

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КЛЕТОК, РЕЗОНАНС РАЗНООБРАЗИЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕРАПИЯ

Федюшко Ю. М., Артюшенко А. В.

*НТУ «Харьковский политехнический институт»*

*В статье рассматриваются вопросы воздействия последовательностей импульсов на основе системы итерируемых функций на биологические колебательные системы.*

**Постановка проблемы.** Изучение терапевтического воздействия электромагнитных полей на животных и человека является актуальной проблемой, а успешное развитие электромагнитной терапии невозможно без моделирования воздействия различных электромагнитных полей на биологические клетки. Современное состояние представлений о функционировании клеток уже не соответствует их моделям, которые используются при анализе воздействия электромагнитных полей на организм и усовершенствование моделей клеток является актуальной задачей. В любых моделях, с электрофизической точки зрения, клетка представляет собой нелинейную колебательную систему.

Обычно при исследовании сложных процессов в колебательных системах используется формализм на основе нелинейных дифференциальных уравнений или отображений. Практически во всех реальных случаях клетка взаимодействует с другими клетками и постоянно находится под действием случайных сил. С термодинамической точки зрения биологические объекты являются открытыми системами.

В случае воздействия случайных сил и возмущений часто используется подход на основе стохастических дифференциальных уравнений. Однако для сложных систем более эффективно было бы рассмотрение вместо непрерывных моделей эволюции дискретных моделей на основе отображений, но с учетом влияния внешних случайных воздействий. Математическим аппаратом, осуществляющим такой подход, может служить формализм системы итерируемых функций (СИФ) [1, 2]. В работе используется модель функционирования клеток на основе СИФ и эффекты, связанные с возникновением специфических резонансов в множестве взаимодействующих клеток.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Оптимальная беспорядочность, заложенная в сложной системе, может резко повысить ее чувствительность к слабым внешним воздействиям. Не исключено, что такой резонанс играет важную роль в био- и экосистемах. Хаотическое воздействие, или попросту шум, обычно считается вредной помехой, препятствующей нормальному функционированию устройств. Физикам, однако, известно, что в определенных ситуациях шум может играть и конструктивную роль. Именно это происходит, например, при стохастическом резонансе, когда шум определенной мощности резко улучшает чувствительность системы к слабым внешним воздействиям. Другим примером такой ситуации является возможность подавления внутренних шумов с помощью внешних.

В статье [3] показан эффект, целиком обязанный создающей роли беспорядочности, - резонанс, порожденный разнообразием. В этой работе рассмотрен не один (как в стохастическом резонансе), а  $N$  элементов, связанных друг с другом в глобальную сеть (то есть каждый связан с каждым). В качестве отдельных элементов рассматриваются положения элементов  $x_i$ , которые подчиняются системе динамических уравнений в бистабильном потенциале с гармонической внешней силой, с учетом простейшего взаимодействия между элементами.

**Цель статьи.** Показать возможность управления сигналами малого уровня биологическими процессами в организме на основе представления отдельных клеток нелинейными осцилляторами в виде связанных СИФ, в которых разнообразие управляется внешним сигналом.

**Основные материалы исследований.** Рассмотрим систему связанных возбудимых мембран, которые описываются уравнениями Фитц-Хью – Нагумо [4]:

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i - \frac{1}{3}x_i^3 - y_i + \frac{C}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - x_i), \quad (1)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = x_i + a_i + A \sin(\Omega t), \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Взаимодействие между клетками осуществляется простейшим образом, пропорциональными разнице

функций  $V(x_i) = \frac{C}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - x_i)$ :

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i - x_i^3 + a_i + \frac{C}{N} \sum_{j=1}^N (x_j - x_i) + A \sin(\Omega t), \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N.$$

Внешняя сила действует на каждый элемент, и если какой-то из них переключается, то он «тянет» за собой другие. Элементы отличаются только константами  $a_i$ . Величины параметра  $a_i$  удовлетворяют соотношениям  $\langle a_i \rangle = 0$ ,  $\langle a_i a_j \rangle = \delta_{ij} \sigma^2$ , где величину  $\sigma$  можно назвать параметром разнообразия. Переключение большинства элементов означает, что сеть как целое реагирует на внешнее воздействие. Для характеристики этой реакции введена средняя величина положения по всей сети:

$$X(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j(t). \quad (4)$$

Такие сети изучались и раньше, но обычно они конструировались из идентичных элементов, а здесь параметры элементов будут слегка различаться (подчеркнем, что средние по всей сети параметры элементов были фиксированы, изменялась лишь величина разброса свойств элементов относительно среднего.) Привнесенное таким образом разнообразие в систему тоже можно представить как некую форму «шума», только «встроенного» в систему.

Легко видеть, что усреднение системы уравнений (1) приводит к уравнению

$$\frac{dX(t)}{dt} = X - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j^3 + A \sin(\Omega t),$$

которое можно упростить, предположив, что отклонения  $x_i = X + \delta_i$  от среднего значения  $X$  невелики. Введем еще одну

среднюю величину  $M = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \delta_j^2$ . Из этих соотношений следует уравнение для среднего смещения  $X$ :

$$\frac{dX(t)}{dt} = (1 - 3M)X - X^3 + A \sin(\Omega t), \quad (5)$$

описывающее, как такая сеть откликается на слабые периодические внешние воздействия. Анализ уравнения (5) показывает следующее.

Обычная сеть, состоящая из почти одинаковых элементов, откликалась на подпороговые внешние воздействия столь же слабо, как и единичный триггер. Сеть с чрезмерно большим разнообразием тоже плохо отслеживала внешнее возмущение, поскольку ее удерживал от этого слишком большой процент «неподатливых» элементов.

Реакцию системы на внешнее воздействие характеризует величина спектрального усиления  $\eta = \frac{4}{A^2} \left| \langle e^{i\Omega t} X(t) \rangle_t \right|^2$ , в определении которого символ  $\langle \dots \rangle_t$  означает усреднение по времени. Численный анализ показывает, что при оптимально подобранном разнообразии  $\sigma$  чувствительность сети ( $\eta$ ) возрастала в десятки раз.

Таким образом, вся система при оптимальном разнообразии  $\sigma$  чувствует гораздо более слабые возмущения, чем какой-нибудь один типичный триггер. Это явление было названо резонансом, вызываемым разнообразием. Так же, как и в случае стохастического резонанса, ключевую роль здесь играет некая «оптимальная беспорядочность», определяющаяся устройством сети.

Если в условиях электромагнитной терапии рассматривать клетки, как нелинейные осцилляторы [5], находящиеся под воздействием последовательности импульсов, то ясно, что, воспользовавшись аппаратом СИФ, их можно представить в виде связанных СИФ, в которых разнообразие управляется внешним сигналом.

Численный анализ этих связанных систем показывает, что внешним сигналом можно достичь оптимальной беспорядочности (оптимального многообразия) взаимодействующих клеток, и электромагнитная терапия при этом, как бы «мобилизует» систему и обеспечивает ей сильный отклик даже на малейшие внешние воздействия. Благодаря разнообразию систем отпадает необходимость накладывать внешний шум на слабый сигнал: оптимальный шум уже присутствует в устройстве взаимодействующих клеток.

**Выводы.** В настоящей статье приведена модель эволюции биологических колебательных систем под воздействием сложных последовательностей импульсов на основе аппарата СИФ. При этом оказывается, что даже малыми сигналами можно управлять биологическими системами.

Изложенные в статье результаты позволяют надеяться на дальнейшее развитие информационных методов управления биологическими процессами с помощью электромагнитных импульсов малой амплитуды.

#### Список использованных источников

1. Massopust P. R. Fractal Functions, Fractal Surfaces, and Wavelets / Academic Press, San-Diego, 1995.
2. Магда И. И. Технология адаптивного тестирования состояний нелинейных систем, ее приложение к типичным СВЧ устройствам и хаотическая связь / И. И. Магда, А. В. Пашенко, И. М. Шаповал, В. Е. Новиков. Успехи современной радиоэлектроники. – №11. – 2005. – С. 47 – 55.
3. C. Tessone, C. Mirasso et all, Diversity-induced resonance, arXiv: cond-mat/0605082v1, 3 May 2006.
4. FitzHugh R., in H. P. Schwan (ed.), Biological Engineering. – New York, 1969. – P. 1.
5. Иваницкий Г. Р. Математическая биология клетки / Г. Р. Иваницкий, В. И. Кринский, Е. Е. Сельков. – М.: «Наука», 1978.

#### Анотація

### ВЗАЄМОДІЯ КЛІТОК, РЕЗОНАНС РАЗНООБРАЗІЙ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ТЕРАПІЯ

Федюшко Ю. М., Артюшенко О. В.

*У статті розглядаються питання дії послідовностей імпульсів на основі системи ітерованих функцій на біологічні коливальні системи.*

#### Abstract

### CO-OPERATION OF CAGES, RESONANCE OF VARIETY AND ELECTROMAGNETIC THERAPY

Yu. Fedyushko, A. Artyushenko

*The questions of influence of impulses on the basis of the system of iterated functions on the biological oscillating systems are examined in the article.*