

На правах рукописи



Проскуркин Иван Сергеевич

**ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ НЕЙРОПОДОБНЫХ
СЕТЕЙ ИМПУЛЬСНО СВЯЗАННЫХ ХИМИЧЕСКИХ
ОСЦИЛЛЯТОРОВ И СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА С
АДАПТИВНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ**

01.04.03 – Радиофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Калининград – 2021

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Ванаг Владимир Карлович

Официальные оппоненты: **Москаленко Ольга Игоревна**
доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», профессор кафедры физики открытых систем Института физики

Храмов Александр Евгеньевич

доктор физико-математических наук, профессор,
Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис», руководитель лаборатории нейронауки и когнитивных технологий Центра компетенций НТИ по направлению «Технологии компонентов робототехники и мехатроники»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»

Защита состоится «23» июня 2021 г. в 15:00 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/2021/1102/diss-Proskurkin-1102.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. На протяжении многих лет разработка искусственного интеллекта (ИИ) является одним из главных и наиболее интересных направлений в развитии науки и технологий. На данный момент существует два основных подхода к разработке ИИ, а именно нисходящий (Top-Down) и восходящий (Bottom-Up). Первый подход заключается в создании экспертных систем, базы знаний и систем логического вывода, которые имитируют психические процессы (речь, мышление и эмоции человека). Во втором случае к ИИ подходят с точки зрения нейробиологии, а именно изучения сетей нейронов. Несомненно, что самое оптимальное и эффективное решение для выполнения такой задачи для восходящего подхода лучше позаимствовать у природы. В связи с этим исследование работы мозга играет огромную роль в создании ИИ. Известно, что мозг работает путём передачи информации между огромным количеством нейронов с помощью электрохимических импульсов, активирующих или тормозящих действия других нейронов посредством выделения в синаптические щели соответствующих нейротрансмиттеров. Исходя из этого, первоначально нужно попытаться понять устройство базовых элементов мозга или базовых принципов работы мозга на самом низком уровне, на уровне отдельных нейронов и их связей, а затем, опираясь на их свойства, попытаться построить на нейроподобных элементах сеть, подобную нейронной сети мозга. Мы хотим, используя химические осцилляторы, построить сеть, способную к интеллектуальному поведению, например, адаптации к внешним воздействиям.

В работах по изучению нейронных сетей показано, что нейроны связаны через синапсы с помощью импульсных сигналов, которые действуют через некоторое время после возбуждения тела нейрона. А сети, состоящие из таких нейронов, обычно используют разные возбуждающие и ингибирующие синапсы с соответствующими нейротрансмиттерами, например, глутамат для возбуждения и гамма-аминомасляную кислоту для ингибирования. Поэтому, используя знания о базовых принципах работы нейронов и их сетей, стало возможным применять осцилляторы в качестве нейроподобных элементов и использовать их при построении искусственных нейронных сетей. На данный момент такие сети

широко изучаются как теоретически, так и экспериментально в связи с их важностью для понимания нейронных сетей мозга.

Одним из наиболее удобных вариантов для экспериментальной реализации нейроподобных осцилляторов является использование автокаталитической реакции Белоусова-Жаботинского (БЖ). БЖ реакция представляет собой катализируемое ионами металла (или металло-комплексами) окисление малоновой кислоты броматом в кислой среде. Ключевыми интермедиатами этой реакции являются HBrO_2 , который является активатором, и ион бромиды, который является ингибитором. Для создания ингибиторной связи между химическими БЖ осцилляторами можно использовать ионы бромиды или молекулярный бром, а для создания активаторной связи используют ионы серебра, которые убирают из реакции ингибитор бромид. Таким образом сеть химических осцилляторов с импульсными связями и временной задержкой является удобным объектом для изучения принципов работы нейронных сетей, а также может быть первым кирпичиком для построения сложной архитектуры реального ИИ.

В связи с этим в последние годы ведутся активные исследования по изучению импульсно связанных нейроподобных осцилляторов с использованием временной задержки, а также появляются экспериментальные работы по созданию устройств, умеющих считать, хранить изображения и даже распознавать образы. Такое устройство должно быть относительно простым в реализации, но включать в себя необходимо большое число нейроподобных элементов и связей между ними.

Цели и задачи исследования. Цель диссертационной работы состоит (а) в исследовании динамических режимов нейроподобных сетей импульсно связанных химических осцилляторов, (б) в применении полученных результатов для создания устройства с адаптивным поведением.

В работе выполнены следующие задачи:

- создание установки для контроля двух БЖ макроосцилляторов, связанных импульсными связями с временной задержкой;
- экспериментальное и теоретическое исследование динамических режимов двух разночастотных БЖ

макроосцилляторов, связанных импульсными связями с временной задержкой при следующих видах связи: ингибиторная, активаторная и «инверсная» ингибиторная;

- построение установки для генерации устойчивых гомогенных БЖ микрокапелек заданного размера в микрогидродинамическом чипе;

- создание установки с петлей обратной связи для регистрации состояния и управления ансамблем БЖ макроосцилляторов;

- экспериментальное и теоретическое исследование влияния глобальной отрицательной обратной связи на одномерный массив БЖ макроосцилляторов с ингибиторной диффузионной связью;

- построение и тестирование химического нейроморфного устройства.

Научная новизна.

В работе впервые получены следующие результаты:

1. Для двух БЖ макроосцилляторов, импульсно связанных ингибиторной связью с временной задержкой, была обнаружена биритмичность между противофазным и синфазным режимом для резонанса 1:1. Если начальный временной сдвиг s_0 между двумя ближайшими спайками осцилляторов 1 и 2 меньше, чем временная задержка τ , то мы получаем синфазные колебания, а противофазный режим устанавливается, если $s_0 > \tau$.

2. Для двух БЖ макроосцилляторов, импульсно связанных ингибиторной связью с временной задержкой, обнаружен новый тип фазового перехода для резонанса 1:2 между так называемыми режимами “0.2/0.7” и “0/0.5”.

3. Разработан и апробирован новый тип связи, названный нами «инверсная» ингибиторная связь. Связь осуществляется импульсным отключением постоянного ингибирования и имеет активаторную природу.

4. В работе теоретически и экспериментально для разных видов импульсной связи (активаторная, ингибиторная, «инверсная» ингибиторная) получены диаграммы динамических режимов двух разночастотных связанных БЖ осцилляторов в зависимости от времени задержки импульсной связи. Для всех видов связи получены кривые переустановки фаз (КПФ), позволяющие делать анализ динамических режимов простым и менее трудоемким

способом, чем решение уравнений ОДЕ (обыкновенных дифференциальных уравнений).

5. Обнаружено и исследовано влияние глобальной отрицательной обратной связи (ГООС) на динамику ансамбля одинаковых химических БЖ микроосцилляторов с локальным ингибирующим взаимодействием в “одномерном” капилляре. При увеличении силы обратной связи происходит следующий сценарий изменения динамических мод системы: регулярные (число кластеров 5-6) кластеры → хаотические (= нерегулярные) кластеры → опять регулярные (3-4) кластеры → сложные кластеры → двухфазные кластеры, которые можно назвать локализованными кластерами, так как многие осцилляторы подавляются при большой силе ГООС. Слабая ГООС выравнивает фазы БЖ осцилляторов, создавая тем самым множество кластеров. Эффект сильной ГООС состоит в объединении этих многочисленных небольших кластеров и подавлении БЖ осцилляторов с относительно небольшими собственными частотами. При определенной силе ГООС может быть найдена биритмичность. При этом могут сосуществовать хаотические и регулярные колебательные кластеры. Появление того или иного вида кластеров зависит от начальных условий. Предположительно, колебательные системы с такой биритмичностью могут демонстрировать динамический режим химеры.

6. На основе полученных результатов построено экспериментальное устройство, представляющее собой иерархическую сеть импульсно связанных БЖ микроосцилляторов с адаптивным поведением.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Результаты исследований динамических режимов двух разночастотных импульсно связанных БЖ осцилляторов расширяют область знаний в теории нелинейных систем. Обнаруженная биритмичность между противофазным и синфазным режимами для резонанса 1:1 и новый тип фазового перехода для резонанса 1:2 для ингибиторной связи могут быть использованы в качестве инструментов для управления динамическими режимами малых сетей связанных осцилляторов.

Новая разработанная нами «инверсная» ингибиторная связь позволяет осуществлять связь активаторного типа для

светочувствительных БЖ микроосцилляторов. Это открывает новые возможности для конструирования нейроподобной вычислительной системы, основанной на использовании химических микроосцилляторов.

Обнаруженное влияние ГООС на динамические режимы локально связанных БЖ микроосцилляторов дает нам инструмент по управлению ансамблем микроосцилляторов. Например, мы можем при помощи ГООС влиять на размер, стабильность и количество кластеров в ансамбле микроосцилляторов, а также при определенных условиях на появление хаотического режима колебаний. ГООС способна влиять на синхронизацию частоты осцилляторов и подавлять осцилляторы с относительно небольшими собственными частотами. Опираясь на полученные результаты, можно использовать ГООС в качестве механизма для запоминания начального состояния системы.

Экспериментально реализованное химическое нейроморфное устройство, выполняющее задачу адаптивного поведения, является значимым шагом в создании искусственного интеллекта, работающего на реальных нейроподобных сетях. В дальнейшем предполагается создание более сложного устройства, осуществляющего задачу самостоятельного принятия решений.

Методология и методы исследования. Для экспериментального исследования динамических режимов нейроподобных сетей осцилляторов используется хорошо изученная БЖ реакция. Уравнения для моделирования двух импульсно связанных разночастотных БЖ осцилляторов с временной задержкой основаны на детальном механизме Филда – Кёрёша – Нойеса, для моделирования ансамбля локально связанных микроосцилляторов применялась модель Ванага-Эпстина. Вычисления производились с помощью программы FlexPDE. Экспериментальная установка для двух связанных химических осцилляторов построена с использованием проточных реакторов с постоянным перемешиванием (ПРПП). Импульсная связь осуществлялась посредством перистальтических насосов через трубочки, по которым в реактор поступал активатор или ингибитор. При исследовании влияния ГООС микрореакторами служили капли размером около 125 мкм в масляной фазе, наполненные БЖ раствором и приготовленные с помощью

микрогидродинамического оборудования фирмы Dolomite. ГООС реализована через свет с использованием светочувствительного комплекса $\text{Ru}(\text{bpy})_3$ в качестве катализатора БЖ реакции. Микрореакторами для химического нейроморфного устройства служили наполненные реагентами БЖ реакции и зажатые между двумя стеклышками тонко нарезанные кусочки резиновой трубочки с внутренним диаметром 0.25 мм. В экспериментах управление связью осуществлялось через АЦП и компьютерный проектор с помощью компьютерных программ, разработанных автором в среде LabView 2012.

Положения, выносимые на защиту:

1. Применение импульсной связи для двух разночастотных осцилляторов приводит к появлению множества резонансных режимов, таких как 1:1, 2:3, 1:2, 2:5, 1:3 и 1:4.

2. Для двух разночастотных БЖ осцилляторов, связанных импульсной ингибиторной связью с временной задержкой, обнаружен фазовый переход для резонанса 1:2 между так называемыми режимами “0.2/0.7” и “0/0.5”. Переход можно контролировать временной задержкой, а также силой связи. Переход сопровождается резким изменением периода колебаний.

3. Обнаружено, что начальные условия, определяемые как сдвиг фаз, влияют на динамические режимы двух БЖ осцилляторов, связанных импульсной ингибиторной связью с временной задержкой. Это влияние обусловлено существованием биритмичности между противофазным и синфазным режимами при резонансе 1:1 для определенного диапазона времён задержки.

4. Найден новый тип импульсной активаторной связи, основанный на кратковременном (импульсном) отключении постоянного внешнего ингибирования БЖ реакции, осуществляемого, например, светом. Такое «инверсное» ингибирование возбуждает систему и связь становится активаторной по природе своего действия, если это «инверсное» ингибирование вызвано спайком в другом осцилляторе.

5. Показано, что ГООС может контролировать динамику локально связанных БЖ микроосцилляторов, расположенных в 1D капилляре. При увеличении силы обратной связи обнаруживается следующая последовательность паттернов: лестничные, многофазные регулярные колебательные кластеры с пятью-шестью

(или даже более) кластерами, затем хаотические колебательные кластеры, затем регулярные четырех- или трехфазные колебательные кластеры, затем сложные колебательные кластеры (в которых разные кластеры имеют кратные периоды), затем малые двухфазные кластеры, где термин «малые» означает, что многие осцилляторы полностью подавляются при большой силе ГООС, и количество оставшихся осцилляторов, находящихся в колебательном состоянии, мало по сравнению с общим числом осцилляторов, и, наконец, однофазные колебательные кластеры, которые обнаруживаются только в моделировании при очень большой силе обратной связи.

6. С помощью сети импульсно связанных БЖ микроосцилляторов экспериментально реализовано химическое нейроморфное устройство, выполняющее задачу адаптивного поведения.

Степень достоверности и апробация результатов. По материалам диссертации опубликовано 11 научных работ: из них 4 работы - это тезисы докладов на международных конференциях; а остальные 7 работ – это статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России и науки РФ, а также индексируемых базами данных научной периодики Scopus и Web of Science. В процессе работы над диссертацией было получено свидетельство № 2018611678 о гос. регистрации программы ЭВМ «Управление ингибиторной связью между четырьмя БЖ-осцилляторами».

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на семинарах Центра Нелинейной Химии, а также на международных конференциях: «XXXIV Dynamics Days Europe», Университет Байрота, Германия, 2014 г.; «Нелинейные волны – 2016», Нижний Новгород, Россия; «Gordon Research Conference», Вентура, США, 2017 г.; «10th International Conference "Engineering of Chemical Complexity"», Потсдам, Германия, 2019 г.

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

Все эксперименты и теоретические построения проводились лично диссертантом или с его непосредственным участием. Это

отражается в том, что в 9 из 11 публикаций диссертант является первым из соавторов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, содержащих литературный обзор, описание методов, результаты работы и выводы, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка цитируемой литературы и приложений. Диссертация изложена на 117 страницах и содержит 52 рисунка и 2 таблицы. Библиография содержит 180 литературных ссылок.

Краткое содержание работы.

В главе 1 изложены имеющиеся в литературе экспериментальные и теоретические исследования БЖ реакции, а также систем связанных химических осцилляторов, основанных на этой реакции. В главах 2-3 представлены результаты наших экспериментальных и теоретических исследований для ингибиторной, активаторной и «инверсной» ингибиторной импульсной связи двух разночастотных химических осцилляторов с временной задержкой. В главе 4 содержатся результаты экспериментальных и теоретических исследований по влиянию ГООС на динамику ингибиторно связанных химических осцилляторов в одномерном массиве. В главе 5 показано построение и тестирование химического нейроморфного устройства с адаптивным поведением. В Приложении А представлены все переключения между режимами для химического нейроморфного устройства, а также таблица с фазами для этих переключений. В Приложении Б разобрана динамика переключения $IP \rightarrow AP$ химического нейроморфного устройства с электронными блоками P и P_A.

Глава 1. Литературный обзор

Автоколебания в химических системах в жидкой фазе были впервые обнаружены в 1951 г. Б. П. Белоусовым (результаты опубликованы в 1959 г.). Он обнаружил, что окисление лимонной кислоты броматом, катализируемое ионами церия, протекает периодически во времени. Жаботинский провёл подробные исследования реакции, включая её различные варианты, а также составил её первую математическую модель (1964). Механизм реакции был предложен Филдом, Кёррешем и Нойесом в 1972 г.

(ФКН механизм). Объединение механизма ФКН с идеями Брюсселятора привело к созданию упрощённой трёхкомпонентной вычислительной модели БЖ реакции, Орегонатора. В 2009 г. была опубликована модель Ванага-Эпстина (VE) для эмульсионных систем, также основанная на ФКН механизме и дополнительно включающая разделение скоростей диффузии между активатором и ингибитором. В диссертации для моделирования использованы уравнения, основанные на ФКН механизме, а также VE модель. БЖ реакция являлась отличной реакцией для экспериментальной проверки теоретических исследований поведения динамических систем, в том числе и связанных осцилляторов. В 1975 г. группой Марека экспериментально впервые была изучена синхронизация двух связанных БЖ осцилляторов. За этим последовали наблюдения хаоса в БЖ реакторах, в 1983 году было изучено фотоингибирование БЖ. В 1989 г. в работе по изучению связанных через массообмен почти идентичных БЖ осцилляторов были получены такие режимы синхронизации, как синфаза, противофаза и «фазовая смерть» (прекращение колебаний и переход в стационарное состояние), а катализатор был идентифицирован как главный элемент реакции, влияющий на силу связи. В 2000 году впервые были обнаружены колебательные кластеры в гомогенной БЖ среде с применением ГООС. В нашей же работе изучено влияние ГООС на массив БЖ микроосцилляторов. В 2012 г. в результате теоретического и экспериментального исследования импульсно связанных БЖ осцилляторов было получено новое необычное поведение системы, такое как синфазная синхронизация для ингибиторной связи, быстрые противофазные (FAP) колебания и бёрстинг для активаторной связи, а также различные резонансы (например, 4:5, 1:2, 1:3) для активаторной и ингибиторной связи.

Также в литературном обзоре были описаны экспериментальные реализации вычислительных устройств, использующих БЖ реакцию. В 1995 г. группой Шоуолтера (Showalter) были проведены экспериментальные исследования распространения волн в сложных лабиринтах с применением возбудимой БЖ реакции. В 2001 группой Рамбиди в России также проводились эксперименты по поиску кратчайших путей в лабиринте при использовании БЖ реакции. Группой Адамацкого изучалась возможность построения гибкой вычислительной

структуры, представляющей собой основанный на столкновении химических волн компьютер. Ученые показали, что возможно построить булевый реакционно-диффузионный процессор на реальной химической среде. В 2004 году группа Адамацкого опубликовала работу с первым в истории бортовым химическим контроллером для навигации мобильных роботов с помощью стимулов. Учеными из университета Брендаяза исследовалась возможность применения БЖ реакции для создания «химического нейрона», который можно использовать для построения процессора на основе булевой или неявной логики.

Глава 2. Ингибиторная и активаторная импульсная связь двух разночастотных химических осцилляторов с временной задержкой

Были изучены динамические режимы двух разночастотных импульсно связанных БЖ осцилляторов с временной задержкой как экспериментально, так и теоретически с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений и КДФ для ингибиторной и активаторной связей [1, 2]. Разработана довольно простая химическая система из двух БЖ осцилляторов, связанных с помощью коротких импульсов (ввода ингибитора/активатора) в одном осцилляторе через τ секунд после того, как произошел спайк в другом осцилляторе, при этом силу связи, задержку по времени и периоды осцилляторов можно легко регулировать.

Для ингибиторной и активаторной связей были построены теоретические и экспериментальные диаграммы резонансных режимов в плоскости T_2/T_1 (соотношение собственных периодов осцилляторов #2 и #1) и временной задержки τ , имеющие довольно хорошее соответствие. Найдено множество резонансных режимов, таких как 1:1, 2:3, 1:2, 2:5, 1:3 и 1:4. Для ингибиторной связи мы обнаружили фазовый переход для резонанса 1:2 между так называемыми режимами “0.2/0.7” и “0/0.5” (Рис. 1).

Кроме того, мы обнаружили бифазность при использовании ингибиторной связи: сосуществование синфазных и противофазных колебаний при одинаковых параметрах системы (резонанс 1:1). Если начальный временной сдвиг s_0 между двумя ближайшими спайками осцилляторов 1 и 2 меньше, чем временная задержка τ , то мы получаем синфазные колебания, а режим AP

устанавливается, если $s_0 > \tau$. Для довольно сильной активаторной связи также была обнаружена биритмичность между резонансом 1:2 и резонансом 1:1 в определенных диапазонах временной задержки.

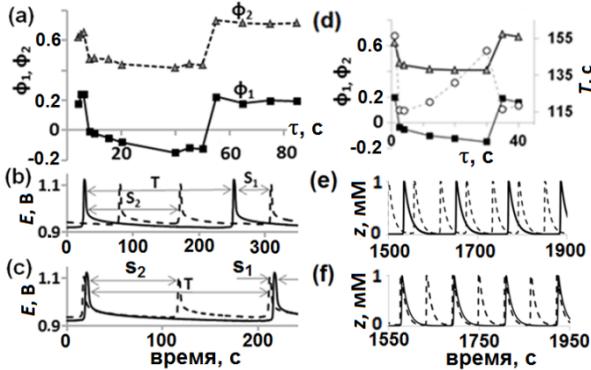


Рис. 1 – Два режима для 1:2 резонанса в эксперименте (a) – (c) и моделировании (d) – (f). Панели (a) и (d), зависимости от фазовых сдвигов $\phi_1 (=s_1/T)$, $\phi_2 (=s_2/T)$, и зависимость совокупного периода T [белые круги (d), вертикальная ось справа] от τ . Панели (b), (c), (e), и (f), кинетические кривые для двух разных режимов резонанса. Параметры: (a) – (c), $C_{inh} = 2 \times 10^{-5}$ М/с, $T_2/T_1 = 0.6$, $T_2 = 90$ с (T_2/T_1 – периоды до включения связи); (b) режим “0.2/0.7” с $\phi_1 = 0.24$ и $\phi_2 = 0.66$ при $\tau = 6$ с; (c) режим “0/0.5” с $\phi_1 = 0$ и $\phi_2 = 0.48$ при $\tau = 8$ с. (d) – (f) $C_{inh} = 5 \times 10^{-5}$ М/с, $h_2 = 0.45$ М и $T_2/T_1 = 0.54$, $\tau =$ (e) 35 с, (f) 3 с

Получены как экспериментально, так и теоретически КПФ для ингибиторного и активаторного импульсного возмущения (Рис. 2). Для исследования КПФ в эксперименте и моделировании мы организовали обратную связь с задержкой таким образом, чтобы возмущение осциллятора происходило через τ секунд после его спайка. С помощью КПФ объяснены различные режимы импульсно связанных осцилляторов для случая резонанса 1:1. Возможно применение КПФ и к различным $n:m$ резонансам. Анализ динамических режимов сети осцилляторов с импульсными связями при использовании КПФ является простым и значительно менее трудоемким, чем решение уравнений ОДУ. Поэтому этот метод

может быть использован в будущем для анализа большого числа осцилляторов с импульсной связью.

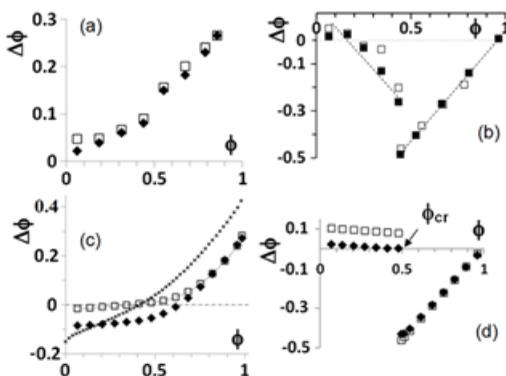


Рис. 2 – (а) – (d) КПФ для БЖ осциллятора, наблюдаемая в эксперименте, (а) и (b), и в моделировании, (с) и (d) (КПФ представлена зависимостью фазового сдвига $\Delta\phi$ относительно фазы возмущения ϕ). (а), (с) ингибиторное возмущение; (b), (d) активаторное возмущение. Параметры силы связи: (а) $C_{inh} = 4.54 \times 10^{-6}$ М/с; (b) $C_{act} = 5.39 \times 10^{-6}$ М/с; (с) $C_{inh} = 1 \times 10^{-5}$ М/с (ромбы и квадраты) и $C_{inh} = 1 \times 10^{-4}$ М/с (крестики); (d) $C_{act} = 1 \times 10^{-5}$ М/с; ϕ_{cr} является критической фазой, при которой КПФ имеет разрыв. Концентрации и параметры: $[H_2SO_4]/M =$ (а) 0.2, (b) 0.125, $T_0/c =$ (а) 81, (b) 151; (с) и (d), $h = 0.3$ М, $T_0 = 146$ с (T_0 – собственный период). Черные ромбы означают $\Delta\phi = \Delta\phi^{(1)} = (T^{(1)} - T_0)/T_0$; белые квадраты – $(T_N - T_0)/T_0$, где $T^{(1)}$ первый период после импульсного возмущения и $T_N = T^{(n)}$ при $n = 10$.

Глава 3. «Инверсная» ингибиторная связь

В связи с тем, что для построения химического нейроморфного устройства мы предполагали использование большого числа микрореакторов с управляемыми светом связями (процесс фотоингибирования), то возникла задача придумать способ установления импульсной активаторной связи, используя всё то же фотоингибирование. Поэтому данная глава посвящена использованию ингибиторного сигнала для установления

импульсной связи активаторного типа между двумя разночастотными БЖ макроосцилляторами [3]. В экспериментах в качестве ингибирующего вещества мы используем бромид, раствор которого постоянно вводится в два реактора таким образом, что колебания не подавляются, а находятся в устойчивом колебательном состоянии. Если БЖ спайк происходит в одном реакторе, то компьютер прерывает введение раствора бромида в другой реактор после временной задержки τ в течение короткого периода времени Δt . Мы называем такой тип связи – «инверсная» связь.

Для нашей «инверсной» ингибиторной связи мы построили экспериментальную и теоретическую КПФ (Рис. 3а и б). Можно заметить, что КПФ для «инверсного» ингибиторного возмущения очень похожа на КПФ для активаторного импульсного возмущения (Рис. 3с), за исключением довольно узкого диапазона ϕ ($= \tau/T$), где обнаруживается ингибирующая природа инверсного импульса.

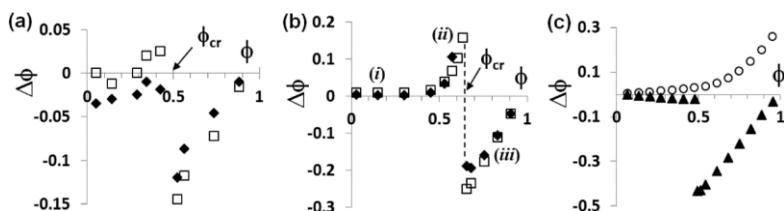


Рис. 3 – (а) Экспериментальная КПФ для БЖ осциллятора с «инверсным» ингибиторным импульсным возмущением; Параметры: $[\text{BrO}_3^-] = 0.25 \text{ M}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 0.35 \text{ M}$, $[\text{MA}] = 0.2 \text{ M}$, $[\text{ferroin}] = 1 \text{ mM}$, $k_0 = 4.23 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, $k_B = 5.87 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, $[\text{Br}^-]_s = 5.0 \times 10^{-3} \text{ M}$, ($T_0 = 68 \text{ c}$), $\Delta t = 10 \text{ c}$. (б) Теоретическая КПФ полученная при параметрах: $A = 0.3 \text{ M}$, $h_1 = 0.5 \text{ M}$, $[\text{MA}] = 0.2 \text{ M}$, $c_0 = 1 \text{ mM}$, $k_0 = 5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, $k_B = 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, $y_s = 3 \times 10^{-2} \text{ M}$; $T_0 = 66 \text{ s}$; $\Delta t = 5 \text{ s}$. Черные ромбы означают $\Delta\phi = \Delta\phi^{(1)} = (T^{(1)} - T_0)/T_0$; белые квадраты $(T_N - T_0)/T_0$ в (а) и $(T_{\text{end}} - T_0)/T_0$ в (б), где $T^{(1)}$ первый период после импульсного возмущения и $T_N = T^{(n)}$ при $n = 10$; $T_{\text{end}} = T^{(n)}$ при $n \rightarrow \infty$; области (i), (ii), и (iii) объяснены в тексте. (с) Теоретические ингибиторная (белые кружки) и активаторная (черные треугольники) КПФ.

Для теоретической КПФ (см. Рис. 3b) области (i) и (iii) аналогичны экспериментально полученной зависимости, а область (ii) соответствует области большого увеличения T . Такие отклонения наблюдались ранее в экспериментах с БЖ реакцией, помещенной в водные микрокапельки, отделенные в капилляре масляными зазорами, а также в соответствующем моделировании (Vanag V.K., Epstein I.R. Phys. Rev. E 2011. Vol. 84. P. 066209). Значительное увеличение T приводит к переходу осциллятора из одного кластера в другой кластер синфазно осциллирующих микроосцилляторов, что напоминает переходы между устойчивыми предельными циклами.

Для дополнительной проверки схожести «инверсной» ингибиторной и активаторной связи мы проанализировали резонанс 1:1 при различных задержках времени. На Рис. 4 продемонстрированы наши экспериментальные данные как для слабой активаторной связи (белые ромбы), так и для «инверсной» ингибиторной связи (черные квадраты).

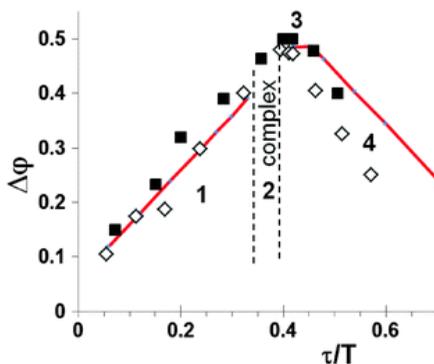


Рис. 4 – Экспериментальные зависимости $\Delta\phi$ от τ/T для резонанса 1:1 для импульсной активаторной (белые ромбы) и «инверсной» ингибиторной связи (черные квадраты). Параметры: $[\text{NaBrO}_3] = 0.25$ М, $[\text{MA}] = 0.1$ М, $[\text{ferroin}] = 1$ мМ, $k_0 = 0.000423$ с⁻¹, $\Delta t = 5$ с. Для активаторной связи (via Ag^+): $[\text{H}_2\text{SO}_4]_1 = 0.125$ М ($T_2 \cong 179$ с), $T_2/T_1 = 0.97$, $C_{\text{act}} = k_B [\text{AgNO}_3]_{\text{stock}} = 2.9 \times 10^{-6}$ М с⁻¹ Для инверсной

ингибиторной связи: $[H_2SO_4]_1 = 0.2 \text{ M}$, $[H_2SO_4]_2 = 0.21 \text{ M}$, $[Br^-]_{1s} = [Br^-]_{2s} = 0.005 \text{ M}$, $k_B = 6.46 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ ($T_2 \cong 155 \text{ c}$), $T_2/T_1 = 0.91$. Жирной красной наклонной линией отмечена теоретическая зависимость фазового сдвига ϕ от τ/T для резонанса 1:1 для инверсной импульсной ингибиторной связи. Параметры: $h_1 = 0.3 \text{ M}$ ($T_1 = 177 \text{ c}$), $h_2 = 0.31 \text{ M}$ ($T_2 = 167 \text{ c}$), $T_2/T_1 = 0.943$, $A = 0.25 \text{ M}$, $[MA] = 0.1 \text{ M}$, $c_0 = 1 \text{ mM}$, $k_0 = 5 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, $k_B = 7 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, $y_{s1} = y_{s2} = 5 \text{ mM}$, $\Delta t = 5 \text{ c}$

Как видно, обе зависимости $\Delta\phi$ от фазы ϕ ($=\tau/T$) очень похожи друг на друга: при малых τ сдвиг фазы $\Delta\phi$ растет линейно с τ/T , достигает значения 0.5 (противофазное колебание), а затем уменьшается. Этот результат подтверждает гипотезу о том, что «инверсные» ингибиторные импульсы приводят к активаторной связи.

Данный тип связи имеет один недостаток: мы не можем увеличить (по крайней мере в широком диапазоне) силу связи, если это необходимо. В результате, если мы имеем довольно слабую связь, то мы не можем найти режим бёрстинга, в то время как обычные колебания 1:1, 2:3, 1:2, 1:3 и 1:4 обнаруживаются.

В результате исследования мы показали, что «инверсная» связь может быть применена для установления связи активаторного типа в сети БЖ микроосцилляторов, которые можно использовать для разработки химического компьютера.

Глава 4. Глобальная отрицательная обратная связь в одномерном ансамбле ингибиторно связанных химических осцилляторов

В данной главе представлено экспериментальное и теоретическое исследование одномерной системы связанных БЖ МК, взаимодействующих локально через ингибиторную диффузионную связь и глобально через ГООС [4]. В эксперименте ансамблем осцилляторов служат 15 монодисперсных водных БЖ микрокапелек размером 125 мкм, разделенные масляной фазой и плотно располагающиеся одна за другой в тонком капилляре с внутренним диаметром 125 мкм. Гидрофобный интермедиат БЖ реакции Br_2 диффундирует между водными МК в масляной фазе и

создает локальную ингибиторную связь. Экспериментально ГООС была организована с помощью фотоингибирования. Интенсивность I актиничного света выражается как

$$I = g_e k N_{ex} / N, \quad (1)$$

где g_e - безразмерный коэффициент ГООС, субиндекс «е» означает, что коэффициент g_e используется в экспериментах. Коэффициент k выбирается таким образом, чтобы максимальная интенсивность I_{max} достигалась при $g_e N_{ex} / N = 1$, где $N = 15$, N - количество БЖ капель, используемых во всех экспериментах.

Для моделирования колебаний в БЖ каплях, мы исследуем следующую базовую модель №1 Ванага-Эпстина (VE) с 4 переменными:

$$dx_i/dt = X(x_i, y_i, z_i) \quad (2)$$

$$dy_i/dt = Y(x_i, y_i, z_i, u_i) + g(c_0 - z_i)z_{av}, \quad (3)$$

$$dz_i/dt = Z(x_i, z_i) + g(c_0 - z_i)z_{av}, \quad (4)$$

$$du_i/dt = U(x_i, y_i, u_i) + k(u_{i-1} - 2u_i + u_{i+1}), \quad (5)$$

где $z_{av} = \sum_{i=1}^N (z_i) / N$; $N = 15$; $i = 1, 2, \dots, 15$; для $i = 1$, $u_{i-1} = 0$ и для $i = 15$, $u_{i+1} = 0$; g это коэффициент ГООС, размерность g $M^{-1} c^{-1}$; $x = [HBrO_2]$, $y = [Br]$, $z = [\text{окисленная форма катализатора}]$, $u = [Br_2]$ (маслорастворимый компонент), $[восстановленная форма катализатора] = red$, $red + z = c_0$. Член $g(c_0 - z_i)z_{av}$ в ур. (3) и (4) представляет ГООС. Чтобы проверить влияние модели №1 на общий результат, мы также используем дополненную модель №2, в которой добавлена 5-я переменная $v (= [BrMA])$ и одна константа заменена на переменную зависящую от v . Также в моделировании введен небольшой аналогичный экспериментальному разброс частот осцилляторов.

Экспериментально и теоретически получены пространственно-временные графики одномерного массива БЖ капель при различных значениях коэффициента ГООС. Суммирование всех полученных результатов показано на Рис. 5. Переход от лестничных S^* -паттернов к R(5-6) колебательным кластерам указывает на то, что ГООС создает кластеры. Затем мы видим переход к хаотическим кластерам при большем g_e ($g_e \cong 0.55$) и затем возврат к регулярным колебательным кластерам [R(3-4)] (при $g_e \cong 1$). Можно предположить, что причиной появления

хаотических кластеров между регулярными кластерами R(5-6) и R(3-4) является конкуренция между локальной ингибирующей связью и ГООС. Левее хаотической области доминирует локальная ингибирующая связь. Правее хаотической областью ГООС преодолевает «отталкивающий» эффект локальной связи.

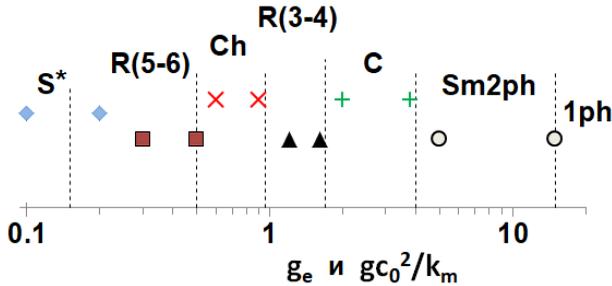


Рис. 5 – Зависимость структуры 1D кластеров от коэффициента ГООС при $k_f = 0.1 \text{ с}^{-1}$. Вертикальные пунктирные линии обозначают границы между различными типами паттернов, найденных при моделировании: лестничные (S^* /ромбы); многофазные регулярные кластеры [R(5-6)/квадраты]; хаотические кластеры (Ch/крестики); трех- или четырехфазные регулярные кластеры [R(3-4)/треугольники]; сложные кластеры (C/плюсы); малые двухфазные кластеры (Sm2ph/кольца) и однофазные малые кластеры (1ph). Коэффициент c_0^2/k_m выбран равным 0.4

Переход от регулярных кластеров к сложным кластерам (при $g_e \cong 1.8$), когда разные БЖ-капли имеют разные (но кратные) периоды, происходит из-за небольших (2-3%) различий в собственных периодах осцилляторов. Аналогичный переход от регулярных к сложным колебательным кластерам при увеличении силы связи наблюдается в сети «все со всеми» импульсно связанных БЖ осцилляторов (Vanag V.K., Smelov P.S., Klinshov V. V. Phys. Chem. Chem. Phys. 2016. Vol. 18, № 7. P. 5509–5520).

Довольно сильная ГООС (когда $g_e > 4$) приводит к простым малым двухфазным (Sm2ph) и однофазным (1ph) колебательным кластерам. В этих кластерах осциллируют только «быстрые» осцилляторы с большими частотами (в пределах 2-3% от средней

частоты). Все «медленные» осцилляторы подавлены. Точно такой же эффект наблюдается в случае практически всех идентичных осцилляторов с импульсной связью при большой силе связи (Vanag V.K., Yasuk V.O. Chaos. 2018. Vol. 28. P. 033105). В диапазоне величин g , соответствующем двухфазным кластерам, и при небольшой частотной дисперсии начальные пространственные условия могут быть «заморожены» (или запомнены) в виде паттерна с противофазными кластерами. Можно также полагать, что в области четырехфазных кластеров можно запомнить более сложное четырехфазное начальное условие, например, такое же как в эксперименте на Рис. 6.

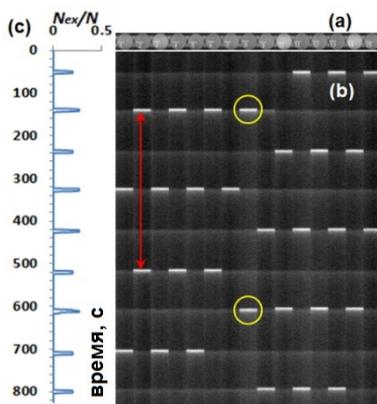


Рис. 6 – Пример четырехфазного кластера. (b) Пространственно-временной график для одномерного массива БЖ МК (a) с коэффициентом ГООС $g_e = 1.25$. (c) Соответствующая зависимость числа возбужденных капель (измеряется как N_{ex}/N , где $N = 15$) от времени. Общий размер пространственно-временного графика (b) равен (125×15) мкм \times 846 с. Красная вертикальная стрелка отмечает средний период T кластеров; $T = 374$ с.

Различные колебательные структуры могут быть реализованы при одном и том же коэффициенте g в зависимости от начальных условий, особенно вблизи границ между различными динамическими паттернами. Этот эффект известен как

биритмичность. Хаотическое поведение и регулярные колебательные кластеры также могут сосуществовать. Предположительно, колебательные системы с такой биритмичностью могут демонстрировать динамический режим химеры, когда одна часть осцилляторов является фазово-когерентной, а остальные осцилляторы фазово-некогерентными. Поскольку окончательный паттерн (при $g_e > 1$) зависит от комбинации начальных условий и пространственного частотного распределения, число различных паттернов может быть чрезвычайно большим. Также следует отметить, что отсутствие диффузии для крайних МК, фиксированные значения или периодичность в одномерном капилляре, также влияют на окончательный паттерн, если число БЖ капель не очень велико. Например, число капель $N = 15$ недостаточно велико, чтобы быть уверенными в том, что конечные паттерны (или, точнее, границы между различными паттернами кластеров) не зависят от N .

Сравним результаты, обнаруженные для нашей дискретной системы БЖ МК, с результатами исследований, полученными ранее для непрерывной системы с возбуждающей локальной связью и ГООС (Vanag V.K. et al. Nature. 2000. Vol. 406. P. 389–391). Для непрерывной системы были обнаружены три основных типа поведения при увеличении коэффициента g ГООС: бегущие волны, колебательные кластеры и объемные колебания малой амплитуды или, другими словами, синфазные однородные колебания. Наши лестничные паттерны при малых или нулевых g подобны бегущим волнам. Наши $1ph$ колебательные кластеры при очень больших g соответствуют объемным (но локализованным) колебаниям.

В диапазоне g , соответствующем колебательным кластерам, имеется много бифуркаций типа кластер-кластер, которые отличаются от бифуркации, обнаруженной при локальной возбуждающей связи. Для локальной возбуждающей связи при растущем g был обнаружен следующий каскад бифуркаций: стоячие двухфазные кластеры, трехфазные кластеры, нерегулярные кластеры, локализованные нерегулярные кластеры и локализованные кластеры. В нашем случае локального ингибирующего взаимодействия существует другой сценарий: R (5-6) кластеры \rightarrow хаотические (= нерегулярные) кластеры \rightarrow R (3-4) \rightarrow сложные кластеры \rightarrow двухфазные кластеры, которые можно назвать

локализованными кластерами, так как многие капли подавляются. В целом можно сказать, что число фаз в кластерах увеличивается при возбуждающей связи и уменьшается при ингибирующей локальной связи.

Глава 5. Построение и тестирование химического нейроморфного устройства с адаптивным поведением

Экспериментально реализована исследованная ранее теоретически иерархическая сеть импульсно связанных химических осцилляторов с адаптивным поведением (Vanag V.K. Chaos. 2019. Vol. 29. P. 083104). Далее в нашей работе мы называем такую сеть нейроморфным устройством или НУ [5].

Блок-схема нашего НУ показана на Рис. 7. НУ представлено сетью химических микроосцилляторов, находящихся в возбуждимом или колебательном состояниях. Микроосцилляторы связаны между собой либо ингибирующими, либо возбуждающими импульсами с временными задержками. Такие связи похожи на связи в мозге, если принять во внимание только синапсы, без щелевых контактов. Химические осцилляторы в НУ сгруппированы в пять блоков: ЦГР (центральный генератор ритмов), Р (ридер для ЦГР), А (антенна), P_А (ридер для А-блока) и ПР (блок переключения ритмов).



Рис. 7 – Блок-схема химического нейроморфного устройства, проявляющего адаптивное поведение. S – внешние сигналы. Обозначения блоков даны в тексте. Стрелками отмечены направления передачи информации

Чтобы реагировать на внешние сигналы S, НУ должно иметь приемный блок, который мы называем антенной (А). Одинаковые ячейки этого блока находятся в возбуждимом устойчивом состоянии. А-блок имеет несколько аттракторов (= стабильные динамические моды), которые возникают в ответ на внешние сигналы S. Независимо от ритмов, появляющихся в А-блоке, НУ имеет свои

собственные динамические ритмы, которые генерируются блоком ЦГР. P и P_A – это считывающие устройства для распознавания ритмов ЦГР и А-блока, соответственно. Роль блока ПР состоит в том, чтобы сравнивать текущие ритмы блоков ЦГР и А и, если они различаются, переключать текущий ритм ЦГР в ритм, аналогичный ритму блока А. Импульсы переключения от блока ПР к ЦГР представлены на Рис. 7 синей стрелкой. Другая синяя стрелка от ПР к А-модулю отображает импульсы, которые возвращают А-модуль из колебательного режима в его исходное стационарное состояние после осуществления соответствующего перехода. Поскольку мода А-блока вызывается внешними сигналами, процесс переключения ритмов ЦГР фактически является адаптацией НУ к внешним условиям. Поэтому наше НУ – это сеть с адаптивным поведением.

При создании схемы НУ мы опирались на наши предыдущие работы по исследованию малых сетей импульсно связанных химических осцилляторов. Экспериментально были протестированы переходы между основными модами блока ЦГР с использованием внешних импульсов [6]. Также был реализован блок ЦГР, состоящий из микроосцилляторов и протестирована работа электронного ридера P , который должен дифференцировать и определять различные ритмы ЦГР [7].

Мы поэтапно продемонстрировали построение и тестирование блоков НУ. Первым был реализован А-блок, состоящий из четырех идентичных возбудимых микроосцилляторов с однонаправленной «инверсной» ингибиторной связью активаторного типа [3], разработанной и описанной нами ранее в главе 3. При соответствующих внешних сигналах S были получены четыре основных динамических ритма: W (шаг, где фазовый сдвиг между спайками соседних осцилляторов равняется четверти глобального периода T), WR (обратный шаг, такой же, как и W , но последовательность спайков обратна направлению связи), AP (противофазный) и IP (синфазный).

Вторым этапом являлась реализация блока P_A в связке с А-блоком. P_A состоит из четырех возбудимых ячеек. Связи настроены таким образом, что каждая ячейка ридера срабатывает при получении двух одновременных импульсов от двух соседних ячеек антенны. Причем первый импульс приходит на все ячейки ридера сразу после спайка А-ячейки, а второй импульс приходит после

спайка соседней А-ячейки на каждую ячейку ридера с различной временной задержкой, равной разности фаз $\Delta\varphi = 0, 0.25, 0.5$ и 0.75 соответствующих разности фаз этих 2-х соседних А-ячеек для одного из ритмов. Проведенные тесты блока P_A с А-блоком показали отличный результат. Все 4 ритма определялись соответствующими этим ритмам ячейками ридера P_A .

Блок Р распознает ритмы блока ЦГР точно так же, как блок P_A распознает ритмы блока А. Тот факт, что ячейки ЦГР находятся в колебательном состоянии и связаны с помощью ингибиторных импульсов, не влияет на процесс распознавания.

Блок ПР так же, как и ридеры состоит из возбудимых ячеек, и каждая из них получает два импульса от двух ячеек разных ридеров. Срабатывание ПР ячеек настроено на одновременное определение выбранных ритмов ЦГР и А-блока. В случае одновременного определения разных ритмов возбужденная ячейка отправляет переключающие ингибиторные импульсы с определенными задержками на ячейки блока ЦГР, чтобы переключить его в такой же ритм, как у блока А. В случае же одновременного определения одинаковых ритмов возбужденная ячейка отправляет ингибиторные импульсы на все ячейки блока А, чтобы перевести их снова в возбудимое состояние, и блок А был бы готов к новым внешним сигналам S.

Для упрощения эксперимента третьим этапом было исследование гибридной схемы НУ. Мы использовали четыре БЖ ячейки для блока ЦГР, четыре других БЖ ячейки для блока А и электронные блоки Р, P_A и ПР. Ячейки этих электронных блоков работают как логические элементы «И». Для этой схемы были успешно реализованы все возможные переключения между ритмами: $IP \rightarrow AP$, $IP \rightarrow W$, $IP \rightarrow WR$, $AP \rightarrow IP$, $AP \rightarrow W$, $AP \rightarrow WR$, $W \rightarrow IP$, $W \rightarrow AP$, $WR \rightarrow IP$ и $WR \rightarrow AP$.

Заключительным этапом работы по реализации химического нейроморфного устройства являлось построение всех его блоков только на реальных химических осцилляторах. Для такой схемы был продемонстрирован эксперимент по адаптации к внешнему сигналу S, ассоциированный антенной с AP ритмом. Блок ЦГР изначально находился в ритме IP, и был переключен в ритм AP, соответствующий ритму антенны. Таким образом в нашей схеме автономно произошел процесс адаптации к внешнему сигналу. Для

реализации данной схемы понадобилось 13 одинаковых БЖ микроячеек. Очевидно, что можно усовершенствовать конструкцию данного НУ и сделать импульсную связь также полностью химической. Световые импульсы можно заменить химическими БЖ волнами, которые распространяются вдоль узких каналов, соединяющих БЖ микрореакторы. Их длины будут определять временные задержки. Чтобы сделать НУ «мыслящим» устройством, нужно научить его выбирать между различными способами решения поставленной задачи. Чтобы увеличить скорость НУ, нужно найти химические микроосцилляторы, которые быстрее, чем БЖ реакция. Также стоит отметить, что это НУ может быть намного более сложным и выполнять более сложные операции из-за увеличения количества БЖ ячеек. Увеличение числа нейроподобных осцилляторов не должно увеличивать (по крайней мере, заметно) время, необходимое для выполнения задачи, поскольку все операции выполняются параллельно.

Микрореакторы, используемые в настоящей работе, могут быть заменены небольшими (около 100 мкм в диаметре) микросферами с иммобилизованным БЖ катализатором, которые погружены в БЖ раствор без катализатора. В такой системе НУ сможет работать очень долго. Архитектура представленного НУ позволяет использовать любые осцилляторы, например, механические или электрохимические, нейроны или микрокристаллы, поскольку его общая схема не накладывает ограничений на природу осцилляторов.

Если связать химические колебания в ЦГР с механическим движением, можно получить интеллектуальное микроустройство, которое имеет различные типы движения в зависимости от ритма ЦГР. Взаимодействие нескольких таких микроустройств может открыть новое интригующее направление в изучении коллективного поведения интеллектуальных «химических существ».

Заключение

1. Для двух разночастотных БЖ осцилляторов, связанных импульсной связью с временной задержкой, найдены следующие резонансные режимы: 1:1, 2:3, 1:2, 2:5, 1:3 и 1:4.

2. Для двух разночастотных БЖ осцилляторов, связанных импульсной ингибиторной связью с временной задержкой, найден фазовый переход для резонанса 1:2 между режимами “0.2/0.7” и “0/0.5”. Показано, что переход можно контролировать временной задержкой, а также силой связи. Переход сопровождается резким изменением периода колебаний.

3. Начальные условия, определяемые как сдвиг фаз осцилляторов, влияют на динамические режимы импульсно связанных БЖ осцилляторов. Это влияние обусловлено существованием биритмичности между противофазным и синфазным режимами при резонансе 1:1 для определенного диапазона времён задержки при ингибиторной импульсной связи.

4. Предложен и разработан новый тип импульсной активаторной связи, названный «инверсной» ингибиторной связью. Он основан на кратковременном (импульсном) отключении постоянного внешнего ингибирующего воздействия на БЖ реакцию. Такое «инверсное» ингибирование возбуждает осциллятор и связь между осцилляторами становится активаторной по природе своего действия, если это «инверсное» ингибирование вызвано спайком в другом осцилляторе.

5. ГООС может контролировать динамику локально связанных БЖ микроосцилляторов. Для одномерного массива МК обнаружено, что при увеличении силы обратной связи существует следующая последовательность кластеров (или более обобщенно паттернов): лестничные, многофазные регулярные колебательные кластеры (пять-шесть или даже более кластеров), хаотические колебательные кластеры, затем регулярные четырех- или трехфазные колебательные кластеры, после них – сложные колебательные кластеры (в которых разные кластеры имеют кратные периоды), предпоследние – малые двухфазные кластеры и, наконец, однофазные колебательные кластеры.

6. Используя все сделанные нами наработки по малым сетям импульсно связанных осцилляторов, впервые экспериментально реализовано химическое нейроморфное устройство, построенное на иерархической сети импульсно связанных БЖ микроосцилляторов. Данное устройство выполняет задачу адаптивного поведения к внешним воздействиям. Аналогичное поведение, проявляемое живыми организмами, мы иногда называем интеллектуальным.

Список публикаций диссертанта

Статьи

1. Proskurkin, I.S. Dynamical regimes of two frequency different chemical oscillators coupled via pulse inhibitory coupling with time delay / I.S. Proskurkin, V.K. Vanag // Russian Journal of Physical Chemistry A. – 2015. – Vol. 89 – № 2.
2. Proskurkin, I.S. Inhibitory and excitatory pulse coupling of two frequency-different chemical oscillators with time delay / I.S. Proskurkin, A.I. Lavrova, V.K. Vanag // Chaos. – 2015. – Vol. 25 – № 6.
3. Proskurkin, I.S. New type of excitatory pulse coupling of chemical oscillators via inhibitor / I.S. Proskurkin, V.K. Vanag // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2015. – Vol. 17 – № 27 – P. 17906–17913.
4. Proskurkin, I.S. Dynamics of a 1D array of inhibitory coupled chemical oscillators in microdroplets with global negative feedback / I.S. Proskurkin, V.K. Vanag // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2018. – Vol. 20 – № 23 – P. 16126–16137.
5. Proskurkin I.S. Experimental verification of an opto-chemical “neurocomputer” / Proskurkin I.S., P.S. Smelov, V.K. Vanag // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2020. – Vol. 22 – P. 19359–19367.
6. 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 – № 6 – P. 3033–3043.
7. 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 – № 17 – P. 2162–2165.

Тезисы докладов

1. Proskurkin, I.S. Can we use inhibitor for excitatory coupling of chemical oscillators? / I.S. Proskurkin, V.K. Vanag // XXXIV Dynamics Days Europe, University of Bayreuth, Germany –2014.
2. Proskurkin, I.S. Dynamic regimes of two frequency different chemical BZ oscillators coupled via pulse coupling by using the following types of link: inhibitory, activator and "negative inhibitory" / I.S. Proskurkin, V.K. Vanag // Нелинейные волны – 2016, Нижний Новгород, Россия – 2016.
3. Proskurkin, I.S., Dynamical rhythms of an array of diffusively coupled BZ microoscillators with Global Negative Feedback / I.S. Proskurkin, V.K. Vanag // Gordon Research Conference, Ventura, USA – 2017.
4. 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 // 10th International Conference "Engineering of Chemical Complexity“, Potsdam, Germany – 2019. – P. 56