

УДК 517.925:612.8

## Исследование моделей нейронных сетей ГОЛОВНОГО МОЗГА

Чернова М.А., Мамедова Т.Ф.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

*Аннотация:* В статье рассматриваются основные модели нейронных сетей: модели Хиндмарша–Роуза и ФицХью–Нагумо, описанные системами дифференциальных уравнений. Показано, что выбор модели зависит от целей исследования: для хаотических процессов предпочтительнее использование модели Хиндмарша–Роуза, для устойчивых циклов – модели ФицХью–Нагумо. Их совместное использование расширяет возможности понимания работы нейронных сетей.

*Ключевые слова:* модель Хиндмарша–Роуза, модель ФицХью–Нагумо, нейронные сети.

### 1. Введение

Существует множество моделей, описывающих работу нейронных сетей в головном мозге. Классические модели, такие как модель Хиндмарша – Роуза и модель ФицХью – Нагумо, описываются системами дифференциальных уравнений и позволяют моделировать динамическое поведение нейронных сетей, включая устойчивость, колебания и реакции на стимулы. Эти модели просты в понимании, что делает их важным инструментом для понимания фундаментальных механизмов работы нейронов головного мозга.

### 2. Модель Хиндмарша–Роуза

Модель Хиндмарша–Роуза хорошо описывает поведение нейронов со сложной, ритмической и динамической активностью [1]. Она представляет собой систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 + (-ax_1^3 + bx_1^2) - x_3 + I, \\ \frac{dx_2}{dt} = c - dx_1^2 - x_2, \\ \frac{dx_3}{dt} = r(s(x_1 - x_R) - x_3), \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_1$  – потенциал мембраны;  $x_2$  – переменная восстановления;  $x_3$  – переменная адаптации;  $I$  – величина стимулирующего тока (эта переменная изображает экспериментальное подключение тока к мембране);  $x_R$  – пороговое значение мембранного потенциала; параметры  $a, b, c, d, r, s$  определяют форму модели и могут быть настроены для воспроизведения различных динамических режимов нейрона.

### 3. Модель ФицХью – Нагумо

Модель ФицХью–Нагумо – это упрощённая версия более сложной модели нейрона Ходжкина–Хаксли, разработанная для описания основных свойств возбуждения и реполяризации нейронов [2]. В отличие от модели Хиндмарша–Роуза, данная модель лучше подходит для описания нейронов с простой, стабильной динамикой возбуждения и реполяризации. Эта модель описывается системой:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_1 - x_1^3 - x_2 + I, \\ \tau \frac{dx_2}{dt} = x_1 - a - bx_2, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_1$  – потенциал мембраны;  $x_2$  – переменная восстановления;  $x_3$  – переменная адаптации;  $I$  – величина тока;  $\tau$  – время, в течение которого происходит изменение переменной восстановления;  $a$  – скорость восстановления мембранного потенциала;  $b$  – отношение между возбуждением и торможением.

### 4. Моделирование нейронной сети

Моделирование различных типов нейронов в одной сети важно для более точного понимания того, как работает мозг. Одни нейроны регулируют циклические процессы, такие как дыхание или сердцебиение, другие участвуют в сенсорной обработке или формировании движения. Они различаются по частоте срабатывания, порогам и активности. Включение различных типов нейронов в модель помогает нам понять, как их взаимодействия создают сложные закономерности, такие как синхронность, ритмы или хаос. Такой подход расширяет исследовательские возможности, помогает определять ключевые параметры и разрабатывать новые методы лечения или нейротехнологии.

В моделировании нейронной сети для каждой модели было выбрано по 3 нейрона (общее число нейронов равно 6). Для каждого нейрона случайным образом задаются начальные значения переменных в диапазоне от -1 до 1, определяющие его стартовое состояние. Далее создаётся матрица связей между нейронами, которая задаёт силу синаптических взаимодействий. В этой матрице каждому паре нейронов присваивается случайный вес, отражающий степень влияния одного нейрона на другой. Веса могут быть как положительными, что соответствует возбуждающему воздействию, так и отрицательными, что соответствует тормозящему эффекту. Важным моментом является исключение самосинапсов – нейрон не влияет сам на себя, поэтому диагональные элементы матрицы устанавливаются равными нулю.

Для каждого нейрона учитывается сумма входных сигналов от всех остальных нейронов с учетом соответствующих синаптических весов. В результате входной сигнал для нейрона представляет собой взвешенную сумму потенциалов других нейронов. Влияние этих сигналов на динамику нейрона выражается путем сложения суммы входных сигналов с внешним стимулом, что влияет на изменение мембранного потенциала и других переменных.

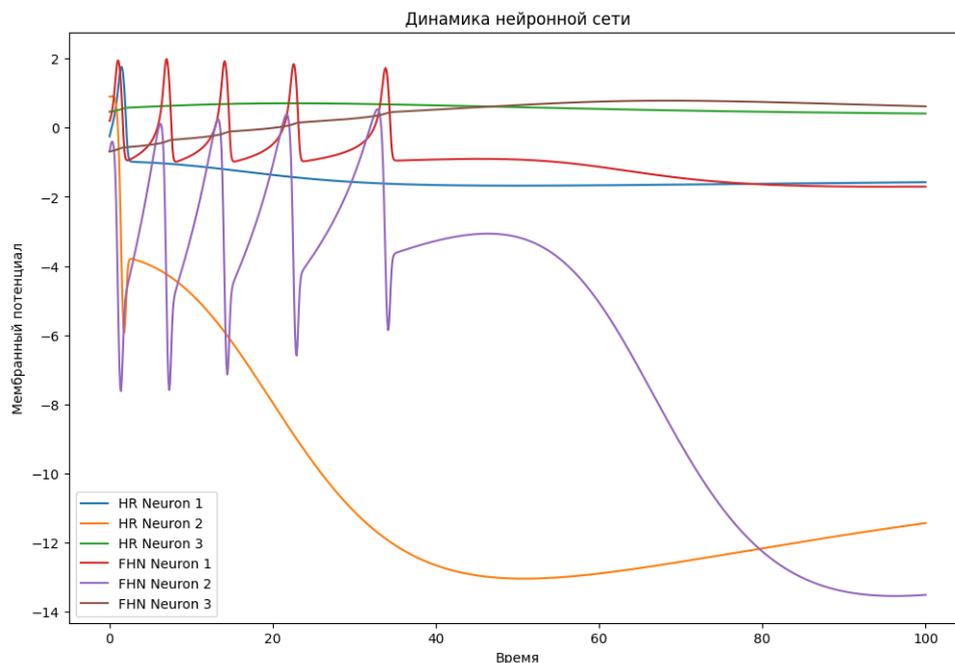
Для моделирования динамики нейронных сетей выбран временной диапазон от нуля до ста. В течение этого периода система изучается с использованием 1000 равномерных точек, что обеспечивает достаточно высокое временное разрешение для анализа таких процессов, как импульсные выбросы и ритмическая активность.

Для численного решения был использован метод Рунге–Кутты с автоматической регулировкой шага. Этот метод выбирает оптимальный размер шага для достижения

заданной точности.

## 5. Результаты моделирования

Результаты численного моделирования представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Динамика нейронной сети

Полученный график показывает, что нейроны, описываемые моделью Хайндмарша–Роуза, демонстрируют более сложное и разнообразное поведение, чем нейроны, описываемые моделью Фицхью–Нагумо. В частности, активность нейронов HR характеризуется наличием выраженных импульсных разрядов, которые могут проявляться в виде регулярных или хаотических колебаний, а также переходов между различными режимами возбуждения. Это свидетельствует об их способности моделировать более сложные динамические состояния, такие как генерация ритмов или паттернов возбуждения, характерных для некоторых типов нейронов мозга.

В то же время нейроны, основанные на модели Фицхью–Нагумо, демонстрируют более упорядоченное и предсказуемое поведение. Их мембранные потенциалы колеблются в относительно узком диапазоне, демонстрируя характерные спайковые разряды, которые повторяются с почти постоянной частотой. Этот тип активности хорошо подходит для моделирования нейронов, участвующих в циклических мозговых процессах. В целом активность этих нейронов более стабильна и менее хаотична по сравнению с нейронами HR.

Таким образом, выбор модели зависит от целей исследования. Для анализа сложных, хаотических и ритмических закономерностей предпочтительнее использовать модель Хиндмарша–Роуза, а для изучения устойчивых циклических процессов – модель Фицхью–Нагумо. Совместное использование этих моделей расширяет возможности понимания работы нейронных сетей.

## **Литература**

1. Hindmarsh J. L., Rose R. M. A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations // Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences. 1984. Vol. 221, No. 1222. P. 87-102.
2. FitzHugh R. Mathematical models of excitation and propagation in nerve // In: Schwan H. P. (Ed.). Biological Engineering. New York: McGraw-Hill Book Co., 1969. P. 1-85.

MSC 93A30

## Research into neural network models of the brain

M.A. Chernova, T.F. Mamedova

National Research Mordovia State University

*Abstract:* The article discusses the main models of neural networks – the Hindmarsh-Rose and FitzHugh-Nagumo models, based on differential equations. It is shown that the choice of model depends on the study's objectives: for chaotic processes, the Hindmarsh–Rose model is preferable, for stable cycles is the FitzHugh–Nagumo model. Their combined using expands the possibilities of understanding the work of neural networks.

*Keywords:* the Hindmarsh–Rose model, the FitzHugh–Nagumo model, neural networks.

### References

1. Hindmarsh J. L., Rose R. M. A model of neuronal bursting using three coupled first order differential equations // Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences. 1984. Vol. 221, No. 1222. P. 87-102.
2. FitzHugh R. Mathematical models of excitation and propagation in nerve // In: Schwan H. P. (Ed.). Biological Engineering. New York: McGraw-Hill Book Co., 1969. P. 1-85.