

На правах рукописи



Ковалева Наталья Сергеевна

**ИНДИВИДУАЛЬНАЯ И КОЛЛЕКТИВНАЯ ДИНАМИКА
ВОЗБУДИМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИМПУЛЬСНЫМИ АДАПТИВНЫМИ
СВЯЗЯМИ**

1.3.4 - радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Мищенко Михаил Андреевич

Официальные оппоненты: **Смирнов Дмитрий Алексеевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор РАН, ведущий научный сотрудник
Саратовского филиала Института радиотехники
и электроники им. В.А. Котельникова
Российской академии наук (СФИРЭ РАН)

Захаров Денис Геннадьевич
кандидат физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник Института когнитивных
нейронаук Национального исследовательского
университета «Высшая школа экономики» (НИУ
ВШЭ)

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Защита состоится 7 февраля 2024 г. в 15 часов на заседании
диссертационного совета 24.2.340.03 при Национальном исследовательском
Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по
адресу: 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте диссертационного совета по
адресу: <https://diss.unn.ru/1393>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.340.03
доктор физ.-мат наук., доцент



А.В. Ключев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

На сегодняшний день интерес к теории сложных сетей проявляется в самых разных областях науки, таких как физика, биология, экономика, социология, информационные технологии. Сложные сети описывают широкий спектр систем в природе и обществе, например, различные биологические и химические системы, нейронные сети, электрические сети, интернет, автомагистрали, системы метро. Исследованием сложных сетей занимаются группы S. Vucelja, J. Kurths, A. Pikovski, В.И. Некоркина, А.Е. Храмова, Г.В. Осипова, В.Б. Казанцева и др. Основные концепции и результаты, достигнутые в исследовании структуры и динамики сложных сетей, а также обобщение соответствующих приложений этих идей различных дисциплинах приведены в ряде обзоров (Barrat et al., 2008; Albert et al., 2002; Vucelja et al., 2006; Costa et al., 2007; Dorogovtsev and Mendes, 2002). Несмотря на значительные успехи в изучении структурных свойств сложных сетей, раскрытие универсальных свойств взаимодействия между топологией и динамикой сложных систем остается актуальной для исследований (Bashan et al., 2012; Barzel and Barabasi, 2013; Shandilya and Timme, 2011). Как отмечено в работе (Rodrigues et al., 2016), посвященной синхронизации сложной сети осцилляторов Курамото, «много было сделано с момента выхода первых работ о синхронизации в сложных сетях. Но многое остается неисследованным, поскольку количество комбинаций топологий и динамических моделей элементов бессчётно».

В качестве элементов узлов сложных сетей могут находиться динамические элементы (Strogatz, 2001; Дмитриев и др., 2015). Такие сети могут проявлять различные интересные динамические эффекты, такие как синхронизация (Barrat et al., 2008; Vucelja et al.; Wang, 2002), кластеризация (Kaneko, 1994), конкуренция (Bianconi and Barabasi, 2001), образование хабов (Hill and Braha, 2010), самоорганизованная критичность.

Важный класс динамических систем представляют возбудимые динамические системы, находящиеся в отсутствие внешнего воздействия в состоянии покоя и способные в ответ на достаточно слабое воздействие генерировать колебание большой амплитуды и возвращаться в состояние покоя. Исследование таких динамических систем является на сегодняшний день одной из наиболее интересных и актуальных проблем современной науки. Характерным примером возбудимой динамической системы является нейрон. Исследованию нелинейных динамических процессов, лежащих в основе возбудимости нейронов, посвящено достаточно большое количество исследований как теоретических, так и экспериментальных. Задачами нейродинамики и исследованием математических моделей нейронов и их сетей занимаются исследователи во всем мире (L. Abbot, J. Kurths, S. Dana, I. Segev, S. Vucelja, G. Deco, W. Gerstner, E. Izhikevich, P.M. Борисюк, Я.Б. Казанович, В.И. Некоркин, Д.Г. Захаров, И.В. Сысоев, В.В. Клиньшов и др.).

В работах (Takahashi et al., 1990; Kaplan et al., 1996) экспериментально исследована возбудимость гигантского аксона кальмара в ответ на периодическую импульсную токовую стимуляцию и изучены бифуркационные механизмы перехода от фазовой синхронизации к квазирегулярным и хаотическим откликам. Подобные исследования по импульсной стимуляции проводились и для различных математических моделей нейрона, таких как модель Бонхоффера-ван дер Поля (Sato and Doi, 1992; Sato and Doi, 1995), модель ФитцХью-Нагумо (Yoshino et al., 1999; Croisier, 2009), модель Ижикевича (Farokhniaee and Large, 2017) и модель со сложно-пороговым возбуждением (Kazantsev et al., 2012; Tchakoutio et al., 2015). Для всех моделей исследовались как механизмы возникновения колебаний, так и особенности синхронизации с периодической стимуляцией.

Сложные сети могут обладать свойством адаптивности, что означает возможность перестроения топологии связей сети вследствие динамики узлов (Maslennikov and Nekorkin, 2017). Динамика нейронных сетей мозга обусловлена не только динамикой нейронов, но и динамическим изменением силы взаимодействия между нейронами за счет эффектов пластичности связей. За счёт динамически меняющихся весовых коэффициентов связей может происходить адаптация сети под внешнее воздействие, что считается возможным механизмом обучения нейронной сети. Исследованиями динамики нейронных сетей с учетом различных механизмов синаптической пластичности занимаются группы М. Tsodyks, W. Gerstner, V. Makarov, В.Б. Казанцева, С.А. Лобова, В.И. Некоркина, В.А. Демина, В.Л. Дунина-Барковского и др. Неизученным остается одновременное влияние нескольких типов пластичности связей на динамику.

Показано, что кратковременная пластичность, которая представляет по своей сути частотную зависимость эффективности связей от активности узлов (Tsodyks and Markram, 1997), способна приводить к повторяющейся синхронной активации в рекуррентной сети возбудимых элементов, что может лежать в основе механизмов генерации ритмов мозга (Tsodyks et al., 2000; Buzsaki, 2006), а так же отвечать, например, за возникновение феномена рабочей памяти (Mongillo et al., 2008; Mi et al., 2017). Такой тип пластичности носит временный эффект и восстанавливает исходные значения силы связи в отсутствии активности на этой связи. Задачами исследования рабочей памяти занимаются группы ученых А. Baddeley, М. Tsodyks, G. Mongillo, M.R. Riley, М. D'Esposito, С.Ю. Гордлеевой, С.А. Лобова и др.

Другой вид пластичности, отражающий более долговременные изменения, зависит от фазовых соотношений между импульсами взаимодействующих нейронов, а точнее – от времен этих импульсов, поэтому получил название пластичности, зависящей от времен импульсов – STDP (spike-timing-dependent plasticity) (Bi and Poo, 1998; Bi and Poo, 2001; Sjöström et al., 2008). Этот тип пластичности является воплощением постулированного Хэббом правила усиления связи при многократном повторении причинно-следственных связей в возникновении импульсов двух взаимодействующих

нейронов, и ослабления – в обратном случае (Hebb, 1949). Такой тип пластичности приводит к долговременным изменениям в силе взаимодействия между узлами и способен перестраивать архитектуру связей в сети (Morrison et al., 2008).

В настоящей диссертационной работе исследуется динамика возбудимых динамических систем. Исследуется динамика одиночного нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), предложенного в качестве модели нейрона в (Мищенко, 2011), в ответ на внешнее импульсное воздействие. Изучается влияние архитектуры связей и параметров их адаптивной перестройки на возникающие режимы коллективной динамики сети. Отличительной особенностью является использование в качестве элементов сети нейроподобных генераторов на основе системы ФАПЧ (Мищенко, 2011; Мищенко и др., 2012; Matrosov et al., 2013) и нейронов – пороговых интеграторов, а также различных механизмов пластичности связей. Исследованию роли различных механизмов пластичности в динамике сети посвящено достаточное количество работ, однако их совместный эффект изучен недостаточно. Получены новые данные о влиянии топологии связей и их временной перестройки на коллективные эффекты, возникающие в динамических сетях, такие как синхронизация, образование кластеров, конкуренция, эффекты рабочей памяти сети.

Цели и задачи работы

Целями данной диссертационной работы являются исследование возбудимости нейроподобного генератора и изучение механизмов формирования режимов коллективной динамики в сетях взаимодействующих нейроподобных генераторов с адаптивными импульсными связями.

Для достижения заявленных целей решены следующие задачи:

1. Анализ состояний равновесия нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты. Исследование возбудимости рассматриваемого генератора в ответ на импульсное воздействие.

2. Исследование формирования конкурентной динамики в сети рассматриваемых возбудимых генераторов с различной топологией связей.

3. Исследование роли кратковременной пластичности в коллективной динамике сети. Определение условий возникновения коллективных динамических эффектов: синхронизации, конкуренции, эффектов рабочей памяти сети.

4. Исследование емкости рабочей памяти импульсной нейронной сети с пластичными связями в зависимости от параметров синаптической пластичности и фонового шумового воздействия.

5. Исследование возможности формирования заданной топологии за счет механизмов фазо-зависимой пластичности. Исследование динамики нейронной сети с двумя типами пластичности: частотно-зависимой и фазо-зависимой. Оценка вклада каждого из типов пластичности в возникновение известных типов коллективной динамики.

Научная новизна

Впервые исследована возбудимость нейроподобного генератора на основе системы ФАПЧ в ответ на внешнее импульсное воздействие. Определены параметры импульсного воздействия, необходимые для появления колебаний большой амплитуды (надпорогового отклика) и рассмотрено влияние параметров периодической импульсной стимуляции на ответ исследуемого генератора.

В изучении коллективной динамики нейронной сети является оригинальным одновременный учет двух типов пластичности: частотной зависимости эффективности связей (кратковременная пластичность, которая связана с расходом ресурса нейротрансмиттера в нейронной сети), а также фазовой зависимости, связанной с соотношением времен импульсов взаимодействующих генераторов (STDP). Показано, что в синаптической модели рабочей памяти кластеры, которые кодируют объекты, могут быть сформированы за счет STDP. Предложена гибкая модель рабочей памяти с двумя типами пластичности, которая может поддерживать любой входной объект благодаря механизму STDP,

Впервые получены зависимости емкости рабочей памяти нейронной сети с импульсными связями от параметров внешнего шумового воздействия. Получены новые результаты влияния синаптических параметров на емкость рабочей памяти при различном уровне потенцированных соединений внутри кластеров.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследований, проведенных в данной работе, обусловлена широким спектром актуальных проблем, связанных с коллективной динамикой сложных сетей. Полученные в работе результаты по исследованию возбуждения нейроподобного генератора внешним импульсным воздействием представляют особый интерес при использовании предложенного генератора в качестве модели нейрона. В таком случае перспективным приложением результатов будет построение сложных сетей из предложенных генераторов, например, для задач обработки информации и построения нейроморфных вычислительных систем. Последовательность импульсов, поступающая на вход генератора, будет соответствовать сигналам от других элементов сети. А различная реакция на импульсы разной амплитуды может быть трактована как основа обучения такой сети за счет настройки силы взаимодействия между элементами. Результаты исследований коллективной динамики возбудимых элементов в данной диссертационной работе имеют значимую роль в задаче исследования эффектов рабочей памяти нейронной сети – системе кратковременного хранения и обработки информации.

Практическая значимость, кроме фундаментальных вопросов о влиянии архитектуры и динамики связей на динамику нейронных сетей и их роли в формировании когнитивных феноменов и обработке информации, связана с

созданием искусственных нейронных сетей (в том числе аппаратных) и методов их обучения, за которое, в сущности, и отвечает пластичность связей. Все эти вопросы требуют скорейшего решения для развития нейроморфных технологий.

Методология и методы исследований

Методы построения модельных динамических систем основаны на четкой классификации динамических режимов отдельных генераторов и выделения соответствующих этим режимам областей параметров, анализу характеристик межэлементной связи, включая синаптические (возбуждающие и тормозные) взаимодействия. Такой последовательный подход, с учетом особенностей наблюдаемых экспериментально сигналов, позволяет эффективно выработать наиболее оптимальную (с точки зрения качественного и количественного соответствия наблюдаемым) конфигурацию модели и осуществить численное моделирование в полученной динамической системе.

В качестве элементов сети рассматривались модели нейроподобного генератора на основе системы ФАПЧ (Мищенко, 2011; Мищенко и др., 2012; Matrosov et al., 2013) и нейрона – порогового интегратора. Для исследования динамики сети с пластичными связями использовалась модель кратковременной пластичности (Tsodyks et al., 2000) и модель пластичности, зависящая от времени спайка (STDP) (Morrison et al., 2008).

Используемые методы включают теорию колебаний для исследования базовых принципов динамических систем, методы статистической физики. Для разработки программ использовалась программная среда Matlab. Для численного решения систем дифференциальных уравнений, описывающих динамику элементов сети и связей, применялся модифицированный метод Эйлера, для численного решения уравнения, описывающего внешние шумовые токи, использовалась схема Эйлера-Маруямы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием качественно-численных методов теории нелинейных колебаний, а также непротиворечивостью с известными в литературе результатами.

Основные положения, выносимые на защиту

1. На появление отклика нейроподобного генератора на основе системы ФАПЧ оказывает влияние амплитуда и длительность стимулирующего импульса. При этом ключевым фактором является площадь стимулирующего воздействия, которая может быть разделена на несколько импульсов. Требуемая площадь стимулирующего воздействия существенно зависит от начальных условий нейроподобного генератора – его расположения на устойчивом диапазоне фазовой переменной.

2. Отклики нейроподобного генератора на периодическую импульсную стимуляцию синхронизируются с различными частотными отношениями в зависимости от амплитуды стимуляции. При этом значения межимпульсного интервала откликов не сосредоточены только в окрестности рациональных соотношений с периодом стимуляции.

3. Увеличение общей активности импульсной нейронной сети с пластичными связями за счет увеличения параметров среднего значения и дисперсии фонового воздействия приводит к увеличению емкости рабочей памяти нейронной сети. Значение емкости рабочей памяти импульсной нейронной сети с учетом кратковременной пластичности увеличивается в среднем при увеличении параметра времени восстановления уровня кальция или при уменьшении параметра времени восстановления нейротрансмиттера.

4. Формирование кластеров в синаптической модели рабочей памяти, кодирующие элементы, может происходить при внешней стимуляции группы нейронов в течение некоторого времени за счет механизмов STDP.

Апробация результатов работы и публикации

Диссертационная работа выполнена на кафедре теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах [A1-A26]. Материалы научно-квалификационной работы были представлены на следующих конференциях:

- XXI - XXVI научные конференции по радиофизике на базе радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород, 2017-2023 г.)
- XXII, XXIII Нижегородские сессии молодых ученых (2017-2018 г.)
- XVIII, XIX, XX научные школы «Нелинейные волны - 2018, 2020, 2022», (г. Нижний Новгород 2018, 2020, 2022 г.)
- XII, XV Всероссийские научные конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2017, 2020 г.)
- 11th FENS Forum of Neuroscience (г. Берлин, 2018 г.)
- XII международная школа-конференция ХАОС - 2019 (г. Саратов, 2019 г.)
- VI Международная конференция «Динамика, бифуркации и хаос» (г. Нижний Новгород, 2020 г.)
- XX международная конференция «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии» (г. Нижний Новгород, 2020 г.)
- II, III международные конференции «Volga Neuroscience Meeting - 2018, 2021» (г. Нижний Новгород, 2021 г.)
- VI Научная школа «Динамика сложных сетей и их приложения» (г. Калининград, 2022)
- Международная конференция «Shilnikov Workshop - 2022» (г. Нижний Новгород, 2022 г.)

- XXX Всероссийская научная конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (г. Саратов, 2023).

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ по следующим темам: РФФИ 20-32-90157, 18-29-23001-мк; государственных заданий Министерства науки и высшего образования 0729-2020-0040, FSWR-2023-0031; программы развития региональных научно-образовательных математических центров № 075-02-2020-1483 «Математика технологий будущего»; гранта Президента РФ МК-2726.2017.2.

Личный вклад автора

Все полученные результаты диссертационной работы получены лично автором. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Автором работы самостоятельно были выполнены аналитические исследования, проведено численное моделирование, выполнены обработка и анализ результатов. Постановка задачи и обсуждение полученных результатов проводилось совместно с научным руководителем.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 123 страницы. В диссертации 51 рисунок, 22 формулы, 5 таблиц. Количество цитированных источников – 129, в том числе публикаций диссертанта – 26.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обосновываются актуальность, новизна и значимость работы, формулируются её цели, приводятся положения, выносимые на защиту, описана методология исследований.

В **первой главе** рассматривается нейроподобный генератор на основе системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) (Мищенко, 2011; Мищенко и др., 2012; Matrosov et al., 2013), описываемый системой дифференциальных уравнений третьего порядка (1), определенной в цилиндрическом фазовом пространстве ($\varphi \bmod 2\pi$, y , z):

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} &= y \\ \frac{dy}{d\tau} &= z \\ \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{dz}{d\tau} &= \gamma - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)z - (1 + \varepsilon_1 \cos\varphi)y + I_{ext} \end{aligned} \quad (1)$$

где φ – текущая разность фаз опорного и подстраиваемого генераторов, γ – текущая разность частот, γ_0 – начальная частотная расстройка, I_{ext} – внешнее воздействие, ε_1 и ε_2 – параметры инерционности фильтров. Изучена динамика исследуемого генератора, находящегося в возбужденном состоянии, в ответ на прямоугольные импульсы и периодическое импульсное воздействие.

В разделе 1.1 рассмотрены преимущества использования нейроподобного генератора в качестве модели нейрона.

В разделе 1.2 приведены описание и уравнения модели нейроподобного генератора.

В разделе 1.3 проведено исследование возбужденности нейроподобного генератора в ответ на импульсное воздействие.

В разделе 1.3.1 проведен анализ состояний равновесия системы и показано, что состояния равновесия в такой системе существуют только при значении параметра начальной частотной расстройки $\gamma=0$. При этом существует континуум негрубых состояний равновесия при любых значениях фазовой переменной φ . Существует интервал значений циклической фазовой переменной φ , названный «устойчивым диапазоном», на котором два оставшихся собственных числа имеют отрицательные действительные части, что говорит о наличии двумерного устойчивого многообразия. При отсутствии внешнего воздействия генератор находится в одном из состояний устойчивого диапазона.

В разделе 1.3.2 проведено численное моделирование процесса возбуждения нейроподобного генератора импульсным воздействием. Определена амплитуда стимула, необходимая для появления на генераторе надпорогового отклика, сопоставимого по амплитуде с известными автоколебательными режимами. Показано, что требуемая амплитуда существенно зависит от начальных условий – его расположения на устойчивом диапазоне переменной φ . Обнаружено, что на появление отклика генератора оказывает влияние не только амплитуда стимулирующего импульса, но и его длительность. При этом ключевым фактором является площадь стимулирующего воздействия, которая может быть результатом воздействия нескольких импульсов.

В разделе 1.4 численно исследована динамика нейроподобного генератора, находящегося в возбужденном состоянии, в ответ на периодическое импульсное воздействие. Рассмотрено влияние параметров периодической стимуляции на ответ исследуемого генератора. Получена зависимость относительных частот следования откликов от амплитуды периодического стимула. Отклики нейроподобного генератора на стимуляцию синхронизируются с различными рациональными частотными отношениями в зависимости от амплитуды стимуляции. Рассмотрено, как влияет изменение амплитуды периодической стимуляции на разброс межимпульсных интервалов между откликами модели нейроподобного генератора. Получена зависимость отношений периода стимуляции к межимпульсным интервалам T_{st}/T от амплитуды стимула, показанная на рисунке 1.

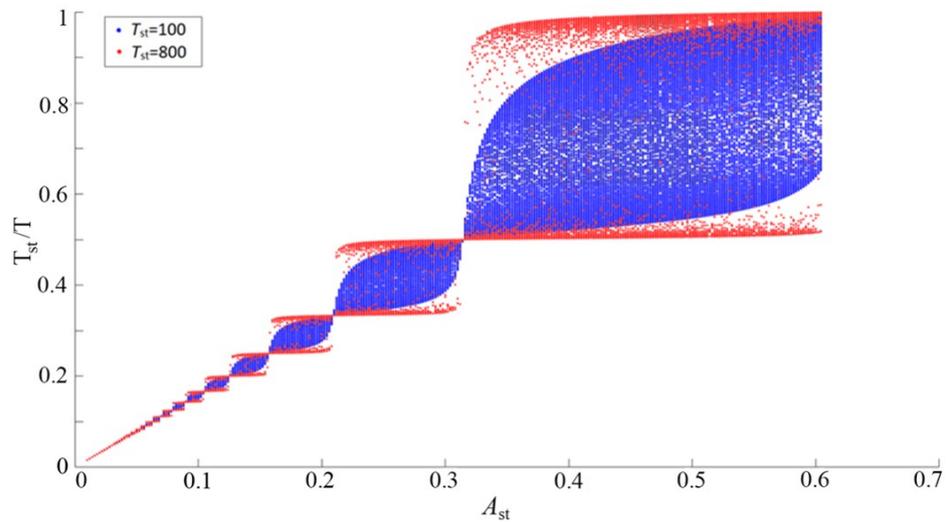


Рисунок 1. Зависимость соотношений межимпульсных интервалов на входе и выходе нейроподобного генератора T_{st}/T при $T_{st}=100$ и $T_{st}=800$ от амплитуды стимула A_{st} .

При увеличении амплитуды стимула увеличивается соотношение T_{st}/T . При этом на графике зависимости T_{st}/T от амплитуды стимула формируются определенные области: при определенном диапазоне амплитуд возможно получение откликов с некоторым ограниченным соотношением T_{st}/T . Значения межимпульсного интервала не сосредоточены только в окрестности рациональных соотношений, в отличие от значений относительных частот следования откликов. При малых периодах внешнего воздействия области на рисунке 1 имеют более плавные границы, то есть происходит более плавный переход к синхронизации с другим соотношением частот. При больших периодах стимула переход осуществляется резко.

В заключительном **разделе 1.5** первой главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённого исследования.

В **второй главе** исследуется коллективная динамика нейроподобных генераторов: взаимодействие двух нейроподобных генераторов с однонаправленной синаптической связью и конкурентная динамика в сетях с различной топологией.

В **разделе 2.1** исследована возбудимость нейроподобного генератора в ответ на импульсы другого нейроподобного генератора через однонаправленную синаптическую связь. Построен график зависимости значений соотношений периодов на входе и выходе нейрона от силы связи. Результаты схожи с поведением в ответ на периодическую последовательность прямоугольных импульсов. При увеличении силы связи между генераторами увеличивается соотношение периодов на входе и выходе. При этом на графике зависимости значений соотношений периодов на входе и выходе нейрона от силы связи формируются определенные области: при определенном диапазоне амплитуд возможно получение откликов с некоторым ограниченным соотношением.

В разделе 2.2 исследована конкурентная динамика кластеров в сети нейроподобных генераторов с различной топологией, силой связей между элементами и уровнем внешнего воздействия.

В разделе 2.2.1 исследована конкурентная динамика сети нейроподобных генераторов, состоящая из двух связанных кластеров с отрицательной межкластерной силой связей. Показано, что по мере увеличения внутрикластерной силы связей время доминирующей активности каждого кластера увеличивается. При большой внутрикластерной силе связей один из кластеров обладает наибольшей активностью и полностью подавляет другой. Чем больше модуль отрицательной межкластерной силы связи, тем больше различие в уровне активности между конкурирующими кластерами. По мере увеличения параметра амплитуды неспецифического внешнего шумового воздействия увеличивается общая активность сети, и увеличивается время доминирующей активности кластеров. При очень больших значениях амплитуды внешнего воздействия увеличивается активность в обоих кластерах, конкуренция сохраняется, но активность подавляемого кластера не опускается до нуля, и время доминирующей активности каждого кластера уменьшается.

В разделе 2.2.2 рассмотрена динамика двух кластеров в сети нейроподобных генераторов с отрицательной межкластерной силой связей и сторонними элементами, не относящимися ни к одному из кластеров. Внешние положительно воздействующие элементы воздействуют на элементы каждого кластера, что увеличивает общую активность сети. Показано, что такая архитектура сети приводит к усилению активности доминирующего кластера.

В разделе 2.2.3 показана возможность наличия конкурентной кластерной динамики сети и подавления активности одного кластера другим с положительной межкластерной силой связей при наличии сторонних возбуждающих и тормозных элементов. При увеличении связности сети активность сети возрастает и один из кластеров становится полностью доминирующим.

В заключительном разделе 2.3 второй главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведённого исследования.

В третьей главе исследуются условия возникновения коллективных динамических эффектов в импульсной нейронной сети с частотной зависимостью связей (кратковременной пластичностью), описываемой уравнениями (2):

$$\begin{aligned} \dot{u}_j(t) &= \frac{U - u_j(t)}{\tau_F} + U[1 - u_j(t)] \sum_k \delta(t - t_k^{(j)}), \\ \dot{x}_j(t) &= \frac{U - x_j(t)}{\tau_D} + u_j(t) x_j(t) \sum_k \delta(t - t_k^{(j)}), \end{aligned} \quad (2)$$

где u – синаптическая эффективность, x – синаптический ресурс, τ_F – время восстановления уровня кальция, τ_D – время восстановления нейротрансмиттеров, U – базовый коэффициент синаптической эффективности (Tsodyks and Wu, 2013). В качестве элементов сети используются нейроподобные генераторы на основе системы ФАПЧ и нейроны – пороговые интеграторы. Развиваются результаты более ранних исследований в рамках синаптической теории рабочей памяти (Mongillo et al., 2008; Mi et al., 2017) и исследуется влияние параметров синаптической пластичности, фонового возбуждения и наличия перекрывающихся кластеров на емкость рабочей памяти сети.

В разделе 3.1 описана модель нейронной сети с частотной зависимостью связей, продемонстрирован механизм кратковременной пластичности на двух возбуждающих нейронах – пороговых интеграторов.

В разделе 3.2 описано понятие рабочей памяти.

В разделе 3.3 описана архитектура сети в синаптической модели рабочей памяти.

В разделе 3.4 проведено численное моделирование динамики сети нейроподобных генераторов с частотной зависимостью связей, архитектура которой соответствует синаптической модели рабочей памяти. Показано, что сеть нейроподобных генераторов с кратковременной пластичностью воспроизводит известные для других моделей нейронов сетевые эффекты: синхронизация, конкуренция, эффекты рабочей памяти. Описана роль кратковременной пластичности в воспроизведении коллективных динамических эффектов. Пример динамики сети представлен на рисунке 2, где каждая точка обозначает возникновение спайка на определенном нейроне. Для каждого кластера синим цветом изображены графики изменения средних значений синаптической эффективности u в кластерах, красным – изменения средних значений синаптического ресурса x в кластерах.

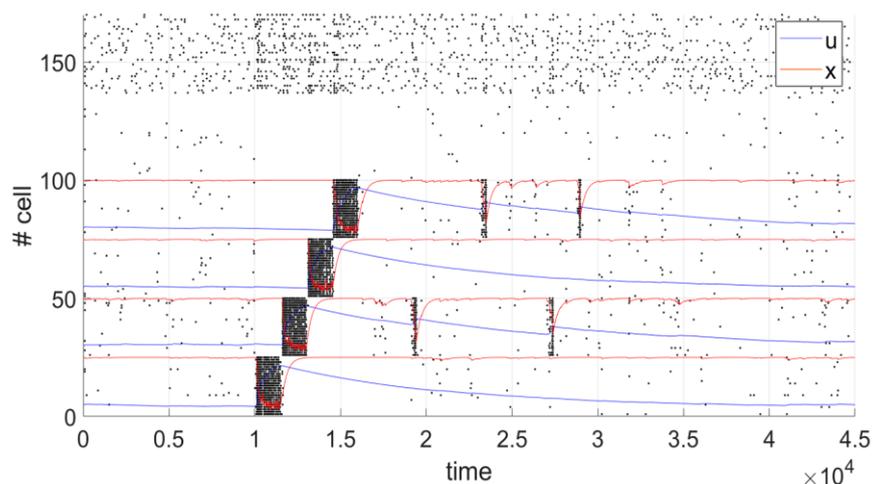


Рисунок 2. Эффекты рабочей памяти в сети нейроподобных генераторов с частотно-зависимыми связями.

В сеть загружаются образы посредством воздействия внешним током последовательно на кластеры в течение некоторого времени. После загрузки

образов в сеть за счет механизмов кратковременной пластичности наблюдается синхронная активность нейронов в кластерах, или спонтанная реактивация загруженных образов. Конкуренция между хранимыми элементами обуславливается неструктурированной связью тормозных и возбуждающих нейронов.

В разделе 3.5 численно исследована динамика сети нейронов – пороговых интеграторов с частотной зависимостью связей, архитектура которой соответствует синаптической модели рабочей памяти. Определена емкость рабочей памяти сети и влияние наличия перекрывающихся кластеров на их синхронную активность и емкость.

В разделе 3.5.1 проведено численное моделирование динамики сети нейронов – пороговых интеграторов с частотной зависимостью связей. Показано, что для воспроизведения синхронных коллективных режимов за счет механизмов кратковременной пластичности необходимо соблюдать баланс между параметрами сил возбуждающих и тормозных связей и внешнего шума, при этом все соотношения важны.

В разделе 3.5.2 рассмотрена модель рабочей памяти сети с перекрывающимися кластерами, т.е. когда нейроны одного кластера имеют потенцированные связи с нейронами других кластеров. Показано, что модель является грубой и не требует жесткого разграничения кластеров и все результаты для непересекающихся представлений памяти можно адаптировать к перекрывающимся.

В разделе 3.5.3 получены графики зависимости емкости от времен синаптической пластичности и параметров фонового воздействия. Показано, что значение емкости рабочей памяти импульсной нейронной сети увеличивается в среднем при увеличении параметра времени восстановления уровня кальция или при уменьшении параметра времени восстановления нейротрансмиттеров (рисунок 3).

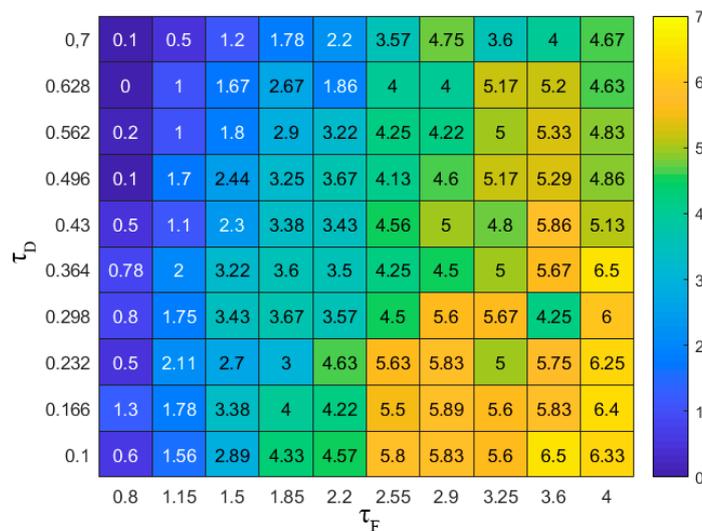


Рисунок 3. Зависимость емкости рабочей памяти сети от времен синаптической пластичности.

Увеличение фонового воздействия шума за счет увеличения параметров среднего значения и дисперсии также приводит к увеличению емкости в среднем. Показано, что при увеличении потенцированного уровня соединений J_p от возбуждающего нейрона к возбуждающему полученные зависимости сохраняются, а емкость в среднем увеличивается. Приведена зависимость емкости рабочей памяти для перекрывающихся кластеров от параметров синаптической пластичности, которая качественно совпадает с зависимостями, полученные без перекрытия.

В заключительном **разделе 3.6** третьей главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенного исследования.

В **четвертой главе** разработана модель нейронной сети на основе нейронов – пороговых интеграторов с учетом частотной и фазовой зависимости связей. Проведена оценка вклада каждого из типов пластичности в возникновении коллективных динамических эффектов. Проведен анализ перестройки архитектуры сети под воздействием активности узлов с фазовой зависимостью связей.

В **разделе 4.1** приведено описание модели импульсной нейронной сети с фазовой зависимостью связей (STDP), описываемой уравнениями (3):

$$\begin{aligned} \frac{ds_i}{dt} &= -\frac{s_i}{\tau_s} + \sum_i \delta(t - t_i), \\ \frac{ds_j}{dt} &= -\frac{s_j}{\tau_s} + \sum_j \delta(t - t_j), \\ \frac{d\omega_{ij}}{dt} &= \lambda[(1 - \omega_{ij})s_j\delta(t - t_i) - \alpha\omega_{ij}s_i\delta(t - t_j)], \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_{ij} – синаптический вес, s_i и s_j – переменные, отслеживающие импульсы на постсинаптическом и пресинаптическом нейроне соответственно, τ_s – характерное время спада локальных переменных, λ – скорость обучения, α – параметр асимметрии (Song et al., 2000; Morrison et al., 2008). Продемонстрирован механизм STDP на двух возбуждающих нейронах – пороговых интеграторах.

В **разделе 4.2** проведено численное моделирование динамики сети нейронов – пороговых интеграторов с фазовой зависимостью связей, состоящей из возбуждающих и тормозных нейронов, связанных неструктурированным образом (рисунок 4).

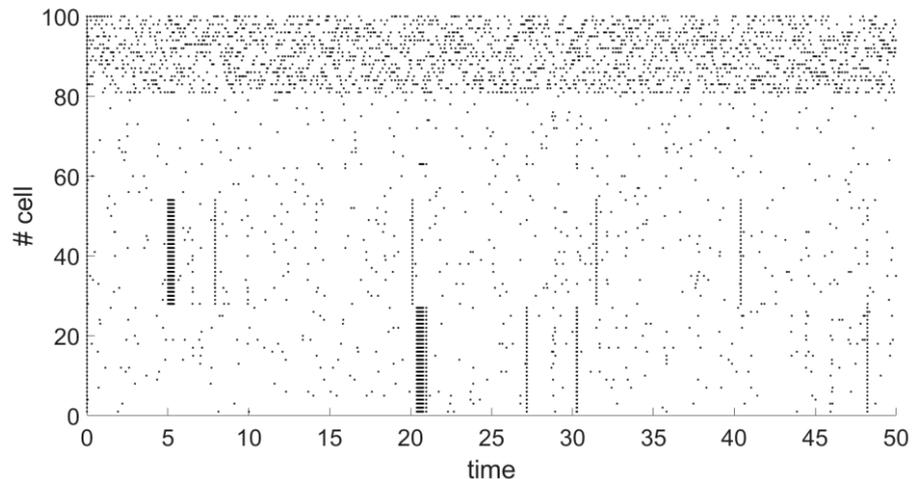


Рисунок 4. Формирование кластеров в нейронной сети с фазовой зависимостью связей и их синхронная активность.

Проведен анализ перестройки архитектуры сети под воздействием активности узлов. Показано, что кластеры в сети могут быть сформированы при синхронном воздействии стимула на группу возбуждающих нейронов за счет механизмов STDP. Рассчитаны средние значения весов связей в зависимости от времени в группах нейронов, одновременно стимулируемых внешним током, и в группе остальных возбуждающих нейронов, не стимулируемых одновременно. Показано, что средние значения весов связей в стимулирующих группах увеличиваются во время стимуляции, что приводит к образованию кластеров.

В разделе 4.3 проведено численное моделирование динамики сети нейронов – пороговых интеграторов с двумя типами зависимости связей: фазовой и частотной. Показано, что кластеры в синаптической модели рабочей памяти, кодирующие элементы, могут образовываться при внешней стимуляции группы нейронов в течение некоторого времени за счет механизмов STDP. За счет кратковременной пластичности происходит периодическая спонтанная синхронная активность сформированных кластеров, то есть реактивация запомненных образов. Таким образом, предложена гибкая синаптическая модель рабочей памяти с двумя типами пластичности – кратковременной и долговременной, которая не требует предварительной настройки в отношении хранимого объекта.

В заключительном разделе 4.4 третьей главы сформулированы основные выводы, вытекающие из проведенного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен анализ состояний равновесия нейроподобного генератора на основе системы фазовой автоподстройки частоты. Показано, что в исследуемой системе при $\gamma = 0$ существует континуум негрубых состояний равновесия при любых значениях циклической фазовой переменной φ . Существует интервал значений φ с двумерным устойчивым многообразием,

названный “устойчивым диапазоном”. Исследована возбудимость рассматриваемого генератора в ответ на одиночные импульсы и периодическое импульсное воздействие. Показано, что требуемая амплитуда стимула, необходимая для появления на генераторе надпорогового отклика, существенно зависит от начальных условий – его расположения на устойчивом диапазоне переменной. При этом ключевым фактором является площадь стимулирующего воздействия, которая может быть результатом воздействия нескольких импульсов.

2. Исследована сеть рассматриваемых возбудимых генераторов и формирование конкурентной динамики в сети с различной топологией связей. Характер конкурентной динамики в сети с двумя связанными кластерами и отрицательной межкластерной силой связи изменяется в зависимости от параметров сил связей и фонового воздействия: изменяется время доминирования кластеров и различие между силой их активности. Показана возможность наличия конкурентной кластерной динамики в сети с более реалистичной топологией: с подсетью тормозных элементов, связанных неспецифическим образом с возбуждающими элементами, среди которых выделены два кластера с более сильными внутрикластерными связями. При изменении параметров рассматриваемой сети изменяется характер конкуренции между кластерами.

3. Исследована роль кратковременной пластичности в коллективной динамике сети. Определены условия возникновения коллективных динамических эффектов: синхронизации, конкуренции, эффектов рабочей памяти сети. Кратковременная пластичность способна приводить к повторяющейся синхронной активации в рекуррентной сети возбудимых элементов, что может лежать в основе механизмов генерации ритмов мозга, а также отвечать, например, за возникновение феномена рабочей памяти. Кратковременная пластичность позволяет избегать неограниченного нарастания активности в сети за счет эффекта синаптической депрессии, это позволяет наблюдать временное разделение синхронной активности нескольких популяций в глобальной сети.

4. Исследована емкость рабочей памяти импульсной нейронной сети с пластичными связями в зависимости от параметров синаптической пластичности и фонового шумового воздействия. Значение емкости рабочей памяти импульсной нейронной сети увеличивается в среднем при увеличении параметра времени восстановления уровня кальция или при уменьшении параметра времени восстановления нейротрансмиттеров. Увеличение фонового воздействия шума за счет увеличения параметров среднего значения и дисперсии также приводит к увеличению емкости в среднем.

5. Исследована возможность формирования заданной топологии за счет механизмов фазо-зависимой пластичности. Фазовая зависимость связей (STDP) позволяет формировать долговременную структуру сети динамически во время работы сети. Кластеры в импульсной нейронной сети могут быть сформированы при синхронном воздействии стимула на группу нейронов за

счет механизмов STDP. Разработана модель нейронной сети с двумя типами пластичности: частотно-зависимой и фазо-зависимой, которая не требует предварительной настройки в отношении хранимого объекта. Проведена оценка вклада каждого из типов пластичности в возникновение известных типов коллективной динамики.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А1. Мищенко, М.А. Возбуждение фазоуправляемого генератора импульсным воздействием / М.А. Мищенко, Н.С. Жукова, В.В. Матросов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2018. – Т. 26. – №. 5. – С. 6-19.

А2. Мищенко, М. А. Возбуждение фазоуправляемого генератора импульсной последовательностью / Н.С. Ковалева, А.В. Половинкин, В.В. Матросов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2021. – Т. 29. – №. 2. – С. 240-253.

А3. Ковалева, Н.С. Емкость рабочей памяти: роль параметров импульсной нейронной сети / Н.С. Ковалева, В.В. Матросов, М.А. Мищенко // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2023. – Т. 31. – №. 1. – С. 86-102.

А4. Жукова, Н.С. Возбуждение нейроподобного генератора на базе системы фазовой автоподстройки частоты импульсной последовательностью / Н.С. Жукова, М.А. Мищенко // Труды XXI научной конференции по радиофизике. – 2017. – С. 143-144.

А5. Жукова, Н.С. Возбудимость нейроподобного генератора в ответ на периодическую импульсную стимуляцию / Н.С. Жукова, М.А. Мищенко // Тезисы докладов XXII Нижегородской сессии молодых ученых. Естественные, математические науки. – 2017. – С. 26.

А6. Жукова, Н.С. Возбуждение нейроподобного генератора периодической импульсной последовательностью / Н.С. Жукова, М.А. Мищенко // Тезисы докладов XII Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика». – 2017. – С. 63.

А7. Жукова, Н.С. Возбуждение нейроподобного генератора импульсным воздействием / Жукова Н.С., Мищенко М.А. // Тезисы докладов XXIII Нижегородской сессии молодых ученых. Технические, естественные, математические науки. – 2018. – Т. 2. – С.17.

А8. Жукова, Н.С. Возбудимость нейроподобного генератора в ответ на импульсное воздействие / Жукова Н.С., Мищенко М.А. // Труды XXII научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию Нижегородской радиолоборатории. – 2018. – С. 209-211.

А9. Жукова, Н.С. Возбудимость нейроподобного генератора на базе системы фазовой автоподстройки частоты в ответ на периодическую

импульсную стимуляцию / Н.С. Жукова, М.А. Мищенко // Тезисы докладов XVIII научной школы «Нелинейные волны - 2018». ИПФ РАН. – 2018. – С. 50.

A10. Mishchenko, M.A. Excitability and Synchronization of Phase-Controlled Neuron-Like Generator / M.A. Mishchenko, N.S. Zhukova, D.I. Bolshakov, V.V. Matrosov // Opera Medica et Physiologica. – 2018. – V. 4. – S. S1. – P. 62.

A11. Bolshakov, D.I. Experimental Investigation of Hardware Neuron Model / D.I. Bolshakov, N.S. Zhukova, M.A. Mishchenko, V.V. Matrosov // Opera Medica et Physiologica. – 2018. – V. 4. – S. S1. – P. 100.

A12. Mishchenko, M.A. Hardware neuron model: excitation and bursting / M.A. Mishchenko, D.I. Bolshakov, N.S. Zhukova, V.V. Matrosov // International Conference Dynamics, Bifurcations and Chaos: Book of Abstract. – 2018. – P. 7.

A13. Жукова, Н.С. Конкурентная динамика сети нейроподобных генераторов / Жукова, Н.С., М.А. Мищенко, В.В. Матросов // Труды XXIII научной конференции по радиоп физике, посвященной 100-летию со дня рождения НА Железцова. – 2019. – С. 254-256.

A14. Ковалева, Н.С. Конкурентная динамика в сети нейроподобных генераторов / Н.С. Ковалева, В.В. Матросов, М.А. Мищенко // Материалы XII международной школы-конференции ХАОС. – 2019. – С. 77.

A15. Ковалева, Н.С. Исследование эффектов рабочей памяти сети с перекрывающимися связями / Н.С. Ковалева, В.В. Матросов, М.А. Мищенко // Тезисы докладов XIX научной школы «Нелинейные волны - 2020». ИПФ РАН. – 2020. – С. 137.

A16. Ковалева, Н.С. Эффекты рабочей памяти сети с перекрывающимися связями / Н.С. Ковалева, М.А. Мищенко, В.В. Матросов // Труды XXIV научной конференции по радиоп физике, посвященной 75-летию радиоп физического факультета. – 2020. – С. 179-181.

A17. Ковалева, Н.С. Исследование рабочей памяти сети с перекрывающимися связями / Н.С. Ковалева, М.А. Мищенко, В.В. Матросов // Сборник трудов XV Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанопотоника и нелинейная физика». Саратов. – 2020. – С. 105.

A18. Ковалева, Н.С. Исследование емкости рабочей памяти нейронной сети / Н.С. Ковалева, М.А. Мищенко, В.В. Матросов // Труды XX международной конференции «Математическое моделирование и суперкомпьютерные технологии». – 2020. – С. 192-193.

A19. Ковалева, Н.С. Емкость рабочей памяти спайковой нейронной сети / Н.С. Ковалева, В.В. Матросов, М.А. Мищенко // Труды XXV научной конференции по радиоп физике. – 2021. – С. 179-182.

A20. Kovaleva, N.S. Investigation of working memory capacity in spiking neural network / N.S. Kovaleva, V.V. Matrosov, M.A. Mishchenko // Abstract book. Volga Neuroscience Meeting. – 2021. – P. 67-68.

A21. Ковалева, Н.С. Моделирование спайковых нейронных сетей с учетом двух типов пластичности / Н.С. Ковалева, В.В. Матросов, М.А.

Мищенко // Труды XXVI научной конференции по радиофизике, посвященной 120-летию МТ Греховой. – 2022. – С. 215-218.

A22. Kovaleva, N.S. Working memory capacity of spiking neural network model / N.S. Kovaleva, V.V. Matrosov, M.A. Mishchenko // 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). – IEEE, 2022. – P. 158-159.

A23. Mishchenko, M.A. The role of connections topology on synchronization in neural network / M.A. Mishchenko, N.S. Kovaleva, D.I. Bolshakov, V.V. Matrosov // 6th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA). IEEE, 2022. - P. 200-201.

A24. Ковалева, Н.С. Формирование рабочей памяти в нейронной сети с учетом двух типов пластичности / Н.С. Ковалева, В.В. Матросов, М.А. Мищенко // Тезисы докладов XX научной школы «Нелинейные волны - 2022». ИПФ РАН. – 2022. – С. 131.

A25. Kovaleva, N. S. Working memory formation in a spiking neural network with two types of plasticity / N.S. Kovaleva, V.V. Matrosov, M.A. Mishchenko// Book of Abstracts. International Conference-School «Shilnikov workshop 2022». – 2022. – P. 22-23.

A26. Ковалева Н.С. Гибкая модель рабочей памяти нейронной сети с двумя типами пластичности / Н.С. Ковалева, М.А. Мищенко, В.В. Матросов // Материалы XXX Всероссийской научной конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых». – 2023. - №. 17. - С. 103-104.