зрозумілими є резонансні канали проходження сигналу до і через клітину. Тому є необхідним пошук математичного опису (моделювання) дії ЕМВ на живий організм та його окремі елементи, побудова моделі, що дозволяє деякою мірою зрозуміти і прогнозувати такий вплив.

Як зазначено в [1–3], окрім потужності сигналу, яка впливає на біологічну систему, велику роль відіграє також його частота. Тому одним із важливих факторів при визначенні відповідної реакції біологічного об'єкта на електромагнітне поле є вибір частоти випромінювання, при якій спостерігалася б найбільш ефективна взаємодія біооб'єкта з полем випромінювання. Можна припустити, що максимальний відгук біооб'єкта на зовнішнє високочастотне випромінювання буде спостерігатися в тому випадку, коли частота зовнішнього сигналу наближається до частоти одного з власних коливань системи або її окремих елементів (клітин), тобто у випадку їх резонансної взаємодії.

Виходячи з наведеного вище, можна сформулювати задачу знаходження власних частот електромагнітних коливань різних структур біологічних систем.

Достовірно відомо, що живі організми не гомогенні, а складаються з різних частинок, що виконують певні функції. Структурною і функціональною одиницею як у рослин, так і у тварин є клітина, яка являє собою самостійну одиницю, а процеси, що протікають в організмі, складаються із сукупності координованих функцій його клітин. Клітини, так, як і органи, мають специфічну організацію: кожен вид клітин має характерні розміри та форму, за якими їх можна розпізнати [5]. В свою чергу, функціонування клітини залежить від стану мембрани, саме вона відповідає за потрапляння в клітину необхідних для її функціонування речовин. Клітини можуть дуже відрізнятися за своїми розмірами, формою і функціям [6]. Отже, і частоти, що відповідають власним резонансам клітини, можуть бути різними і знаходяться в певному діапазоні електромагнітного спектра.

Таким чином, виникає необхідність визначити власні частоти коливань клітин і клітинних структур. Враховуючи, що клітина характеризується набором електричних параметрів (опір мембрани і середовища, що заповнює клітину, ємність мембрани, відносна діелектрична проникність), можна представити клітину (і навіть групу клітин) у вигляді електричної схеми заміщення, що складається з елементів у вигляді комбінації опорів  $R$ , електричних ємностей  $C$  та індуктивностей  $L$ , та визначити резонансні частоти для такої системи.

**Основна частина. Фізичні параметри клітини, її протоплазми і мембрани.** Клітина являє собою складне утворення, оточене мембраною (оболонкою). Не зупиняючись детально на описі структури клітини і мембрани, зазначимо лише, що середовище, яке оточує клітину, і середовище всередині клітини мають різні величини відносної діелектричної проникності, як і мембранні білки. На рис. 1 представлений один з можливих варіантів структури клітинної мембрани [4], який дозволяє оцінити складність побудови єдиної еквівалентної схеми заміщення.

Наведемо дані значень геометричних розмірів клітин та їх складових, що опубліковані в науковій літературі.

Радіус клітини ( $r_c$ ) складає близько  $10^{-6} \dots 10^{-5}$  м [5], [6], товщина мембрани  $h_m = 7,5 \dots 8,0$  нм [5], [6] і рідко перевищує величину 10 нм [7], ширина міжклітинного простору  $\sim 1 \dots 2 \cdot 10^{-8}$  м, розмір глобулярних білків  $2 \dots 10 \cdot 10^{-10}$  м, товщина фосфоліпідного шару  $3 \dots 6 \cdot 10^{-9}$  м [7].

Щодо електричних параметрів мембран і складових клітини, в літературі немає єдиних даних. Зустрічаються різні значення електричного опору мембран; крім того, кожен автор наводить різні розмірності для опору [5]–[7].

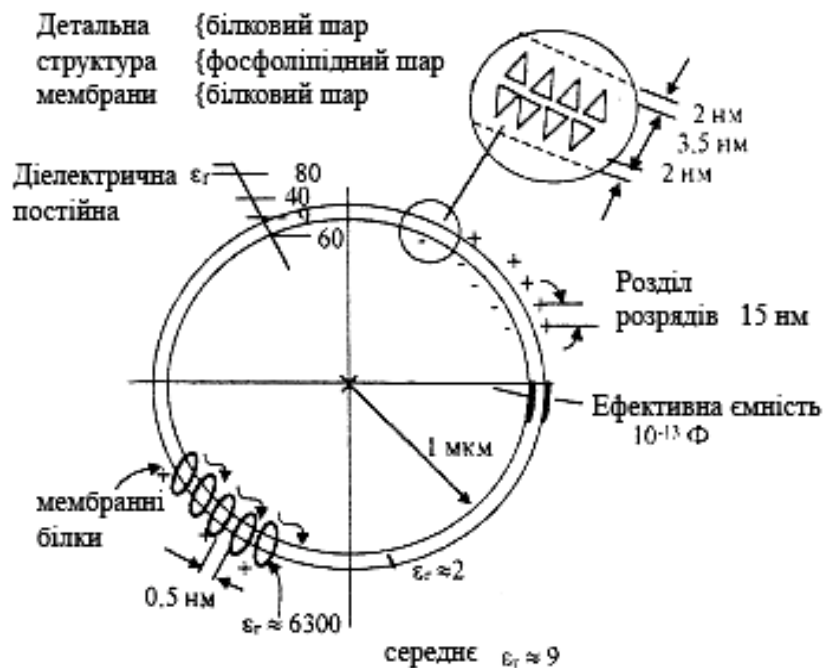


Рис. 1. Структура клітинної мембрани [3]

З переглянутих джерел випливає, що опір різних мембран лежить в інтервалі  $10^{12} \dots 10^{18}$  Ом і знижується в деяких мембран до  $10^6 \dots 10^8$  Ом, а опір каналів в інтервалі  $10^{12} \dots 10^{13}$  Ом. Опір міжклітинної рідини, яка є водним розчином і містить іони різних речовин, має порядок  $1 \dots 10$  кОм. Самі значення, що лежать в указаних інтервалах, будуть використовуватися надалі при моделюванні резонансних явищ.

Аналізуючи наведені вище дані, необхідно зауважити, що інтервали зміни допустимих значень фізичних параметрів біологічних систем досягають декількох порядків (у випадку опору мембрани – 12 порядків). Даний факт з точки зору фізики є парадоксальним, оскільки для реальних фізичних систем така багатократна зміна параметра системи є або неможливою, або (у випадку температури) катастрофічною, що призводить до руйнування системи. Певною мірою зміна в широких межах значень опору мембрани зумовлена кількістю відкритих каналів.

Значення електричної ємності мембран знаходяться в інтервалі  $10^{-14} \dots 2 \cdot 10^{-13}$  Ф [7].

Магнітні властивості клітин і тканин виражені слабо, оскільки багато органічних речовин є діаманітними і для них значення відносної магнітної проникності  $\mu \approx 1$ .

У роботі [2] пропонують обраховувати індуктивність мембрани за формулою:

$$L_m = \frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_m} C_m, \tag{1}$$

де  $\mu_0$  і  $\epsilon_0$  – відносна магнітна та діелектрична проникність;  $\epsilon$  – діелектрична проникність середовища;  $C_m$  – ємність клітинної мембрани.

Для подальшого розрахунку, виходячи з наведеного вище, візьмемо такі допустимі межі зміни параметрів клітин та її складових за такими відомими формулами:

$$\text{діаметр клітини } d_c = 2 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-5} \text{ м;}$$

$$\text{ємність клітинної мембрани } C_m = 10^{-14} \dots 2 \cdot 10^{-13} \text{ Ф;}$$

$$\text{електричний опір мембрани } R_m = 10^6 \dots 10^{18} \text{ Ом;}$$

$$\text{електричний опір протоплазми } R_p = 10^3 \dots 10^5 \text{ Ом;}$$

$$\text{відносна діелектрична проникність мембрани } \epsilon_m = 2 \dots 9;$$

відносна діелектрична проникність протоплазми  $\epsilon_p = 40 \dots 80$ .

Наведені дані дозволяють провести розрахунок електричних параметрів клітинної мембрани, протоплазми і клітини, виходячи з такого:

– абсолютні діелектричні проникності клітинної мембрани  $\epsilon_{ma} = \epsilon_m \epsilon_0$  і протоплазми  $\epsilon_{pa} = \epsilon_p \epsilon_0$ , де  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

– електрична ємність мембрани протоплазми  $C_p = 2\pi\epsilon_0\epsilon_p d_c$ ;

– індуктивність клітинної мембрани і протоплазми відповідно дорівнюють:

$$L_m = \frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_m} C_m \text{ та } L_p = \frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_p} C_p. \quad (2)$$

**Еквівалентна схема заміщення клітини.** Еквівалентну схему заміщення клітини можна отримати шляхом послідовного з'єднання схем для мембрани і протоплазми. Таким чином на рис. 2 представлений один із можливих варіантів заміщення при проходженні електромагнітного сигналу через клітину:

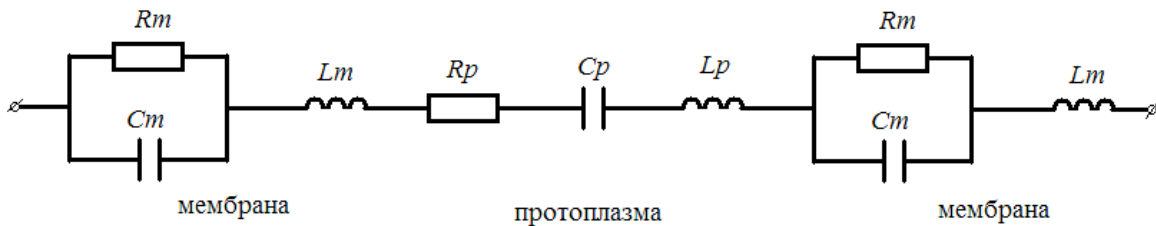


Рис. 2. Еквівалентна схема заміщення клітини

Проаналізуємо схему. Вираз для вхідного опору схеми, зображеної на рис. 2, являє собою суму вхідних опорів для мембрани та протоплазми і має вигляд:

$$Z_{ex}(j\omega) = \left( R_p + \frac{R_m}{1 + (\omega R_m C_m)^2} \right) + j \left( \omega(L_m + L_p) - \frac{1}{\omega C_p} - \frac{\omega k}{1 + (\omega} \right) \quad (3)$$

Вираз для вихідного опору схеми має вигляд:

$$Z_{eux}(j\omega) = \frac{R_m}{1 + (\omega R_m C_m)^2} + j \left( \omega L_m - \frac{\omega R_m^2 C_m}{1 + (\omega R_m C_m)^2} \right). \quad (4)$$

Коефіцієнт передачі еквівалентної схеми:

$$K(\omega) = \frac{Z_{eux}(j\omega)}{Z_{eux}(j\omega) + Z_{ex}(j\omega)}. \quad (5)$$

Привівши до спільного знаменника, перетворивши і прирівнявши уявну частину до нуля, отримаємо рівняння для визначення резонансних частот:

$$A\omega^6 + B\omega^4 + D\omega^2 + E = 0, \quad (6)$$

де коефіцієнти А, В, D, Е визначаються таким чином:

$$A = C_p L_m R_p C_m^4 R_m^4;$$

$$B = C_p R_m^2 C_m^2 (2L_m R_p - R_p C_m R_m^2 - R_m L_p);$$

$$D = C_p R_p (L_m - C_m R_m^2) - R_m (C_p L_p - C_m^2 R_m^2);$$

$$E = R_m.$$

За допомогою програмного забезпечення MathCad проведено розрахунок коренів рівняння. Визначено дві резонансні частоти, які можуть виникати при опроміненні ЕМ-сигналом,  $f_p = 6$  ГГц; 59,7 ГГц. Резонансні частоти розраховані для середніх значень параметрів клітини та її складових.

Варто зазначити, що при розв'язанні рівняння для резонансних частот були відкинуті корені рівняння, які не мають фізичного змісту.

**Висновки.** Розрахунки показують, що частоти коливання клітини та її елементів знаходяться в сантиметровому і міліметровому діапазоні. Саме вплив на біологічні об'єкти електромагнітним

випромінюванням у мм-діапазоні хвиль є ефективним, активно використовується в технологіях квантової медицини [1] і може призвести до максимального біологічного ефекту (відгуку).

Таким чином, можна сказати, що діапазон частот, в якому можливий резонансний вплив зовнішнього електромагнітного сигналу на клітину, достатньо широкий. Звичайно, якщо клітини, які належать різним біологічним об'єктам або його частинам, відрізняються, то для достатньо точного визначення резонансних частот необхідно знати електричні параметри внутрішнього складу клітини і мембрани.

Результати моделювання підтвердили наявність резонансних частот у мм-діапазоні хвиль.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Ситько С.П.* Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины / *С.П. Ситько, Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко.* – К. : ФАДА ЛТД, 1999. – 200 с.
2. *Никулин Р.Н.* Определение резонансных частот биологической клетки, представленной в виде эквивалентной схемы замещения / *Р.Н. Никулин* // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2005. – № 3. – С. 10–17.
3. *Вилли К.* Биология (Биологические процессы и законы) : пер. с англ. Н.М. Обручевой / *К.Вилли.* – М. : Мир, 1975. – 315 с.
4. *Голант М.Б.* Биологические и физические факторы, обуславливающие влияние монохроматических электромагнитных излучений миллиметрового диапазона малой мощности на жизнедеятельность / *М.Б. Голант* // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине / под ред. акад. Н.Д. Девяткова. – М. : ИРЭ АН СССР, 1985. – С. 21–36.
5. *Бецкий О.В.* Миллиметровые волны низкой интенсивности в медицине и биологии / *О.В. Беркий, Н.Д. Девятков, В.В. Кислов* // Вопросы физической метрологии : Вестн. Поволжск. отдел. метрол. акад. России. – 1999. – Вып. 1. – С. 44–81.
6. *Бецкий О.В.* Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты / *О.В. Бецкий, Н.Н. Лебедева* // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 3. – С. 5–19.
7. *Рубин А.Б.* Биофизика : В 2-х книгах / *А.Б. Рубин.* – М. : Высш. школа, 1987. – 400 с.

МЕЛЬНИК Єлизавета Тарасівна – магістрант Національного технічного університету України "КПІ".  
Наукові інтереси:

– діагностична та лікувальна апаратура мм-діапазону хвиль.

E-mail: [Melnik\\_Elizaveta@ukr.net](mailto:Melnik_Elizaveta@ukr.net).

ЯНЕНКО Олексій Пилипович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України "КПІ".

Наукові інтереси:

– метрологічне забезпечення приладів квантової медицини;

– радіометрія;

– діагностична та лікувальна апаратура мм-діапазону хвиль.

Подано 19.01.2010

**Мельник Е.Т., Яненко О.П.** Моделирование резонансной взаимосвязи микроволновых сигналов с клетками живого организма

**Мельник Е.Т., Яненко А.Ф.** Моделирование резонансного взаимодействия микроволновых сигналов с клетками живого организма.

**Melnik E.T., Yanenko O.P.** Modeling of resonant interaction microwave signals with the cells of living organism

УДК 621.317.7.089

**Моделирование резонансного взаимодействия микроволновых сигналов с клетками живого организма / Е.Т. Мельник, А.Ф. Яненко**

Проведен анализ литературных источников объекта исследования. Разработана эквивалентная схема замещения биологической клетки при прохождении через нее микроволнового сигнала. Проведено моделирование и получено аналитическое выражение для расчета резонансных частот. С помощью программы MathCad определены две резонансные частоты микроволнового диапазона.

УДК 621.317.7.089

**Modeling of resonant interaction microwave signals with the cells of living organism / E.T. Melnik, O.P. Yanenko**

An analysis of research literature was held. The developed equivalent circuit replace biological cells when passing through the microwave signal. A simulation was held and an analytical expression for calculating the resonant frequencies received. Two resonant frequencies of microwave range are defined with MathCad.