

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Сети спайковых осцилляторов и их применение для создания разумных автономных устройств

В.К. Ванаг

Рассмотрены иерархические сети импульсно связанных химических микроосцилляторов (МО). В качестве МО выступает колебательная реакция Белоусова – Жаботинского в микрообъёме. При конструировании рассматриваемых сетей, называемых нами "химическим мозгом", используются биологические принципы работы нейросетей и законы нелинейной динамики. Показано, что "химический мозг" способен к адаптивному поведению и принятию решений.

Ключевые слова: сети спайковых микроосцилляторов, реакция Белоусова – Жаботинского, принятие решений, "химический мозг"

PACS numbers: 07.05.Mh, 82.40. – g, 84.35. + i

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.05.038978>

Содержание

1. Введение (477).
 2. Классификация сетей (479).
 3. Нейросети (479).
 4. Микроосцилляторы реакции Белоусова – Жаботинского (480).
 5. Импульсная связь (481).
 6. Связанные микроосцилляторы реакции Белоусова – Жаботинского (482).
 7. Малые сети спайковых осцилляторов (483).
 8. Принципы работы "химического мозга" (486).
 9. Принятие решений (487).
 10. Заключение (488).
- Список литературы (488).

Используемые сокращения:

- АОТ — обращённая микроэмульсия аэрозоля ОТ, ОТ обозначает торговую марку;
 БЖ — реакция Белоусова – Жаботинского;
 БЖК раствор — БЖ раствор без катализатора;
 ИИ — искусственный интеллект;
 КПФ — кривые переустановки фазы;
 МА — малоновая кислота;
 МО — микроосцилляторы;
 НРПП — перемешиваемый реактор с постоянной подкачкой вещества;
 ПРПП — проточный реактор постоянного перемешивания;
 ФКН — механизм Филда – Кёреса – Нойеса;

- ФИС — реакционная система ферроцианид – иодат – сульфит;
 ХИМ — реакционная система хлорит – иодид – малоновая кислота;
 AP — anti-phase мода, противофазные колебания;
 AIP — almost in-phase, почти синфазные колебания двух осцилляторов;
 CPG — central pattern generator, центральный генератор ритмов;
 DM — блок принятия решений;
 E — блок executor, исполнитель;
 FAP — fast anti-phase, быстрые противофазные колебания;
 IP — in-phase, синфазные колебания;
 IPAP — in-phase anti-phase, мода, возникающая в системе четырёх связанных осцилляторов;
 OSI — мода, в которой один осциллятор подавлен (S — suppressed) и находится в стационарном окисленном состоянии, а второй осциллятор находится в колебательном режиме (O — oscillatory);
 OSII — мода, в которой один осциллятор подавлен (S — suppressed) и находится в стационарном возбуждённом состоянии, а второй осциллятор находится в колебательном режиме;
 PRC — phase response curves;
 R — Reader, Ридер;
 W — мода шаг (walk);
 WR — мода обратный шаг (walk reverse).

1. Введение

Некоторые исследователи полагают, что человечество приближается к концу эры "кремниевых компьютеров" и, следовательно, нам понадобятся альтернативные вычислительные системы, такие, например, как сети связанных осцилляторов, которые являются естественной средой для параллельной обработки информации и могут составить в будущем конкуренцию привычным

В.К. Ванаг. Центр нелинейной химии, Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, ул. А. Невского 14, 236016 Калининград, Российская Федерация
 E-mail: vvanaag@kantiana.ru

Статья поступила 30 марта 2021 г.

фон-Неймановским компьютерам как в скорости, так и в энергоэффективности [1, 2].

Сетям связанных осцилляторов уделяется в последние годы всё возрастающее внимание. Такими сетями занимаются специалисты из разных областей науки: физики, нейрофизиологи, химики-нелинейщики (так обычно называют химиков, занимающихся нелинейной динамикой химических реакций), биофизики, математики, включая занимающихся дискретной математикой, специалисты по искусственному интеллекту и просто любители, интересующиеся последними достижениями науки. Из приведённого, но неполного перечня специалистов видно, что тема "сетей связанных осцилляторов" является междисциплинарной и, следовательно, люди, занимающиеся такими сетями, пришли в эту науку разными путями. Как биофизику, давно работающему с нелинейными (колебательными) химическими реакциями и ставшему уже химиком-нелинейщиком, мне представляется важным кратко описать эволюционное развитие нелинейной химии, приведшее многих к изучению сетей связанных осцилляторов.

За точку отсчёта стоит взять открытие колебательной химической реакции Белоусова–Жаботинского (БЖ) [3, 4]. Именно с этого события и теории Пригожина [5, 6] начался бум в нелинейной химии [7–13]. Пять советских учёных: Г.Р. Иваницкий, В.И. Кринский, А.Н. Заикин, А.М. Жаботинский и Б.Н. Белоусов — были удостоены в 1980 г. Ленинской премии с формулировкой "за обнаружение нового класса автоволновых процессов и исследование их роли в нарушении устойчивости возбудимых распределённых систем". Под автоволновыми процессами в этой формулировке понимаются химические волны в пространственно распределённой БЖ реакции. Тремя годами раньше, в 1977 г., И.Р. Пригожин получил Нобелевскую премию по химии "за работы по термодинамике необратимых процессов, особенно за теорию диссипативных структур".

Вслед за этими событиями началось повальное изучение "точечных" химических колебательных систем [7–10]. Под словом "точечные" (т.е. с пространственной размерностью ноль, как у точки) понимаются химические реакции, протекающие в хорошо перемешиваемом химическом реакторе с постоянной подпиткой всей системы (т.е. реактора) свежими реагентами. Были открыты десятки новых колебательных реакций, а если считать различные модификации этих реакций, то счёт идёт на сотни. К основным типам этих реакций, не считая БЖ реакции, относятся реакция ХИМ (хлорит–иодид–малоновая кислота) [14], рН-осцилляторы [15, 16] и частный случай рН-осцилляторов — реакция ФИС (ферроцианид–иодат–сульфит) [17–19], которая важна из-за диссипативных пространственных структур, обнаруживаемых в специальных двумерных реакторах с участием этой реакции.

В ходе таких работ были установлены основные правила и закономерности, благодаря которым в химических реакциях могут возникать колебательные режимы: способ перехода от режима бистабильности к колебательному режиму [20], наличие положительной и отрицательной обратных связей, а также временной задержки между моментами максимального проявления этих двух типов связи [21, 22]. Если говорить математически, то это химико-кинетические условия появления бифуркации Андронова–Хопфа, которые следуют из анализа соб-

ственных значений Якобиана линеаризованной системы [5]. В случае подкритической бифуркации Хопфа появляются низкоамплитудные синусоидальные (гармонические) колебания, в то время как надкритическая бифуркация Хопфа приводит к возникновению высокоамплитудных колебаний релаксационного типа [23]. Релаксационные колебания имеют прямое отношение к понятию "спайковые осцилляторы", с которым мы будем иметь дело в настоящем обзоре. В нейрофизиологии спайком называют быстрое возбуждение нейрона и прохождение по аксону потенциала действия. Взрывообразное возбуждение осциллятора в случае релаксационных колебаний напоминает появление спайка. В отличие от гармонических колебаний, каждый период релаксационных колебаний может быть разделён на два чётких этапа: быстрых и медленных изменений состояния системы. Этап быстрых и коротких во времени изменений с ярко выраженным пиком (максимальное изменение состояния системы) и называется спайком.

Вслед за ранним этапом изучения точечных колебательных систем в нелинейной химии наступил этап изучения диссипативных структур. Нельзя определённо сказать, что сначала был этап изучения точечных колебательных систем, а затем наступил этап изучения диссипативных структур в пространственно-распределённых системах. Конечно, эти этапы накладываются друг на друга на временной шкале, но, тем не менее, их можно чётко выделить в историческом процессе развития нелинейной химии. Этап изучения диссипативных структур начался с изобретения НРПП (неперемешиваемый реактор с постоянной подкачкой вещества) [24] и экспериментального обнаружения структур Тьюринга [25, 26]. Прошло почти 40 лет с даты предсказания стационарных диссипативных структур Аланом Тьюрингом [27] и их обнаружением в эксперименте.

Изобретение НРПП повысило и уровень работ по изучению химических волн, которые велись со дня их открытия А.Н. Заикиным и А.М. Жаботинским [28]. Если раньше это были волны в закрытой системе, а потому волновые структуры были неустойчивы во времени, то в НРПП стало возможным поддерживать эти структуры сколь угодно долго. Это привело к целой серии открытий новых, более тонких волновых явлений, например, суперспиралей [29] и длинноволновой неустойчивости [30, 31]. В начале 2000-х годов были открыты новые диссипативные структуры в так называемой БЖ-АОТ системе, в которой БЖ реакция протекает не в водном растворе, а в обращённой микроэмульсии аэрозоля ОТ (АОТ) [32]. В качестве таких структур можно назвать антиволны [33], пакетные волны [34], сегментные волны [35], осциллоны [36] и новые типы структур Тьюринга [37–39].

Однако к концу первого десятилетия 2000-х годов интерес химиков-нелинейщиков стал переключаться на изучение больших и малых ансамблей связанных осцилляторов. Интерес к связанным осцилляторам был, конечно, и раньше, но около 10 лет назад появились химические микроосцилляторы (МО), которые позволили экспериментально изучать ансамбли связанных МО [40, 41]. В мире имеется небольшое число научных групп, которые в состоянии проводить такие эксперименты. Это, в первую очередь, группа профессора Showalter из университета West Virginia (США) [42–45] и тесно сотрудничающая с ней группа профессора Taylor из университета Sheffield (Великобритания) [46–48], две группы

из университета Brandeis (США): группа профессора Epstein [40, 41, 49, 50] и группа профессора Fraden [51, 52], группа профессора Gorecki из Варшавы (Institute of Physical Chemistry, Polish Academy of Sciences), сотрудничающая с группой профессора Adamatzky из Англии (University of the West of England, Bristol) [53–55], группа профессора Rossi из Италии (Università degli Studi di Siena) [56, 57], группа японского профессора Yoshikawa [58–60] и наша группа из Балтийского федерального университета им. И. Канта (Россия) [61–63].

Большое число химических МО — это ещё не сеть осцилляторов. Нужно уметь связывать эти осцилляторы близкодействующими (т.е. диффузионными) или далекодействующими (например, импульсными) силами. Как раз во втором десятилетии 2000-х годов был открыт способ импульсной связи с временной задержкой между двумя химическими осцилляторами [64, 65] и оптический метод установления импульсной связи между БЖ МО с иммобилизованным фоточувствительным катализатором $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ [66]. Всё это позволило начать экспериментальное изучение сетей импульсно связанных химических МО.

Путь математиков и физиков-теоретиков к сетям связанных осцилляторов был много короче, так как многие из них не стали задерживаться на этапе диссипативных пространственно-распределённых структур, а сразу перешли от точечных осцилляторов к их ансамблям [67–71]. В качестве наиболее ранней даты появления теории нейросетей называется 1959 год [72], что даже раньше открытия колебаний в БЖ реакции, но позже знаменитой работы Ходжкина и Хаксли о распространении электрического сигнала по аксону [73]. С увеличением скорости счёта компьютеров стало возможным решать динамические задачи с участием сотен и тысяч связанных осцилляторов, что также способствовало интенсификации исследований сетевых проблем. И, наконец (если не в первую очередь), загадки функционирования мозга, который состоит из огромного числа связанных осцилляторов и возбудимых ячеек (нейронов), постоянно поддерживают интерес научного сообщества к тем задачам, которые связаны с сетями активных элементов.

В настоящем обзоре мы хотим представить относительно новые сети спайковых осцилляторов, в которых единственный осциллятор представляет собой химическую колебательную реакцию, протекающую в микрообъёме. В отличие от предыдущих работ, в которых изучались динамические режимы сетей МО, мы покажем, что новые иерархические сети способны выполнять и некоторые "разумные" операции, связанные с адаптацией к внешним сигналам и с принятием решений. Сети химических МО способны работать без электричества, на одном лишь "химическом топливе". Обзор разбит на несколько разделов. В разделе 2 мы рассматриваем способы классифицировать разнообразные сети осцилляторов и активных элементов. В разделе 3 рассматриваются нейросети и обсуждается возможность использования принципов их функционирования для создания искусственных сетей химических МО. В разделе 4 описываются МО на основе реакции Белоусова–Жаботинского (БЖ). В разделе 5 мы подробно анализируем характеристики и способ описания импульсной связи с временной задержкой. Динамические моды БЖ МО, связанных диффузионно или импульсной связью, опи-

саны в разделе 6. Малые сети спайковых осцилляторов, кластеризация, мультиритмичность и зарождение функциональной иерархичности рассмотрены в разделе 7. В разделе 8 мы уже переходим к принципам работы "химического мозга", а в разделе 9 обсуждаем работу центрального блока принятия решений, который и наделяет работу сетей связанных осцилляторов "разумностью". Обзор заканчивается небольшим Заключением и оценкой перспектив (раздел 10).

2. Классификация сетей

Классификацию сетей связанных осцилляторов можно проводить по нескольким признакам. Например, по типу дифференциальных уравнений, описывающих динамику единичного осциллятора: сеть может состоять из простейших фазовых осцилляторов [70, 74] или из полных моделей реальных (химических или нейрофизиологических) осцилляторов [75]. При классификации можно учитывать топологию сети, например, связи каждый с каждым, связи только с ближайшими соседями или связи как у сети "малый мир" [76]. Можно учитывать архитектурную сложность сети, например, иерархические сети [62, 77]. Можно сделать акцент на типе связей между узлами сети (т.е. осцилляторами). Это могут быть локальные связи диффузионного типа, как между химическими МО [40], или далекодействующие импульсные связи по типу связей между нейронами через аксоны и дендриты [64]. В реальной нейросети локальным диффузионным связям соответствуют электрические синапсы (контакты) между соседними клетками. Нейрофизиологи отмечают, что для функционирования нервной системы даже простейших беспозвоночных важны оба типа связей: импульсная (т.е. химические синапсы) и диффузионная (электрические синапсы) [78, 79]. Связи могут быть ингибиторными (т.е. подавляющими) или активаторными [64, 80], с временной задержкой или без неё [81], однонаправленными или обоюдными, постоянными или настраиваемыми (т.е. меняющимися во времени) [82]. Однонаправленными могут быть только импульсные связи. Диффузионная же связь, как очевидно, двунаправленная (т.е. обоюдная). В литературе по искусственным нейронным сетям различают также рекуррентные сети и так называемые "feedforward" сети [83]. В сетях последнего типа нет петель обратной связи, хотя все элементы сети связаны, но информация передаётся только в одном направлении: от входов к выходам. Классический персептрон относится именно к такому классу сетей [84, 85]. Такая классификация сетей, возможно, не даёт ответа на вопрос о зависимости динамических мод сети от её архитектуры, однако более глубокой классификации с предсказанием динамических мод на основе топологии пока нет.

3. Нейросети

Литература по сетям связанных осцилляторов и возбудимых элементов чрезвычайно обширна (см., например, обзор, соавтором которого является известный профессор Ermentrout [86]). Однако, несмотря на это изобилие литературы, прогресс в понимании работы мозга невелик [87]. Известные нейрофизиологи призывают объединить эмпирические и теоретические подходы [87–89], что для физиков звучит немного странно, так как обычно

только так и делается. Надежды на то, что выявление всех связей между нейронами мозга ("Коннектом" [90–92]) позволит понять, как работает мозг, прошли. Даже выявление структуры всех межнейронных связей простейшей нервной системы нематоды *C.elegans* [93], состоящей из 302 нейронов, не дало полного понимания того, как эта нейросеть работает, хотя интересные локальные связи этой нейросети (так называемые "мотивы") были обнаружены [94, 95].

Стало понятно, что структуру нейросети надо дополнять динамикой этой сети, которая, в принципе, способна менять эту структуру. В нейронауках стали возникать новые термины, отражающие связь динамики со структурой сети, например, "Dynome" [96] или "Chronnectome" [97]. Стало понятным, что функциональный коннектом не тождествен анатомическому коннектому. Проявление той или иной динамической моды в анатомическом коннектоме зависит от нейромодуляторов [78]. Нейромодуляторы высвобождаются вместе с нейротрансмиттерами недалеко от синапсов, но, в отличие от последних, могут диффундировать на большие расстояния. Кроме того, нейромодуляторы могут высвобождаться из специальных нейроэндокринных клеток, которые не имеют синаптических контактов. Они могут переноситься по организму как гормоны. Время их действия может быть как относительно коротким (секунды и минуты), так и продолжительным (часы) [98]. Таким образом, анатомический коннектом представляет собой набор потенциальных конфигураций связей между нейронами (или нейросетей), в то время как реальная функциональная конфигурация зависит от нейромодуляторов. Более того, нейромодуляторы могут качественно менять и свойства нейронов, переводя их, например, из тонического спайкового режима в возбудимый стационарный режим [98].

Термин "Chronnectome" указывает на то, что нейросеть мозга меняется со временем, включая как активность отдельных нейронов, так и связность или функциональную связность. Появилось относительно новое направление, называемое "Адаптивные динамические сети" [82], т.е. такие сети, топология которых (связность) перестраивается со временем. Естественным образом возникает вопрос о законах этой перестройки. Если в реальных нейросетях за перестройку отвечают нейромодуляторы (хотя и не только они), то в "математических" сетях, собранных из фазовых осцилляторов, перестройка связей описывается математически [99–101], в виде функции силы связи между узлами сети от текущих фаз этих осцилляторов. В таких моделях остаётся неясным, как математические правила перестройки связей соотносятся с молекулярными процессами в реальных сетях.

Понимание важной роли пластичности (или адаптивности) нейросетей привело к пониманию неизбежности самоструктурированности нейроподобных сетей. Возникли представления о мозге как о многомасштабной сетевой системе [88], о нейронах-хабах, которые связывают разные функциональные участки мозга [102], об иерархичности нейросетей [103]. Одним из вариантов иерархичности является современная теория мультислойных нейросетей [104]. Математический аппарат для описания и анализа динамики сетей связанных осцилляторов, включая и колебательные нейронные сети, приведён в обзоре профессора Ashwin [105].

И наконец отметим, что нейросети в большой степени являются сетями спайковых осцилляторов с химически-

ми синапсами (если пренебречь электрическими синапсами). Поэтому давно существовавший интерес к сетям спайковых осцилляторов [106] вырос в последнее время [107–109]. Иногда спайковые нейросети называют третьей генерацией искусственных нейросетей [108]. Заметим также, что исследователи, занимающиеся когнитивными науками, призывают к большей интеграции между нейробиологией и искусственным интеллектом (ИИ) [104]. Одним из стимулов к этому является тот факт, что современные устройства с ИИ потребляют довольно много энергии, в то время как сети спайковых осцилляторов являются энергосберегающими. Так, например, компания Microsoft разработала чип TrueNorth, работающий на принципах сетей спайковых нейронов [110], который потребляет около 70 мВт при производительности в 46 млрд "синаптических операций в секунду на ватт". Такое энергопотребление приблизительно на четыре порядка меньше, чем у обычного компьютера.

Так как работать с сетями осцилляторов, описываемых полными моделями реальных процессов, довольно трудно, то существует техника редуцирования таких систем к сетям фазовых осцилляторов. Недавно появились два прекрасных обзора, в которых методы редуцирования полно и систематично описаны [111, 112]. Для полноты описания нейросетей нельзя не сказать и о таком явлении, как химера. Этим словом обозначается такая динамическая мода сети, в которой часть осцилляторов колеблется синфазно, а другая часть проявляет асинхронное (хаотичное) поведение. Недавний обзор позволяет мне не останавливаться на этом важном поведении нейросетей [113].

Многочисленные исследования по спайковым нейросетям приносят нам разрозненную информацию. Сложить кусочки пазла в единую картину пока не получается. В качестве примера такого кусочка информации приведу лишь одну работу [114], в которой показано, что сильные ингибиторные связи способствуют поддержанию рабочей памяти. Что делать дальше с этой и с подобной ей информацией — проблема исследователя. Работа с малыми нейронными сетями, мы надеемся, позволит приблизиться к пониманию работы мозга.

И наконец, надо сказать, что спайковые искусственные нейросети широко используются в устройствах искусственного интеллекта [115–121]. Но так как мы описываем в данном обзоре "химический мозг", который работает без электричества и без математических формул, то на схемах искусственного интеллекта мы не будем останавливаться.

4. Микроосцилляторы реакции Белоусова–Жаботинского

БЖ реакция очень хорошо изучена [9, 10]. Она представляет собой окисление малоновой кислоты (хотя можно использовать и другие субстраты) броматом в кислой среде, причём этот процесс катализируется ионами металлов или их комплексами. Наиболее часто используемыми катализаторами являются такие металло-комплексы, как ферроин, $\text{Fe}(\text{phen})_3^{2+}$, или $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$. В некотором диапазоне концентраций исходных реагентов (который весьма широк) данная реакция протекает в колебательном режиме: за быстрым автокаталитическим окислением катализатора следует относительно медленное его восстановление, а затем процесс повторяется.

Широко принятым механизмом БЖ реакции является механизм Филда–Кёреса–Нойеса (ФКН) [122], который включает в себя 12 "элементарных" реакций (см. также [63]). При использовании $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ в качестве катализатора реакция БЖ становится фоточувствительной [123]. В зависимости от концентраций бромата (BrO_3^-) и малоновой кислоты (МА), действие света может приводить как к ингибированию колебаний (это случается, когда используется "много" МА и "мало" бромата) [124], так и к активации автокатализа и к ускоренным колебаниям ("мало" МА и "много" бромата) [125].

Важнейшими интермедиатами БЖ реакции являются бромид, Br^- , выполняющий роль ингибитора колебаний, и молекула HBrO_2 , которая выполняет роль активатора колебаний. Помимо бромиды ингибитором является также и молекулярный бром, Br_2 , который находится с бромидом в приблизительном равновесии за счёт быстрых реакций, переводящих Br_2 в Br^- и наоборот. Напомним, что автокатализ в БЖ реакции начинается тогда, когда концентрация ингибитора Br^- понижается ниже критического порога [122, 126].

Для полноты картины отметим, что БЖ реакция может демонстрировать биритмичность [127], хаотические колебания [128–130], а также стационарные диссипативные структуры Тьюринга [38], антиволны [33], пакетные волны [34] и много других диссипативных структур и волн [32, 126]. Динамика колебательной БЖ реакции может напоминать динамику нейрона с его спайками, с той лишь разницей, что период колебаний БЖ реакции лежит в минутном диапазоне, а колебания нейрона имеют много большую частоту.

В последнее десятилетие в нелинейной химии появились БЖ МО (см. обзор [63]), с использованием которых стали возможны эксперименты с относительно большим количеством связанных химических осцилляторов [41, 48, 49, 131–135].

Как правило, диаметр таких МО варьирует от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. "В среднем" микроосциллятор можно представить как микрокаплю или микросферу диаметром около 100 мкм. БЖ микросферы могут быть сделаны (синтезированы) из органических полимеров, например, из ионообменной смолы [134] или из силикагеля (неорганический полимер) [136], а катализатор БЖ реакции должен быть иммобилизован в этих микросферах. Если такую БЖ микросферу погрузить в БЖ раствор без катализатора (БЖК раствор), то микросферы начинают осциллировать как локализованные МО. Так как исходные реагенты БЖ реакции (бромат и малоновая кислота) всё время диффундируют из БЖК раствора в БЖ микросферу, то колебания продолжают десятки часов без заметных признаков изменения амплитуды [136]. Такие БЖ МО пригодны для создания сетей осцилляторов с устойчивыми модами.

БЖ микрокапли обычно получают с использованием микрогидродинамического (microfluidic) метода [40, 41, 137], так как при смешивании водной фазы с несмешивающейся жидкостью, маслом, в микрогидродинамическом чипе образуются водные микрокапли. Если при смешивании воды с маслом использовать БЖ раствор вместо чистой воды, то получаются БЖ микрокапли в непрерывной масляной фазе. Как и размер БЖ микросфер, размер БЖ капель можно варьировать в диапазоне от нескольких десятков до сотен микрометров.

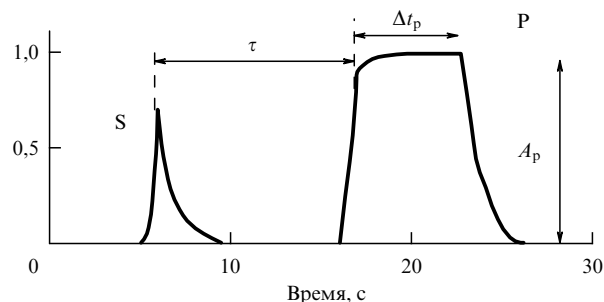


Рис. 1. Импульс P в реакторе j возникает спустя τ секунд после того, как некая переменная S в реакторе i генерирует спайк и достигает некоего критического значения. Почти прямоугольный импульс P характеризуется длительностью Δt_p и амплитудой A_p . (Рисунок взят из работы [146].)

5. Импульсная связь

Наряду с методами создания МО был экспериментально разработан и реализован метод импульсной связи с временной задержкой [64, 65, 138–143]. Применительно к двум релаксационным БЖ осцилляторам с индексами i и j импульсная связь с задержкой выглядит, как показано на рис. 1. Если в осцилляторе i возникает спайк S , то это событие активирует некий механизм, который приводит через время задержки τ к импульсному воздействию на осциллятор j . В случае макроосцилляторов (макро-реакторов) в качестве такого воздействия может служить кратковременный вброс в реактор j небольшой порции некоего вещества (активатора или ингибитора). В случае же микрореакторов таким воздействием может быть адресное импульсное облучение светом конкретного МО (с номером j в рассматриваемом случае). Действие такой связи с задержкой не описывается дифференциальными уравнениями с задержкой [144, 145], в которых состояние системы в любой момент времени t оказывает воздействие на эту же или другую систему в момент времени $t + \tau$. В случае синаптических связей между нейронами и в нашем случае импульсной связи только одно (возбуждённое) состояние системы (спайк) в конкретный момент времени t_0 оказывает воздействие на другие нейроны (осцилляторы) в момент времени $t_0 + \tau$. В нейросетях временная задержка τ определяется в основном временем прохождения потенциала действия по аксонам.

Если эта связь ингибиторного типа, то пришедший на осциллятор j импульс "отодвигает" во времени появление очередного спайка в j -осцилляторе. Если же пришедший импульс является активаторным, то он "приближает" спайк в j -осцилляторе. Такую связь иногда называют возбуждающей. Существует очень простой и эффективный способ охарактеризовать импульсное воздействие с временной задержкой — это кривые переустановки фазы (КПФ), которые в англоязычной литературе называются phase response curves (PRC) [147, 148].

Пусть фаза осциллятора ϕ линейно растёт со временем и меняется от 0 до 1, где единица соответствует полному периоду T (от спайка до спайка). При достижении 1 фаза обнуляется. Выразим момент импульсного возмущения в единицах фазы ϕ предельного цикла как $\phi_p = \tau/T$, где время τ отсчитывается от момента предыдущего спайка до момента импульсного возмущения.

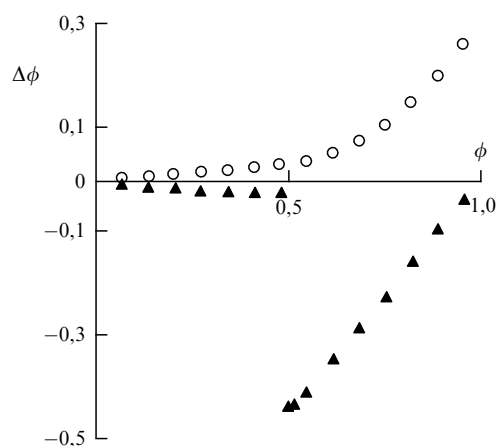


Рис. 2. Типичные ингибиторная КПФ (светлые кружки) и активаторная КПФ (чёрные треугольники), обнаруженные в эксперименте с колебательной БЖ реакцией. Кривые построены на основании данных, представленных в [149].

Тогда зависимость фазового сдвига $\Delta\phi = (T_n - T)/T$ от ϕ_p и есть КПФ, где T_n — интервал времени от предыдущего до очередного спайка при условии, что в этот интервал времени произошло одиночное импульсное возмущение осциллятора, причём амплитуда и длительность импульса не меняются с изменением фазы ϕ_p . Типичные зависимости $\Delta\phi$ от ϕ (нижний индекс "р" опущен) для ингибиторного и активаторного импульсного воздействий на БЖ реакцию представлены на рис. 2 [149, 150].

Удобство метода КПФ заключается в том, что динамическую систему (сеть) с импульсными связями между осцилляторами можно описывать последовательностью дискретных событий. Различные аспекты, связанные с устойчивостью такой системы и с наклоном кривой КПФ, а также со знаком второй производной КПФ описаны в обзоре [107].

6. Связанные микроосцилляторы реакции Белоусова – Жаботинского

Рассмотрим отличие диффузионной связи от импульсной на примере двух БЖ МО. Заметим, что для макроосцилляторов диффузионная связь в чистом виде трудно реализуема, и вместо неё экспериментаторы используют массообмен [151], действие которого заметно отличается от диффузионной связи.

В качестве примера активаторной или преимущественно активаторной диффузионной связи можно привести поведение двух БЖ микросфер с иммобилизованным катализатором, которые помещены в водный БЖК раствор (это БЖ раствор без катализатора) [136]. На большом расстоянии их фазы и частоты не синхронизированы (рис. 3а). По мере сближения БЖ МО (рис. 3б, в) между ними возникает активаторная связь, выравнивающая частоты колебаний МО и приводящая в итоге к синфазным колебаниям.

В качестве примера ингибиторной диффузионной связи мы показываем поведение двух силикагелевых БЖ микросфер, предварительно напитаемых реагентами БЖ реакции, а затем помещённых в масляную фазу, в которой могут диффундировать только гидрофобные мо-

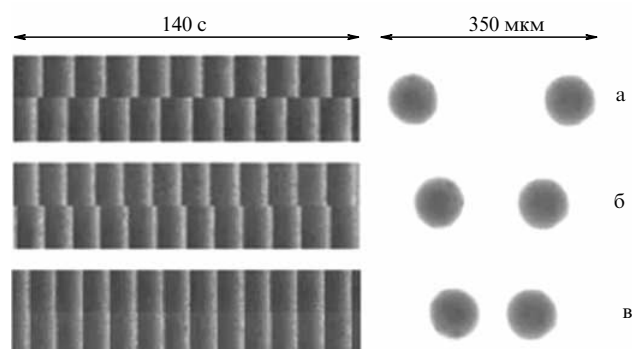


Рис. 3. Возникновение синфазной синхронизации при сближении двух БЖ МО, связанных диффузионной активаторной связью. Использовались силикагелевые микросферы. На пространственно-временных графиках время движется справа налево, а оптическое пропускание регистрировалось через микроскоп в центральных областях микросфер.

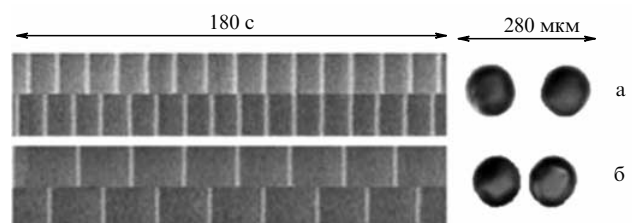


Рис. 4. Возникновение антифазной синхронизации при сближении двух силикагелевых БЖ МО, связанных диффузионной ингибиторной связью. На пространственно-временных графиках время движется справа налево. Оптическое пропускание регистрировалось через микроскоп в центральных областях микросфер.

лекулы ингибитора Br_2 [136]. Как видно на рис. 4, изначально находящиеся на большом расстоянии друг от друга БЖ МО не синхронизируются и колеблются с немного разными периодами и сдвигом фаз (рис. 4а). Однако при их сближении (рис. 4б) между ними начинает устанавливаться ингибиторная связь, которая удлинняет (почти вдвое) и выравнивает периоды МО и приводит в конечном итоге к антифазным колебаниям. Таким образом, активаторная диффузионная связь приводит к синфазным колебаниям, а ингибиторная диффузионная связь порождает антифазные колебания.

Совершенно другое поведение наблюдается для импульсной связи [64, 152]. Во-первых, динамический режим зависит от двух параметров: от временной задержки τ и от амплитуды импульса A_p при постоянной длительности импульса Δt_p (см. рис. 1). На рисунке 5, на плоскости $A_p - \tau$, мы приводим области различных динамических мод для ингибиторной (рис. 5а) и активаторной (рис. 5б) связей. Эти диаграммы получены для теоретической модели [152], однако качественно такие же диаграммы получены и в эксперименте [64]. Для ингибиторной связи мы обозначаем амплитуду импульса A_p как C_{inh} , а для активаторной связи — как C_{ex} .

Мы видим на рис. 5а, что для импульсной ингибиторной связи нет области исключительно антифазных колебаний. Вместо этого для относительно малых C_{inh} или τ (левый нижний угол диаграммы) наблюдается область биритмичности, в которой в зависимости от начальных условий (т.е. соотношения фаз осцилляторов) может

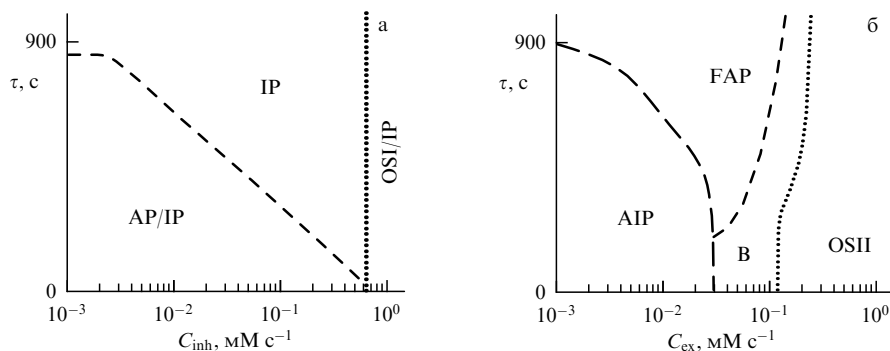


Рис. 5. Диаграммы динамических мод (а) в плоскости $C_{inh} - \tau$ для импульсной ингибиторной связи и (б) в плоскости $C_{ex} - \tau$ для импульсной активаторной связи. Символы: IP — синфазные колебания, AP — антифазные колебания, мода OSI (OSII) означает, что один осциллятор полностью подавлен и находится в восстановленном (окисленном) состоянии, FAP — быстрые антифазные колебания, AIP — почти синфазные колебания, B — бёрстинг. Собственный период колебаний T_0 изолированного осциллятора равен 2150 с. Диаграммы построены по данным работы [152].

возникнуть AP или IP мода. Но самое удивительное — это то, что при относительно больших C_{inh} или τ (правый верхний угол диаграммы) существуют только синфазные (IP) колебания. В области чрезмерно большой амплитуды импульса один из осцилляторов может оказаться полностью подавленным (область OSI).

На рисунке 5б можно видеть не менее интересные динамические моды. Во-первых, идеальных синфазных колебаний, как в случае активаторной диффузионной связи, нет ни в одной области на плоскости $C_{ex} - \tau$. При относительно малых C_{ex} и τ (τ мало по отношению к периоду собственных колебаний T_0), что соответствует нижнему левому углу диаграммы, наблюдаются так называемые почти синфазные колебания (almost in-phase — AIP), в которых временной сдвиг между близко расположенными спайками осцилляторов равен приблизительно задержке τ , а период колебаний T приблизительно равен T_0 . При увеличении τ или C_{ex} происходит резкий переход от AIP моды к новой моде FAP (fast anti-phase — быстрые противофазные колебания). Импульс от одного осциллятора через время задержки τ мгновенно вызывает спайк у другого осциллятора и наоборот. Таким образом, период колебаний $T \cong 2\tau$. При очень больших величинах C_{ex} образуется мода OSII, в которой один осциллятор находится в стационарном возбуждённом состоянии, а другой продолжает давать колебания как независимый осциллятор с периодом T_0 . Между областями мод OSII и FAP существует узкая область B, в которой обнаруживаются колебания типа bursting, что выглядит как пачки высокочастотных спайков, разделённых периодами покоя.

Таким образом, импульсная связь — это не только энергетически выгодный способ "общения" между осцилляторами, но и способ получать новые динамические режимы, которых нет в случае диффузионной связи.

7. Малые сети спайковых осцилляторов

Рассмотрим теперь малые сети спайковых осцилляторов, состоящие всего лишь из нескольких узлов (осцилляторов или возбудимых ячеек). В связи с тем, что мы не ставим себе целью всестороннее математическое описание таких сетей (это хорошо сделано в обзорах [81, 107]), то нам достаточно сфокусироваться на тех свойствах этих сетей, которые могут быть использованы для

создания "разумных" автономных устройств. К таким свойствам мы относим в первую очередь кластеризацию/синхронизацию и мультиритмичность. Этим вопросам посвящено большое число работ и даже специальные (тематические) выпуски журнала Chaos [153, 154]. Кластерами в данном контексте называются группы осцилляторов, которые колеблются синхронно. Сети почти одинаковых осцилляторов могут иметь довольно много кластеров. Можно посчитать число n различных состояний сети из N почти одинаковых связанных осцилляторов. Так, для $N = 2$ существует два устойчивых симметричных состояния: синфазные и противофазные колебания (см. рис. 5). Два осциллятора в синфазном состоянии образуют кластер. Для $N = 3$ можно насчитать 3 состояния: синфазная мода, когда все осцилляторы колеблются синхронно, мода Splay (когда осцилляторы дают спайки поочередно с временным интервалом T/n , где T — общий период), и мода "2 + 1", когда два осциллятора колеблются синхронно, а третий — в противофазе к ним. Если учитывать, какие именно осцилляторы колеблются синхронно, т.е. учитывать перестановки, то число состояний типа "2 + 1" увеличится до трёх, а общее число состояний n становится равным 5. Для $N = 10$ учёт перестановок и сочетаний увеличивает число состояний с $n = 40$ до $n = 487311$ (более чем на 4 порядка).

Учёт состояний, отличающихся друг от друга только перестановками (заменами) входящих в них осцилляторов, крайне важен для теории гетероклинических переходов [155–159]. Наряду с группой профессора Рабиновича, группа профессора Тимме также активно развивала теорию гетероклинических переходов применительно к функционированию мозга и, соответственно, придавала большое значение перестановкам (заменам) элементов внутри кластеров [160–162].

Зависимости числа состояний n от числа N элементов (узлов) сети представлены на рис. 6 для двух случаев: с учётом и без учёта перестановок (замен).

Если перестановки не учитывать, то при малых N ($N < 8$), число состояний n растёт экспоненциально, как $n \cong 0,44 \times 2^{0,63N}$ (зависимость, обозначенная ромбами на рис. 6). Но при $N > 10$ рост n замедляется и становится линейным (с наклоном, равным 14,5). Если мы хотим увеличить число различных состояний, то имеет смысл большие сети разбивать на меньшие. Так, например, для $N = 12$ число состояний $n = 69$, а для $N = 6$ число со-

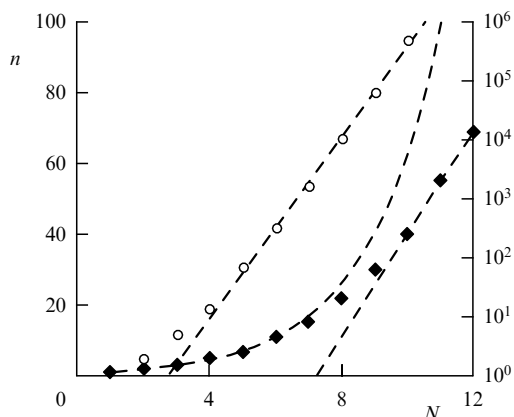


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Зависимость числа состояний n от числа N почти одинаковых связанных осцилляторов. Синие ромбы маркируют число состояний без учёта перестановок и сочетаний (левая вертикальная ось), в то время как красными кружками (которые относятся к правой логарифмической шкале) отмечаются числа состояний n с учётом перестановок и сочетаний.

стояний $n = 11$. Поэтому для комбинации двух малых сетей с $N = 6$ общее число мод (т.е. состояний) может составить $11^2 = 121$, что уже заметно больше $n = 69$.

С учётом же перестановок число различных состояний увеличивается многократно, и n начинает расти приблизительно как $2^{2.5N}$ (зависимость, обозначенная красными кружками на рис. 6). Заметим, что число состояний n группы несвязанных ячеек, каждая из которых может принимать только два состояния, например 0 и 1, растёт как 2^N , а число состояний n без учёта перестановок растёт как $2^{0.63N}$, т.е. медленнее. Однако если начать учитывать перестановки, то n начинает расти приблизительно как $2^{2.5N}$, т.е. намного быстрее, чем число состояний группы несвязанных ячеек.

Пример симметричных регулярных динамических мод для четырёх осцилляторов, связанных импульсными ингибиторными связями с задержкой, представлен на рис. 7. Слова "симметричных регулярных" означают, что за один полный период каждый осциллятор генерирует только один спайк (регулярные колебания) и динамика всех осцилляторов одинакова (симметричные колебания).

Помимо симметричных регулярных мод существуют и другие устойчивые моды, некоторые из них показаны на рис. 8. Как правило, такие несимметричные моды появляются при достаточно большой силе импульсной связи [75].

Когда сеть осцилляторов обладает большим числом динамических мод, то очень часто возникает явление мультистабильности — сосуществование различных устойчивых состояний (мод или аттракторов) при одном и том же наборе параметров системы. Реализация той или иной моды зависит в этом случае только от начальных условий [154]. Наши расчёты и эксперименты с малыми сетями импульсно связанных БЖ осцилляторов показывают, что мультистабильность увеличивается, как правило, при увеличении силы связи [75, 141, 164].

Малые сети, состоящие всего из двух-трёх импульсно связанных почти идентичных осцилляторов, могут иметь десятки различных мод и проявлять высокую степень мультитритмичности при правильном подборе амплитуды и задержек импульсных сигналов [165]. Благодаря

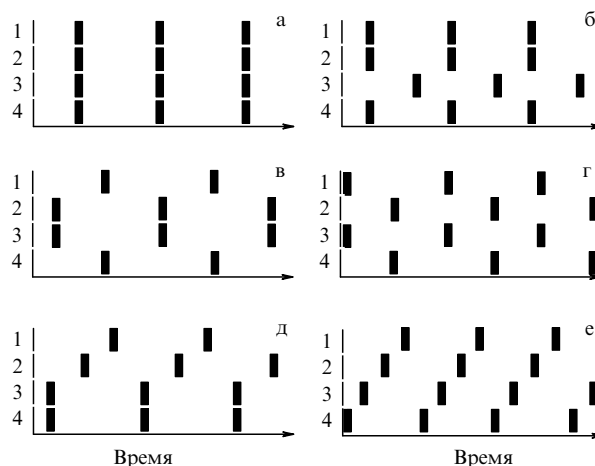


Рис. 7. Регулярные динамические моды, обнаруженные в системе из четырёх спайковых БЖ осцилляторов, связанных каждый с каждым импульсными ингибиторными связями с временной задержкой. (а) синфазная мода, (б) кластер "3 + 1", (в) кластер "2 + 2", мода IPAP; (г) кластер "2 + 2", мода AP (противофазные колебания), (д) кластер "2 + 1 + 1", (е) мода шаг или Splay (кластер "1 + 1 + 1 + 1"). Короткие жирные вертикальные штрихи обозначают спайки осцилляторов, номера которых стоят слева от графиков пространство–время [163].

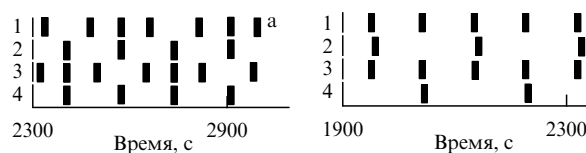


Рис. 8. Несимметричные моды, обнаруженные в системе из четырёх спайковых БЖ осцилляторов. (а) Осцилляторы № 2 и № 4 колеблются синхронно и за один общий период дают два спайка, осцилляторы № 1 и № 3 дают три спайка за один общий период и колеблются в противофазе друг к другу; (б) осцилляторы № 1 и № 3 колеблются синхронно и за один общий период дают два спайка, в то время как осцилляторы № 2 и № 4 колеблются в противофазе друг с другом и дают один спайк за период [75].

этому свойству они получили название "когнитивные моды", которые весьма чувствительны к внешним воздействиям и одновременно устойчивы к малым возмущениям-шумам.

Большое число (десятки) разных мод было теоретически обнаружено при рассмотрении как одного, так и двух одинаковых БЖ МО, заключённых в небольшую капсулу с непроницаемыми стенками [166]. Связь между этими БЖ МО была диффузионной. Оказалось, что динамическое поведение такой пары БЖ МО сильно зависит от расстояния между БЖ МО и даже от положения этой пары внутри капсулы. Были обнаружены сложные колебания с чередующимися большими и малыми пиками, различные типы хаотических колебаний, а также стационарный режим (колебания подавлены), причём изолированный БЖ МО демонстрировал обычные регулярные колебания.

Различные динамические моды, в частности, моды, связанные с образованием кластеров в сетях осцилляторов, важны для нас в силу того, что разные моды могут служить памятью нейросети, например, ассоциативной памятью. Действительно, всякая устойчивая динамическая мода представляет собой аттрактор, к которому стягиваются фазовые траектории, принадлежащие бас-

сейну этой моды. В сложных сетях границы бассейнов аттракторов могут быть весьма витиеваты и их бывает трудно точно определить [167], но качественно понятно, что небольшие искажения входного сигнала, не выходящие из бассейна данной моды, всё равно приведут к той же самой устойчивой моде.

Наличие мультиритмичности у центрального генератора ритмов (CPG — central pattern generator) позволяет многим животным управлять движением своих конечностей (или способом сокращения стенок желудка) путём переключения из одной моды в другую [168–171]. Методам переключения между модами также посвящено немалое количество работ (см. [163, 172] и ссылки в этих работах). Мы разработали специальный небольшой блок из ячеек, называемый Ридером (Reader, R), который определяет, в какой конкретно моде находится блок CPG [61, 163]. Зная текущий ритм CPG и конечную (желаемую) моду, можно подобрать такие импульсы, которые переключат CPG "правильно".

Известный нейрофизиолог Buzsaki считает, что в разумно организованной нейросети должна быть специальная считывающая система (а "reading" system), считывающая информацию из другой специальной части нейросети, называемой CPG или приёмным блоком [173]. Иными словами, любая информация, поступающая в мозг, имеет смысл только тогда, когда какая-то другая подсистема мозга (Reader) может считывать и понимать эту информацию [173]. Ридер же, в свою очередь, пересылает эту информацию на интегратор, собирающий информацию как о внешних сигналах, так и о состоянии собственной нейросети. Таким образом, мы переходим к иерархическим сетям, в которых есть различные функциональные блоки, состоящие из спайковых осцилляторов или возбудимых ячеек. При этом химическая природа всех наших микроячеек остаётся совершенно одинаковой — это БЖ реакция, которая может протекать в разных режимах.

Работа ридера в обобщённом виде представлена на рис. 9. Имеется несколько возможностей настроить

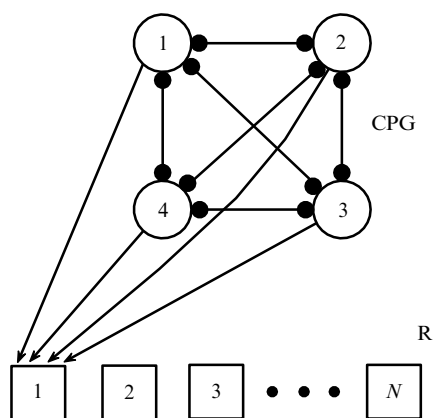


Рис. 9. Нейроподобная иерархическая сеть представлена двумя блоками: блок CPG (центральный генератор ритмов) и R (Ридер). Четыре осциллятора блока CPG связаны "каждый с каждым" импульсными ингибиторными связями. Ячейки блока R находятся в стационарном возбудимом состоянии и ждут активаторных импульсов от блока CPG. Прорисованы только импульсные связи между всеми осцилляторами блока CPG и ячейкой №1 блока R, чтобы не перегружать рисунок, но точно такие же связи существуют и для всех других ячеек блока R.

ячейки ридера на различные моды блока CPG, например на регулярные моды, представленные на рис. 7. Можно суммировать амплитуды всех импульсов, поступающих от ячеек CPG на каждую ячейку ридера, при условии, что эти импульсы поступают на ячейки ридера сразу после спайков осцилляторов блока CPG, что соответствует нулевой задержке. Если все задержки будут одинаковы, то мы получим точно такой же результат. Другое условие — одинаковые амплитуды всех импульсов.

Далее можно настроить ячейки ридера так, что они будут иметь разные пороги для возбуждения спайка. Для БЖ МО с комплексом $Ru(bpy)_3^{2+}$ разные пороги достигаются простым увеличением интенсивности постоянного освещения нужного МО. Порог ячейки № 1 можно сделать таким, что она будет срабатывать только при одновременном приходе на неё четырёх импульсов, ячейка № 2 — при одновременном приходе трёх импульсов, а ячейка № 3 — при одновременном приходе двух импульсов. Остальные ячейки (если они есть) могут срабатывать и от одиночных импульсов. Очевидно, что суммарные максимальные амплитуды будут разными для моды IP, моды кластера "3 + 1" и мод кластеров "2 + 2". На IP моду сработает ячейка № 1 и все остальные ячейки. На моду "3 + 1" ячейка № 1 уже не откликнется, но все остальные ячейки дадут спайки. На моду "2 + 2" и моду "2 + 1 + 1" ячейки № 1 и № 2 не откликнутся, а все остальные ячейки ридера будут давать спайки. Таким образом, мы не сможем отличить моду "2 + 2" от моды "2 + 1 + 1", и уж тем более мы не сможем отличить моду AP (рис. 7г) от моды IPAP (рис. 7в).

Можно настроить ячейки ридера на частоту приходящих на них импульсов. Такой метод также имеет свои преимущества и недостатки [163]. Вопрос о том, как нейросеть кодирует и декодирует информацию, является одним из важнейших вопросов нейробиологии [174]. Распространённым методом кодирования информации нейросетью является фазовое кодирование [108]. Частным случаем упомянутого метода является кодирование информации, основанное на синхронизации спайков нейронов [175]. В нашем случае метод фазового кодирования, в котором импульсы от разных осцилляторов CPG приходят на ячейки ридера синхронно, также оказался наиболее чувствительным к разным модам.

Идея рассматриваемого метода поясняется на рис. 10. Импульсы от ячеек № 1 и № 2 блока CPG должны приходиться на определённые ячейки ридера одновременно, так как все эти ячейки дают спайк только от двух одновременно пришедших импульсов. В данном случае мы рассматриваем для простоты блок CPG, в котором все осцилляторы связаны по кругу однонаправленными импульсными ингибиторными связями.

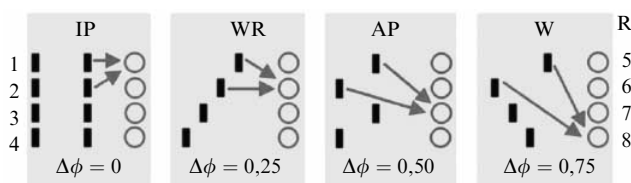


Рис. 10. Иллюстрация к фазовому методу работы ячеек ридера. Пояснения в тексте. Номера ячеек CPG (слева) те же, что и на рис. 9, а номера четырёх ячеек ридера R (справа) начинаются теперь с № 5 и оканчиваются № 8.

Такой блок CPG обладает четырьмя регулярными модами: IP (синфаза), WR (обратный шаг), AP (антифаза) и W (шаг), которые изображены на рис. 10. Так как разность между фазами осцилляторов № 1 и № 2 различна для всех четырёх мод, то для одновременного прихода импульсов на соответствующие ячейки № 5–№ 8 блока ридер (R) надо ввести временные задержки, соответствующие разности фаз в разных модах. Так, для моды IP и настроенной на неё ячейки № 5 временная задержка равна нулю. Для моды WR и настроенной на неё ячейки № 6 временная задержка должна равняться четверти от периода колебаний моды WR. Для мод AP и W и соответствующих ячеек № 7 и № 8 временная задержка должна равняться половине и 3/4 от периодов колебаний мод AP и W соответственно.

8. Принципы работы "химического мозга"

Прежде чем продемонстрировать на практике, как иерархическая сеть импульсно связанных осцилляторов и возбудимых ячеек может имитировать разумное поведение, остановимся кратко на тех принципах или свойствах, которые эта сеть заимствует у динамических систем и у биологических нейросетей. От динамических систем мы берём (на данный момент) следующие свойства: а) колебательные (предельный цикл) и возбудимые состояния динамической системы (БЖ осциллятор в нашем случае); б) настраиваемые пороги для возбуждения ячеек, находящихся в ждущем режиме; в) кластеризация ансамблей почти одинаковых связанных осцилляторов; г) мультистабильность или мультиритмичность, что равносильно наличию нескольких устойчивых аттракторов. Заметим, что мультистабильность присуща и нейросетям, причём есть мнение, что временные задержки в нейросетях способствуют созданию мультистабильности [176]; д) переключения между устойчивыми аттракторами под действием коротких внешних импульсов; е) наличие аттракторов допускает некоторую "неточность" как при переключениях между аттракторами, так и при восприятии внешней информации.

В нашем случае внешний сигнал (т.е. информация) активирует один из возможных аттракторов приёмного устройства (антенны), которое изначально находится в стационарном ждущем режиме. Наша антенна не работает как фотоаппарат и не запоминает все детали внешнего сигнала. Напротив, внешний сигнал преобразуется в антенне в один из возможных аттракторов, к которому этот сигнал наиболее близок. Чем больше в антенне содержится аттракторов, тем точнее должно быть восприятие внешнего сигнала.

Из биологических принципов организации нейросетей мы используем следующие: а) иерархичность сети; б) сжатие исходной информации; в) замена исходного внешнего сигнала его образом, аналогично тому как слово в нашем сознании заменяет реальные объекты и действия; г) обратные связи; д) однонаправленность потока информации между некоторыми блоками, что достигается использованием импульсных связей; е) энергосбережение за счёт использования спайковых осцилляторов; ж) взаимное ингибирование нейронов (ячеек), которые не должны работать одновременно.

Собрав вместе все блоки, описанные выше, мы получаем схему "химического мозга". В данном случае это сеть импульсно связанных МО, имитирующая приспо-

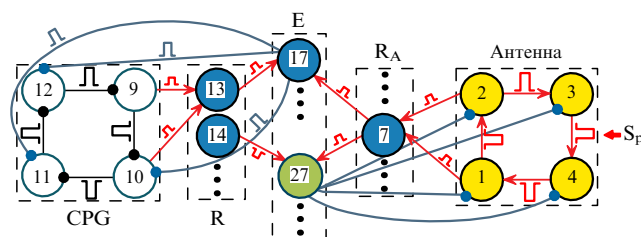


Рис. 11. (В цвете онлайн.) Блок-схема "химического мозга". Блок антенна включает в себя возбудимые ячейки № 1–№ 4. Блок ридер для антенны (R_A) состоит из возбудимых ячеек № 5–№ 8 (нарисована только ячейка № 7). Блок CPG состоит из осцилляторов № 9–№ 12. Ридер для CPG, R, состоит из возбудимых ячеек № 13–№ 16. Возбудимые ячейки № 17–№ 30 образуют блок E (executer). Ингибиторные импульсы обозначены отрезками или дугами с маленькими кружочками на конце, в то время как активаторные импульсы прорисованы отрезками со стрелками на конце. S_p обозначает внешние сигналы (импульсы), способные поступать на любую ячейку антенны [62].

собляемость (т.е. адаптацию) к внешним сигналам [62, 77]. Схема изображена на рис. 11.

Блок CPG состоит из четырёх БЖ МО, связанных по кругу ингибиторными импульсными связями. Такая топология CPG позволяет ему обладать четырьмя устойчивыми регулярными модами, показанными на рис. 10. Блок антенны также состоит из четырёх БЖ микроячеек, находящихся в возбудимом состоянии. Они соединены также по кругу, но активаторными импульсными связями. Этот блок также обладает теми же четырьмя устойчивыми регулярными модами, показанными на рис. 10. Совпадение числа мод блоков CPG и антенны сделано специально, чтобы не возникало проблемы выбора перед блоком CPG, какой моде антенны следует подражать. Ридеры R и R_A считывают состояние текущих мод блоков CPG и антенны соответственно. В каждом ридере активируется только одна ячейка.

Для определённости рассмотрим случай, когда в антенне возникла AP мода (таков был внешний сигнал S_p), и в ридере R_A активировалась, соответственно, только одна ячейка № 7, а в блоке CPG текущей модой является IP мода, и в ридере R активна только одна ячейка № 13, настроенная на моду IP. Мы будем считать, что наш "химический мозг" ведёт себя разумно, если текущая мода блока CPG всегда соответствует моде антенны, т.е. внутреннее состояние устройства, за которое отвечает CPG, всегда подстраивается к внешним условиям, регистрируемым антенной. Для рассмотренного конкретного случая наше устройство должно выполнить переключение IP → AP.

Для выполнения переключений существует блок E (executer — исполнитель) [61, 62], который должен уметь переключать любую из четырёх мод блока CPG в одну из других трёх мод по требованию антенны. Все ячейки блока E находятся в ждущем режиме и могут быть активированы как минимум от двух одновременно пришедших импульсов. Каждая ячейка блока E, будучи активированной, посылает на CPG три импульса (на ячейки № 10–№ 12), осуществляющие переключение между заданными модами. Соответственно, наборы этих импульсов различны для разных переходов. Для осуществления рассматриваемого IP → AP перехода только одна ячейка блока E, ячейка № 17, должна активироваться от активных ячеек № 7 и № 13.

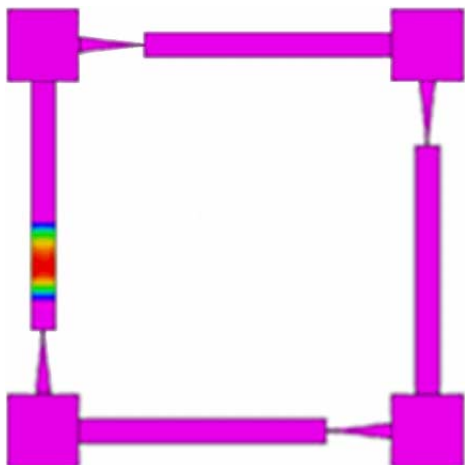


Рис. 12. (В цвете онлайн.) Четыре микроосциллятора (изображены небольшими квадратиками в углах большой квадратной конструкции) соединены микроканалами специальной формы, которая обеспечивает однонаправленность распространяющихся по каналам химических волн. Область с максимальной концентрацией катализатора в левом канале, по которому бежит волна, отмечена красным цветом.

Как только переход $IP \rightarrow AP$ произошёл, в блоке R активируется другая ячейка, № 14, ответственная за регистрацию AP моды. Теперь две активные ячейки № 14 и № 7 активируют другую ячейку в блоке E, ячейку № 27. Эта ячейка (как и аналогичные ячейки № 28 – № 30) предназначена для того, чтобы вернуть антенну в стационарный ждущий режим путём отправки на ячейки антенны ингибирующих импульсов. Таким образом, операция переключения завершается и устройство готово к принятию новых внешних сигналов.

В настоящее время схема, представленная на рис. 11, уже реализована экспериментально [62], но импульсные связи между ячейками осуществляются посредством облучения микроячеек сфокусированными лучами света, которые поступают от проектора, управляемого компьютером. Поэтому общий размер устройства задаётся размерами микроскопа, компьютера и проектора. Однако от всех этих крупногабаритных приборов можно отказаться, если импульсные связи между ячейками реализовывать точно так же, как в нейронах, т.е. посредством химических волн, распространяющихся по узким каналам, как показано на рис. 12. Такой способ соединения МО обеспечивает в блоках CPG и антенне все моды, найденные ранее для оптической импульсной связи.

9. Принятие решений

Для того чтобы рассматриваемая сеть МО больше походила на "химический мозг", она должна не только адаптироваться к внешним условиям по ранее заданной программе, как в случае схемы на рис. 11, но и самостоятельно принимать решения. Проблеме принятия решений искусственно созданным устройством посвящено огромное количество работ. Одних обзоров, опубликованных за последние три года, насчитывается более 12 тысяч (по данным Web of Science). Поэтому мы приводим здесь лишь относительно новые обзоры (ссылки), которые показались нам интересными, важными и близкими к нашему подходу по созданию

"разумного" устройства на основе сетей связанных активных элементов [177 – 192].

Принятие решения зависит от многих факторов: от текущего состояния системы (индивида), причём как физического, так и эмоционального; от информации о ранее приобретённом опыте (память); от представлений о будущем; от социальных связей; от случайности, наконец. Относительно маленький мозг дрозофилы (около 100 тыс. нейронов) интегрирует в своей центральной части информацию с очень многих (периферических) участков мозга для принятия решения о направлении движения этой мушки [181]. Как принимаются решения в условиях неопределённости окружающего мира и как работают Байесовские (Bayesian) модели принятия решений, обсуждается в обзорах [182, 188] и [187] соответственно. Влиянию ценности информации (Value of Information) на принятие решения в условиях внешней неопределённости и множественности различных решений посвящены обзоры [179, 190]. Проблема влияния эмоций на принятие решений и роль награды на процесс обучения и принятия решений обсуждается в обзорах [185, 189] соответственно, причём в последнем обзоре это делается на уровне конкретных нейронов и нейросетей. Проблеме выбора единственно верного решения из большого числа возможностей посвящён обзор [178], причём авторы утверждают, что им удалось вычленишь шесть канионических биологически правдоподобных схем нейронов (минисетей), которые являются универсальными при решении подобных задач.

Как использовать последние достижения искусственных нейросетей в решении проблем нейронаук, обсуждается в обзоре [183]. Взаимосвязь между искусственным и естественным интеллектом также обсуждается в обзоре [184], но на примере решения мультимасштабных задач, когда учитываются события на малых и больших пространственных и временных масштабах.

Пытаясь переосмыслить и упростить огромный объём информации по механизмам принятия решений применительно к разрабатываемому нами "химическому мозгу", мы предложили простейшую схему этого "мозга", представленную на рис. 13. Во-первых, рис. 13а постулирует, что вся информация о внутреннем состоянии "химического мозга", которое выражается модами блока CPG, и о внешних (входных) сигналах, выражающаяся модами антенны, поступает на блок принятия решений DM опосредованно через ридеры R и R_A . Для простоты рассматриваемой сети блок CPG имеет всего два состояния (две моды): синфазные и противофазные колебания. Антенна также имеет всего два устойчивых аттрактора (IP и AP).

Решение о том, стоит ли блоку CPG соответствовать моде в антенне, принимается блоком DM, обозначенным жёлтым квадратом как на рис. 13а, так и на рис. 13б. Способ доведения этого решения до исполняющего блока E реализуется ячейками № 11 – № 16, показанными на рис. 13б. Предположим, что в антенне возникла мода IP (активна ячейка № 7), а в блоке CPG существует мода AP (активна ячейка № 4). По каким-то соображениям блок DM решил, что надо принять внешнюю моду. Тогда он активирует ячейку "Pro" (за) (ячейка № 11), которая благодаря самоактивации будет в дальнейшем поддерживать в себе спайковые колебания. Две активные (колеблющиеся) ячейки № 11 и № 7 должны активировать ячейку № 13, что происходит, если импульсы от этих

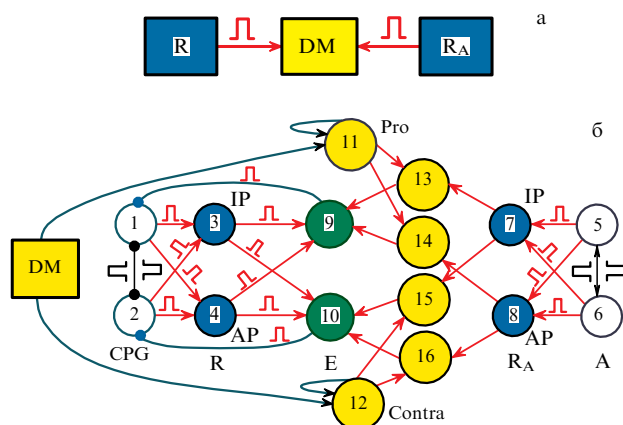


Рис. 13. (В цвете онлайн.) (а) Информация от ридеров R и R_A поступает в блок принятия решений DM (Decision Making). (б) Детализация сигналов между ячейками блоков "химического мозга". Блок CPG состоит из микроосцилляторов № 1 и № 2. Ридер этого блока представлен ячейками № 3 и № 4. Если в CPG установилась IP мода, то периодические спайки начинает генерировать ячейка № 3. Если же в CPG установилась AP мода, то периодические спайки начинает генерировать ячейка № 4. Антенна состоит из ячеек № 5 и № 6, а ридер антенны — ячейки № 7 и № 8. Зелёные ячейки № 9 и № 10 представляют собой исполняющий блок E, который будет (или не будет) переключать блок CPG в другую моду. Блок DM (жёлтый цвет) разделён на две части: скрытую, представленную квадратом DM на рис. а и б, и явную — ячейки № 11–№ 16.

ячеек приходят на ячейку № 13 одновременно. Далее, две активные ячейки № 4 и № 13 активируют ячейку № 9, которая и переключает блок CPG из AP моды в синфазную моду. Аналогичные рассуждения можно провести и для остальных трёх комбинаций между модами AP и IP в блоках CPG и антенна.

Устройство же блока DM может быть достаточно сложным. В простейших случаях блок DM для принятия решения может вызывать из памяти информацию о предыдущих переключениях или просто принимать решения случайно. Решения могут приниматься путём сравнения в блоке DM информации от двух (и более) антенн (от различных источников информации), которые реагируют на внешний сигнал по-разному, давая блоку принятия решений пищу для анализа. Мы полагаем, что конструирование блока DM должно проходить на основе обширной информации, содержащейся в приведённых выше обзорах [177–192], и в сотрудничестве с консультантом-нейрофизиологом, который мог бы оценить "биологичность" той или иной схемы.

В заключении данного раздела поясним, почему информация о внешних и внутренних процессах поступает на наш блок DM не напрямую от антенны и блока CPG, а от ридеров. Дело в том, что активные ячейки ридеров выполняют роль названий (имён) той или иной моды. Фактически ячейки ридеров вводят символичный язык, которым можно пользоваться даже в том случае, когда основные блоки: антенна и CPG — отключены (спят). Представим себе, что от блока DM (или от каких-либо иных блоков) могут поступать активирующие импульсы на ридеры R или R_A , как это показано на рис. 14. Тогда эти блоки могут "ожить" и заменить собой реальные сигналы. Это даёт возможность всей системе "проиграть в уме" возможные последствия принятия того

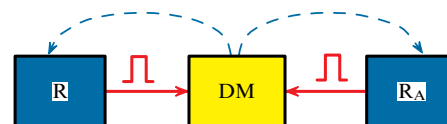


Рис. 14. (В цвете онлайн.) Информация от ридеров R и R_A поступает в блок принятия решений DM, а блок DM в свою очередь может активировать ячейки в ридерах.

или иного решения. Другими словами, это возможность предвидеть будущее.

10. Заключение

В своей книге "Автономный искусственный интеллект" А.А. Жданов пишет, что бестелесный искусственный интеллект принципиально отличается от реального интеллекта, носителем которого является живой организм [193]. В данном обзоре мы описали основные принципы работы "химического мозга", которые отчасти заимствованы у живых организмов, обладающих нервной системой. Таким образом, наш подход к созданию "химического мозга" чем-то схож с подходом А.А. Жданова, хотя у него нет никаких химических МО. Отличием нашего "химического мозга" от всех других ИИ является то, что "химический мозг" не будет нуждаться в электричестве, а сможет работать только на химическом топливе.

Кроме того, наш "химический мозг" является динамической системой (сетью связанных осцилляторов и возбудимых ячеек) и потому широко использует принципы нелинейной динамики, чего не делают другие ИИ. Мы используем динамические моды сетей и подсетей связанных осцилляторов для запоминания информации, для символического языка при информационном обмене между различными динамическими блоками "химического мозга", для самоопределения системой своего состояния и для принятия решений. Но многое пока ещё не используется. Например, дополнительные возможности при включении диффузионных связей между соседними осцилляторами [152] или такие методы кластеризации и синхронизации всей системы, как отрицательная глобальная связь [194], пока не использованы. Наверное, "химический мозг" станет совершеннее, если в нём будут использованы и достижения ИИ по распознаванию образов. Но первые успешные шаги по созданию "химического мозга", способного адаптироваться к внешним сигналам [62, 77], позволяют надеяться на плодотворное развитие этого нового направления.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-11-50011). Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность организаторам Программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта, благодаря которой возникла сама идея написания данного обзора.

Список литературы

1. Raychowdhury A et al. *Proc. IEEE* **107** 73 (2019)
2. Parrilla-Gutierrez J M et al. *Nat. Commun.* **11** 1442 (2020)
3. Жаботинский А М *ДАН СССР* **157** (2) 392 (1964)

4. Белоусов Б П, в сб. *Сборник рефератов по радиационной медицине за 1958 г.* (Под ред. А В Лебединского) (М.: Медгиз, 1959) с. 145
5. Nicolis G, Prigogine I *Self-Organization in Nonequilibrium Systems* (New York: Wiley-Interscience, 1977)
6. Prigogine I, Lefever R J. *Chem. Phys.* **48** 1695 (1968)
7. Gray P, Scott S K *Chemical Oscillations and Instabilities: Non-linear Chemical Kinetics* (Oxford: Clarendon Press, 1990)
8. Epstein I R, Pojman J A *An Introduction to Nonlinear Chemical Dynamics* (New York: Oxford Univ. Press, 1998)
9. Field R J, Burger M *Oscillations and Traveling Waves in Chemical Systems* (New York: Wiley, 1985)
10. Epstein I R, Showalter K J. *Phys. Chem.* **100** 13132 (1996)
11. Иваницкий Г Р, Кринский В И, Сельков Е Е *Математическая биофизика клетки* (М.: Наука, 1978)
12. Ivanitsky G R, Krinsky V I, Zaikin A N, Zhabotinsky A M *Biol. Rev. D* **2** 279 (1981)
13. Krinsky V I (Ed.) *Self-Organization: Autowaves and Structures Far from Equilibrium: Proc. of an Intern. Symp., Pushchino, USSR, July 18–23, 1983* (Springer Series in Synergetics, Vol. 28) (Berlin: Springer-Verlag, 1984)
14. Lengyel I, Rábai G, Epstein I R *J. Am. Chem. Soc.* **112** 4606 (1990)
15. Luo Y, Epstein I R *J. Am. Chem. Soc.* **113** 1518 (1991)
16. Rábai G, Orban M, Epstein I R *J. Phys. Chem.* **96** 5414 (1992)
17. Lee K J et al. *Science* **261** 192 (1993)
18. Edblom E C et al. *J. Am. Chem. Soc.* **109** 4876 (1987)
19. Edblom E C et al. *J. Phys. Chem.* **93** 2722 (1989)
20. Boissonade J, De Kepper P J. *Phys. Chem.* **84** 501 (1980)
21. Field R J, Noyes R M *J. Chem. Phys.* **60** 1877 (1974)
22. Epstein I R, Luo Y J. *Chem. Phys.* **95** 244 (1991)
23. Marsden J E, McCracken M *The Hopf Bifurcation and its Applications* (New York: Springer-Verlag, 1976)
24. Nosztczius Z e al. *Nature* **329** 619 (1987)
25. Castets V et al. *Phys. Rev. Lett.* **64** 2953 (1990)
26. Ouyang Q, Swinney H L *Nature* **352** 610 (1991)
27. Turing A M *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B* **237** 37 (1952)
28. Zaikin A N, Zhabotinsky A M *Nature* **225** 535 (1970)
29. Perez-Munuzuri V et al. *Nature* **353** 740 (1991)
30. Zhou L, Ouyang Q *Phys. Rev. Lett.* **85** 1650 (2000)
31. Ouyang Q, Flesselles J M *Nature* **379** 143 (1996)
32. Ванар В К *УФН* **174** 991 (2004); Vanag V K *Phys. Usp.* **47** 923 (2004)
33. Vanag V K, Epstein I R *Science* **294** 835 (2001)
34. Vanag V K, Epstein I R *Phys. Rev. Lett.* **88** 088303 (2002)
35. Vanag V K, Epstein I R *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **100** 14635 (2003)
36. Vanag V K, Epstein I R *Chaos* **17** 037110 (2007)
37. Bansagi T, Vanag V K, Epstein I R *Science* **331** 1309 (2011)
38. Vanag V K, Epstein I R *Phys. Rev. Lett.* **87** (2001)
39. Vanag V K, Epstein I R *Phys. Rev. E* **71** 066212 (2005)
40. Toiya M, Vanag V K, Epstein I R *Angew. Chem. Int. Ed.* **47** 7753 (2008)
41. Toiya M, Gonzalez-Ochoa H O, Vanag V K, Fraden S, Epstein I R *J. Phys. Chem. Lett.* **1** 1241 (2010)
42. Maselko J, Showalter K *Nature* **339** 609 (1989)
43. Totz J F et al. *Phys. Rev. E* **92** 022819 (2015)
44. Totz J F et al. *Nat. Phys.* **14** 282 (2018)
45. Wilson D et al. *Chaos* **28** 123114 (2018)
46. Taylor A F et al. *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **165** 137 (2008)
47. Taylor A F et al. *Science* **323** 614 (2009)
48. Taylor A F et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* **50** 10161 (2011)
49. Tompkins N et al. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **111** 4397 (2014)
50. Vanag V K, Epstein I R *Engineering of Chemical Complexity II* (Singapore: World Scientific, 2014) Ch. 10
51. Litschel T et al. *Lab Chip* **18** 714 (2018)
52. Norton M M et al. *Phys. Rev. Lett.* **123** 148301 (2019)
53. Gorecki J, Gorecka J N, Adamatzky A *Phys. Rev. E* **89** 042910 (2014)
54. Gorecki J *Entropy* **22** 313 (2020)
55. Adamatzky A *Philos. Trans. R. Soc. B* **374** 20180372 (2019)
56. Torbensen K et al. *J. Phys. Chem. C* **121** 13256 (2017)
57. Budroni M A et al. *J. Phys. Chem. Lett.* **11** 2014 (2020)
58. Yoshikawa K, Aihara R, Agladze K J. *Phys. Chem. A* **102** 7649 (1998)
59. Gorecki J, Yoshikawa K, Igarashi Y *J. Phys. Chem. A* **107** 1664 (2003)
60. Hamada T e al. *Langmuir* **21** 7626 (2005)
61. Smelov P S, Proskurkin I S, Vanag V K *Phys. Chem. Chem. Phys.* **21** 3033 (2019)
62. Proskurkin I S, Smelov P S, Vanag V K *Phys. Chem. Chem. Phys.* **22** 19359 (2020)
63. Мальфанов И Л, Ванар В К *Ученые химию* **90** 1263 (2021); Mallphanov I L, Vanag V K *Russ. Chem. Rev.* **90** 1263 (2021)
64. Horvath V et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* **51** 6878 (2012)
65. Horvath V et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17** 4664 (2015)
66. Ke H et al. *Phys. Rev. E* **89** 052712 (2014)
67. Kuramoto Y *Int. J. Bifurcat. Chaos* **7** 789 (1997)
68. Kuramoto Y *Physica D* **50** 15 (1991)
69. Kuramoto Y, Battogtokh D *Nonlin. Phenom. Complex Syst.* **5** 380 (2002)
70. Winfree A T *J. Theor. Biol.* **16** 15 (1967)
71. Kuramoto Y, in *Intern. Symp. on Mathematical Problems in Theoretical Physics, January 23–29, 1975, Kyoto Univ., Kyoto, Japan* (Lecture Notes Physics, Vol. 39, Ed. H Araki) (Berlin: Springer, 1975) p. 420
72. Hubel D H, Wiesel T N *J. Physiol.* **148** 574 (1959)
73. Hodgkin A L, Huxley A F *Proc. R. Soc. Lond. B* **140** 177 (1952)
74. Sakaguchi H, Kuramoto Y *Prog. Theor. Phys.* **76** 576 (1986)
75. Vanag V K, Smelov P S, Klinshov V V *Phys. Chem. Chem. Phys.* **18** 5509 (2016)
76. Watts D J, Strogatz S H *Nature* **393** 440 (1998)
77. Vanag V K *Chaos* **29** 083104 (2019)
78. Bargmann C I, Marder E *Nat. Meth.* **10** 483 (2013)
79. Bargmann C I *Bioessays* **34** 458 (2012)
80. Vanag V K, Epstein I R *Phys. Rev. E* **84** 066209 (2011)
81. Клиньшов В В, Некоркин В И *УФН* **183** 1323 (2013); Klinshov V V, Nekorkin V I *Phys. Usp.* **56** 1217 (2013)
82. Масленников О В, Некоркин В И *УФН* **187** 745 (2017); Maslennikov O V, Nekorkin V I *Phys. Usp.* **60** 694 (2017)
83. Gencay R, Liu T *Physica D* **108** 119 (1997)
84. Rosenblatt F "The perceptron — a perceiving and recognizing automaton", Report 85-460-1 (Buffalo, NY: Cornell Aeronautical Laboratory, 1957)
85. Rosenblatt F *Psycholog. Rev.* **65** 386 (1958)
86. Ermentrout B, Park Y, Wilson D *Philos. Trans. R. Soc. A* **377** 20190092 (2019)
87. Bassett D S, Sporns O *Nat. Neurosci.* **20** 353 (2017)
88. Bassett D S, Zurn P, Gold J I *Nat. Rev. Neurosci.* **19** 566 (2018)
89. Bassett D S, Khambhati A N, Grafton S T *Annu. Rev. Biomed. Eng.* **19** 327 (2017)
90. Markram H *Sci. Am.* **306** (5) 50 (2012)
91. Sporns O *Neuroimage* **80** 53 (2013)
92. Alivisatos A P et al. *Neuron* **74** 970 (2012)
93. White J G et al. *Philos. Trans. R. Soc. B* **314** 1 (1986)
94. Marder E, Taylor A L *Nat. Neurosci.* **14** 133 (2011)
95. Milo R et al. *Science* **298** 824 (2002)
96. Kopell N J et al. *Neuron* **83** 1319 (2014)
97. Calhoun V D et al. *Neuron* **84** 262 (2014)
98. Marder E *Neuron* **76** 1 (2012)
99. Касаткин Д В, Некоркин В И *Изв. вузов. Радиофизика* **58** 981 (2015); Kasatkin D V, Nekorkin V I *Radiophys. Quantum Electron.* **58** 877 (2016)
100. Botella-Soler V, Glendinning P *Phys. Rev. E* **89** 062809 (2014)
101. Maistrenko Y L et al. *Phys. Rev. E* **75** 066207 (2007)
102. van den Heuvel M P, Sporns O *Trends Cognitive Sci.* **17** 683 (2013)
103. Chaudhuri R et al. *Neuron* **88** 419 (2015)
104. Hernandez A, Amigo J M *Eur. Phys. J. Spec. Top.* **227** 1039 (2018)
105. Ashwin P, Coombes S, Nicks R *J. Math. Neurosci.* **6** 2 (2016)
106. Maass W *Neural Networks* **10** 1659 (1997)
107. Клиньшов В В *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика* **28** (5) 465 (2020)
108. Tan C, Sarlija M, Kasabov N *Neural Proc. Lett.* **52** 1675 (2020)
109. Kiselev M V *Comput. Res. Model.* **12** 401 (2020)
110. TrueNorth (2021), <https://www.research.ibm.com/articles/brainchip.shtml>
111. Kuramoto Y, Nakao H *Philos. Trans. R. Soc. A* **377** 20190041 (2019)

112. Pietras B, Daffertshofer A *Phys. Rep.* **819** 1 (2019)
113. Majhi S et al. *Phys. Life Rev.* **28** 100 (2019)
114. Kim R, Sejnowski T J *Nat. Neurosci.* **24** 129 (2021)
115. Stockel A, Eliasmith C *Neural Computat.* **33** 96 (2021)
116. Kim J et al. *Neurocomputing* **428** 153 (2021)
117. Demin V A et al. *Neural Networks* **134** 64 (2021)
118. She X Y et al. *Front. Neurosci.* **14** 615756 (2021)
119. Xing Y N, Di Caterina G, Soraghan J *Front. Neurosci.* **14** 590164 (2020)
120. Li X M, Yi H, Luo S Y *Neural Plasticity* **2020** 8851351 (2020)
121. Lu S, Sengupta A *Front. Neurosci.* **14** 535 (2020)
122. Field R J, Körös E, Noyes R M *J. Am. Chem. Soc.* **94** 8649 (1972)
123. Kuhnert L *Nature* **319** 393 (1986)
124. Kádár S, Amemiya T, Showalter K *J. Phys. Chem. A* **101** 8200 (1997)
125. Kaminaga A, Mori Y, Hanazaki I *Chem. Phys. Lett.* **279** 339 (1997)
126. Ваняг В К *Диссипативные структуры в реакционно-диффузионных системах* (М.: RandC Dynamics, 2008)
127. Taylor A F *Prog. React. Kinet. Mec.* **27** 247 (2002)
128. Hudson J L, Hart M, Marinko D *J. Chem. Phys.* **71** 1601 (1979)
129. Marchettini N et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12** 11062 (2010)
130. Turner J S et al. *Phys. Lett. A* **85** 9 (1981)
131. Nkomo S, Tinsley M R, Showalter K *Phys. Rev. Lett.* **110** 244102 (2013)
132. Tinsley M et al. *Physica D* **239** 785 (2010)
133. Taylor A F, Tinsley M R, Wang F, Huang Z, Showalter K *Science* **323** 614 (2009)
134. Taylor A F, Tinsley M R, Showalter K *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17** 20047 (2015)
135. Markovic V M et al. *Chaos* **29** 033130 (2019)
136. Mallphanov I L, Vanag V K *J. Phys. Chem. A* **124** 272 (2020)
137. Delgado J et al. *Soft Matter* **7** 3155 (2011)
138. Lavrova A I, Vanag V K *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16** 6764 (2014)
139. Проскуркин И С, Ваняг В К *Журн. физ. химии* **89** 340 (2015); Proskurkin I S, Vanag V K *Russ. J. Phys. Chem. A* **89** 331 (2015)
140. Смелов П С, Ваняг В К *Журн. физ. химии* **91** 963 (2017); Smelov P S, Vanag V K *Russ. J. Phys. Chem. A* **91** 1015 (2017)
141. Safonov D A, Klinshov V, Vanag V K *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19** 12490 (2017)
142. Horvath V, Epstein I R *Chaos* **28** 045108 (2018)
143. Proskurkin I S, Smelov P S, Vanag V K *Chemphyschem* **20** 2162 (2019)
144. Murray J D *Mathematical Biology I. An Introduction* (New York: Springer, 2002)
145. DDE (2021), http://www.scholarpedia.org/article/Delay-differential_equations
146. Ваняг В К "Связанные химические осцилляторы", в сб. *Нелинейные волны 2016* (Под. ред. А М Сергеева, А В Слюняева) (Н. Новгород: ИПФ РАН, 2017) с. 263
147. Achuthan S, Canavier C C *J. Neurosci.* **29** 5218 (2009)
148. Canavier C C, Achuthan S *Math. Biosci.* **226** 77 (2010)
149. Proskurkin I S, Lavrova A I, Vanag V K *Chaos* **25** 064601 (2015)
150. Proskurkin I S, Vanag V K *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17** 17906 (2015)
151. Crowley M F, Epstein I R *J. Phys. Chem.* **93** 2496 (1989)
152. Safonov D A, Vanag V K *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20** 11888 (2018)
153. Abrams D M, Pecora L M, Motter A E *Chaos* **26** 094601 (2016)
154. Feudel U, Pisarchik A N, Showalter K *Chaos* **28** 033501 (2018)
155. Рабинович М И, Мюезинолу М К *УФН* **180** 371 (2010); Rabinovich M I, Muezzinoglu M K *Phys. Usp.* **53** 357 (2010)
156. Rabinovich M I, Afraimovich V S, Varona P *Dyn. Syst. Int. J.* **25** 433 (2010)
157. Rabinovich M I et al. *Front. Computat. Neurosci.* **8** 22 (2014)
158. Rabinovich M I et al. *Phys. Life Rev.* **9** 51 (2012)
159. Rabinovich M I, Varona P *Front. Computat. Neurosci.* **5** 24 (2011)
160. Neves F S, Timme M *J. Phys. A* **42** 345103 (2009)
161. Neves F S, Timme M *Phys. Rev. Lett.* **109** 018701 (2012)
162. Kirst C, Timme M, Battaglia D *Nat. Commun.* **7** 11061 (2016)
163. Smelov P S, Vanag V K *R. Soc. Open Sci.* **5** 171495 (2018)
164. Vanag V K, Yasuk V O *Chaos* **28** 033105 (2018)
165. Vanag V K *Chaos* **29** 033106 (2019)
166. Vanag V K *Chaos* **30** 013112 (2020)
167. Saha A, Feudel U *Chaos* **28** 033610 (2018)
168. Ryczko D, Simon A, Ijspeert A J *Trends Neurosci.* **43** 916 (2020)
169. Sanders R H, Levitin D J *Brain Sci.* **10** 215 (2020)
170. Mantziaris C, Bockemuehl T, Bueschges A *Develop. Neurobiol.* **80** 16 (2020)
171. Hachoumi L, Sillar K T *Develop. Neurobiol.* **80** 42 (2020)
172. Klinshov V, Nekorkin V *Commun. Nonlin. Sci. Num. Sim.* **83** 105067 (2020)
173. Buzsáki G *Neuron* **68** 362 (2010)
174. Brette R *Front. Syst. Neurosci.* **9** 151 (2015)
175. Buzsáki G, Freeman W *Current Opin. Neurobiol.* **31** v–ix (2015)
176. Asl M M, Valizadeh A, Tass P A *Sci. Rep.* **8** 12068 (2018)
177. ter Wal M et al. *Nat. Commun.* **11** 3075 (2020)
178. Mysore S P, Kothari N B *Elife* **9** e51473 (2020)
179. Busemeyer J R et al. *Trends Cognitive Sci.* **23** 251 (2019)
180. Bielczyk N Z et al. *Plos One* **14** e0211885 (2019)
181. Cheong H S J, Siwanowicz I, Card G M *Current Opin. Neurobiol.* **65** 77 (2020)
182. Monosov I E *Trends Neurosci.* **43** 795 (2020)
183. Yang G R, Wang X J *Neuron* **107** 1048 (2020)
184. Badman R P, Hills T T, Akaishi R *Brain Sci.* **10** 396 (2020)
185. Mendl M, Paul E S *Neurosci. Biobehavioral Rev.* **112** 144 (2020)
186. Tekulve J et al. *Front. Neurobotics* **13** 95 (2019)
187. Ma W J *Neuron* **104** 164 (2019)
188. Soltani A, Izquierdo A *Nat. Rev. Neurosci.* **20** 635 (2019)
189. Cox J, Witten I B *Nat. Rev. Neurosci.* **20** 482 (2019)
190. Bolam F C et al. *Biol. Rev.* **94** 629 (2019)
191. Zhdanov A et al. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* **47** 907 (2008)
192. Zhdanov A A *J. Comput. Syst. Sci. Int.* **38** 792 (1999)
193. Жданов А А *Автономный искусственный интеллект* (М.: Бином. Лаборатория знаний, 2020)
194. Proskurkin I S, Vanag V K *Phys. Chem. Chem. Phys.* **20** 16126 (2018)

Networks of spike oscillators and their application for creating autonomous intelligent devices

V.K. Vanag

Center for Nonlinear Chemistry, Immanuel Kant Baltic Federal University,
ul. A. Nevskogo 14, 236016 Kaliningrad, Russian Federation
E-mail: vvanag@kantiana.ru

Hierarchical networks of pulse-coupled chemical micro-oscillators (MOs) are considered. The Belousov–Zhabotinsky oscillatory reaction in a microvolume serves as a single MO. Biological principles of neural networks and the laws of nonlinear dynamics are used to operate the considered networks, which we call a ‘chemical brain.’ It has been shown that this ‘chemical brain’ is capable of adaptive behavior and decision-making.

Keywords: networks of spike micro-oscillators, Belousov–Zhabotinsky reaction, decision-making, ‘chemical brain’

PACS numbers: 07.05.Mh, **82.40.–g**, **84.35.+i**

Bibliography — 194 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **192** (5) 477–490 (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.05.038978>

Received 30 March 2021

Physica – Uspekhi **65** (5) (2022)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2021.05.038978>