

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ИММУННЫХ КЛЕТКАХ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ВИДЕ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Шерстюк А. В.

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко

В статье рассматриваются подходы к нахождению собственных частот электромагнитных колебаний различных структур биологических систем.

**Постановка проблемы.** Клетка является сложным образованием, окруженное мембраной. Среда, которая окружает клетку, и среда внутри клетки имеют разные величины относительной диэлектрической проницаемости, как и мембранные белки. Установлено, что характерной особенностью воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ) на живые организмы является его резонансный характер – биологический эффект проявляется в узких интервалах частот [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Анализ литературы показал, что максимальный отклик биологической среды на воздействующее высокочастотное излучение будет наблюдаться в том случае, когда частота внешнего гармонического воздействия приближается к частоте одного из собственных колебаний системы, т.е. в случае резонансного взаимодействия.

**Цель статьи.** Исходя из всего вышесказанного, вытекает задача о нахождении собственных частот электромагнитных колебаний различных иммунных клеточных структур биологических систем.

**Основные материалы исследования.** Известно, что биологические объекты не гомогенны, а представлены разнообразными структурами, имеющими отличное строение. Элементом структуры биологических объектов является клетка. Протекающие в организме процессы представляют собой суперпозицию координированных функций его клеток. Клетки могут сильно различаться по размерам, форме и функциям, поэтому частоты, соответствующие собственным резонансам клетки, могут быть различны и лежать в определенном участке электромагнитного спектра.

Отсюда вытекает задача определения собственных резонансных частот тучных клеток, соответствующих участку биологически активных точек биологического объекта животного происхождения.

Согласно методике, представленной в работах [2, 3], поставленную задачу можно решить, представив клетку эквивалентной схемой замещения в виде комбинации сопротивлений ( $R$ ), электрических емкостей ( $C$ ) и индуктивностей ( $L$ ), и определить для такой системы резонансные частоты. На рис. 1 представлен один из возможных вариантов структуры клеточной мембраны [2], позволяющий оценить сложность построения единственной эквивалентной схемы замещения.

Рассмотрим решение задачи через представление клетки эквивалентной схемой замещения. Подобные схемы замещения биологических клеток и их мембран разработаны авторами [2, 3], детальное рассмотрение осуществлялось в работе [3]. Однако из нескольких

предложенных вариантов представления клетки в виде эквивалентной схемы замещения [3], в которых клетка представляется последовательным соединением схем замещения клеточной мембраны и протоплазмы, предпочтение следует отдать варианту, изображенному на рис. 2 с учетом исследований, проведенных в работе [2].

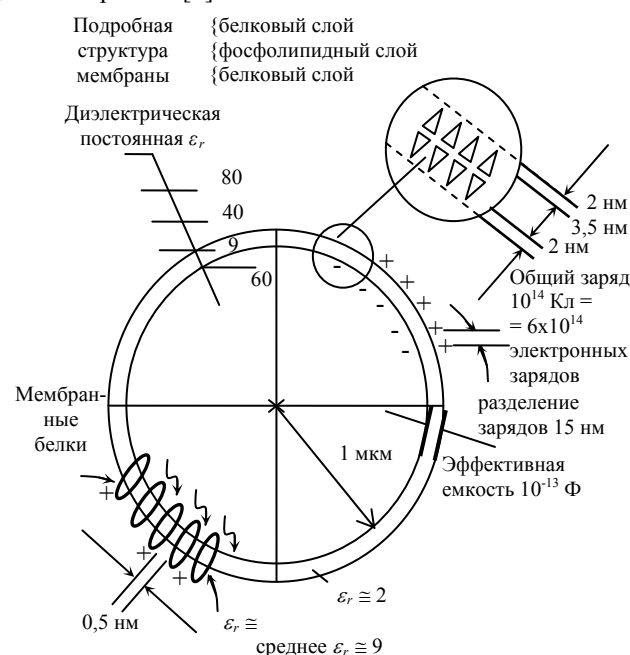


Рисунок 1 – Структура клеточной мембраны

Представим эквивалентную схему замещения клетки в виде четырехполюсника, составленного из соединения эквивалентной схемы клеточной мембраны и эквивалентной схемы клеточной протоплазмы.

Приведём данные о значениях геометрических размеров и электрических параметрах клеток и их составляющих, опубликованные в научной литературе [3, 4].

В [2] отмечалось, что магнитные свойства клеток и тканей выражены слабо и для них значение относительной магнитной проницаемости  $\mu \approx 1$ .

Необходимо отметить, что для расчета электрических параметров клеточных мембран существует три основных подхода к моделированию [5]:

- модели однородного диэлектрика;
- модели с использованием эмпирических потенциалов;
- модели с явно заданным липидным бислоем.

Использована модель однородного диэлектрика, преимущество которой состоит в простоте и вычислительной эффективности, однако при этом считается, что клеточная мембрана гомогенна и ее диэлектрическая проницаемость постоянна, хотя в действительности она колеблется в широких пределах (от 2 до 80), благодаря наличию воды в каналах и на поверхности бислоя. Не рассматривается также картина "белок – растворитель". Однако указанные недостатки можно учесть при составлении эквивалентной схемы клетки.

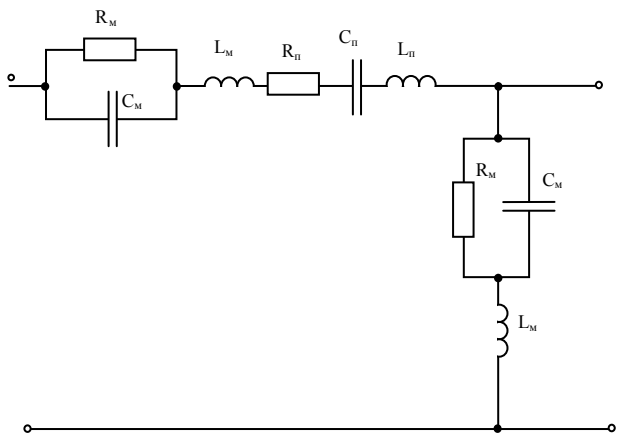


Рисунок 2 – Эквивалентная схема замещения биологической клетки

Для протоплазмы, представляющей собой последовательное соединение элементов  $L_n$ ,  $C_n$ ,  $R_n$  выражение для входного сопротивления имеет вид:

$$Z(j\omega) = \frac{\omega RC + j(\omega^2 CL - 1)}{\omega C}, \quad (1)$$

а резонанс возникает при  $f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_n C_n}}$ . Для эквивалентной схемы биологической клетки, изображенной на рис. 2, выражение для выходного сопротивления имеет вид:

$$Z_{\text{вых}}(j\omega) = \frac{R_m}{1 + (\omega R_m C_m)^2} + j \left[ \omega L_m - \frac{\omega R_m^2 C_m}{1 + (\omega R_m C_m)^2} \right], \quad (2)$$

а для входного сопротивления

$$Z(j\omega) = \left( R_n + \frac{R_m}{1 + (\omega R_m C_m)^2} \right) + j \left[ \omega(L_m + L_n) - \frac{1}{\omega C_n} - \frac{\omega R_m^2 C_m}{1 + (\omega R_m C_m)^2} \right]. \quad (3)$$

Полученные данные позволяют определить для выбранных параметров резонансные частоты клетки, приравняв мнимую часть выражения (3) к нулю.

Уравнение для определения резонансных частот в данном случае имеет вид:

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

$$\text{где } A = C_m^2 R_m^2 C_n (L_m + L_n);$$

$$B = C_n (L_m + L_n) - R_m^2 C_m (C_m + C_n);$$

$$D = -1.$$

Численные результаты решения уравнений (4) для определения резонансных частот клеток лимфоцитов и тучных клеток получены с помощью специализированного пакета MathCAD и могут быть представлены следующими соотношениями:

$$\omega \rightarrow \left[ \begin{array}{l} -\sqrt{-\frac{1}{A} \left( B + \sqrt{B^2 - 4AD} \right)} \\ \sqrt{-\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}} \\ -\sqrt{-\frac{1}{A} \left( B - \sqrt{B^2 - 4AD} \right)} \\ \sqrt{-\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}} \end{array} \right]$$

Для выполнения численного расчета, на основе анализа источников [2, 3, 4], возьмем следующие значения параметров клетки и ее составляющих, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 – Значения параметров иммунных клеток

	$d_c$ , м	$C_m$ , Ф	$R_m$ , Ом	$R_n$ , Ом	$\varepsilon_m$	$\varepsilon_n$
лимфоциты	$7 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-14}$	$10^9$	$10^4$	2,5	40-80
тучные клетки	$2,5 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-14}$	$10^9$	$10^4$	3	40-80

Индуктивности клеточной мембраны и протоплазмы соответственно [3] определяются:

$$L_m = \frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_m} C_m; \quad L_n = \frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_n} C_n,$$

$$\text{где } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м;}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м;}$$

$C_n = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_n d_c$ , где  $d_c$  – диаметр сферической модели клетки.

После подстановки данных в приведенные соотношения, получаем значения параметров клеточных мембран и протоплазмы (табл. 2, рис. 3, 4).

Таблица 2 – Расчетные данные электрофизических параметров клеток для  $\varepsilon_n = 80$

Клетки	$R_m, \text{ Ом}$	$L_m, \text{ Гн}$	$C_m, \text{ Ф}$
Лимфоциты	$10^9$	$1,14 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-14}$
Тучные клетки	$10^9$	$9,47 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-14}$
Клетки	$R_n, \text{ Ом}$	$L_n, \text{ Гн}$	$C_n, \text{ Ф}$
Лимфоциты	$10^4$	$5,52 \cdot 10^{-11}$	$3,11 \cdot 10^{-14}$
Тучные клетки	$10^4$	$1,58 \cdot 10^{-10}$	$8,89 \cdot 10^{-14}$

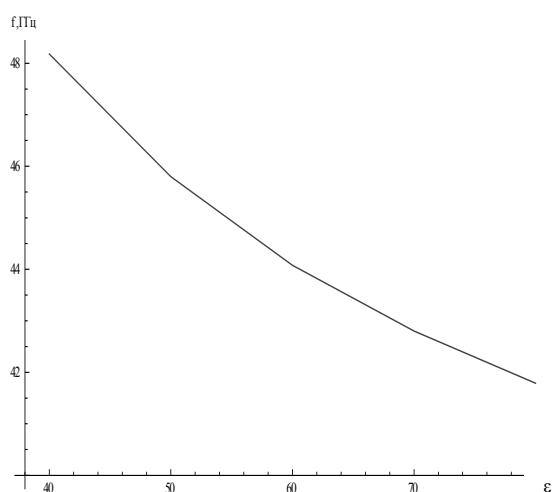


Рисунок 3 – Зависимость резонансной частоты лимфоцита от значений диэлектрической проницаемости протоплазмы

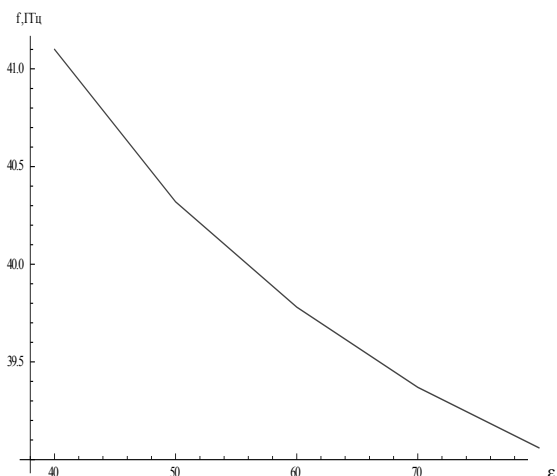


Рисунок 4 – Зависимость резонансной частоты тучной клетки от значений диэлектрической проницаемости протоплазмы

Имея указанные данные, возможно определить резонансные частоты иммунных клеток – лимфоцитов и тучных клеток, табл. 3.

Таблица 3 – Результаты определения резонансных частот тучных клеток и лимфоцитов

Лимфоциты		Тучные клетки	
$\varepsilon_n$	$f_{рез}, \text{ ГГц}$	$\varepsilon_n$	$f_{рез}, \text{ ГГц}$
40	48,19	40	41,10
50	45,80	50	40,32
60	44,08	60	39,78
70	42,80	70	39,37
80	41,79	80	39,06

**Выводы.** Резонансные частоты иммунных клеток при сделанных допущениях лежат в миллиметровом диапазоне (41,1 до 44 ГГц).

Эффективность использования терапевтического ЭМИ данного диапазона неоднократно подтверждена многочисленными опытами, активно используется в квантовой медицине и ветеринарии и может быть использована для стимуляции иммунитета животных.

#### Список использованных источников

1. Бецкий О. В. Миллиметровые волны в биологии / О. В. Бецкий, М. Б. Голант, Н. Д. Девятков. М.: Знание, 1988. – 64 с.
2. Мельник С. Т. Моделирование резонансной взаимодії мікрохвильових сигналів з клітинами живого організму / С. Т. Мельник, О. П. Яненко. Вісник ЖДТУ. – №1 (52). – Київ, 2010. – С. 115 – 119.
3. Никулин Р. Н. Исследование воздействия СВЧ-излучения низкой интенсивности на биологические объекты / Р. Н. Никулин. Материалы III Всероссийской конференции "Радиолокация и радиосвязь". - ИРЭ РАН, 26 – 30 октября 2009 г. – С. 136 – 140.
4. Ярилин А. А. Основы иммунологии: Учебник / А. А. Ярилин. М.: Медицина, 1999. – 608 с.

#### Анотація

#### МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ІМУННИХ КЛІТИНАХ, ЯКА ПРЕДСТАВЛЕНІХ У ВИГЛЯДІ СХЕМ ЗАМІЩЕННЯ

Шерстюк О. В.

*У статті розглядаються підходи до знаходження власних частот електромагнітних коливань різних структур біологічних систем.*

#### Abstract

#### DESIGN OF ELECTRIC PROCESSES IN THE IMMUNE CELLS REPRESENTED AS CHART OF SUBSTITUTION

A. Sherstyuk

*The approaches to finding of own frequencies of electromagnetic vibrations of different structures of the biological systems are examined in the article.*