

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

УДК № 537.86

Кафедра радиофизики и
нелинейной динамики

**Эффект накопления внешнего сигнала нейроном
Хиндмарша–Розе**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4032 группы
направления 03.03.03 Радиофизика
Института физики
Гурьянова Никиты Владимировича

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н.

_____ А.В. Бух

Зав. кафедрой радиофизики
и нелинейной динамики,
д.ф.-м.н., доцент

_____ Г.И. Стрелкова

Саратов 2025

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность

Актуальность темы исследования обусловлена стремительным развитием искусственного интеллекта (ИИ), который всё больше проникает во все сферы жизни — от повседневных запросов в интернете до решения сложных профессиональных задач. Современные ИИ-системы в основном базируются на математических вычислениях и алгоритмах, которые не учитывают биологические особенности нейронных сетей. В то время как биологические нейроны передают информацию с помощью электрических импульсов — потенциалов действия, их активность включает не только одиночные спайки, но и сложные режимы, такие как взрывные колебания (bursting) — серии импульсов с периодами затишья. Механизмы накопления и интеграции таких внешних сигналов нейроном остаются малоизученными как в отечественной, так и в зарубежной науке.

Изучение эффекта накопления внешнего сигнала нейроном Хиндмарша–Роуз позволяет углубить понимание сложной динамики нейронной активности и расширить математический аппарат для анализа биологических систем, что важно для создания более биологически релевантных моделей нейроподобных вычислительных систем. Это, в свою очередь, способствует совершенствованию современных систем искусственного интеллекта, делая их работу более приближенной к человеческому восприятию и обработке информации на основе особенностей нейронных связей.

Таким образом, актуальность выпускной квалификационной работы заключается в необходимости поиска новых подходов к моделированию и анализу нейронной динамики, что позволит повысить качество и эффективность ИИ-технологий, интегрируя биологические принципы функционирования нервной системы в современные вычислительные модели. **Цель работы** состоит в исследовании эффекта накопления внешнего сигнала нейроном Хиндмарша–Роуз и выявление оптимальных параметров внешнего воздействия, обеспечивающих устойчивые и выраженные

режимы нейронной активности. **Задачи** включают анализ литературы по моделированию нейронных связей, проведение численных экспериментов для подбора управляющего тока, амплитуды и длительности импульса, а также исследование поведения нейрона при воздействии одного и двух аналогичных нейронов

В первом разделе рассматриваются основные биологические механизмы и математические модели нейронной активности, уделяется внимание особенностям передачи сигналов в нейронных сетях, а также анализируется влияние управляющего тока на динамику нейрона Хиндмарша–Роуз, что позволяет определить оптимальные параметры для дальнейших исследований

В следующем разделе подробно раскрывается реакция нейрона Хиндмарша–Роуз на различные варианты внешних сигналов: описывается используемая математическая модель, исследуется динамика взаимодействия двух нейронов, а также анализируется поведение нейрона при воздействии нескольких входных связей и интеграции сигналов

МОДЕЛЬ НЕЙРОНА ХИНДМАРША-РОУЗ

В данной главе рассматривается теоретическая основа моделирования нейронной активности, приводится математическая модель нейрона Хиндмарша–Роуз и обсуждаются основные параметры модели

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_0^{\text{out}} = y_0^{\text{out}} - (x_0^{\text{out}})^2 (ax_0^{\text{out}} - b) + I - z_0^{\text{out}} + \sum_{i=1}^N \sigma_{i0} (x_i^{\text{in}} - x_0^{\text{out}}), \\ \dot{y}_0^{\text{out}} = c - d (x_0^{\text{out}})^2 - y_0^{\text{out}}, \\ \dot{z}_0^{\text{out}} = r (s(x_0^{\text{out}} - x_R) - z_0^{\text{out}}), \\ \\ \dot{x}_i^{\text{in}} = y_i^{\text{in}} - (x_i^{\text{in}})^2 (ax_i^{\text{in}} - b) + I - z_i^{\text{in}} + H_i(t), \\ \dot{y}_i^{\text{in}} = c - d (x_i^{\text{in}})^2 - y_i^{\text{in}}, \\ \dot{z}_i^{\text{in}} = r (s(x_i^{\text{in}} - x_R) - z_i^{\text{in}}), \end{array} \right. \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$, а N — число входных нейронов. В уравнениях $x_0^{\text{out}}, y_0^{\text{out}}, z_0^{\text{out}}$ — динамические переменные выходного нейрона, а $x_i^{\text{in}}, y_i^{\text{in}}, z_i^{\text{in}}$ — соответствующие переменные входных нейронов. Параметры a, b, c, d, r, s, x_R и I определяют свойства нейронов и их взаимодействий, а коэффициенты σ_{i0} задают силу связи между входными нейронами и выходным нейроном. Внешний сигнал, воздействующий на входные нейроны, описывается функцией $H_i(t)$, которая имеет вид:

$$H_i(t) = \begin{cases} C, & i\tau \leq t \leq i\tau + T, \\ 0, & t < i\tau \text{ или } t > i\tau + T, \end{cases}$$

где C — амплитуда импульса, τ — временной сдвиг между стимулами для разных входных нейронов, а T — длительность воздействия.

Таким образом, представленная модель позволяет исследовать влияние распределенных во времени внешних сигналов на динамику нейронной сети и выявлять механизмы накопления и интегрирования сигналов нейроном Хиндмарша–Роуз.

Для анализа динамики системы фиксируются параметры на основе литературы: $a = 1, b = 3, c = 1, d = 5, s = 4, x_R = -\frac{8}{5}, r \approx 10^{-3}$.

Управляющий ток I варьируется от -10 до 10 и определяет возбудимость нейрона

Результаты исследования начального управляющего тока модели нейрона Хиндмарша-Роуз

В данном разделе приведены результаты численного моделирования одиночного нейрона при различных значениях управляющего тока и параметров внешнего сигнала. Показано влияние начальных условий и управляющего тока на спайковую активность нейрона

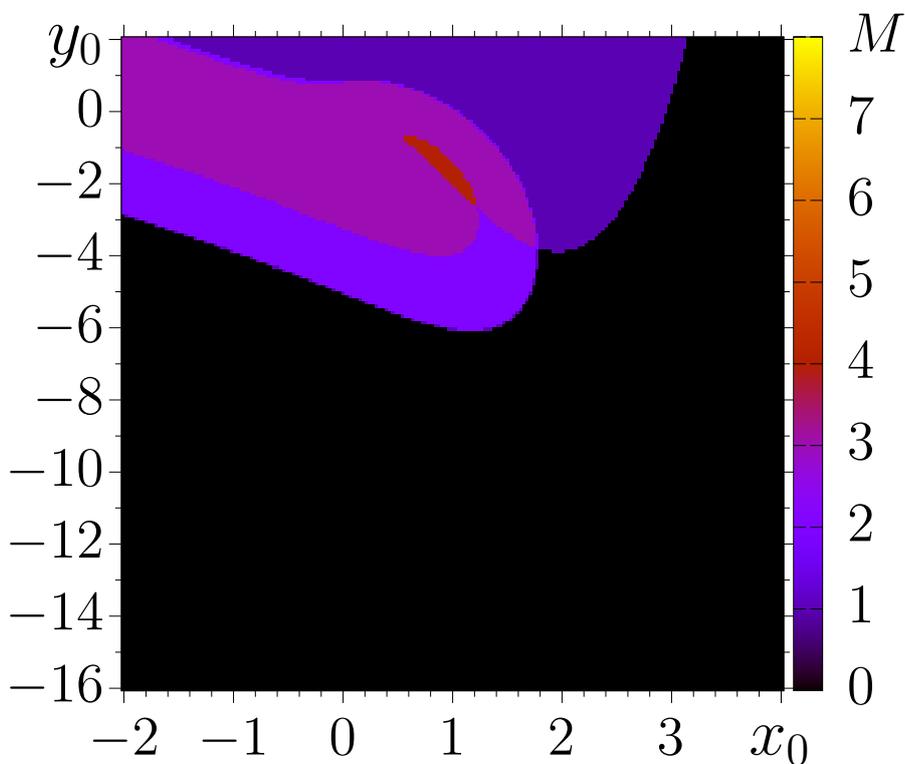


Рисунок 1 — Карта количества спайков M на плоскости начальных условий x_0, y_0 при $I = 0$

На рисунке 1 показано, как начальные условия (x_0, y_0) влияют на число спайков M в модели нейрона Хиндмарша-Роуза без внешнего тока ($I = 0$). Видны чёткие границы между областью покоя и зоной спайковой активности, что отражает пороговый характер динамики: небольшие изменения начальных условий могут резко изменить поведение нейрона. Такая чувствительность объясняет различия в реакции нейронов на одинаковые стимулы

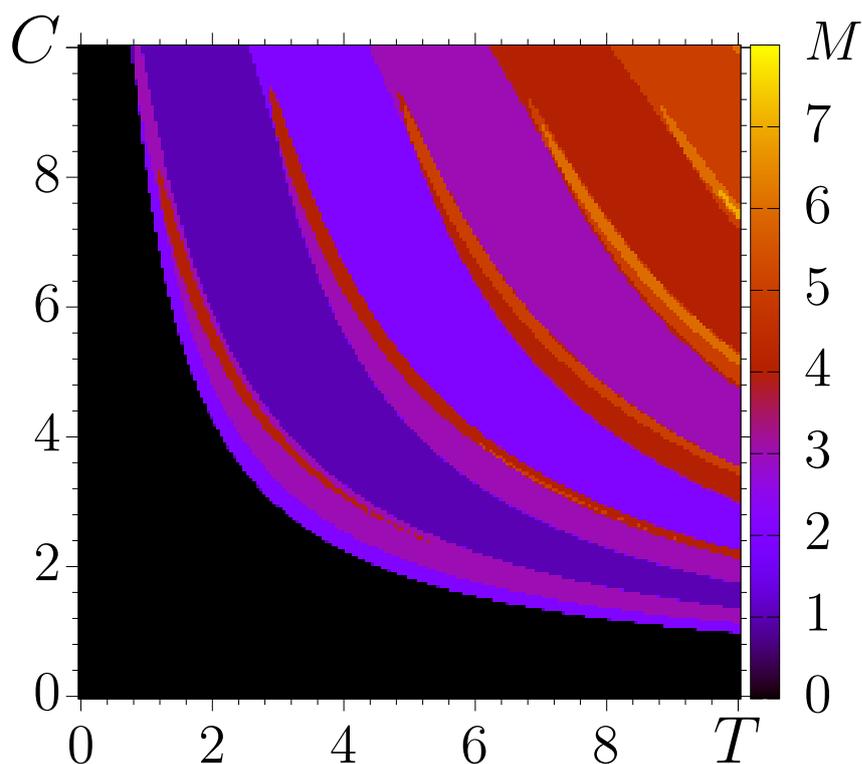


Рисунок 2 — Карта количества спайков M на плоскости параметров внешнего сигнала C и T при $I = 0$.

На рисунке 2 показано, как амплитуда C и длительность T внешнего сигнала влияют на число спайков M нейрона. Видно, что разные сочетания параметров могут как запускать, так и подавлять спайковую активность.

Изменяя параметры стимула, можно управлять переходом нейрона между покоем и активностью. Временные реализации $x(t)$ для разных C и T демонстрируют, как меняется характер ответа при изменении этих параметров.

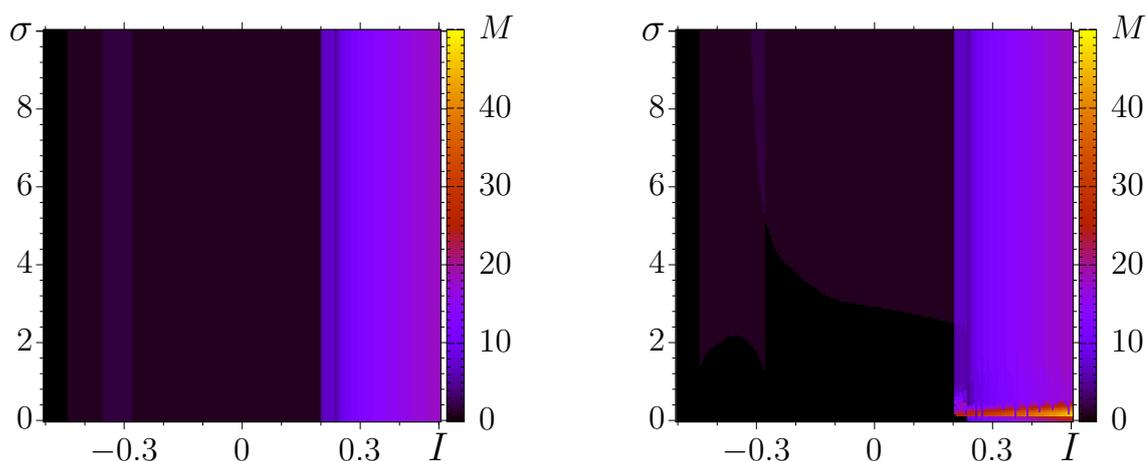
Управляющий ток I сильно влияет на динамику: при $I < 0$ нейрон труднее возбудить, а при $I > 0$ он становится более чувствительным и активным. При больших I нейрон почти всегда активен, а влияние параметров стимула становится минимальным. Модель полезна для анализа интеграции сигналов и построения нейросетей.

РЕАКЦИЯ НЕЙРОНА ХИНДМАРША–РОУЗА НА СЛОЖНЫЕ ВНЕШНИЕ СИГНАЛЫ

В данной главе рассматривается реакция нейрона Хиндмарша–Роуз на сложные внешние сигналы, а также влияние параметров сигнала на характер нейронной активности

Однонаправленное взаимодействие двух нейронов Хиндмарша–Роуз

В данном разделе исследуется динамика системы из двух связанных нейронов Хиндмарша–Роуз при однонаправленном взаимодействии, анализируется влияние силы связи и управляющего тока на спайковую активность



(а) Карта спайковой активности входного нейрона в координатах σ и I .

(б) Карта спайковой активности выходного нейрона в координатах σ и I .

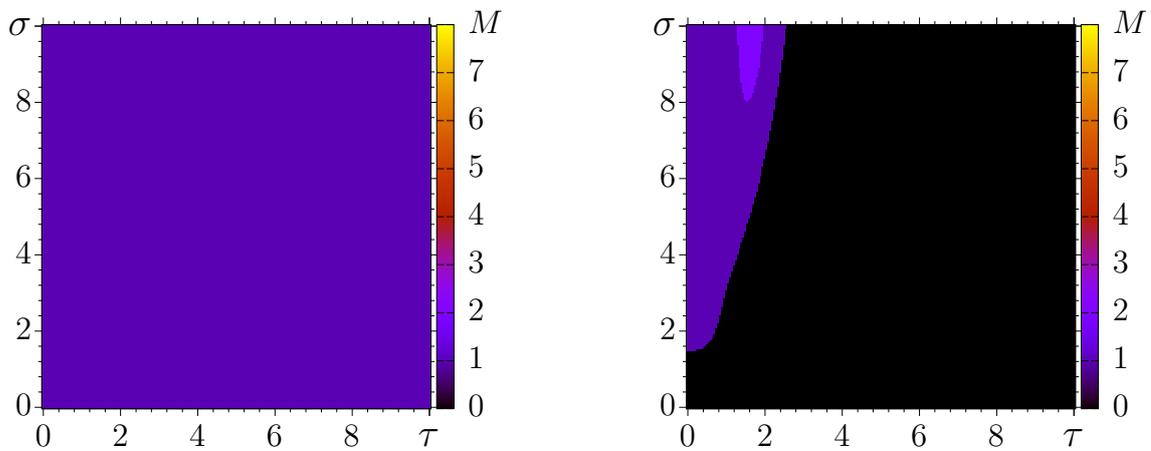
Рисунок 1 — Влияние силы связи σ и управляющего тока I на активность входного (слева) и выходного (справа) нейронов Хиндмарша–Роуз.

Карты спайковой активности показывают, что при малых значениях силы связи σ и управляющего тока I оба нейрона находятся в покое. С увеличением любого из параметров начинается генерация спайков, а при больших σ и I активность нейронов синхронизируется. Таким образом, сила связи и управляющий ток совместно определяют переход системы

от покоя к интенсивной активности, а карты позволяют увидеть границы между разными режимами работы нейронов

Поведение нейрона Хиндмарша–Роуз под действием двух входных нейронов

В данном разделе рассматривается поведение выходного нейрона при воздействии сигналов от двух входных нейронов, выявляются условия для возникновения эффекта накопления сигнала



(а) Карта спайковой активности входного нейрона

(б) Карта спайковой активности выходного нейрона

Рисунок 2 — Карты количества спайков M в координатах силы связи σ и временной задержки τ при $I = 0$ для системы из двух входных нейронов и одного выходного: (а) входной нейрон; (б) выходной нейрон.

На рисунках 2 показано, как сила связи σ и задержка τ между входными импульсами влияют на спайковую активность нейронов Хиндмарша–Роуз при $I = 0$. При малых σ и больших τ нейроны находятся в покое, а при увеличении силы связи и уменьшении задержки число спайков возрастает.

Интеграция сигналов выходным нейроном эффективна только при достаточно сильной связи и оптимальной задержке. При слабой связи или большой задержке система малочувствительна, но в некоторых случаях при определённых параметрах возможен эффект накопления: выходной

нейрон генерирует спайк за счёт суммирования слабых или разнесённых по времени сигналов, что подчёркивает роль временной структуры входных воздействий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование модели нейрона Хиндмарша–Роуз позволило глубоко проанализировать, как параметры внешнего воздействия и внутренние характеристики системы определяют динамику спайковой активности. Было показано, что управляющий ток играет ключевую роль в формировании возбудимости нейрона: при отрицательных значениях тока область спайковой активности существенно сужается, а для генерации импульсов требуются более сильные и продолжительные воздействия. При положительном токе нейрон становится значительно более чувствительным к внешним стимулам, расширяется диапазон активных режимов, возрастает максимальное число спайков, а порог возбуждения снижается.

Анализ карт количества спайков на плоскостях начальных условий и параметров внешнего сигнала выявил сложную бифуркационную структуру фазового пространства, наличие резких границ между различными режимами активности и зоны неустойчивости, где малые изменения параметров вызывают скачкообразные переходы между состояниями покоя и возбуждения. Временные реализации мембранного потенциала продемонстрировали переход от одиночных спайков к устойчивой пачечной активности по мере увеличения амплитуды и длительности стимула, а также подтвердили взаимную компенсацию этих параметров.

Особое внимание уделялось эффекту накопления: даже при слабой силе связи между нейронами и отсутствии выраженного управляющего тока система способна интегрировать во времени слабые или разнесённые сигналы, что приводит к генерации спайков в выходном нейроне. Этот эффект подчёркивает важность временной структуры входных воздействий и адаптивные свойства нейронных сетей.

Нейрон Хиндмарша–Роуз, несмотря на высокую сложность переходных процессов, демонстрирует возможность накопления энергии на достаточно большом интервале времени. В сравнении с нейроном ФитцХью–Нагумо [1] область накопления сигнала для нейрона Хиндмарша–Роуз не носит периодический характер во времени и не характе-

ризуется участками с тормозящим эффектом, связанным со влиянием мгновенной амплитуды входного сигнала на участке спайка в отрицательной области значений относительно состояния равновесия. По этой причине нейрон Хиндмарша–Розе может оказаться очень полезным в спайковых нейронных сетях при применении метода обучения пространство-время-зависимая-пластичность (STDP).

В целом, работа показала, что модель Хиндмарша–Роуз не только воспроизводит широкий спектр режимов нейронной активности, но и позволяет исследовать влияние управляющих параметров на интеграцию и накопление сигналов. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего изучения принципов обработки информации в нейронных сетях, а также для разработки биологически обоснованных моделей искусственного интеллекта и нейроморфных вычислительных систем.