На правах рукописи

Смелов Павел Сергеевич

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ МАЛОЙ СЕТИ ОСЦИЛЛЯТОРОВ, СВЯЗАННЫХ ИМПУЛЬСНОЙ ИНГИБИРУЮЩЕЙ СВЯЗЬЮ С ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКОЙ

01.04.03 - Радиофизика

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Калининград 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта»

Научный Ванаг Владимир Карлович

руководитель: доктор физико-математических наук, профессор

Официальные Постников Евгений Борисович локтор физико-математических н

доктор физико-математических наук, доцент,

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Курский государственный университет», профессор кафедры физики и технологий,

заведующий отделом теоретической физики НИЦ

физики конденсированного состояния

Пономаренко Владимир Иванович

доктор физико-математических наук, профессор, Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской

академии наук,

ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики Российской академии

наук»

Защита состоится «23» июня 2021 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета Д212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского и на сайте https://diss.unn.ru/files/2021/1105/diss-Smelov-1105.pdf

Автореферат разослан ______ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.166.07 канд. физ.мат. наук, доцент

Клюев Алексей Викторович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Наука о нелинейных физико-химических явлениях (волны, диссипативные структуры, связанные осцилляторы всех типов, динамика сетей) достигла уже такого уровня зрелости, когда наступает время её практического применения. Нейрофизиологи, физики и математики-нелинейщики приходят к пониманию, что мозг человека надо рассматривать как динамическую систему, как иерархически организованную динамическую сеть связанных осцилляторов и возбудимых элементов. Но при изучении мозга возникает множество физико-математических вопросов, например, о стабильности и изменчивости режимов нейросетей, состоящих из возбудимых и осциллирующих клеток с локальными и удаленными импульсными связями с задержками... Как самообразуется и самонастраивается иерархическая структура нейросети? Как и где можно применять нейроподобные сети (логические элементы, элементы электрической цепи, поиск кратчайшего пути...)? Все эти вопросы находятся в центре внимания специалистов по теории нелинейных динамических систем.

Исследование принципов работы нейронной сети головного мозга является одним из крупных современных трендов. Однако биологические системы очень сложны для исследования. В основном для изучения их свойств используются модельные экспериментальные системы, в частности системы связанных химических осцилляторов.

Актуальность темы обусловлена нерешённостью задачи о правилах (законах) функционирования сложных сетей связанных осцилляторов. Также об актуальности темы исследования может говорить большой интерес к ней исследовательских групп по всему миру и постоянное появление новых статей в рецензируемых научных журналах Scopus и Web of Science, которые, в свою очередь, говорят о постоянном развитии науки в этом направлении.

Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является создание теории функционирования небольших нейроподобных сетей связанных осцилляторов с обратными связями. А именно, изучение влияния

топологии связей и их параметров на формирование динамических режимов четырёх почти одинаковых осцилляторов, связанных импульсными ингибирующими и/или активирующими связями с временной задержкой; численное моделирование поведения таких сетей с использованием наиболее простых фазовых осцилляторов и полномасштабных кинетических моделей, основанных химической автоколебательной реакции Белоусова-Жаботинского (БЖ-осцилляторы). Количество осцилляторов, равное четырём, объясняется возможностью применения таких сетей для имитации динамики четвероногих животных (локомоции) и роботов. Более того, в сетях такого размера существует много динамических режимов при том, что сама сеть является относительно простой как для теоретического, так и экспериментального изучения.

Для достижения поставленной цели и восполнения обнаруженных во время исследований пробелов в теории были решены следующие задачи:

- для трёх топологических типов связи (однонаправленная по кругу, двунаправленная по кругу, связь «все со всеми») с помощью численного моделирования составлены карты областей динамических режимов, границы которых зависят от двух параметров сети: силы связи между осцилляторами C_{inh} и временной задержки τ между спайком в одном осцилляторе и вызываемым им возмущением в другом;
- проведено экспериментальное исследование таких сетей, основываясь на полученных результатах моделирования;
- составлены области существования режимов на параметрической плоскости $C_{\mathrm{inh}}-\tau$ в зависимости от разброса периодов колебаний осцилляторов (дисперсии) вокруг среднего значения периода;
- выполнено сравнение результатов экспериментального и теоретического исследований;
- используя полученные данные, разработаны и численно протестированы общие методы и алгоритмы самоанализа текущего режима сети осцилляторов;
- метод распознавания текущего режима сети с помощью задержек был апробирован в натуральном эксперименте;

- на основе способности самоанализа текущего режима сети осцилляторов разработан алгоритм переключения между возможными режимами сети.

Научная новизна

Основные результаты, полученные В процессе исследования, диссертационного являются новыми. Впервые составлены максимально подробные диаграммы динамических режимов сети из четырёх почти одинаковых БЖ осцилляторов, импульсной ингибиторной СВЯЗЬЮ временной связанных плоскости $C_{\rm inh} - \tau$ для задержкой трёх видов однонаправленная по кругу, двунаправленная по кругу, связь «все со всеми». Впервые составлены диаграммы областей стабильности основных режимов сети, зависимых от расстройки осцилляторов (в данной работе расстройка частот – это дисперсия собственных периодов колебаний осцилляторов относительно их среднего значения периода). Создана компьютерная программа на языке программирования Pascal для расчёта динамики четырёх связанных импульсной ингибирующей связью БЖ-осцилляторов. Разработаны новые принципы распознавания сетью динамического состояния. На основе исследования поведения связанных осцилляторов под воздействием внешних импульсов составлена таблица параметров (фазы возмущаемых осцилляторов, амплитуда и длительность возмущающих импульсов), позволяющих эффективно осуществлять переключение текущего режима сети в желаемый.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическое исследование нейроподобной сети из четырёх почти одинаковых осцилляторов, импульсно связанных ингибиторной связью с временной задержкой, подкреплённое экспериментальными данными, позволит расширить теорию функционирования небольших сетей связанных осцилляторов с обратными связями. В будущем эти знания должны быть масштабированы на сети с большим количеством осцилляторов.

Разработанные методы построения сетей с когнитивной функцией самостоятельного распознавания и изменения своего текущего динамического состояния лягут в основу создания

«химического компьютера» - интеллектуального устройства, способного принимать решения в ответ на внешние стимулы.

Методология и методы исследования

Благодаря своим свойствам сети химических осцилляторов являются идеальным объектом для экспериментов (как численных, так и натуральных) по изучению работы нейроподобных сетей, в то время как реальные биологические нейросети слишком сложны и плохо воспроизводимы, а электрические сети не столь пластичны, как химические. Наиболее изученным химическим осциллятором является реакция Белоусова-Жаботинского (БЖ), динамика которой близка к динамике нейронов: БЖ-осциллятор способен давать спайковые (релаксационные) колебания и быть в возбудимом состоянии. Именно по этим причинам в работе применялись сети БЖ-осцилляторов.

Проводилось компьютерное моделирование сетей БЖ осцилляторов. Чтобы открыть главные свойства найденных режимов колебаний и некоторые их особенности, связанные именно с реакцией БЖ, параллельно рассматривалась модель фазовых осцилляторов. При моделировании фазовые осцилляторы имеют преимущество перед химическими в вычислительной простоте. Для подтверждения или опровержения полученных теоретических данных проводились экспериментальные исследования с БЖмакроосцилляторами. Для была собрана этого управляемая компьютером с использованием программы LabVIEW через АЦП. Результаты теоретических и экспериментального исследований были сравнены, и получено их хорошее соответствие.

Положения, выносимые на защиту

- 1) карты областей динамических режимов сети четырёх осцилляторов, связанных ингибиторной импульсной связью при различных значениях параметров силы связи $\mathcal{C}_{\mathrm{inh}}$ и задержки τ для трёх типов связи: однонаправленная по кругу, двунаправленная по кругу, связь «все со всеми»;
- области стабильности основных режимов сети при различных значениях разброса периодов колебаний осцилляторов вокруг среднего значения периода;

- три типа архитектуры сети с блоком распознавания своего текущего динамического состояния: определение режимов с помощью задержек во времени, определение кластеров по амплитуде сигнала, определение режимов с помощью резонансного подхода;
- 4) два метода переключения динамических состояний сети между собой: силовой и специфический;
- 5) таблица параметров переключения динамических режимов сети силовым методом.

Степень достоверности и апробация результатов

Представляемые результаты компьютерного моделирования получены с применением современных методов численного счёта теории дифференциальных уравнений, а данные натурального эксперимента - корректным применением апробированных методик экспериментальных исследований. Их достаточная степень достоверности и надёжности обеспечена согласованностью между собой и с результатами работ по предмету исследования, проведённых ранее другими авторами, отмеченными ссылками, а также цитированиями наших работ.

Основные положения работы докладывались и обсуждались семинарах Центра Нелинейной Химии. также на на международных конференциях: «VIII Международная Конференция: Конструирование Химической сложности» (2015 г., (Мюнхен), Германия); семинар в рамках школы «Non-Equilibrium Collective Dynamics in Condensed Matter and Biological Systems» B Техническом Университете Берлина, (2015 г., Берлин, Германия); «Нелинейные Волны - 2016» (2016 г., Нижний Новгород, Россия); «Х Международная Конференция: Конструирование Химической сложности» (2019 г., Потсдам, Германия).

По теме диссертации было опубликовано 3 тезиса докладов и 6 статей в научных периодических изданиях. Все издания входят в список рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при министерстве образования и науки Российской Федерации (ВАК РФ) и индексируются базами данных научной периодики Scopus и Web of Science. А также получено свидетельство № 2018611395 о

государственной регистрации программы для ЭВМ «Динамика БЖ-макроосцилляторов, связанных ингибиторной связью с задержкой».

Часть результатов, представленных в диссертации, получены при выполнении работ по грантам РНФ (17-12-01123), РФФИ (15-07-01726) и Государственного задания (4.8448.2017/БЧ).

Личный вклад автора

Основные результаты, представленные в диссертации, получены лично автором. Постановка задач и обработка полученных результатов сделаны совместно с научным руководителем. В работах, где фамилия автора диссертации стоит не первой, внесён равный вклад с первым соавтором.

Литературный обзор

Существует множество математических моделей, описывающих автоволновые процессы в активной среде. Одной из первых таких моделей была модель Ходжкина-Хаксли. В 1952 году Алан Ходжкин и Эндрю Хаксли в попытках описать нервный сигнал в гигантском аксоне кальмара предложили математическую модель, объясняющую ионные механизмы, лежащие основе генерирования И распространения потенциалов нейронах. Позднее были придуманы более простые модели, позволяющие эффективно проводить крупномасштабное моделирование целых групп связанных нейронов, более обще осцилляторов. Например, модель ФитцХью-Нагумо. Целью создания этой модели было выявление важных с точки зрения математики свойств возбуждения и распространения нервных импульсов, отделение их от электрохимических свойств потоков ионов натрия и Таким образом, произошло разделение развития математических моделях на две концепции, которые можно грубо математическое моделирование описать так: возбудимой системы в пространстве и времени и математическое моделирование механизмов, протекающих внутри возбудимой системы.

В химии бурное изучение связанных осцилляторов началось с середины 70-ых годов. Благодаря открытию советским химиком Борисом Павловичем Белоусовым автоколебательной реакции и

«открытию» спустя десятилетие повторному её советским Марковичем Жаботинским биофизиком Анатолием «нелинейщиков» появился важный объект для исследований законов нелинейных систем. Эту реакцию назвали в их честь -Белоусова-Жаботинского (БЖ-реакция). Обычно, реакция — это окисление малоновой кислоты броматом под воздействием катализатора В кислой среде. Ключевыми интермедиатами реакции являются HBrO₂, который выступает в качестве активатора автокаталитического роста, и ионы бромида, являющиеся ингибитором автокатализа. В случае ингибиторной связи в качестве ингибитора можно использовать тот же бромид или молекулярный бром (переменная u в моделях). А в случае активаторной связи применяют нитрат серебра (AgNO₃), который быстро удаляет ингибитор (бромид) из раствора. Здесь стоит отметить, что динамика БЖ-реакции схожа со спайковой динамикой нейрона.

Упростив химический механизм, состоящий из десяти реакций, — механизм Филда-Кёрэша-Нойеса (ФКН, FKN mechanism), Ричард Филд и Ричард Нойес вывели упрощенную математическую модель БЖ реакции, получившую название Орегонатор. Существуют и другие математические модели, которые могут быть использованы для моделирования БЖ-реакции, например, известные модели Ванага-Лавровой (VL модель), Ванага-Эпштейна с четырьмя переменными (VE модель) и трёхпеременная ZBKЕ-модель. В данной работе в качестве базовых были взяты две модели: Ванага-Лавровой и Ванага-Эпштейна. Их системы уравнений будут подробно описаны в главах 1 и 4, соответственно. Эти модели более реалистичны, чем модель Орегонатор.

Для моделирования быстрых переходов между модами в сетях связанных осцилляторов удобнее использовать модель Ванага-Эпштейна, содержащую в качестве быстрой переменной *u*.

Помимо полномасштабных моделей БЖ-реакции, основанных на элементарных химических реакциях, хорошо известен другой метод изучения импульсно связанных осцилляторов — метод Кривых Переустановки Фаз (КПФ). Кривые Переустановки Фаз — это характерная зависимость сдвига фазы,

вызванного внешним почти что дельта-образным возмущением, от фазы осциллятора, в которую это возмущение и произошло. Концепция КПФ позволяет использовать очень простые (с точки зрения вычислений) фазовые модели.

Сеть связанных химических осцилляторов интересна своей перспективой стать нейроподобной вычислительной системой. По мере приближения к пределам увеличения производительности вычислительных систем, построенных на кремниевых чипах, всё более интересны новые эффективные архитектуры, отличные от общепринятой архитектуры фон Неймана.

Амбициозной целью многих учёных-нелинейщиков является понимание механизма работы головного мозга, устройства памяти, обработки информации. Бужаки (György Гиорги фокусируется на факте, что в мозге должны существовать три подсистемы: одна генерирует динамические режимы (например, Центральный Генератор Ритмов (ЦГР)), вторая распознаёт их, а третья анализирует реакцию второй. В целом, несколько таких «считывающих систем» и несколько ЦГР могут сосуществовать и работать вместе. Такой взгляд на архитектуру мозга схож с нашим развитию «химического компьютера»: системы подходом к связанных осцилляторов, которая может выполнять такие функции, как распознавание сигнала (в каком-то смысле - образа), принятие решений или адаптация и «умный» ответ на внешнее воздействие.

В данной работе представлены результаты теоретического и экспериментального изучения сети из четырёх почти одинаковых БЖ осцилляторов с ингибиторной и активаторной импульсной связью с временной задержкой.

Глава 1. Динамические режимы четырёх почти одинаковых осцилляторов, связанных импульсной ингибиторной связью с задержкой

В Главе 1 анализируются эффекты временной задержки au, силы связи C_{inh} и связности на формирование режимов и мультистабильность (другими словами, мультиритмичность) для двух качественно разных моделей осцилляторов: модель

химических БЖ-осцилляторов в проточных реакторах с постоянным перемешиванием (ПРПП) и модель фазовых осцилляторов. Рассмотрены три топологии сети: однонаправленная связь по кругу, взаимная или двунаправленная связь по кругу, «все со всеми», как показано на рисунке 1. Исследовано влияние архитектуры на коллективное поведение импульсно связанных осцилляторов.

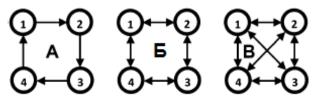


Рисунок 1 — (A) Однонаправленная связь по кругу, (Б) двунаправленная связь по кругу, (В) связь «все со всеми».

Для моделирования поведения сети связанных ингибиторной импульсной БЖ связью осцилляторов, обыкновенных дифференциальных использовалась система уравнений из четырёх переменных – модель Ванага-Лавровой (VLмодель):

$$\frac{dx_i}{dt} = -k_1(h_i)x_iy_i + k_2(h_i)y_i - 2k_3x_i^2
+ \frac{k_4(h_i)x_i(c_0 - z_i)}{(c_0 - z_i + c_{min})} - k_0x_i,$$
(1)

$$\frac{dy_i}{dt} = -k_1(h_i)x_iy_i - k_2(h_i)y_i + k_9v_iz_i - k_0y_i + \sum_{j \neq i} C_{ji}P(x_j, \Delta t, \tau_{ji}),$$
(2)

$$\frac{dz_i}{dt} = \frac{2k_4(h_i)x_i(c_0 - z_i)}{(c_0 - z_i + c_{min})} - k_9v_iz_i - k_{10}z_i,\tag{3}$$

$$\frac{dv_i}{dt} = 2k_1(h_i)x_iy_i + k_2(h_i)y_i + k_3x_i^2 - k_9v_iz_i - k_{13}v_i - k_0v_i, \tag{4}$$

где i – индекс осциллятора с 1 по 4,

x – концентрация активатора, ([$HBrO_2$]),

y – концентрация ингибитора, ([Br^-]),

- z концентрация окисленного состояния катализатора,
- v концентрация броммалоновой кислоты, ([BrMA]),
- c_0 общая концентрация катализатора (окисленная и восстановленная формы), и $c_{min} \ll c_0$.

Прямоугольная функция $P(s, \Delta t, \tau)$ переключается из значения 0 в 1 через время τ (время задержки) после острого спайка переменной s (= x), а затем спустя время Δt вновь принимает значение 0.

Рассмотрим так называемые «регулярные» режимы, в которых каждый осциллятор производит ровно один спайк за один полный период системы. Существует четыре таких режима при однонаправленной связи: синфазные колебания (IP – In-Phase), противофазные (AP -Anti-Phase), когда любые осцилляторы имеют сдвиг по фазе, равный половине глобального периода T, режим ходьба (W – «Walk»), когда осцилляторы дают спайки один за другим в направлении связи со сдвигом фазы между соседними осцилляторами равным T/4, и обратная ходьба (WR – Walk-reverse) - режим, такой же, как и W, но последовательность спайков обратна направлению связи. Примеры этих режимов показаны на рисунке 2А – Г, соответственно.

При двунаправленной связи появляется новый режим IPAP (синфазно-противофазный: два соседних осциллятора находятся в синфазе, как и другие два, но сами пары осциллируют противофазно). Стоит отметить, что при данном типе связи нет различий между режимами W и WR, т. к. нет определённого направления, поэтому будем применять обозначение Сплей (S, Splay) - общее название режимов, когда осцилляторы вспыхивают один за другим с равным временным интервалом).

В случае связи «все со всеми» добавляются два новых режима — трёхкластерный (3Cl = «2+1+1») и двухкластерный (2Cl = «3+1»), когда один кластер состоит из трёх синфазных осцилляторов и одного, находящегося в противофазе с первыми тремя.

В добавок к регулярным найдены сложные режимы (C). Режим называется сложным, если все четыре осциллятора производят спайки и количество спайков N_i каждого осциллятора за полный период T различно или $N_i > 1$ (например, $N_i = 2$). В

описанных выше регулярных режимах $N_i=1$. Примеры сложных режимов представлены на рисунке 2 Ж и К.

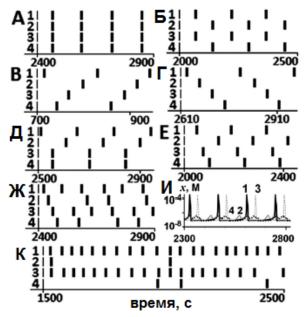


Рисунок 2 — Примеры режимов для однонаправленной связи. Спайк осциллятора обозначен вертикальной чертой. На вертикальной оси отмечены номера осцилляторов. (А) Режим IP; $\tau=60$ с, $C_{inh}=1.5\times 10^{-4}$ M c^{-1} ; T=127.3 с. (Б) Режим AP; $\tau=10$ с, $C_{inh}=1.5\times 10^{-4}$ M c^{-1} ; T=153.2 с. (В) WR; $\tau=20$ с, $C_{inh}=1.0\times 10^{-4}$ M c^{-1} ; T=113.3 с. (Г) W; $\tau=10$ с, $C_{inh}=2\times 10^{-6}$ M c^{-1} ; T=162.9 с. (Д) «2+1+1»; $\tau=45$ с, $C_{inh}=2\times 10^{-6}$ M C^{-1} ; T=143.9 с. (Е) четырёхкластерный режим (отличный от W и WR); $\tau=30$ с, $C_{inh}=2\times 10^{-6}$ M C^{-1} ; T=143.4 с. (Ж) сложный периодический режим «2/3»; $\tau=30$ с, $C_{inh}=3\times 10^{-4}$ М C^{-1} ; T=261 с, $N_2/N_3=2/3$ ($N_2=N_4$, $N_1=N_3$). (И) реальная кинетика концентрации активатора режима OS; осцилляторы 2 и 4 подавлены; $\tau=15$ с, $C_{inh}=7\times 10^{-4}$ М C^{-1} ; T=140.4 с. (К) сложный нерегулярный режим; $\tau=15$ с, $C_{inh}=5\times 10^{-4}$ М C^{-1}

В зоне сложных динамических режимов при относительно больших значениях $C_{\rm inh}$ спайки диагональных осцилляторов (допустим, 2 и 4) становятся нерегулярными, как видно на рисунке 2 И, в то время как осцилляторы 1 и 3 дают спайки регулярно. В какомто смысле такое поведение может быть названо «химерой»

(динамический режим, при котором часть осцилляторов колеблется когерентно, а часть — беспорядочно). При дальнейшем увеличении силы связи диагональная пара полностью подавляется. Так, С-режим переходит в OS (Oscillation Suppression), когда хотя бы один осциллятор подавлен (рисунок 2 К).

Часто встречаются зоны бимодальности, где присутствуют два разных режима, и зоны тримодальности с тремя сосуществующими режимами. Даже с одинаковыми осцилляторами и при одинаковых параметрах система четырёх импульсно связанных осцилляторов способна генерировать как минимум два различных режима. Если сравнивать информационную ёмкость нашей сети с ёмкостью известной сети Хопфилда, то последняя способна хранить $n/2\log_2 n$ решений, где n — количество бинарных ячеек. То есть для рассматриваемого случая четырёх осцилляторов — только одно решение.

Глава 2. Экспериментальное исследование сети из четырех химических осцилляторов, однонаправленно связанных ингибиторной импульсной связью

Как И любой теоретический результат, данные компьютерного моделирования требуют экспериментального подтверждения. В Главе 2 представлены результаты численного моделирования, экспериментального исследования сети четырёх осцилляторов с однонаправленной импульсной ингибиторной ПО кругу И поиска всех динамических режимов, предсказанных компьютерными вычислениями. В качестве осцилляторов использовались ПРПП с БЖ реакцией. Блок-схема экспериментальной установки для четырех импульсно связанных химических осцилляторов представлена на рисунке 3.

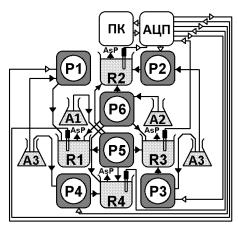


Рисунок 3 — Блок-схема экспериментальной установки. Белые стрелки показывают направление движения данных, черные — направление движения растворов.

Растворы А1 и А2 непрерывно подавались в реакторы R1, R2, R3 и R4 с помощью перистальтических насосов P5 и P6. Наполняемость бюксов реакционной смесью контролировалась вакуумными насосами AsP1 и AsP2. Колебания регистрировались по потенциалам Pt-электродов. Сигнал от Pt-электродов поступал на входы аналого-цифрового преобразователя АЦП, соединённого с компьютером ПК. Обработка входных сигналов осуществлялась программой разработанной в среде визуального программирования LabView 12.0. С помощью этого программно-аппаратного комплекса осуществлялась ингибиторная импульсная связь между реакторами с заранее определенной силой связи $C_{\rm inh}$ и временем задержки τ .

ходе экспериментов наблюдались разные частоты изолированных осцилляторов даже несмотря на то, что все реакторы находились в одинаковых условиях. Для внесения корректировок в областей режимов карту динамических параллельно С экспериментом проводилось компьютерное моделирование. уравнения (1) - (4) была добавлена расстройка собственных частот осцилляторов, выражаемая различной для каждого осциллятора концентрацией водорода (параметр h_i). ионов регулировался параметром ε – отклонением от базового значения

 $h=0.3~{
m M}.$ Таким образом, концентрация ионов водорода для каждого осциллятора выражается как $h_i=h-arepsilon_i.$

Для численного интегрирования системы ОДУ была написана собственная программа с применением пятиэтапного метода Рунге—Кутта четвертого порядка (метод Рунге—Кутта—Мерсона). Так же, использовалась программа FlexPDE.

Экспериментально подтверждено существование четырех основных режимов синхронизации: синфазные колебания (IP); антифазный режим (AP); режим «ходьба» (W); режим «обратная ходьба» (WR). Также найдены режимы ОS и «2+1+1». Показано, что обнаруженные экспериментально режимы соответствуют найденным при моделировании осцилляторов с расстройкой частот (рисунок 4).

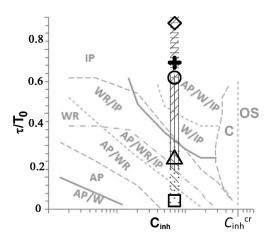


Рисунок 4 — Диаграмма динамических режимов для четырех почти одинаковых БЖ-осцилляторов, однонаправленно связанных по кругу ингибиторной импульсной связью. Зоны, ограниченные серыми линиями, получены при моделировании системы (1) - (4) с расстройкой собственных частот осцилляторов не более 2.5%. Вертикальная штрихованная полоса с символами «квадрат», «треугольник», «круг», «плюс» и «ромб» обозначает режимы колебаний при разбросе частот до 12%. Символы маркируют экспериментальные данные, а штриховка — моделированные при Cinh = 0.07 мМ/с. Обозначения режимов: квадрат и точки — режим WR; треугольник и диагональный штрих — режим «2+1+1»; круг и вертикальный штрих — режим IP;

плюс и обратный диагональный штрих — режим W; ромб и горизонтальный штрих — режим AP.

С помощью компьютерного моделирования был проведён анализ стабильности исходных начальных режимов AP, W, WR, «2+1+1» и IP в зависимости от параметров ε и τ при постоянном значении $C_{\rm inh}$, причём $C_{\rm inh}$ примерно соответствует силе связи, используемой в эксперименте. Результаты представлены на рисунке 5.

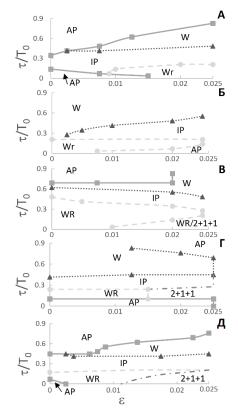


Рисунок 5 - Области стабильности всех динамических режимов на плоскости $\varepsilon - \tau/T_0$ (где ε – величина, характеризующая разброс периодов колебаний осцилляторов вокруг среднего периода T_0) для начальных состояний: (а) AP, (б) W, (в) WR, (г) «2+1+1», (∂) IP. Линиями/символами пунктир/треугольники, сплошная/квадраты, тире/круги и «пунктир с точкой» обозначены границы областей стабильности для режимов W, AP, WR u «2+1+1» соответственно; $C_{inh} = 0.07 \text{ MM/c}.$

Для большинства начальных состояний при малых τ и больших ε наиболее устойчивым оказывается режим WR. Это соответственно объясняет, почему в эксперименте не удалось найти режим AP при малых τ . С другой стороны, AP оказывается

относительно устойчив при τ/T_0 ближе к единице (рисунок 5 A, B, Г и Д), где он и был найден.

Таким образом, экспериментально доказано существование всех динамических режимов, предсказанных ранее теоретически. Корректировку в теоретическую диаграмму (рисунок 4) вносит зависимость режимов от естественного разброса собственных периодов осцилляторов.

Глава 3. Применение динамических режимов четырёх связанных осцилляторов для построения «химического компьютера»

Несколько почти идентичных БЖ-осцилляторов ингибирующей и активирующей импульсной связью с временной задержкой могут производить много различных динамических режимов. Как и в биологии, будем называть эту сеть осцилляторов – Центральным Генератором Ритмов. Согласно идее Бужаки о существовании «ридера», должен быть некий анализирующий блок (группа дополнительных БЖ-элементов), способный различать различные режимы ЦГР и посылать сигнал другому блоку химического компьютера, который можно назвать «логическим» или блоком «принятия решений» (ПР). В данной главе численно исследуются различные методы функционирования анализирующего блока, названного нами «А», который должен различать разные режимы ЦГР.

Любой динамический режим (включая режимы ЦГР) можно охарактеризовать фазами, амплитудой и частотой колебаний. Соответственно разработаны три метода, основанные на: (а) разности фаз между осцилляторами ЦГР, (б) суммарной амплитуде осцилляторов в кластерах и (в) резонансах, которые чувствительны к частоте. В качестве ЦГР используются четыре осциллятора с импульсной связью типа «каждый с каждым» и анализируются пять регулярных режимов, найденные в такой сети. Блок А должен информировать модуль ПР о каждом из регулярных режимов без ошибок.

Для моделирования реакции БЖ во всех осциллирующих ячейках ЦГР и связей между ними применялась система ОДУ (1) - (4). Анализирующий блок должен состоять не из осциллирующих, а из

возбудимых ячеек, поэтому для него необходимо немного модифицировать уравнение (2). Для подавления колебаний, чтобы осцилляторы оставались В стационарном (но возбудимом) состоянии, можно поддерживать необходимую концентрацию ингибитора, например, постоянным его притоком, скорость которого выражается произведением $k_0 y_0$:

$$\frac{dy_m}{dt} = -k_1(h)x_m y_m - k_2(h)y_m + k_9 v_m z_m - k_0(y_m - y_0)$$

$$\equiv F(x_m, y_m, z_m, v_m),$$
(5)

где m = 1, 2,..., N (номера А-ячеек), параметры h и y_0 применялись для регулирования стационарного состояния БЖосцилляторов.

Между ЦГР и А-блоком используется однонаправленная активирующая импульсная связь с временной задержкой. Для её установления в уравнение (5) был добавлен член $k_{diff}[Ag_m]y_m$:

$$\frac{dy_m}{dt} = F(x_m, y_m, z_m, v_m) - \mathbf{k_{diff}}[\mathbf{A}\mathbf{g_m}]\mathbf{y_m},\tag{6}$$

и в систему введена пятая переменная $\llbracket Ag_m
Vert$ (концентрация серебра), скорость изменения которой описывается следующим уравнением:

$$\frac{d[Ag_m]}{dt} = \sum_{i} [C_{ex}P(x_i, \tau_{im}, \Delta t)] - k_{diff}[Ag_m]y_m, \tag{7}$$

где

i = 1, 2, 3, 4 (номера осцилляторов ЦГР) Значение y_0 должно быть достаточным, чтобы сдвинуть систему в регион до бифуркации Хопфа. Параметры бифуркации Хопфа найдены линейным анализом стабильности системы (рисунок 6), описывающей А-ячейки. При используемых параметрах системы значение y_0 , при котором наступает бифуркация Хопфа, равняется $y_0^{\rm H}$ (\cong 1.3331 M). При $y_m > y_0^{\rm H}$ колебания подавляются. Разница между значением $y_{\rm SS}$ [значение переменной y, когда система находится в стационаром состоянии (СС)] и критическим значением $y_{\text{SS}}^{\text{H}} \ (\cong 8.58 \text{ мкM})$, при котором СС становятся нестабильным, т. е. когда $y_0 = y_0^{\rm H}$, определяет минимальную амплитуду входящего возбуждающего импульса, который вызывает спайк Аячейки при заданном параметре y_0 .

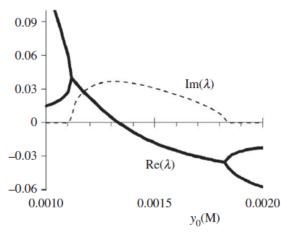


Рисунок 6 — Типичная зависимость наибольших собственных значений λ от y_0 для линеаризированной системы (1), (5), (3) и (4). Толстая кривая представляет $Re(\lambda)$, пунктирная — $Im(\lambda)$. h=0.3 М. Все остальные параметры системы (1), (5), (3) и (4) даны в тексте.

Распознавание режимов с помощью задержек основано на фазовом сдвиге между разными осцилляторами ЦГР и на гипотезе полихронизации, которая утверждает, что два импульса от двух нейронов, генерирующих спайки в различные моменты времени, могут прийти на третий нейрон одновременно, если временная задержка Δt_d между этими двумя спайками и разница в расстоянии Δl между третьим нейроном и каждым из этих двух связана формулой $\Delta l/\Delta t_d=v$, где v – скорость распространения импульса пο аксону. Таким образом, удовлетворительного для метода функционирования рассматриваемого должны соблюдены два условия: (i) А-ячейки настроены так, что только четыре одновременных импульса, пришедших на ячейку, могут вызвать спайк в ней; (ii) временные задержки $au_{
m d}^{(i)}$ между моментом спайка в i-ом осцилляторе ЦГР и моментом прихода импульса на mую ячейку блока А выбраны (настроены) так, что все четыре импульса от ЦГР-осцилляторов приходят одновременно только на одну А-ячейку, отвечающую соответствующему динамическому режиму ЦГР.

Второй метод распознавания режимов ячейками анализирующего блока основан на суммировании активирующих импульсов от осцилляторов ЦГР при условии, что импульс, сгенерированный спайком ЦГР-осциллятора достигает А-ячейку (с которой связан осциллятор) моментально (без задержек) или с одинаковыми временными задержками для всех осцилляторов ЦГР и А-ячеек. Есть три типа суммирования импульсов от осцилляторов: (i) суммирование всех четырёх (как в предыдущем случае, но без учёта временных задержек), (ii) суммирование трёх импульсов от любой тройки осцилляторов ЦГР и (iii) суммирование двух импульсов от любых пар осцилляторов ЦГР.

Третий метод основан на поведении стационарного состояния устойчивого фокуса, который может реагировать на внешнее воздействие только если это возмущения превышает определённый порог (находиться в возбудимом состоянии). Динамика системы (1), (5), (3) и (4) в ответ на малое возмущение её стационарного состояния описывается следующим уравнением (например, для переменной y):

$$y - y_{SS} = y_{ini} \cos(\omega_0 t) e^{2.3 \text{Re}(\lambda) t}, \tag{8}$$

где $y_{
m ini}$ — начальное значение y сразу после малого импульсного возмущения,

$$\omega_0 = \operatorname{Im}(\lambda),$$

 ${\rm Im}(\lambda)$ и ${\rm Re}(\lambda)$ — мнимая и действительная части наибольшего собственного значения λ линеаризованной системы (1), (5), (3) и (4) (рисунок 6), ${\rm Re}(\lambda) < 0$.

Типичная динамика системы (1), (5), (3) и (4) в ответ на возмущение устойчивого фокуса представлена на рисунке 7. Если внешний периодический импульсный сигнал имеет частоту ω , близкую к ω_0 , то должен наблюдаться резонанс. Другими словами спайк должен быть вызван относительно малой амплитудой $C_{\rm ex}$ (но большей некоторой критической величины $C_{\rm ex}^{\rm cr}$) после серии импульсных возмущений. Для того, чтобы три А-ячейки могли детектировать режимы IP, AP и S блока ЦГР, следует настроить их частоты ω_0 на частоты этих режимов.

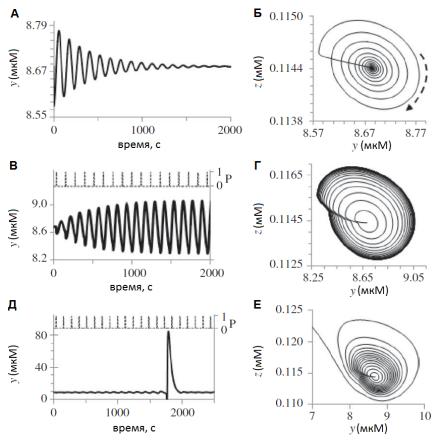


Рисунок 7 — Кинетика возбудимой А-ячейки (А, В, Д) и соответствующие фазовые портреты (Б, Г, Е) при однократном малом возмущении (А, Б) и периодическом импульсном возмущении $C_{ex} \times P(S, \tau, \Delta t)$: (В, Г) при $C_{ex} < C_{ex}^{cr}$ и (Д, Е) при $C_{ex} > C_{ex}^{cr}$. Периодические импульсы $P = P(S, \tau, \Delta t)$ показаны на панелях (В, Д) (правая ось); $S = H(\sin(\omega t) - 0.99)$, $H(x) - \phi$ ункция Хэвисайда. Параметры системы (1), (5), (3) и (4), (6) и (7): h = 0.371757 М, $y_0 = 1.7743$ мМ, $\omega = 0.052$ с $^{-1}$, $C_{ex} = (A, E)$ 0, (B, Г) 1.3×10^{-8} М с $^{-1}$, (Д, E) 1.65×10^{-8} М с $^{-1}$; $x_{ini} = (A, E)$ $1.2x_{ss}$; (B-E) x_{ss} ; $x_{ss} = 2.3055 \times 10^{-7}$ М; $y_{ini} = y_{ss} = 8.68402 \times 10^{-6}$ М; $z_{ini} = z_{ss} = 1.14411 \times 10^{-4}$ М; $v_{ini} = v_{ss} = 5.270125 \times 10^{-4}$ М; $Im(\lambda) \cong 0.0538$ с $^{-1}$; $Im(\lambda)/Re(\lambda) \cong -22.2$.

Все эти подходы могут быть скомбинированы и работать вместе, компенсируя недостатки друг друга. Рассмотренные методы распознавания динамических режимов можно с лёгкостью расширить на варианты ЦГР с пятью, шестью и более осцилляторами.

Функциональная организация больших сетей может быть основана на знании малых сетей.

Глава 4. Переключение между стабильными режимами в малой сети импульсно связанных химических осцилляторов

В Главе 4 рассматривается малая сеть четырёх почти идентичных химических осцилляторов с однонаправленной ингибирующей импульсной связью. Проводится как численный анализ переключений между режимами, так и их экспериментальная проверка.

Переключение между режимами, вызываемое коротким внешним возмущением только одного осциллятора, мы называем «специфическим», т. к. это переключение состоит из определенного каскада спайков и последующих за ним внутренних импульсов.

В дополнение продемонстрирован более эффективный тип переключений, который мы называем «силовым» или «принудительным». Для такого переключения возмущаются несколько осцилляторов (обычно одновременно) и устанавливаются их новые фазы таким образом, чтобы они практически совпадали с фазами осцилляторов желаемого конечного режима.

Третий тип переключений, рассмотренный нами, - это сложные переходы через промежуточные режимы, которые могут быть как стабильными, так и нестабильными. Если через один и тот же динамический режим можно реализовать переключения нескольких режимов, то такой режим можно назвать «хабом».

четырёх БЖ Для моделирования сети осцилляторов использовалась четырёхпеременная модель Ванага-Эпштейна, дополненная условиями внутренних импульсных $C_{\text{inh}}P(x_{i-1},\tau),$ внешних переключающих импульсов, и $C_{i}^{(\text{ext})}P(t_{i1},t_{i2})$:

$$\frac{\mathrm{d}x_i}{\mathrm{d}t} = -k_{1i}x_iy_i + k_{2i}y_i - 2k_3x_i^2 + \frac{k_{4i}x_i(c_0 - z_i)}{(c_0 - z_i + c_{min})} - k_0x_i,$$
 (9)

$$\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}t} = -3k_{1i}x_iy_i - 2k_{2i}y_i + k_3x_i^2 + k_7u_i + k_9z_i - k_0y_i + C_{\mathrm{inh}}P(x_{i-1},\tau) + C_i^{\mathrm{ext}}P(t_{i1},t_{i2}),$$
(10)

$$\frac{\mathrm{d}z_i}{\mathrm{d}t} = \frac{2k_{4i}x_i(c_0 - z_i)}{(c_0 - z_i + c_{min})} - k_9 z_i - k_{10} z_i,\tag{11}$$

$$\frac{\mathrm{d}u_{i}}{\mathrm{d}t} = 2k_{1i}x_{i}y_{i} + k_{2i}y_{i} + k_{3}x_{i}^{2} - k_{7}u_{i} - k_{0}u_{i},$$
где $x = [\mathrm{HBrO}_{2}],$
 $y = [\mathrm{Br}^{-}],$

z = [окисленная форма катализатора],

 $u = [Br_2],$

индексы i=1,2,3,4 отвечают номерам осцилляторов,

 $c_0 = 1 \, {
m MM}$, общая концентрация катализатора,

константы k_i представляют собой объединение параметров: $A=[BrO_3^{-}]=0.25~\mathrm{M},~h=[\mathrm{H^+}]=0.3~\mathrm{M}$ и [малоновая кислота] = [MA] = 0.1 M.

Функция $P(x_{i-1},\tau)$ в уравнении (10) — это прямоугольная функция, которая переключается из «0» в «1» через время τ после появления спайка x и снова переключается в «0» через время Δt ($\Delta t=5$ с в нашем случае). Функция $P(t_{i1},t_{i2})$ — тоже прямоугольная функция, переключающаяся из «0» в «1» в момент времени $t=t_{i1}$ и обратно в $t=t_{i2},t_{i2}-t_{i1}=5$ с; она применяется для короткого внешнего возмущения с целью переключений между модами.

Так как в данной главе используется модель VE вместо модели VL, как в Главе 1, пришлось построить новую параметрическую диаграмму в плоскости $\mathcal{C}_{\mathrm{inh}} - \tau$, чтобы определить области стабильности для четырёх основных режимов: IP, AP, W, WR.

В случае силового переключения фазы осцилляторов выставляются внешним возмущением в желаемом порядке, который соответствует относительным фазам конечного режима. Это достигается возмущениями осцилляторов импульсами с

разными специально подобранными амплитудами. Такой подход даёт результат незамедлительно, другими словами система колеблется в новом режиме уже сразу после воздействия импульсами. Этот метод позволяет нам реализовать все переходы межу базовыми режимами, кроме перехода от W к WR и наоборот, т. к. эти режимы не сосуществуют при фиксированном наборе параметров. Ниже для примера представлены переходы из режима IP.

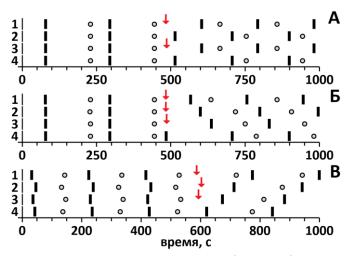


Рисунок 8 — Пространственно-временные графики для переходов из синфазных колебаний четырёх БЖ осцилляторов с однонаправленной ингибиторной импульсной связью, описываемых моделью (9) - (12). Маленькие вертикальные чёрточки обозначают моменты зажигания осцилляторов (спайков), а пустые круги — моменты импульсов от соседних осцилляторов, которые устанавливают импульсную связь. Направленные вниз красные стрелки обозначают внешние ингибирующие импульсы для переключения режимов. (A) переключение $IP \to AP$, (Б) переключение $IP \to W$ и (В) переход $IP \to WR$. Параметры: $C_{inh} = 7 \times 10^{-5} \ M \ c^{-1}$, $\Delta t = \Delta t^{(ext)} = 5 \ c$; $\tau/c = (A) \ u$ (Б) 150, (В) 100; фазы внешних импульсов $\phi = (A)$ -(В) 0.88. Амплитуды внешних импульсов (М c^{-1}): (A) $C_1^{(ext)} = C_3^{(ext)} = 2 \times 10^{-2}$, (Б) $C_1^{(ext)} = 1 \times 10^{-3}$, $C_2^{(ext)} = 1 \times 10^{-2}$, $C_3^{(ext)} = 0.4$, $(B) \ C_1^{(ext)} = 0.4$, $C_2^{(ext)} = 6 \times 10^{-3}$, $C_3^{(ext)} = 6 \times 10^{-4}$.

Пример «специфического» переключения показан на рисунке 9: режим АР может быть переключён в режим W всего лишь одним внешним ударом. После сдвига фазы осциллятора #1

возникает нестабильный режим 3CI, который медленно (в течение нескольких периодов осцилляций) трансформируется в стабильный режим W. Во время этого перехода внутренние импульсы от осциллятора #1 приходят на осциллятор #2, растягивая межспайковый интервал и сдвигая фазы спайков. Осциллятор #2, в свою очередь, сдвигает осциллятор #3, что в итоге и приводит к режиму W.

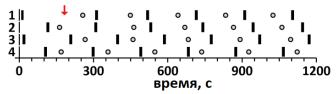


Рисунок 9 — Специфическое переключение AP \rightarrow W. Символы такие же, как и на рисунке 8. Параметры: $C_{inh}=7\times 10^{-5}~{\rm M~c^{-1}}, \Delta t=\Delta t^{(ext)}=5~{\rm c}; \tau/{\rm c}=150;$ фаза внешнего импульса $\phi=0.89;$ амплитуда внешнего импульса (M ${\rm c^{-1}}$): $C_1^{(ext)}=1\times 10^{-3}$.

В случаях, когда переключение между двумя режимами трудно реализуемо, можно использовать промежуточные режимы и переходы в и из них. Такой подход можно реализовать и с помощью силового и с помощью специфического переключений. Главная идея переключений через промежуточные режимы — пытаться менять число кластеров в режимах, уменьшая или увеличивая их число на один.

Чтобы проверить результаты моделирования, проведена серия экспериментов и получены предсказанные переходы между режимами с помощью разных типов переключений. Параметры переключения динамических режимов сети силовым методом представлены в таблице 1.

Таблица 1. Фазы осцилляторов, при которых они должны возмущаться для переключения режимов. В левом столбце — начальные режимы, в первой строке — режимы после перехода; Δt_{sw} — длительность импульса; верхний индекс k в $\phi_{sw}^{(k)}$ (k=2,3,4) означает индекс осциллятора в сети, который получает импульсное возмущение. Пропуски в ячейках для переходов $WR \to W$ и $W \to WR$ означают, что эти режимы не сосуществуют при одних и тех же параметрах.

	IP	AP	W	WR
IP		$ \phi_{sw}^{(2)} = 0.7 $ $ \phi_{sw}^{(4)} = 0.7 $ $ \Delta t_{sw} = 8 \text{ c} $	$\phi_{sw}^{(2)} = 0.26$ $\phi_{sw}^{(3)} = 0.7$ $\phi_{sw}^{(4)} = 0.92$	$ \phi_{sw}^{(2)} = 0.92 $ $ \phi_{sw}^{(3)} = 0.85 $ $ \phi_{sw}^{(4)} = 0.65 $
АР	$ \phi_{sw}^{(2)} = 0.7 $ $ \phi_{sw}^{(4)} = 0.7 $ $ \Delta t_{sw} = 8 \text{ c} $		$ \phi_{sw}^{(2)} = 0.75 $ $ \phi_{sw}^{(3)} = 0.87 $ $ \phi_{sw}^{(4)} = 0.61 $ $ \Delta t_{sw} = 8 \text{ c} $	$ \phi_{sw}^{(3)} = 0.7 $ $ \phi_{sw}^{(4)} = 0.9 $ $ \Delta t_{sw} = 10 \text{ c} $
W	$\phi_{sw}^{(2)} = 0.92$ $\phi_{sw}^{(3)} = 0.69$ $\phi_{sw}^{(4)} = 0.81$ $\Delta t_{sw} = 13 \text{ c}$	$ \phi_{sw}^{(2)} = 0.34 $ $ \phi_{sw}^{(3)} = 0.8 $ $ \phi_{sw}^{(4)} = 0.88 $ $ \Delta t_{sw} = 13 \text{ c} $		-
WR	$ \varphi_{sw}^{(2)} = 0.26 $ $ \varphi_{sw}^{(3)} = 0.65 $ $ \varphi_{sw}^{(4)} = 0.92 $ $ \Delta t_{sw} = 8 \text{ c} $	$ \phi_{sw}^{(3)} = 0.94 $ $ \phi_{sw}^{(4)} = 0.91 $ $ \Delta t_{sw} = 10 \text{ c} $	-	

В настоящей работе впервые продемонстрировано, что «силовой» метод переключения обеспечивает адресные переходы между любыми двумя режимами рассматриваемой системы при условии, что эти режимы сосуществуют при выбранных параметрах. Преимущество силового переключения перед специфическим — это надёжный переход между любыми двумя сосуществующими режимами. Кроме того, силовое переключение является более предсказуемым, и амплитуды возмущающих систему импульсов могут быть рассчитаны по данным из КПФ.

Заключение

Систематически изучены динамические режимы сети из четырёх спайковых осцилляторов, импульсно связанных ингибиторной связью временной С задержкой сделаны последовательные шаги от наблюдения за сетью до управления ею (составлены подробные карты областей динамических режимов для сетей с разной топологией, на этой базе предложены методы распознавания режимов, что, В свою очередь, позволило переключать состояния сети). Полученные данные легли в основу дальнейшего развития идеи спайкового химического компьютера. Каждая часть проделанной работы способствовала созданию самостоятельно функционирующей динамической системы нейроподобной сети. Особенно важен тот факт, что каждый теоретический шаг проверен и подтверждён в экспериментах. Так, информация о динамических режимах на параметрической диаграмме в плоскости $\mathcal{C}_{\mathrm{inh}} - \tau$ позволила использовать свойство мультистабильности и предложить два способа переключения системы из одного колебательного режима в другой: силовой и специфический. Кроме того, для возможности самостоятельного выполнения этого свойства системе необходимо «знать» своё текущее состояние. Для решения этой задачи были разработаны три метода распознавания динамических режимов: С задержек во времени, определение кластеров по амплитуде сигнала резонансный подход. Bcë это позволило смоделировать автономную сеть, адаптирующуюся к внешнему воздействию, и протестировать её экспериментально, собрав воедино «кирпичики».

Список публикаций диссертанта

- 1. Vanag, V.K. Dynamical regimes of four almost identical chemical oscillators coupled via pulse inhibitory coupling with time delay / V.K. Vanag, P.S. Smelov, V. V. Klinshov // Physical Chemistry Chemical Physics. -2016. Vol. $18 N {o}$ 7 P. 5509 5520.
- 2. Смелов, П.С. Экспериментальное исследование сети из четырех химических осцилляторов, однонаправленно связанных ингибиторной импульсной связью / П.С. Смелов, В.К. Ванаг // Журнал Физической Химии. 2017. T. 91 N = 6 C. 963 968.
- 3. Smelov, P.S. A 'reader' unit of the chemical computer / P.S. Smelov, V.K. Vanag // Royal Society Open Science. -2018. Vol. 5- No. 1- P. 171495.
- 4. Smelov, P.S. Controllable switching between stable modes in a small network of pulse-coupled chemical oscillators / P.S. Smelov, I.S. Proskurkin, V.K. Vanag // Physical Chemistry Chemical Physics. -2019. Vol. $21 N_{\odot}$ 6 P. 3033 3043.
- 5. Proskurkin, I.S. Experimental Investigation of the Dynamical Modes of Four Pulse-Coupled Chemical Micro-Oscillators / I.S. Proskurkin, P.S. Smelov, V.K. Vanag // ChemPhysChem. -2019. Vol. 20 Nº 17 P. 2162–2165.
- 6. Proskurkin, I.S. Experimental verification of an opto-chemical "neurocomputer" / I.S. Proskurkin, P.S. Smelov, V.K. Vanag // Physical Chemistry Chemical Physics. -2020. Vol. 22 No. 34 P. 19359-19367.

Тезисы докладов

- 1. Smelov, P.S. Dynamical Regimes of Four Almost Identical Chemical Oscillators Circularly Coupled Via Pulse Inhibitory Coupling with Time Delay / P.S. Smelov, V.K. Vanag // ENGINEERING OF CHEMICAL COMPLEXITY, 8th International Conference. Garching, Germany. June 22-26, 2015. P. 88.
- 2. Смелов П. С. Динамические режимы четырёх почти одинаковых химических осцилляторов, связанных все-со-всеми импульсной ингибиторной связью с задержкой / П. С. Смелов // Тезисы докладов научной школы «Нелинейные волны 2016». Нижний Новгород, Россия. —24 февраля 4 марта, 2016. С. 134.
- 3. Smelov, P.S. Controllable switching between stable modes in network of four pulse coupled chemical oscillators / P.S. Smelov, I.S. Proskurkin, V.K. Vanag // ENGINEERING OF CHEMICAL COMPLEXITY, 10th International Conference. Potsdam, Germany. June 3-6, 2019. P. 56.