

© 2022 г. И.С. ПРОСКУРКИН, канд. физ.-мат. наук  
(megavolt007@mail.ru),  
В.К. ВАНАГ, д-р. физ.-мат. наук (vvanag@kantiana.ru)  
(Центр нелинейной химии, Балтийский федеральный университет  
им. Иммануила Канта, Калининград)

## СЛУЧАЙНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В СЕТЯХ ИМПУЛЬСНО СВЯЗАННЫХ СПАЙКОВЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ<sup>1</sup>

Теоретически и экспериментально исследована иерархическая сеть импульсно связанных спайковых микроосцилляторов (МО), способная случайным образом реагировать на внешний сигнал. Сеть включает в себя блоки Антенна, Центральный Генератор Ритмов (ЦГР) и блок Принятия Решений (ПР). Внешний сигнал вызывает в Антенне противофазные или синфазные колебания входящих в Антенну микроячеек. ЦГР также обладает этими двумя колебательными модами. Какую моду принять блоку ЦГР в ответ на появление колебательной моды в Антенне, решает блок ПР. Благодаря своей конфигурации блок ПР принимает это решение случайно. В качестве МО используются микросферы с колебательной реакцией Белоусова–Жаботинского. Импульсные связи между МО осуществляются сфокусированными на МО лучами света.

*Ключевые слова:* спайковые микроосцилляторы, импульсные связи, сети, принятие решений, случайный выбор, реакция Белоусова–Жаботинского.

DOI: 10.31857/S0005231022060101, EDN: ADGWTB

### 1. Введение

Изучение сетей импульсно связанных спайковых осцилляторов приобрело в последние годы особую актуальность [1–11]. В качестве таких осцилляторов рассматриваются математические модели, электрические схемы и даже автоколебательные химические реакции [12–14]. Для изучения сетей спайковых<sup>2</sup> химических микроосцилляторов мы используем известную автокаталитическую реакцию Белоусова–Жаботинского (БЖ) [15, 16]. Реакция БЖ представляет собой окисление, как правило, малоновой кислоты (МА) броматом в кислой среде, причем этот процесс катализируется ионами металлов

<sup>1</sup> Данное исследование было поддержано из средств программы стратегического академического лидерства “Приоритет 2030” Балтийского федерального университета им. И. Канта.

<sup>2</sup> Спайком БЖ реакции называется резкий переход системы из состояния с преимущественно восстановленным катализатором в состояние с преимущественно окисленным катализатором и обратно — из окисленного в восстановленное состояние. Такой быстрый переход обеспечивается автокатализом.

или такими металло-комплексами, как ферроин,  $\text{Fe}(\text{phen})_3^{2+}$ , или  $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ , где phen – это 1,10-фенантролин, а bpy – это 2,2'-бипиридин. Динамика БЖ реакции подобна динамике нейронов. Поэтому построение сетей химических микроосцилляторов позволяет выявлять и исследовать свойства, присущие нейросетям мозга.

К настоящему времени нами исследована относительно небольшая иерархическая сеть импульсно связанных химических осцилляторов (от 30 до 50 микроосцилляторов), способная демонстрировать адаптивное поведение [17]. Сеть импульсно связанных БЖ-осцилляторов может обладать мультиритмичностью [18]. Эффекту мультиритмичности (или мультистабильности) даже посвящен специальный выпуск журнала Chaos [19]. Этот эффект мы используем для создания мультиритмичного Центрального Генератора Ритмов (ЦГР), контролирующего различные состояния (или моды) системы. Переключения между этими состояниями осуществляются специальными импульсами, которые формируются специальным блоком Принятия Решений (ПР) [20].

Помимо функциональных блоков ПР и ЦГР наша иерархическая сеть содержит два блока “Ридер” и блок Антенна. Антенна принимает внешние сигналы, которые ассоциируются Антенной с какой-либо модой, способной в ней возникнуть. Ридеры считывают текущие ритмы блоков ЦГР и Антенны и посылают информацию на блок ПР. Он в свою очередь сравнивает информационные сигналы от двух Ридеров и в случае несовпадения ритма ЦГР с ритмом Антенны посылает специальные импульсы на ЦГР, которые переключают его текущий ритм в другой ритм, аналогичный ритму Антенны. Используемый нами термин “иерархическая сеть” подразумевает, что одни блоки сети (например, Антенна) управляют динамикой других блоков сети (например, ЦГР). Полученные ранее результаты [17, 20] наметили перспективы создания сетей, способных выполнять более сложные задачи.

## 2. Принципиальное описание сети

В данной статье мы представляем новую схему иерархической нейроподобной сети БЖ осцилляторов и возбудимых ячеек (рис. 1), в которой старый ПР блок разделен на две части. Одну часть мы назвали блоком “Исполнитель” (ячейки № 9–№ 12), а для другой части сохранили старое название ПР (ячейки № 13, № 14, “Pro” и “Contra”). Но теперь новый блок ПР действительно принимает решения, а не выполняет команды, как это происходило в старом блоке ПР. Функции же исполнения команд отданы блоку “Исполнитель”. Для простоты мы упростили блоки ЦГР (осцилляторы № 1 и № 2) и Антенна (возбудимые ячейки № 5 и № 6). Теперь каждый из этих блоков состоит всего из двух ячеек и может иметь только два ритма: синфазные и противофазные колебания. Соответственно, и Ридеры этих блоков (“P” и  $P_A$ ) состоят только из двух возбудимых ячеек (Ридер “P” состоит из возбудимых ячеек № 3 и № 4, а ридер  $P_A$  представлен возбудимыми ячейками № 7 и № 8). Ячейки блока ЦГР (а также ячейки № 13 и № 14) находятся в колебательном

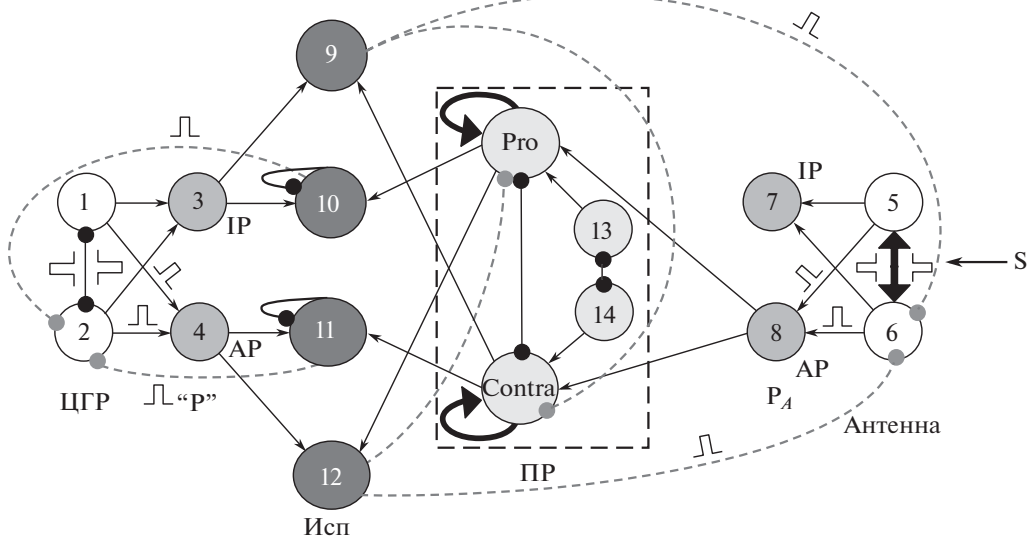


Рис. 1. Схема иерархической сети импульсно связанных спайковых осцилляторов и возбудимых ячеек, в которой реализуется случайный тип принятия решения. Обозначения: ЦГР – центральный генератор ритмов; Исп – блок Исполнитель; PR – блок Принятия Решений. Черными жирными стрелочками отмечены возбуждающие импульсы с амплитудой  $I$ , тонкими черными стрелочками – импульсы с амплитудой  $I/2$ . Связи с круглыми наконечниками – это ингибиторные импульсы. Черными сплошными и серыми пунктирными линиями обозначены ингибиторные связи внутри одного блока и между разными блоками соответственно. Подписи у ячеек Ридеров соответствуют определяемым ими ритмам, для IP (inphase) – синфазный, а для AP (antiphase) – противофазный. Чтобы не перегружать рисунок, в схеме прорисованы лишь те связи, которые необходимы для ее работы в случае возникновения в Антенне противофазного ритма.

режиме, а все остальные ячейки — в возбудимом состоянии с одинаковым порогом возбуждения.

Как правило, в живых системах принятие решения является сложным процессом, в который вовлечена обработка многих сигналов из разных частей мозга. Однако в некоторых случаях решение необходимо принять очень быстро, не имея возможности на анализ всей информации. В принятии решения в таком случае, как правило, присутствует случайный выбор [21]. На рис. 1 как раз и представлена сеть, предназначенная для случайного (в значении “равновероятного”) принятия решений.

Блок ЦГР может находиться в синфазном (IP) или противофазном ритме (AP). При поступлении внешнего импульса  $S$  на Антенну в ней также возникает IP или AP ритм, а Ридер  $P_A$  определяет возникший ритм (= моду). Если в Антенне возбудилась AP (IP) мода, то активируется ячейка № 8 (№ 7), которая с периодом противофазных или синфазных колебаний в Антенне (в зависимости от того, какая мода возбудилась в Антенне при приходе сигнала  $S$ )

посылает импульсы на блок ПР, точнее, на ячейки “Pro” и “Contra”. Для активации ячеек “Pro” и “Contra”, а также ячеек № 8, № 7, № 3 и № 4 на них должны одновременно прийти два импульса амплитудой  $I/2$ . Под словом “одновременно” понимается такая последовательность импульсов, профили которых в значительной степени пересекаются на временной шкале в момент их прихода на ячейку. В этом случае суммарная амплитуда возбуждающего сигнала достигает порогового значения  $I$ , при котором возбудимая ячейка генерирует спайк.

Чтобы каждая ячейка Ридера  $P_A$  активировалась в ответ на определенный ритм, два импульса от ячеек Антенны приходят на ячейки Ридера с разными фазами. На ячейку № 7 импульсы от ячеек № 5 и № 6 приходят без временных задержек. В этом случае ячейка № 7 возбуждается, если в Антенне установилась IP мода. На ячейку № 8 импульсы от ячеек № 5 и № 6 приходят с разностью фаз, равной половине периода противофазных колебаний  $T_{AP}$ . Поэтому ячейка № 8 возбуждается, если в Антенне установилась AP мода. Аналогичным образом работает Ридер “P” блока ЦГР.

Случайность принятия решения заключается в случайной активации ячеек “Pro” или “Contra”. Если случайно активируется ячейка “Pro”, то в блоке ЦГР должен установиться такой же внутренний ритм, как и в Антенне. И наоборот, если случайно активируется ячейка “Contra”, то в блоке ЦГР должен установиться ритм, противоположный ритму Антенны. Блок Исполнитель выполняет всю “техническую” работу по установлению нужного ритма в ЦГР. Ячейки блока Исполнитель активируются только при одновременном приходе на них двух импульсов: одного от одной из ячеек Ридера “P”, а другого от одной из ячеек блока ПР. Если одна из ячеек № 10 или № 11 активировалась, то Исполнитель отправляет переключающий сигнал на блок ЦГР, изменяя его ритм на ритм, аналогичный или противоположный ритму Антенны, в зависимости от того, активна ячейка “Pro” или “Contra”.

В качестве примера работы блока Исполнитель рассмотрим случай, когда активны ячейки “Pro” и № 3. Одновременный приход двух импульсов от ячеек “Pro” и № 3 на ячейку № 10 возбуждает ее. В активированной ячейке № 10 рождается спайк и ячейка № 10 отправляет на ячейку № 2 блока ЦГР переключающий ингибиторный импульс. Этот импульс переключает синфазную моду ЦГР в противофазную, а родившаяся в ЦГР AP мода регистрируется ячейкой № 4 Ридера “P”. Так как переключающий импульс, отправленный на ячейку № 2, имеет временную задержку, превышающую периоды ритмов в блоках ЦГР и Антенна, то за это время задержки ячейка № 10 может сгенерировать второй спайк, что нарушает правильную работу сети. Поэтому для ячейки № 10 (это же относится и к ячейке № 11) дополнительно введено импульсное самоингибирование, что позволяет ячейке № 10 оставаться какое-то время после первого спайка нечувствительной к возбуждающим импульсам.

Случайный выбор принятия решения реализуется через совпадение двух независимых событий, а именно: прихода на ячейки “Pro” и “Contra” двух импульсов возбуждения от других, не синхронизованных между собой осцилля-

торов, имеющих разные частоты. В качестве одного осциллятора выступает одна из ячеек Ридера  $P_A$  (например, ячейка № 8, если в Антенне установилась AP мода). А в качестве второго осциллятора выступает один из осцилляторов пары импульсно связанных ингибиторной связью осцилляторов № 13 и № 14. Благодаря правильно подобранным параметрам ингибиторной связи эти осцилляторы колеблются в противофазе. Осциллятор № 13 посылает импульсы на ячейку “Pro”, а осциллятор № 14 — на ячейку “Contra”, которые приходят на эти ячейки в противофазе, т.е. в разные моменты времени. Второй импульс, необходимый для активации ячеек “Pro” и “Contra”, поступает от осциллятора № 8 (в случае AP моды в Антенне). Заметим, что осциллятор № 8 начинает работать в случайный момент времени, определяемый случайным моментом прихода на Антенну внешнего импульса S. Поэтому одновременный приход двух возбуждающих импульсов на ячейку “Pro” или “Contra” является случайным событием.

Если одна из ячеек “Pro” или “Contra” возбудилась (что равносильно принятию решения), то нужно эту возбужденную ячейку перевести в колебательную моду, которая должна существовать некоторое время до момента исполнения принятого решения. Поэтому мы вводим для ячеек “Pro” и “Contra” дополнительные возбуждающие импульсы самоактивации с амплитудой  $I$ , которые периодически вызывают спайки в этих ячейках после первой их активации. Период самоактивации ячеек “Pro” и “Contra”, который определяется временем задержки импульса самоактивации, подобран так, чтобы он был приблизительно равен периоду синфазных колебаний в блоке Антенна. Если возбудилась одна из ячеек “Pro” или “Contra”, то активация второй ячейки должна стать невозможной. Для выполнения этого условия мы вводим между ячейками “Pro” и “Contra” двустороннюю импульсную ингибиторную связь большой амплитуды [22].

После того как все необходимые переключения завершены и случайно принятое решение выполнено, наша сеть должна вернуться в исходное состояние, в котором она была бы готова принимать новые случайные решения, т.е. все ячейки кроме ячеек блоков ЦГР, “P” и ячеек № 13 и № 14 должны оказаться в стационарном возбудимом состоянии. Эту работу выполняют ячейки № 9 и № 12, посылая ингибиторные импульсы на ячейки “Pro” и “Contra” блока ПР и на ячейку № 6 блока Антенна. Ингибиторные импульсы можно посылать и на ячейку № 5 блока Антенна, но это не имеет значения.

Возможен также вариант, когда возбуждаются ячейки “Pro” или “Contra”, а изначальный ритм блока ЦГР уже аналогичен или противоположен, соответственно, ритму Антенны. В этом случае переключения моды ЦГР не происходит. Вместо этого на Антенну и блок ПР отправляются от ячеек № 9 или № 12 ингибиторные импульсы обратных связей, которые возвращают эти блоки в их исходное состояние.

Таким образом, сеть импульсно связанных ячеек, представленная на рис. 1, получая внешний сигнал S, случайным образом решает, установить ли в ЦГР ритм, аналогичный или противоположный ритму Антенны.

### 3. Эксперимент

В качестве БЖ микроосцилляторов и возбудимых микроячеек мы используем микросферы ионообменной смолы Dowex<sup>®</sup> 50WX2 с иммобилизованным в них светочувствительным катализатором БЖ реакции,  $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$ , так называемые БЖ микросферы [23]. Метод приготовления микросфер Dowex 50WX2 с иммобилизованным  $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$  приведен в ссылке [24]. БЖ микросферы, имеющие средний диаметр около 100 микрометров (см. рис. 2), помещаются в обращенную микроэмульсию АОТ [24], наполненную всеми реагентами БЖ реакции, но без катализатора. Для приготовления АОТ микроэмульсии [24] в качестве непрерывной гидрофобной фазы использовался тетрадекан. Концентрация  $\text{Ru}(\text{bpy})_3^{2+}$  в микросферах была высчитана равной 3 мМ. Водные нанокapли АОТ микроэмульсии с БЖ реагентами постоянно подпитывают БЖ микросферы в силу диффузионного обмена содержимым между нанокapлями и БЖ микросферами.

При достаточно большом расстоянии между БЖ микросферами они ведут себя независимым образом. Мы помещали БЖ микросферы в реактор (см. рис. 2), в качестве которого служит склеенная из предметных стеклышек прямоугольная ванночка глубиной 1 мм. После наполнения БЖ микроэмульсией и БЖ микросферами ванночка накрывалась оптическим стеклом, чтобы предотвратить возможное испарение тетрадекана.

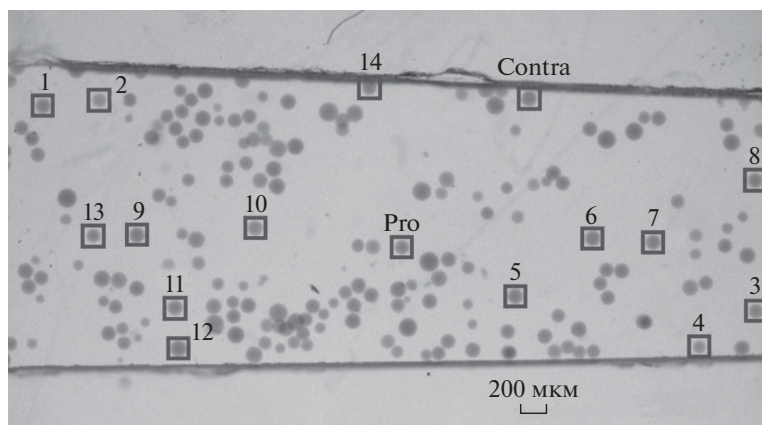


Рис. 2. Снимок используемых в эксперименте БЖ микросфер, находящихся в реакторе. Квадратными рамками отмечены границы областей облучения актиничным светом всех БЖ микросфер, используемых для реализации сети, представленной на рис. 1. Номера рядом с БЖ микросферами соответствуют номерам ячеек на схеме рис. 1. Не отмеченные номерами БЖ микросферы во время эксперимента находятся в колебательном состоянии и никак не влияют на динамику исследуемых БЖ микросфер из-за их удаленного расположения, исключая действие диффузионных связей. Две длинные черные линии на рисунке являются “верхней” и “нижней” границами реактора (правая и левая границы находятся за пределами рисунка).

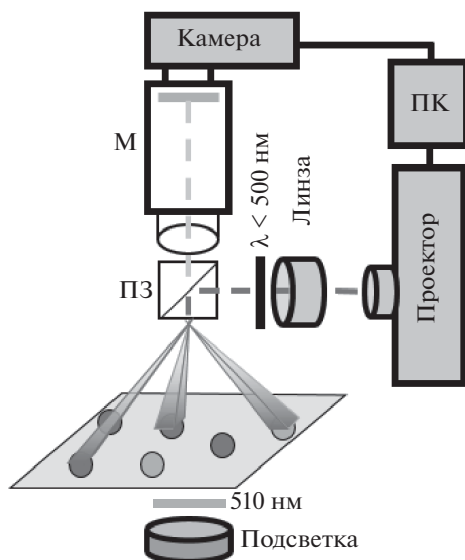


Рис. 3. Схема лабораторной установки. М – микроскоп; ПЗ – полупрозрачное зеркало с соотношением отражение/пропускание, равным 50/50; ПК – персональный компьютер. Серыми пластинками отмечены интерференционные фильтры с длиной волны  $\lambda = 510$  нм и шириной пропускания  $\Delta\lambda = 10$  нм. Черной пластинкой отмечен коротковолновый фильтр с границей отрезания на длине волны  $\lambda = 500$  нм. Серыми и светло-серыми шариками представлены БЖ микросферы в реакторе. Проектор преобразует динамическую маску, контролируруемую персональным компьютером, в лучи актиничного света, а линза фокусирует эти лучи на микросферы. Максимально возможная интенсивность актиничного света  $I_{\text{макс}} = 2,07$  клк (килолюкса). Анализирующий свет подсветки проходит сквозь микросферы и регистрируется камерой. Резкое увеличение яркости микросферы отмечается программой LabVIEW как спайк осциллятора.

Микроэмульсия АОТ описывается двумя физическими параметрами:  $\omega = [\text{H}_2\text{O}]/[\text{АОТ}]$  и объемной долей нанокაпелек  $\varphi_d$  [25]. Величина  $\omega$  определяет радиус водного ядра нанокაпелек  $R_w$  (нм) приблизительно как  $R_w \cong 0,17\omega$ . Для нашего случая  $\omega = 10$ , а  $\varphi_d = 0,45$ . Концентрации БЖ реагентов в водной псевдофазе АОТ микроэмульсии:  $[\text{МА}] = 0,36$  М,  $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 0,5$  М,  $[\text{NaBrO}_3] = 0,27$  М,  $[\text{NaBr}] = 0,07$  М, где МА – это малоновая кислота. Эти концентрации поддерживают в БЖ микросферах колебания с периодом около 40 с, которые являются устойчивыми на протяжении не менее 100 мин.

С помощью видеокамеры, оборудованной на окуляре стереомикроскопа, регистрируется изменение яркости проходящего сквозь БЖ микросферы света с длиной волны  $\lambda = 510$  нм (применяется интерференционный фильтр) (см. рис. 3). Свет этой длины волны не влияет на динамику фоточувствительной БЖ реакции.

Для создания импульсных связей мы используем актиничный свет с длиной волны  $\lambda < 500$  нм (используется коротковолновый фильтр). В условиях нашей реакции импульсы такого света увеличивают период БЖ колебаний, т.е. являются ингибиторными импульсами. Увеличение амплитуды импульса (интенсивности освещенности) приводит к большему ингибированию. Сфокусированные лучи актиничного света, падающие на индивидуальные микросферы, создаются мощной линзой и проектором, в котором устанавливается нужная геометрическая маска, контролируемая компьютером. Необходимые области пикселей в маске принимают определенную степень яркости в нужные моменты времени, т.е. маска является динамической. Компьютерная программа, разработанная авторами в среде LabVIEW, анализирует состояние осцилляторов и контролирует все параметры импульсных связей, такие как амплитуда, длительность и задержка импульса, и создает динамическую маску, которая проецируется линзой и полупрозрачным зеркалом (ПЗ) на микросферы.

Исходно все БЖ микросферы находятся в колебательном состоянии при выбранных концентрациях БЖ реагентов. Для создания из них возбудимых ячеек мы используем постоянное облучение светом определенной интенсивности  $I$ , при которой БЖ микросферы ингибируются и переходят в возбудимое состояние. Известно, что если на короткий промежуток времени  $\Delta t$  прервать это ингибиторное облучение, то возбудимая ячейка даст спайк [26]. Таким образом, импульсное прекращение постоянного облучения используется нами в качестве возбуждающего импульса — это так называемый “отрицательный” импульс. Для реализации возбуждающих импульсов разной амплитуды мы понижаем интенсивность ингибиторного освещения возбудимых ячеек на амплитуду  $I$  для случая, если к этой ячейке на рис. 1 идет жирная черная стрелочка, и на амплитуду  $I/2$ , если к этой ячейке на рис. 1 идет тонкая черная стрелочка. Если интенсивность освещения возбудимой ячейки понижается до нуля (что соответствует амплитуде отрицательного возбуждающего импульса равной  $I$ ), то такая ячейка дает спайк в случае продолжительности этого импульса не менее  $\Delta t = 10$  с, но для получения стабильного результата выбрано  $\Delta t = 15$  с. Приход на ячейку одного отрицательного возбуждающего импульса с амплитудой  $I/2$  и длительностью  $\Delta t = 15$  с понижает порог возбудимости ячейки. Поэтому для ее активации достаточно прихода второго импульса, который пересекается во времени с первым уже не в течение 10–15 с, а в течение  $\Delta t_x = 5$  с (или больше).

Любой импульс в нашей сети, вышедший из одной ячейки и идущий к другой ячейке, характеризуется тремя параметрами: (1) время задержки  $\tau$  между моментом рождения импульса (= момент времени появления спайка в ячейке) и моментом прихода этого импульса к адресату, т.е. к другой ячейке, (2) длительность импульса  $\Delta t$ , (3) амплитуда импульса  $I^*$ . Ингибиторная связь, например, между ячейками № 1 и № 2 создается положительными импульсами света со следующими параметрами:  $\tau = 0$  с,  $\Delta t = 3$  с и  $I^* = 0,94$  клк. При этих параметрах устанавливаются устойчивые проти-



вофазные или синфазные колебания в зависимости от начальных условий. Напомним, что колебательные ячейки № 1 и № 2 не освещаются постоянным светом. Если из ячейки выходит несколько импульсов, то к параметрам импульсов добавляется подстрочный индекс “ $n_m$ ”, где  $n$  – это номер ячейки, из которой выходит импульс, а  $m$  – это номер ячейки, к которой устремляется импульс.

#### 4. Результаты эксперимента

Используя БЖ-микроосцилляторы, показанные на рис. 2, нашу программу по управлению импульсами света (написанную в среде LabVIEW) и установку, схема которой показана на рис. 3, мы экспериментально воссоздали иерархическую сеть спайковых микроосцилляторов и возбудимых микроячеек, представленную на рис. 1. Работа этой сети в виде динамики ячеек всех ее блоков представлена на рис. 4 для случая, когда случайно активировалась ячейка “Pro”.

Исходно ритм блока ЦГР является синфазным в рассматриваемом примере, и ячейка № 3 периодически генерирует спайки благодаря одновременно приходящим на нее импульсам от осцилляторов № 1 и № 2. Ячейки № 13 и № 14 блока ПР постоянно колеблются в противофазе, что достигается обоюдными ингибиторными импульсами со следующими параметрами:  $\tau_{13\_14} = 0$  с,  $\Delta t_{13\_14} = 3$  с и  $I_{13\_14}^* = 0,94$  клк. Все остальные ячейки сети исходно находятся в возбудимом стационарном состоянии. Взаимные ингибиторные импульсы между ячейками Pro и Contra характеризуются следующими параметрами:  $\tau = 0$  с,  $\Delta t = 70$  с и  $I^* = 1,88$  клк.

В случайный момент времени на Антенну поступает внешний сигнал S (черная вертикальная стрелочка на рис. 4) и активирует одну из ее ячеек (№ 5 или № 6), запуская в Антенне противофазный ритм. Ячейка № 8 Ридера  $R_A$  начинает генерировать спайки, регистрируя тем самым противофазный ритм Антенны (кинетика ячейки № 8 представлена пунктирной кривой на панельке “P”,  $R_A$  рис. 4). Ячейки № 8 и № 13 отправляют возбуждающие импульсы на ячейку “Pro”, а ячейки № 8 и № 14 — на ячейку “Contra”. В момент  $t = 1650$  с два импульса случайно приходят на ячейку “Pro” одновременно и возбуждают ее. Это означает, что блок ПР случайно выбрал решение “Pro”.

Далее в момент времени  $t \cong 1820$  с возбуждающие импульсы от ячеек № 3 и “Pro” одновременно поступают на ячейку № 10 и активируют ее. Она в свою очередь с временной задержкой  $\tau_{10\_2}$  отправляет переключающий ингибиторный импульс на ячейку № 2 блока ЦГР. Величина  $\tau_{10\_2}$  выбрана равной 60 с в силу того, что при такой задержке переключающий импульс приходит на ячейку № 2 в тот момент, когда фаза синфазных колебаний  $\varphi_{IP}$  находится в той области, в которой синфазный режим весьма чувствителен к внешним ингибиторным импульсам и может легко переключиться в противофазный режим. В нашем случае  $\varphi_{IP} \cong 0,7$  (фаза меняется от нуля до единицы). Если фаза  $\varphi_{IP}$  будет еще ближе к единице, то чувствительность еще больше повышается, но стабильность переключения понижается. На рис. 4 видно, что пе-

реключающий импульс переводит блок ЦГР в противофазную моду в момент времени  $t \cong 1900$  с. Параллельно с отправкой переключающего импульса на ячейку № 2 ячейка № 10 самоингибируется.

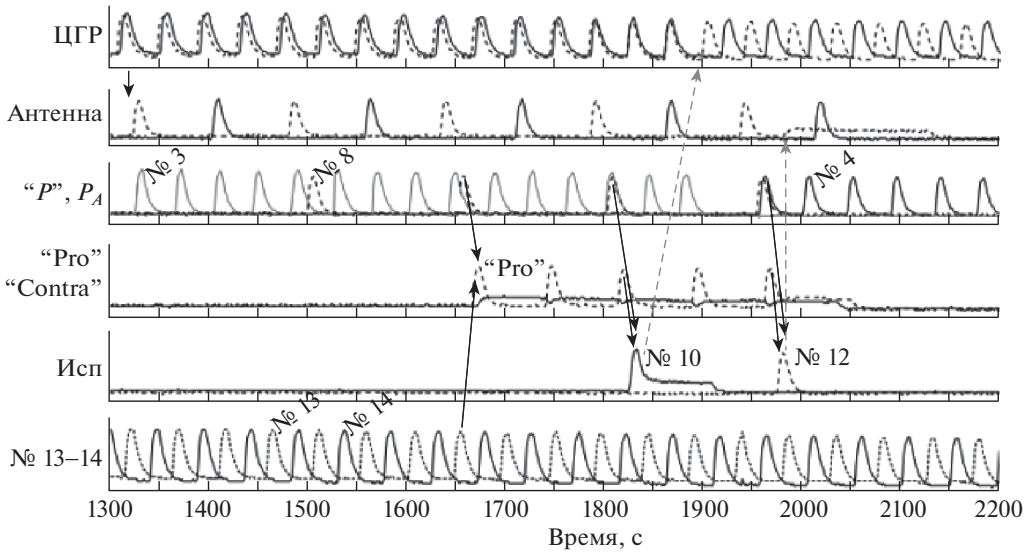


Рис. 4. Динамика ячеек сети при случайной активации ячейки “Pro”. Черными сплошными линиями со стрелочками отмечены возбуждающие импульсы, а серыми пунктирными — ингибиторные. Интенсивность постоянного освещения для всех возбудимых ячеек  $I = 0,19$  клк. Параметры импульсов. Ингибиторные импульсы:

$$\begin{aligned} \tau_{10\_2} &= 60 \text{ с}, \tau_{11\_2} = 30 \text{ с}, \Delta t_{10\_2} = \Delta t_{11\_2} = 3 \text{ с}, I_{10\_2}^* = I_{11\_2}^* = 0,94 \text{ клк}; \\ \tau_{12\_6} &= \tau_{9\_6} = 0 \text{ с}, \Delta t_{12\_6} = \Delta t_{9\_6} = 150 \text{ с}, I_{12\_6}^* = I_{9\_6}^* = 1,88 \text{ клк}, \\ \tau_{10\_10} &= \tau_{11\_11} = 0 \text{ с}, \Delta t_{10\_10} = \Delta t_{11\_11} = 60 \text{ с}, I_{10\_10}^* = I_{11\_11}^* = 1,88 \text{ клк}. \end{aligned}$$

Возбуждающие импульсы:

$$\begin{aligned} \tau_{5\_6} &= \tau_{6\_5} = 60 \text{ с}, \Delta t_{5\_6} = \Delta t_{6\_5} = 15 \text{ с}, \tau_{1\_3} = \tau_{2\_3} = \tau_{5\_7} = \tau_{6\_7} = 0 \text{ с}, \\ \Delta t_{1\_3} \tau_{8\_Pro} &= \tau_{8\_Contra} = 0 \text{ с}, \Delta t_{8\_Pro} = \Delta t_{8\_Contra} = 15 \text{ с}; \\ \tau_{13\_Pro} &= \tau_{14\_Contra} = 0 \text{ с}, \Delta t_{14\_Contra} = \Delta t_{13\_Pro} = 15 \text{ с}; \\ \tau_{Pro\_Pro} &= \tau_{Contra\_Contra} = 60 \text{ с}, \Delta t_{Pro\_Pro} = \Delta t_{Contra\_Contra} = 15 \text{ с}; \\ \tau_{Pro\_10} &= 0 \text{ с}, \Delta t_{Pro\_10} = 15 \text{ с}, \tau_{Pro\_12} = 0 \text{ с}, \Delta t_{Pro\_12} = 15 \text{ с}, \\ \tau_{Contra\_11} &= 0 \text{ с}, \Delta t_{Contra\_11} = 15 \text{ с}, \tau_{Contra\_9} = 0 \text{ с}, \Delta t_{Contra\_9} = 15 \text{ с}, \\ \tau_{3\_10} &= 0 \text{ с}, \Delta t_{3\_10} = 15 \text{ с}, \tau_{3\_9} = 0 \text{ с}, \Delta t_{3\_9} = 15 \text{ с}, \tau_{4\_11} = 0 \text{ с}, \\ \Delta t_{4\_11} &= 15 \text{ с}, \tau_{4\_12} = 0 \text{ с}, \Delta t_{4\_12} = 15 \text{ с}. \end{aligned}$$

В блоке ЦГР период синфазных колебаний  $T_{IP} = 38$  с, а период противофазных колебаний  $T_{AP} = 44$  с. Период противофазных колебаний в Антенне  $T_{AP} = 151$  с. Период противофазных колебаний в паре осцилляторов № 13–№ 14  $T_{13\_14} = 48$  с.

Если ячейка № 4 определила новый противофазный ритм ЦГР, она отправляет возбуждающий импульс на ячейку № 12 блока Исполнитель. В момент времени  $t \cong 1970$  с одновременно с импульсом от ячейки № 4 на ячейку № 12 приходит импульс от ячейки “Pro”, вызывая в ней спайк. Возбужденная ячейка № 12 отправляет ингибиторный импульс на ячейку № 6 Антенны. Этот импульс переводит все ячейки Антенны в стационарное возбужденное состояние, в котором Антенна готова принимать новые внешние сигналы. Ячейка № 12 посылает также ингибиторный импульс на ячейку “Pro”, переводя ее в возбужденное состояние, что позволяет блоку ПР вновь принимать случайные решения.

Аналогичный эксперимент при случайной активации ячейки “Contra” также дал ожидаемый результат.

Оценим теперь численно вероятность активации ячеек “Pro” и “Contra” при случайном приходе внешнего сигнала S на Антенну. Для этого мы моделировали работу нашей сети с момента  $t_S$  случайного прихода единичного импульса S и до момента активации одной из ячеек “Pro” или “Contra”. Условие “единичного импульса” означает, что в Антенне возбуждается противофазная мода и, следовательно, в Ридере  $P_A$  всегда будет возбуждаться ячейка № 8, настроенная на эту моду. Так как исходно все ячейки Антенны и Ридера  $P_A$  находятся в стационарном состоянии, то “случайность” прихода сигнала S надо соотносить с начальной фазой  $\varphi$  колебаний пары осцилляторов № 13–№ 14.

Если  $t_S$  – это время прихода внешнего импульса S на одну из ячеек Антенны, то  $t_S + \tau_{S\_8}$  – это время первой активации ячейки № 8 ( $= t_8^{(0)}$ ), где временной интервал  $\tau_{S\_8}$  складывается из времени, необходимого для активации второй ячейки Антенны, и из времени, требуемого на приход двух импульсов от ячеек Антенны на ячейку № 8. Конкретная величина времени  $\tau_{S\_8}$  зависит от того, на какую ячейку, № 5 или № 6, приходит сигнал S. Из рис. 4 можно видеть, что время  $\tau_{S\_8} \cong 190$  с. Однако знание точного значения величины  $\tau_{S\_8}$  не требуется для определения вероятности активации ячеек “Pro” и “Contra”. Моменты первого и последующих спайков ячейки № 8,  $t_8^{(n)}$ , определяются как:

$$(1) \quad t_8^{(n)} = t_8^{(0)} + T_{AP} \times n,$$

где  $n$  – целое число от нуля до бесконечности,  $T_{AP} = 151$  с (см. рис. 4). Предположим, что в момент времени  $t_S$  пара осцилляторов № 13–№ 14 находится в произвольной фазе  $\varphi_0$ , где фаза  $\varphi$  меняется от 0 до 1, а осциллятор № 13 производит спайк при  $\varphi = 0$  и  $\varphi = 1$  (при  $\varphi = 1$  фаза обнуляется до  $\varphi = 0$ ), а осциллятор № 14 производит спайк при  $\varphi = 1/2$  (так как осцилляторы № 13 и № 14 колеблются в противофазе). Тогда спайки в ячейке № 13 происходят в следующие моменты времени  $t_{13}^{(m)}$ :

$$(2) \quad t_{13}^{(m)} = t_S + (1 - \varphi_0 + m) \times T_{13\_14},$$

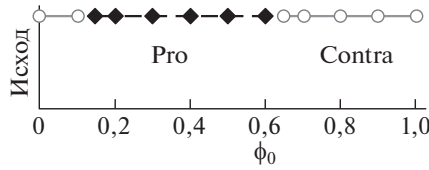


Рис. 5. Зависимость исхода активации ячеек “Pro” и “Contra” от начальной фазы колебаний  $\varphi_0$  пары осцилляторов № 13–№ 14. Черный цвет соответствует активации ячейки “Pro”, а серый — активации ячейки “Contra”.

где  $m$  – целое число от 0 до бесконечности, а период  $T_{13\_14}$  мы положили равным 48 с, как было измерено в наших экспериментах. Моменты спайков в ячейке № 14,  $t_{14}^{(m)}$ , можно задать через моменты  $t_{13}^{(m)}$ :

$$(3) \quad t_{14}^{(m)} = t_{13}^{(m)} - T_{13\_14}/2.$$

Так как  $\tau_{13\_Pro} = \tau_{8\_Pro} = 0$  с, то мы полагаем, что ячейка “Pro” должна активироваться, если моменты времени  $t_{13}^{(m)}$  и  $t_8^{(n)}$  совпадают при каких-то целых  $n$  и  $m$  с точностью до времени перекрытия импульсов активации, причем мы учитываем только наименьшие значения  $n$  и  $m$ . Так как для активации ячейки “Pro” импульсы возбуждения могут перекрываться всего лишь на время  $\Delta t_x$  ( $= 5$  с), то для активации ячейки “Pro” должно выполняться следующее неравенство:

$$(4) \quad \left| t_{13}^{(m)} - t_8^{(n)} \right| < \Delta t - \Delta t_x,$$

где  $\Delta t \equiv \Delta t_{8\_Pro} = \Delta t_{13\_Pro}$  ( $= 15$  с). Если же выполняется условие:

$$(5) \quad \left| t_{14}^{(m)} - t_8^{(n)} \right| < \Delta t - \Delta t_x,$$

причем раньше, чем условие (4), то должна активироваться ячейка “Contra”.

Так как выражение  $\left| t_{13}^{(m)} - t_8^{(n)} \right|$  в (4) после подстановки в него выражений (1) и (2) преобразуется к виду  $|(1 - \varphi_0 + m) \times T_{13\_14} - \tau_{S\_8} - T_{AP} \times n|$ , в котором уже нет времени  $t_S$ , но есть начальная фаза  $\varphi_0$  (то же самое происходит и с разностью  $(t_{14}^{(m)} - t_8^{(n)})$ ), то при моделировании мы изменяли фазу  $\varphi_0$  от нуля до единицы. Заметим, что случайный момент времени  $t_S$  определяет начальную фазу  $\varphi_0$ . На рис. 5 мы отмечаем черным цветом и ромбами исход опыта, если активировалась ячейка “Pro”, и серым цветом и кружочками, если активировалась ячейка “Contra”. Длины черной и серой линий оказались равны друг другу, что доказывает, что активация ячеек “Pro” и “Contra” происходит равновероятно. Такой же равновероятный исход должен быть и при полностью случайной активации ячеек “Pro” и “Contra”. Однако наша “случайность” весьма специфична, а именно, существуют две компактные зоны фаз  $\varphi_0$ , в которых исход события предопределен, а вероятность попадания в одну из этих зон одинакова.

## 5. Заключение

В данной статье мы продемонстрировали способ случайного принятия решения сетью импульсно связанных спайковых осцилляторов. Этот способ, основанный на случайном совпадении во времени фаз или импульсов от осцилляторов с разной частотой, не является, конечно, единственным. Можно, например, использовать для принятия решения локальную подсеть из двух-трех осцилляторов, которая дает хаотические колебания [27]. Такой способ, вероятно, привел бы к более выраженной “случайности” при принятии решения. Однако нашей целью является разработка такого блока принятия решений, который сможет осуществлять выбор решения не только случайным образом, но и целенаправленно, учитывая полученный ранее опыт при принятии решений. Для этих целей мы планируем разработать блок памяти и синхронизировать его работу с другими блоками сети. Рассмотренный же в данной статье метод случайного принятия решений является лишь первым шагом на пути создания “разумного” микроробота, который не всегда работает по заданной программе.

Отметим, что полное математическое описание единичного БЖ микроосциллятора дается четырьмя дифференциальными уравнениями [18, 20]. Импульсная связь с временной задержкой между двумя микроячейками также описывается четырьмя дифференциальными уравнениями. Однако использовать столь точный математический аппарат для описания происходящих в сети событий совсем не обязательно. БЖ осцилляторы можно заменить фазовыми осцилляторами [18], а импульсное воздействие описывать при помощи кривых переустановки фазы [26, 28]. Возбудимые ячейки легко заменяются триггерными элементами с задаваемым порогом возбудимости. Временные задержки можно реализовать при помощи химических (или электрохимических) волн, распространяющихся с конечной скоростью по узким каналам между заданными микроячейками [29]. Такие замены говорят о том, что предложенный нами метод случайного принятия решений может быть универсален и применим к другим спайковым сетям.

Мы благодарим И.Л. Мальфанова за приготовление БЖ микросфер и микроэмульсии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Klinshov V. V.* Collective Dynamics of Networks of Active Units with Pulse Coupling: Review // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy-Prikladnaya Nelineynaya Dinamika*. 2020. V. 28. P. 465–490.  
*Клиншов В.В.* Коллективная динамика сетей активных элементов с импульсными связями: Обзор // *Изв. высш. уч. заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2020. Т. 28. № 5. С. 465–490.
2. *Buzsaki G., Freeman W.* Editorial overview: Brain rhythms and dynamic coordination // *Current Opinion in Neurobiology*. 2015. V. 31. P. V–IX.
3. *Neves F.S., Timme M.* Reconfigurable Computation in Spiking Neural Networks // *IEEE Access*. 2020. V. 8. P. 179648–179655.

4. *Ryu H., Campbell S.A.* Stability, Bifurcation and Phase-Locking of Time-Delayed Excitatory-Inhibitory Neural Networks // *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2020. V. 17. P. 7931–7957.
5. *Liang X., Zhang X.C., Xia J., Ezawa M., Zhao Y.L., Zhao G.P., Zhou Y.* A Spiking Neuron Constructed by the Skyrmion-Based Spin Torque Nano-oscillator // *Appl. Phys. Lett.* 2020. V. 116. #122402.
6. *Spaeth A., Tebyani M., Haussler D., Teodorescu M.* Spiking Neural state Machine for Gait Frequency Entrainment in a Flexible Modular Robot // *Plos One*. 2020. V. 15. P. e0240267.
7. *Kadhim K.L., Hermundstad A.M., Brown K.S.* Structured Patterns of activity in Pulse-coupled Oscillator Networks with Varied Connectivity // *Plos One*. 2021. V. 16. P. e0256034.
8. *Bazhanova M.V., Krylova N.P., Kazantsev V.B., Khramov A.E., Lobov S.A.* Synchronization in a Network of Spiking Neural Oscillators with Plastic Connectivity // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2020. V. 63. P. 298–309.  
*Бажанова М.В., Крылова Н.П., Казанцев В.Б., Храмов А.Е., Лобов С.А.* Синхронизация в сети импульсных нейронных генераторов с пластичными связями // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2020. Т. 63. № 4. С. 330–343.
9. *Afifurrahman, Ullner E., Politi A.* Collective Dynamics in the Presence of Finite-width Pulses // *Chaos*. 2021. V. 31. #043135.
10. *Galinsky V.L., Frank L.R.* Collective Synchronous Spiking in a Brain Network of Coupled Nonlinear Oscillators // *Phys. Rev. Lett.* 2021. V. 126. #158102.
11. *Gast R., Knosche T.R., Schmidt H.* Mean-field Approximations of Networks of Spiking Neurons with Short-term Synaptic Plasticity // *Phys. Rev. E*. 2021. V. 104. #044310.
12. *Kuramoto Y.* Phase- and Center-manifold Reductions for Large Populations of Coupled Oscillators with Application to Non-locally Coupled Systems // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 1997. V. 7. P. 789–805.
13. *Velichko A., Putrolaynen V., Belyaev M.* Higher-order and Long-range Synchronization Effects for Classification and Computing in Oscillator-based Spiking neural Networks // *Neural Computing & Applications*. 2021. V. 33. P. 3113–3131.
14. *Taylor A.F., Tinsley M.R., Wang F., Huang Z.Y., Showalter K.* Dynamical Quorum Sensing and Synchronization in Large Populations of Chemical Oscillators // *Science*. 2009. V. 323. P. 614–617.
15. *Belousov B.P.* Collection of Short Papers on Radiation Medicine. Moscow: Medgiz, 1959. P. 145–152.  
*Белюсов Б.П.* В кн. Сборник рефератов по радиационной медицине за 1958 г. М.: Изд-во Медгиз, 1959. С. 145.
16. *Zhabotinsky A.M.* Periodic liquid phase reactions // *Proc. Acad. Sci. USSR*. 1964. V. 157. P. 392–395.  
*Жаботинский А.М.* Периодические окислительные реакции в жидкой фазе // *Докл. АН СССР*. 1964. Т. 157. № 2. С. 392–395.
17. *Proskurkin I.S., Smelov P.S., Vanag V.K.* Experimental Verification of an Optochemical “neurocomputer” // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2020. V. 22. P. 19359–19367.
18. *Vanag V.K., Smelov P.S., Klinshov V.V.* Dynamical Regimes of Four Almost Identical Chemical Oscillators Coupled via Pulse Inhibitory Coupling with Time Delay // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2016. V. 18. P. 5509–5520.

19. *Feudel U., Pisarchik A.N., Showalter K.* Multistability and Tipping. From Mathematics and Physics to Climate and Brain-Minireview and Preface to the Focus Issue // *Chaos*. 2018. V. 28. #033501.
20. *Smelov P.S., Proskurkin I.S., Vanag V.K.* Controllable Switching between Stable Modes in a Small Network of Pulse-coupled Chemical Oscillators // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2019. V. 21. P. 3033–3043.
21. *Кузнецов О.П.* Ограниченная рациональность и принятие решений // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2019. № 1. С. 3–15.
22. *Mysore S.P., Kothari N.B.* Mechanisms of competitive selection: A canonical neural circuit framework // *Elife*. 2020. V. 9. P. e51473.
23. *Taylor A.F., Tinsley M.R., Showalter K.* Insights into Collective cell Behaviour from Populations of Coupled Chemical oscillators // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015. V. 17. P. 20047–20055.
24. *Mallphanov I.L., Vanag V.K.* Distance Dependent Types of Coupling of Chemical Micro-oscillators Immersed in a Water-in-Oil Microemulsion // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021. V. 23. P. 9130–9138.
25. *De T.K., Maitra A.* Solution behaviour of Aerosol OT in non-polar solvents // *Adv. Colloid Interface Sci.* 1995. V. 59. P. 95–193.
26. *Proskurkin I.S., Vanag V.K.* New Type of Excitatory Pulse Coupling of Chemical Oscillators via Inhibitor // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2015. V. 17. P. 17906–17913.
27. *Stankevich N., Volkov E.* Evolution of Quasiperiodicity in Quorum-sensing Coupled Identical Repressilators // *Chaos*. 2020. V. 30. #043122.
28. *Canavier C.C., Achuthan S.* Pulse Coupled Oscillators and the Phase Resetting curve // *Math. Biosci.* 2010. V. 226. P. 77–96.
29. *Safonov D.A., Vanag V.K.* Oscillatory Microcells Connected on a Ring by Chemical Waves // *Chaos*. 2021. V. 31. #063134.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии О.П. Кузнецовым.*

Поступила в редакцию 26.11.2021

После доработки 17.01.2022

Принята к публикации 26.01.2022