

На правах рукописи

СЕЦИНСКИЙ Дмитрий Вячеславович

**СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА
МАЛЫХ АНСАМБЛЕЙ
ВОЗБУДИМЫХ СИСТЕМ**

01.04.03 - радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов - 2004

Работа выполнена на кафедре радиофизики и нелинейной динамики Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Постнов Дмитрий Энгелевич.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Безручко Борис Петрович;
доктор технических наук, профессор Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич.

Ведущая организация: Саратовское отделение института радиотехники и электроники РАН

Защита состоится сентября 2004 года в : на заседании диссертационного совета Д.212.243.01 в Саратовском Государственном Университете (410026, г.Саратов, ул. Астраханская, 83). С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Саратовского госуниверситета.

Автореферат разослан ” ” августа 2004г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:

Аникин В.М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Шум является принципиально неустранимым явлением в любой физической системе. Одними из первых влияние шума на функционирование динамических систем исследовали в своей работе Понтрягин, Андронов и Витт. Долгое время оно ассоциировалось с деструктивным воздействием, внесением беспорядка в какой бы то ни было процесс (работы Стратоновича, Малахова). Однако, исследования последних лет показали, что в нелинейных системах шум может играть и конструктивную роль: воздействие шума может индуцировать новые упорядоченные режимы, приводить к образованию более регулярных структур, вызывать увеличение отношения сигнал/шум и т.д. Одним из ярких примеров такого поведения нелинейных систем под воздействием шума является эффект *стохастического резонанса*, впервые исследованный Бензи, Сутера и Вульпиани, когда интегральные характеристики отклика системы на слабый внешний периодический сигнал (коэффициент усиления или отношение сигнал/шум) имеют выраженный максимум при некоторой оптимальной интенсивности шума. К настоящему времени установлено, что эффект стохастического резонанса имеет фундаментальный характер и проявляется в нелинейных системах самой разнообразной природы (работы Мосса, Анищенко, Неймана, Шиманского-Гайера).

В то время как эффект стохастического резонанса предполагает внешнее периодическое воздействие на систему, другой нелинейный эффект, так называемый *когерентный резонанс*, наблюдается в отсутствие внешнего периодического сигнала и выражается в существовании некоторого оптимального значения интенсивности шума, приложенного к системе, для которого стохастические колебания становятся наиболее близкими к регулярным. Впервые этот эффект попал в поле зрения исследователей при изучении влияния флуктуаций на динамическую систему в окрестности точки седлоузловой бифуркации. Затем в работах Неймана, Ли и др. развивался подход, рассматривающий когерентный резонанс как эффект «высвечивания» шумом колебательной динамики, которая в детерминированной системе реализуется за точкой бифуркации и может быть активирована соответствующим выбором параметра.

Важный шаг в понимании механизмов индуцированной шумом когерентности связан с переходом к изучению *возбуждаемых систем*. Парадигма возбуждаемой системы используется для описания функционирования нервных клеток — нейронов, поэтому изучение возбуждаемых систем свя-

зано с такой областью исследований как нейродинамика. Особенностью возбудимой системы является то, что в отсутствии внешнего воздействия она находится в состоянии устойчивого равновесия, а при превышении воздействующим сигналом некоторого порогового значения происходит *активация системы* — она генерирует отклик (*спайк*). В фазовом пространстве системы процессу генерации спайка соответствует почти замкнутая траектория (*псевдоорбита*). В работе Пиковского и Куртца был предложен механизм эффекта когерентного резонанса в возбудимой системе, основанный на оптимальном соотношении времени активации из положения равновесия и времени генерации отклика, что было экспериментально подтверждено в работе Постнова с соавторами.

Согласно терминологии, предложенной Ходжкиным, можно выделить два типа возбудимых систем: «резонаторы» и «интеграторы», в зависимости от типа бифуркации, реализующейся при переходе системы к автоколебательному режиму. Каждый тип возбудимых систем обладает собственными механизмами активации из положения устойчивого равновесия, проявление особенностей которых является недостаточно изученным. Мало изучен режим «канард»-колебаний — специфический колебательный режим, реализующийся для возбудимых систем «резонаторов» и характеризующегося генерацией автоколебаний небольшой (подпороговой) амплитуды и наличием возбудимых свойств системы.

Для большинства нейронных моделей возбудимых систем характерным является наличие одного состояния устойчивого равновесия, однако имеется ряд примеров проявления эффекта когерентного резонанса в системе с несколькими устойчивыми точками (Баланов, Янсон и др.). В работах Линдера, Шиманского-Гайера и Тсимринга, Пиковского было исследовано проявление индуцированной шумом когерентности в системе с двумя состояниями равновесия, а также в системе, обладающей бесконечной размерностью фазового пространства. В этих работах использовался ряд существенных упрощений модельных систем, поэтому интерес представляет как исследование особенностей проявления эффекта когерентного резонанса в зависимости от числа состояний устойчивого равновесия возбудимой системы и размерности ее фазового пространства, так и обобщение результатов на более реалистичную модель возбудимой системы.

Благодаря проведенным к настоящему времени исследованиям стало ясно, что возбудимая система, функционирующая в режиме когерентного резонанса, может генерировать сигнал близкий к регулярному. Как

было показано в работе Хана с соавторами, в случае, когда возбудимая система имеет собственный источник шумового возбуждающего сигнала, ее можно рассматривать как род стохастического осциллятора и говорить о *стохастической синхронизации* индуцированных шумом колебаний возбудимых систем. Принципиальная возможность синхронизации стохастических колебаний была показана в работах Анищенко, Неймана, Шиманского-Гайера и др. В этой связи представляет интерес исследование некоторых малоизученных аспектов синхронизации индуцированных шумом колебаний возбудимых систем, таких как вариация разности фаз в области синхронизации, возможность синхронизации на гармониках основной частоты, взаимосвязь стохастической синхронизации возбудимых систем и степени регулярности их колебаний.

Имеющиеся к настоящему времени результаты моделирования стохастической динамики связанных возбудимых систем в режиме когерентного резонанса не противоречат современным представлениям о функционировании малых нейронных систем типа генераторов ритмической активности (Абарбанель, Рабинович и др.). Представляет интерес выяснить, в какой степени подобный механизм генерации стохастических колебаний способен обеспечить функционирование более сложных структур возбудимых систем. Как правило, необходимым условием функционирования подобных нейронных схем, предполагается спонтанная активность управляющих нейронов, что означает наличие у них автоколебательных свойств. Однако, в реальности функционирование нейронных структур происходит при постоянном шумовом воздействии, влияние которого изучено недостаточно. Кроме этого, опираясь на свойство возбудимых систем функционировать в режиме когерентного резонанса, можно предположить, что ансамбль способен функционировать и при отсутствии автоколебательных свойств у его элементов. Возникает вопрос: возможна ли генерация ансамблем достаточно регулярного ритмического рисунка при функционировании под внешним шумовым воздействием, когда составляющие его нейроны находятся в возбудимом режиме, а какое-либо внешнее периодическое воздействие отсутствует.

Таким образом, **цель диссертационной работы** заключается в исследовании посредством радиофизического эксперимента и численного моделирования стохастической динамики возбудимых систем и выявлении особенностей функционирования возбудимых систем в составе малых ансамблей типа биологически обоснованных моделей генераторов ритмической активности.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. Создать экспериментальную установку для радиофизического моделирования и программное обеспечение для обработки экспериментальных данных с помощью компьютера.

2. Выявить особенности индуцированных шумом эффектов в одиночных возбудимых системах, обладающих различными свойствами и функционирующих в различных режимах.

3. Выяснить аспекты стохастической синхронизации возбудимых систем и взаимодействия связанных возбудимых систем, обладающих различными свойствами.

4. Исследовать взаимосвязь эффекта стохастической синхронизации возбудимых систем и степени регулярности их индуцированных шумом колебаний.

5. Выяснить возможность функционирования нейронных схем типа генераторов ритма в условиях, когда роль автоколебательных элементов ансамбля выполняют возбудимые системы в режиме когерентного резонанса.

6. Исследовать роль флуктуаций в стохастической динамике ансамбля возбудимых систем типа генератора ритмической активности, функционирующего в автоколебательном режиме.

Научная новизна результатов работы.

- Впервые показано, что возбудимая система, функционирующая в «канард»-режиме, способна демонстрировать эффект когерентного резонанса, проявляющийся как максимум регулярности индуцированных шумом переключений между режимом генерации спайков и подпороговых колебаний.

- Впервые показано, что достижению режима стохастической синхронизации индуцированных шумом колебаний в связанных возбудимых системах соответствует значительный прирост регулярности колебаний, при этом значение степени регулярности может существенно превышать максимально достижимое значение для одиночной системы.

- Впервые показано, что функционирование ансамбля возбудимых систем типа нейронных схем — центральных генераторов ритма возможно в условиях, когда роль автоколебательных элементов выполняют возбудимые элементы в режиме когерентного резонанса.

- Впервые показано, что для малого нейронного ансамбля с подпороговыми тактирующими колебаниями действие шума проявляется в пе-

реключениях между различными режимами генерации при сохранении ритмического рисунка.

• Впервые показано, что явление когерентного резонанса может проявляться как максимум регулярности переключений малого нейронного ансамбля между различными режимами генерации.

Достоверность научных выводов работы подтверждается использованием алгоритмов численного моделирования стохастических систем, базирующихся на классических результатах теории стохастических процессов, качественным соответствием результатов физических и численных экспериментов, а также их воспроизводимостью. Результаты проведенных экспериментов соответствуют теоретическим предпосылкам и исследованиям, проводимым по смежным задачам.

Положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Эффект индуцированной шумом когерентности (когерентный резонанс) присущ широкому классу возбудимых систем, различающихся как типом устойчивости и количеством невозбужденных состояний, так и размерностью пространства вложения псевдоорбиты. Однако, перечисленные различия существенно влияют на его качественные и количественные характеристики. А именно:

- наличие более одного сегмента псевдоорбиты меняет характер эволюции спектра мощности;

- увеличение размерности пространства вложения псевдоорбиты способствует совместному проявлению двух основных механизмов когерентного резонанса;

- наличие или отсутствие осцилляций в окрестности невозбужденного состояния определяет структуру распределения интервалов времени между импульсами и играет важную роль при функционировании возбудимой системы в составе ансамбля.

2. Феноменологическая картина взаимной и вынужденной синхронизации двух возбудимых систем в режиме когерентного резонанса тождественна случаю синхронизации автоколебаний в присутствии шума, при этом переход к режиму стохастической синхронизации сопровождается ростом степени регулярности индуцированных шумом колебаний, которая может быть выше максимально достижимого значения для каждой из одиночных систем.

3. Нейронные схемы генераторов ритма при наличии шума имеют функциональный аналог в виде ансамблей возбудимых систем. При этом

воспроизводятся такие эффекты, как генерация низкочастотной моды, активация различных шаблонов генерации и переключение между ними. Степень проявления перечисленных эффектов от интенсивности шума носит резонансный характер, что позволяет говорить об индуцированной шумом когерентности ритмического рисунка.

Научно-практическая значимость результатов.

В работе выполнено исследование, относящееся к фундаментальным вопросам современной статистической физики и нелинейной динамики. Их научно-практическая значимость состоит в том, что:

- рассмотренный ранее для простых модельных систем, эффект когерентного резонанса обобщен для широкого класса возбудимых систем, включая модели типа ФитцХью-Нагумо с одним и двумя состояниями равновесия, модель Морриса-Лекара, модель бистабильной системы с обратной связью, порогового электронного устройства (моновибратора);
- выявленные особенности функционирования возбудимых систем в составе ансамблей облегчают интерпретацию данных натурального биологического эксперимента;
- результаты по стохастическому моделированию генераторов ритма открывают возможность построения реалистичных моделей, успешно функционирующих в условиях флуктуаций.

Полученные результаты могут быть использованы при создании радиофизических устройств, использующих эффекты стохастической синхронизации и когерентного резонанса.

Исследования, проведенные в ходе выполнения диссертационной работы были частично поддержаны грантами РФФИ 99-02-17732, РФФИ 01-02-16709, РФФИ 04-02-16769, INTAS 01-2061, Министерства образования А03-2.9-362 и CRDF REC-006.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты работы докладывались на конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2000), международной конференции «Contemporary problems of microwave electronics and radiophysics» (Саратов, 2001), международной конференции «Nonlinear science festival III» (Дания, 2001), конференции «Chaos'2001» (Саратов, 2001), конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2001), международной конференции «Synchronization: theory and application» (Украина, 2002), международной конференции «Synchro'2002» (Саратов, 2002), конференции «Нелинейные дни в Саратове для моло-

дых» (Саратов, 2003), а также на научных семинарах лаборатории нелинейной динамики СГУ.

Материалы диссертационной работы обсуждались на научных семинарах кафедры радиофизики и нелинейной динамики СГУ. По теме диссертации в международной и российской печати опубликовано 10 работ (5 статей и 5 тезисов докладов).

Личный вклад автора. В указанных работах автору принадлежит разработка алгоритмов, проведение численного моделирования и радиофизических экспериментов, анализ результатов, а также частично постановка задач и проведение теоретического анализа.

Содержание работы

Материалы диссертации изложены на 192 страницах, содержат 79 рисунков и список цитированной литературы из 120 наименований. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, а также достоверность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приводятся положения выносимые на защиту.

В первой главе исследованы индуцированные шумом эффекты в стохастической динамике одиночной возбудимой системы. Введено понятие «степени регулярности» колебаний системы и описаны различные методы оценки степени регулярности, основывающиеся на различных характеристиках динамики системы. Описан механизм когерентного резонанса, ответственный за достижение максимальной регулярности колебаний при оптимальной интенсивности шума. Показано, что проявление эффекта когерентного резонанса, в основе которого лежит механизм баланса двух характерных времен системы, сходно для возбудимых систем как типа «интеграторов», так и типа «резонаторов», однако их различия играют принципиальную роль при функционировании нейронов в составе ансамбля, что подробно рассматривается во второй главе.

При определенных условиях, развитие предельного цикла в системе типа «резонатор» имеет особенность — наличие области так называемых «канард»-колебаний. А именно, при достижении управляющим параметром бифуркационного значения рождается предельный цикл малого радиуса, соответствующий подпороговым колебаниям, а при дальнейшем изменении параметра амплитуда предельного цикла скачкообразно ра-

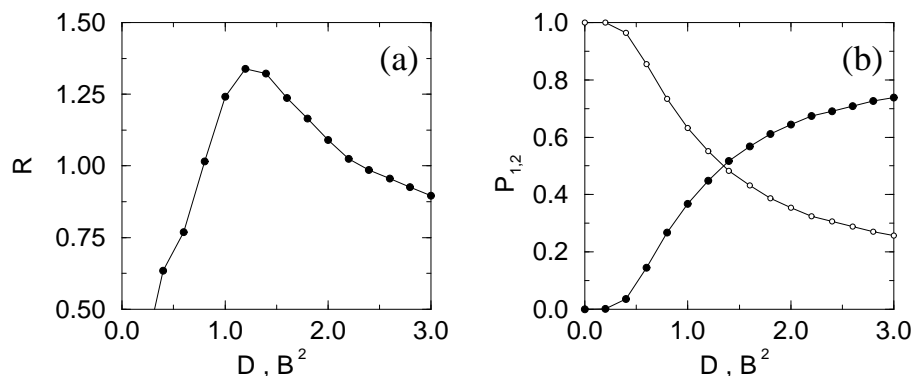


Рис. 1: Степень регулярности R переключений системы между режимом генерации спайков и подпороговых колебаний (а) и вероятность P найти систему в каждом из режимов (b) в зависимости от интенсивности воздействующего шума D .

стет до значений, соответствующих обычному автоколебательному режиму. Функционирование возбудимой системы в «канард»-режиме приводит к ряду эффектов при возбуждении внешним шумовым сигналом. В частности, выявлен эффект частичного подавления шумом процесса непрерывной генерации спайков, что ведет к появлению области значений интенсивности шума, в которой наблюдается аномальное уменьшение частоты их генерации при увеличении интенсивности воздействующего шума. Показано, что воздействие шума индуцирует процесс переключений системы между режимом генерации спайков и подпороговых колебаний. При этом возбудимая система способна демонстрировать эффект когерентного резонанса, проявляющийся как максимум степени регулярности индуцированных шумом переключений между этими режимами в оптимальном диапазоне интенсивностей шума (рис.1). Полученные результаты заставляют пересмотреть сложившуюся точку зрения, согласно которой наличие режима подпороговых «канард»-колебаний малой амплитуды не может оказывать влияние на функционирование реальных нейронных систем из-за постоянного шумового воздействия, неизбежно присутствующего в любой живой системе.

Сопоставление ряда моделей, относящихся к классу возбудимых систем, показывает, что количество сегментов псевдоорбиты может быть более одного в случае, если система имеет несколько устойчивых состояний (мультистабильность), достигаемых последовательно. Размерность пространства вложения псевдоорбиты, как стало ясно недавно, также играет важную роль. В диссертационной работе представлены результаты радиофизического и численного эксперимента, позволяющие оценить

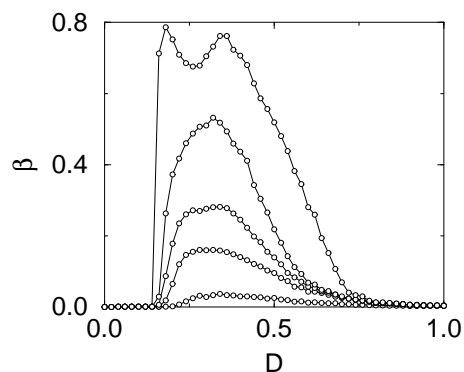


Рис. 2: Зависимость степени регулярности β индуцированных шумом колебаний от интенсивности шума D для различной размерности фазового пространства системы.

влияние обсуждаемых выше факторов на проявление эффекта когерентного резонанса. Исследуемая радиофизическая модель представляла собой инерционный нелинейный элемент с характеристикой N -типа, охваченный цепью обратной связи в виде RC -фильтра низких частот. Для случая однозвенного фильтра уравнения такой системы сводятся к уравнениям модели ФитцХью-Нагумо. Результаты численного и радиофизического эксперимента показывают, что возбудимая система способна демонстрировать эффект когерентного резонанса как в моностабильном, так и в бистабильном режиме, но наличие у системы двух состояний равновесия необходимо учитывать при расчете количественных характеристик регулярности, в частности, производимых на основе оценки спектра мощности сигнала системы. Увеличение размерности системы ведет к проявлению еще одного механизма индуцированной шумом когерентности. График степени регулярности в этом случае имеет два максимума, соответствующих различным интенсивностям шума (рис.2).

Вторая глава посвящена исследованию стохастической динамики неавтономной возбудимой системы и ансамбля из двух связанных возбудимых систем. Исследованы различия в механизмах возбуждения внешним периодическим подпороговым сигналом возбудимых систем различных типов и показаны обусловленные этим особенности детерминированной и стохастической динамики ансамбля из двух связанных возбудимых систем. Исследован ряд важных аспектов стохастической синхронизации возбудимых систем, таких как механизмы перехода к режиму синхронизации, динамика разности фаз в области синхронизации, синхронизация на гармониках основной частоты. Показана взаимосвязь синхронизации индуцированных шумом колебаний возбудимых систем с ростом их ре-

гулярности.

Результаты проведенных в работе экспериментов показали, что для обоих типов нейронов понятие «порога возбуждения» может применяться лишь в контексте конкретной частоты воздействия и формы воздействующего импульса. Для нейронов «резонаторов» граница области активации на плоскости параметров «частота-амплитуда» сигнала воздействия носит весьма сложный, изрезанный характер. Эти особенности детерминированной динамики проявляют себя также и в стохастическом случае при функционировании системы в составе ансамбля из двух нейронов, один из которых активируется шумовым сигналом. В этом случае наблюдаются такие индуцированные шумом эффекты, как частичное подавление процесса генерации спайков одним из нейронов, чему соответствует немонотонная зависимость отношения частот генерации спайков нейронами от интенсивности шума.

В ходе выполнения работы было проведено численное и радиофизическое моделирование синхронизации автоколебательных систем, а также стохастической синхронизации возбудимых систем в режиме когерентного резонанса и бистабильной системы в режиме стохастического резонанса. Полученные результаты показали, что явление стохастической синхронизации возбудимых систем по всем основным аспектам аналогично синхронизации автоколебательных систем в присутствии шума. Характер эволюции спектров мощности при переходе к режиму стохастической синхронизации аналогичен известным механизмам синхронизации регулярных колебаний захватом частот и подавлением собственной динамики. Показано, что характер изменения разности фаз при вариации управляющих параметров в области стохастической синхронизации возбудимых систем в режиме когерентного резонанса близок к случаю синхронизации автоколебаний в присутствии шума и существенно отличается от стохастической синхронизации колебаний в бистабильной системе.

В ходе проведенных исследований была показана взаимосвязь между стохастической синхронизацией индуцированных шумом колебаний возбудимых систем в режиме когерентного резонанса и степенью регулярности их колебаний. Результаты проведенных радиофизических экспериментов показывают, что переход к режиму стохастической синхронизации сопровождается ростом степени регулярности индуцированных шумом колебаний возбудимых систем. При этом значение максимальной регулярности в режиме стохастической синхронизации может существенно превышать максимально достижимое значение для одиночной возбуди-

мой системы (рис.3). Рост степени регулярности наблюдается также в случае синхронизации возбудимых систем на гармониках основной частоты индуцированных шумом колебаний. В этом случае степень регулярности колебаний зависит от соотношения частот взаимодействующих систем и достигает максимумов в зонах синхронного поведения. Полученные результаты дополняют исследования, проведенные ранее в работах Анищенко, Неймана и др., касающиеся взаимосвязи эффекта стохастического резонанса и стохастической синхронизации.

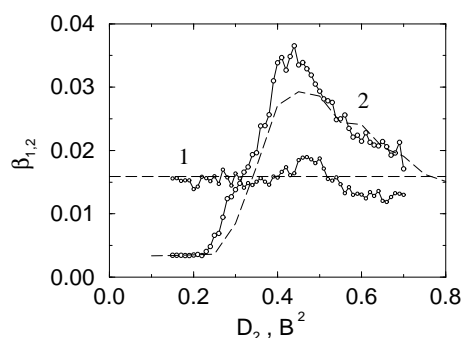


Рис. 3: Зависимость степени регулярности β индуцированных шумом колебаний связанных возбудимых систем в зависимости от интенсивности шума во второй системе D_2 . Рост степени регулярности соответствует достижению режима синхронизации. Пунктиром показаны значения регулярности в автономных системах при тех же значениях управляющих параметров.

Третья глава содержит результаты исследования динамики простейших нейронных генераторов ритмов: центрального генератора низкочастотного ритма дыхания улитки, нейронного ансамбля Копелл, а также упрощенного нейронного ансамбля, созданного на его базе. Исследуется воздействие шума на генерацию нейронным ансамблем ритмических рисунков в случае автоколебательной динамики составляющих его нейронов и показана возможность генерации ансамблем индуцированных шумом ритмов, когда его нейроны функционируют в режиме когерентного резонанса.

Известно, что в функционировании живых организмов огромную роль играют нейронные схемы, ответственные за генерацию определенных типов ритмической активности: дыхания, различных движений и т.п. — так называемые центральные генераторы ритма. В данной работе рассмотрен простейший центральный генератор ритма дыхания улитки, содержащего всего два управляющих нейрона и один исполнительный — мотонейрон. Управляющие нейроны, активированные внешним шумом,

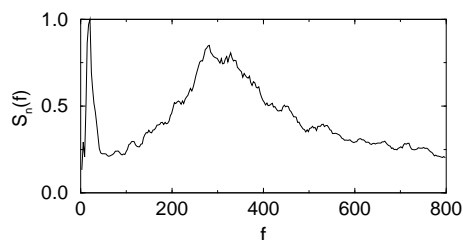


Рис. 4: Спектр мощности для модели центрального генератора ритма дыхания улитки при оптимальной интенсивности воздействующего шума.

продуцируют ритм и воздействуют на мотонейрон, который управляет мышцами, обеспечивая вдох и выдох легких улитки. Нейроны охвачены инерционными взаимо- и самоподавляющими связями, структура которых обуславливает наличие двух метастабильных состояний (генерация спайков то одним, то другим нейроном), последовательно сменяющих друг друга. Другой моделью, количественно воспроизводящей динамику нейронной системы, является ансамбль, разработанный научной группой Копелл. Он состоит из трех нейронов и предназначен для моделирования так называемых β - и γ - ритмов, наблюдаемых, в частности, в головном мозге. Принципиально важным для подобных нейронных схем является наличие так называемых *синаптических связей* между нейронами, основанных на химическом взаимодействии посредством соответствующих нейромедиаторов. Особенностью этого типа связи является наличие временной задержки сигнала, а также ограничение максимального уровня сигнала воздействия. Разделяют возбуждающие и подавляющие синаптические связи, вызывающие, соответственно, активацию или подавление активности нейрона. Ансамбль Копелл состоит из трех нейронов, два из которых являются возбужденными, а активность третьего (интернейрона) подавлена за счет введения самоподавляющей обратной связи. Интернейрон обеспечивает взаимодействие возбужденных нейронов в отсутствие прямой связи между ними. Структура связей в нейронной схеме во многом определяет возможные режимы ее функционирования — генерацию ансамблем того или иного ритмического рисунка.

В ходе работы, радиофизическое моделирование центрального генератора ритма дыхания улитки было проведено с использованием пороговых электронных устройств — моновибраторов, выполняющих роль управляющих нейронов ансамбля. Структура синаптических связей между нейронами моделировалась с помощью *RC*-цепочек, образующих фильтры

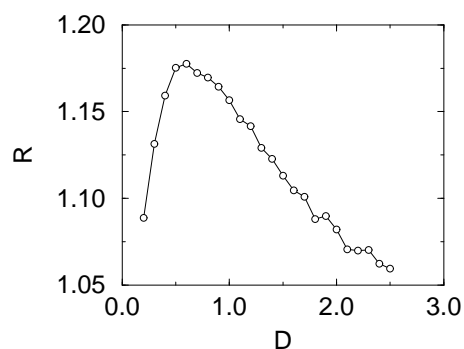


Рис. 5: Зависимость степени регулярности R индуцированных шумом переключений между различными режимами генерации спайков ансамблем нейронных осцилляторов Коппелл от интенсивности воздействующего шума D .

низких частот. За счет воздействия шума, в спектре сигнала модели появляются две компоненты — высокочастотная, соответствующая частоте генерации спайков нейронами, а также низкочастотная, соответствующая динамике смены состояний (рис.4). Это означает, что для генерации низкочастотных квазирегулярных колебаний с определенными фазовыми соотношениями *не обязательны* автоколебательные свойства нейронов либо наличие внешнего ритма.

В рамках выполнения диссертационной работы было проведено также численное исследование воздействия шума на функционирование нейронного ансамбля Коппелл. Показано, что в случае автоколебательной динамики составляющих ансамбль элементов, воздействие шума проявляется в спонтанных переключениях ансамбля между различными режимами генерации при почти бездефектном сохранении их структуры. При этом степень регулярности переключений между режимами генерации при оптимальной интенсивности шума достигает максимума, демонстрируя эффект когерентного резонанса (рис.5).

Для того, чтобы вскрыть механизмы, лежащие в основе такого поведения, была разработана упрощенная модель ансамбля, сохраняющая, однако, структуру и характер синаптических связей в ансамбле Коппелл и демонстрирующая все основные режимы работы исходной модели. Исследование стохастической динамики упрощенной модели показало, что вышеописанные факты определяются наличием в системе подпороговых тактирующих колебаний, возникающих благодаря структуре связей между нейронами. Использование упрощенной модели позволило также исследовать возможность функционирования ансамбля в случае, когда

составляющие его нейроны функционируют в режиме когерентного резонанса. Эксперименты показали, что при переходе составляющих ансамбль элементов в возбудимый режим, шум может активировать ритмический рисунок нейронного ансамбля, интегральные характеристики которого таковы, что представляется затруднительным определить, в каком именно исходном режиме функционируют элементы — автоколебательном или возбудимом. Проведенные дополнительные эксперименты показали, что описанное поведение характерно также и для исходной модели ансамбля Коппелл. Таким образом, удалось показать, что функционирование нейронных ансамблей типа генераторов ритмической активности возможно в случае отсутствия автоколебательных свойств у составляющих ансамбль нейронов, функционирующих в режиме когерентного резонанса под воздействием шума в оптимальном диапазоне интенсивности.

Основные результаты и выводы.

1. Создана экспериментальная установка для проведения радиофизического эксперимента и написано программное обеспечение для компьютерной обработки экспериментальных данных.

2. Выявлены особенности проявления эффекта когерентного резонанса в зависимости от таких свойств возбудимой системы, как размерность ее фазового пространства и число состояний устойчивого равновесия. Показано, что увеличение размерности системы может приводить к проявлению двух механизмов эффекта когерентного резонанса, при этом график зависимости регулярности колебаний системы имеет два максимума. Показано также, что возбудимая система способна демонстрировать эффект когерентного резонанса при наличии у нее двух состояний устойчивого равновесия, однако это должно учитываться при оценке количественных характеристик степени регулярности колебаний.

3. Исследованы индуцированные шумом эффекты при функционировании возбудимой системы в области подпороговых колебаний. Установлено, что в этом режиме зависимость частоты генерации системой спайков от интенсивности шума носит аномальный характер. Выявлено, что эффект когерентного резонанса может проявляться как максимум регулярности переключений системы между режимом подпороговых колебаний и генерации спайков.

4. Исследованы особенности активации возбудимых систем типа «резонатор» и «интегратор» внешним периодическим подпороговым сигналом. Построена зона активации на плоскости параметров «частота-

амплитуда воздействия». Выявлены особенности активации возбудимых систем этих типов сигналом другой возбудимой системы с использованием различного типа связи.

5. Выяснены особенности зависимости для средней разности фаз в зоне стохастической синхронизации возбудимых систем в режиме когерентного резонанса. Проведено сравнение вероятностных распределений разности фаз в зоне синхронизации для случая автоколебательных систем с периодической и хаотической динамикой, синхронизации переключений бистабильной системы в режиме стохастического резонанса и возбудимых систем в режиме когерентного резонанса. Установлено, что зависимость для средней разности фаз для случая синхронизации возбудимых систем сходна со случаем автоколебаний в присутствии шума.

6. Установлено, что достижение режима стохастической синхронизации сопровождается ростом степени регулярности колебаний возбудимых систем. Показано, что значение максимальной регулярности в режиме стохастической синхронизации может существенно превышать максимально достижимое значение для одиночной возбудимой системы.

7. Создана экспериментальная установка, моделирующая функционирование центрального генератора ритма дыхания улитки с помощью электронных устройств — моновибраторов и инерционных нелинейных цепей, имитирующих синаптические связи между ними. Показана возможность генерации низкочастотной стохастической моды колебаний благодаря внешнему шумовому воздействию на систему в отсутствие какого-либо периодического воздействия.

8. Проведено исследование влияния шумового воздействия на детерминированные режимы ансамбля нейронных осцилляторов Копелл, генерирующего β - и γ - ритмы. Выяснено, что шумовое воздействие на нейронный ансамбль приводит к спонтанным переключениям между различными ритмическими рисунками генерации спайков при почти бездефектном сохранении их структуры.

9. Исследована возможность генерации нейронным ансамблем типа Копелл достаточно регулярного ритмического рисунка в случае, когда составляющие его нейроны функционируют в режиме когерентного резонанса под воздействием шума оптимальной интенсивности. Показано, что нейронный ансамбль способен в этом случае проявлять достаточно регулярную ритмическую активность, характеристики которой практически не позволяют определить в автоколебательном или возбудимом режиме находятся его нейроны.

Список публикаций по теме диссертации

1. Д.Э. Постнов, О.В. Сосновцева, Д.В. Сецинский, В.С. Борисов. Генерация и синхронизация стохастических колебаний в связанных возбудимых системах // Изв. вузов «ПНД», 2001. Т. 9. №3. С. 15–31.
2. Д.Э. Постнов, Д.В. Сецинский, О.В. Сосновцева. Стохастическая синхронизация и рост регулярности индуцированных шумом колебаний // Письма в ЖТФ, 2001. Т. 27. Вып. 11. С. 49-55.
3. O.V. Sosnovtseva, D. Setsinsky, A. Fausboll, E. Mosekilde. Transitions between beta and gamma rhythms in neural systems // Phys. Rev. E, 2002. V. 66. P. 041901.
4. D. Postnov, O. Sosnovtseva and D. Setsinsky. Rhythmic activity of noisy neural circuits // Fluct. and Noise Lett., 2003. V. 3. No. 3. P. L275-L287.
5. Д.Э. Постнов, А.В. Шишкин, Д.В. Сецинский. Стохастическая динамика возбудимой системы в области подпороговых колебаний // Изв. вузов «ПНД», 2003. Т. 11. №6. С. 104–115.
6. Д.В. Сецинский. Стохастическая синхронизация возбудимых систем в режиме когерентного резонанса // Тезисы докладов научной конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых», Саратов, СГУ, 2000.
7. Д.В. Сецинский, В.С. Борисов. Эффект когерентного резонанса и генерация квазирегулярных одно- и двухмодовых стохастических колебаний // Тезисы докладов второй интернациональной меж-университетской конференции «Современные проблемы микроволновой электроники и радиофизики», Саратов, СГУ, 2001.
8. Д.Э. Постнов, Д.В. Сецинский, О.В. Сосновцева. Мультистабильная динамика стохастической модели нефрона // Тезисы докладов шестой международной конференции хаотических колебаний и образования структур, Хаос 2001.
9. Д.Э. Постнов, Д.В. Сецинский, О.В. Сосновцева. Потеря мультистабильности в стохастической модели нефрона // Тезисы докладов научной конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых», Саратов, СГУ, 2001.
10. Д.Э. Постнов, Д.В. Сецинский. Стохастическая динамика модели ФитцХью-Нагумо в режиме «канард»-колебаний // Тезисы докладов научной конференции «Нелинейные дни в Саратове для молодых», Саратов, СГУ, 2003.

СЕЦИНСКИЙ Дмитрий Вячеславович
СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА МАЛЫХ АНСАМБЛЕЙ
ВОЗБУДИМЫХ СИСТЕМ

Автореферат

Ответственный за выпуск к.ф.-м.н. Шабунин А.В.