

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институт прикладной физики РАН
(г. Нижний Новгород)

На правах рукописи

ЩАПИН Дмитрий Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ
НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ**

01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

Научный руководитель:	д. ф.-м. н., профессор Некоркин Владимир Исаакович
Официальные оппоненты:	д. ф.-м. н., профессор Короновский Алексей Александрович д. ф.-м. н., профессор Осипов Григорий Владимирович
Ведущая организация:	Учреждение Российской академии наук Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва

Защита состоится «28» сентября 2011 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете имени Н.И. Лобачевского (603950, Нижний Новгород, ГСП-20, проспект Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «19» августа 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



В.В. Черепенников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование систем, состоящих из большого числа взаимодействующих активных элементов, обладающих собственной колебательной динамикой, является актуальной проблемой современной радиофизики. Примерами таких систем в радиофизике являются массивы джозефсоновских контактов, сети связанных лазеров, ансамбли синхронизованных генераторов и систем автоматического регулирования, фазированные антенные решетки и т. д. В пространстве элементы могут быть расположены как произвольно, так и упорядоченно – например, находится в узлах пространственной решетки. Связь между элементами варьируется от простой линейной до сложной нелинейной, осуществляя как локальное, так и нелокальное взаимодействие между элементами. Фактически, ансамбли активных элементов представляют собой некоторые активные среды, изучение явлений и процессов в которых является фундаментальной задачей современной физики. Для таких сред особенно интересны и важны режимы коллективной активности и распространения нелинейных волн, осуществляющие динамическую обработку информационных потоков.

В последнее время наблюдается увеличивающийся интерес к изучению, методами нелинейной динамики, активных ансамблей, моделирующих поведение большого числа взаимодействующих нервных клеток – нейронов. С одной стороны, это объясняется современным прогрессом в развитии методов регистрации нейронной активности (мультиэлектродная регистрация, оптический нейроимиджинг и др.), позволяющих получить большое число новых экспериментальных данных о режимах активности достаточно больших нейронных сетей. Систематизация, обобщение и понимание закономерностей возникновения, распространения и исчезновения активности таких сетей стимулировали развитие так называемого нейроморфного моделирования. Модели этого направления учитывают морфологию индивидуальных нейронов и межнейронных связей, имеют архитектуру отражающую строение реальных нейронных систем. В нейроморфных моделях элементы-нейроны наделяются своей внутренней и, в частности, колебательной динамикой, которая в той или иной степени близка к динамике “живых” нейронов. С другой стороны, современные электронные технологии, в частности, так называемые программируемые кристаллы (программируемые логические интегральные схемы – ПЛИС, программируемые блоки аналоговых элементов - field-programmable analog array, и др.), допускают создание компактных электронных схем из большого числа активных единиц, которые, могут воспроизводить базовые свойства нейронов. В связи с этим, построение новых нетрадиционных высокоэффективных систем обработки и хранения информации, координации и управления движением, основанных на нейродинамических принципах, стало актуальной и практически реализуемой задачей.

В настоящее время нелинейно-динамический подход для исследования свойств нейронных сетей активно развивается как в России (Борисюк Г. Н.,

Борисюк Р. М., Безручко Б.П., Иваницкий Г.Р., Казанович Я. Б., Казанцев В.Б., Некоркин В. И., Осипов Г.В., Потапов А.Б., Смирнов Д. А., Яхно В. Г.), так и за рубежом (Abarbanel H.D.I., Afraimovich V. S., Aihara K., Arena P., Ayers J., Bazhenov M., Bilbaut J.M., Courbage M., Ermentrout G.B., Fortuna L., Ijspreert A. J., Iizikevich E.M., Kurths J., Llinas R., Makarenko V. I., Rabinovich M. I., Rinzel J., Rulkov N. F., Sanjuan M. A . F., Tanaka G., Terman D. H., Varona P., Velarde M. G. и др.)

Результаты многочисленных нейрофизиологических экспериментов, свидетельствуют о том, что нейроны являются нелинейными активными элементами, которые генерируют сложные и даже хаотические колебания, и восстанавливают диссипативные потери за счет внутренних биохимических процессов, то есть обладают свойствами характерными для автоколебательных систем. Поэтому исследование автогенераторных моделей нейронных систем представляется естественным и актуальным. Такие модели позволяют воспроизвести основные режимы нейронной активности и могут быть использованы в качестве базовых блоков программируемых кристаллов при построении моделей больших нейронных сетей.

Цель диссертационной работы заключается в построении автогенераторных систем, моделирующих динамику нейронных ансамблей, и выявление на их основе базовых закономерностей процессов формирования и управления колебательно-волновой активностью таких ансамблей.

Научная новизна работы

1. Разработаны аналоговые электронные модели автогенераторов, способные воспроизводить большинство известных динамических режимов, характерных для различных типов нейронов, демонстрирующих колебательную активность.
2. В ансамблях автогенераторов экспериментально обнаружено распространение разнообразных волновых паттернов: фронтов переключения и импульсов возбуждения, обладающих как частицеподобными свойствами, так и свойствами аннигиляции при взаимодействии друг с другом.
3. В ансамбле автогенераторов с двумя нелинейными проводимостями, моделирующих сеть электрически связанных возбудимых нейронов, экспериментально обнаружен режим хаотической спайковой активности.
4. Экспериментально продемонстрирован эффект фазовой переустановки в генераторе, находящемся в режиме периодических колебаний. Показано, что при воздействии внешним стимулом фаза колебаний переустанавливается к одному и тому же значению и не зависит от начальной фазы, а определяется только параметрами внешнего стимула.
5. Экспериментально установлено формирование фазовых кластеров в ансамбле автогенераторов, находящихся под действием внешнего импульсно-го управления.
6. Построен лабораторный образец шагающего робота, управление движением которого основано на эффекте фазовой переустановки.

Достоверность полученных результатов обусловлена соответствием экспериментальных выводов, аналитических и численных результатов исследований, воспроизводимостью экспериментов, а так же согласованностью с результатами исследований реальных нейронных систем.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанные автогенераторы обладают колебательными, возбудимыми и мультистабильными режимами.
2. В системе двух автогенераторов, связанных подавляющей обратной связью, моделирующей взаимодействие нейронов с подпороговой активностью, существует режим перемежающейся синхронизации.
3. Волновые паттерны в ансамбле автогенераторов ФитцХью-Нагумо, моделирующих ансамбль электрически связанных нейронов, в зависимости от значений параметров могут как аннигилировать, так и отражаться при взаимодействии друг с другом или границами ансамбля.
4. В ансамбле автогенераторов, с двумя нелинейными проводимостями, моделирующих сеть электрически связанных нейронов, возможно формирование хаотических паттернов активности.
5. Фазовая автопереустановка в ансамбле автогенераторов, описывающем процессы в сети нейронов с подпороговыми колебаниями, позволяет формировать кластеры (шаблоны) синхронных колебаний с наперед заданными фазовыми сдвигами.

Практическая и теоретическая значимость результатов

Реализованы аналоговые автогенераторы, демонстрирующие широкий спектр динамических режимов, характерных для колебательных нейронов. Реализованы ансамбли в виде цепочек резистивно связанных автогенераторов, в которых экспериментально получено распространение импульсов возбуждения, волновых фронтов переключения и самоподдерживающихся хаотических структур спайковой активности. Построен ансамбль, на основе сети взаимодействующих автогенераторов со свойством фазовой автопереустановки, позволяющий формировать фазовые паттерны синхронных колебаний, с заданным фазовым сдвигом между генераторами. На основе этого ансамбля разработана многопараметрическая система управления шагающим роботом. Разработанные автогенераторы могут быть использованы в качестве базовых единиц при построении информационно-вычислительных устройств нового поколения, способных осуществлять параллельное преобразование больших потоков информации. Результаты работы позволяют дать практические рекомендации по выбору параметров для существования требуемых динамических режимов. Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе ВУЗов: ННГУ, СГУ, МГУ – при обучении студентов по специальностям радиофизического профиля.

Апробация результатов работы

Основные результаты докладывались на следующих российских и международных конференциях: седьмой научной конференции по радиофизике (Нижний Новгород 2003), на конференции молодых ученых "Нелинейные волновые процессы" (Научная школа "Нелинейные волны" 2004, 2006, 2008, 2010 Нижний Новгород), на нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины 2004), на всероссийской конференции "Хаотические автоколебания и образование структур" (Саратов 2004, 2007), International Symposium "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics" (Nizhny Novgorod, Russia 2003; St.-Petersburg - Nizhny Novgorod, Russia 2005; Nizhny Novgorod, Russia 2008), International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, (Dijon, France 2006; Tokushima, Japan 2007), Chaos and dynamics in biological networks (Cargese, France 2010).

Личный вклад автора

Все эксперименты выполнены лично автором. В совместных работах, теоретический анализ и интерпретация полученных результатов были выполнены с научным руководителем. Результаты опубликованы в работах [1-22].

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем составляет 153 страницы, включая 71 рисунок и список литературы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

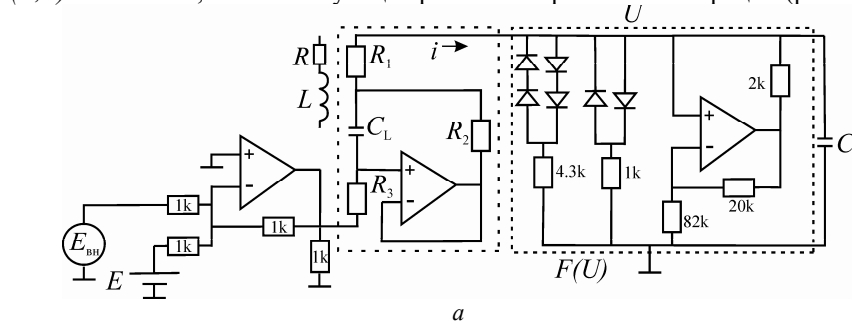
Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, изложены основные результаты и раскрыта их научная и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту и сведения об апробации результатов.

Первая глава посвящена построению и исследованию автогенераторов, обладающих режимами характерными для нейронов с колебательной активностью.

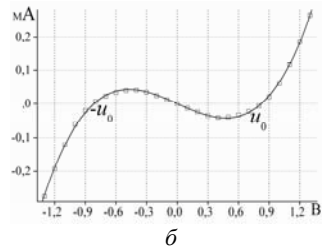
Генератор ФитцХью-Нагумо. Схема генератора представлена на рис. 1а, где напряжение U играет роль мембранного потенциала, C – мембранной емкости, $R=R_1+R_2$ – сопротивления утечки, E – равновесного потенциала, контролирующего уровень деполяризации мембраны, $F(U)$ – нелинейной проводимости мембраны, $L=R_1R_2C_L$ – индуктивности отвечающей за скорость изменения ионных токов, $E_{вн}$ – внешнего стимула. Нелинейная проводимость имеет форму кубической параболы (рис. 1б), которая аппроксимируется функцией $F(U)=\alpha U(U-u_0)(U+u_0)$, где коэффициент α имеет размерность $(\text{ОмВ}^2)^{-1}$. Динамика токов и напряжений данного генератора описывается системой

$$\begin{cases} C \frac{dU}{dt} = -F(U) - i, \\ L \frac{di}{dt} = U - Ri - E - E_{en}(t), \end{cases} \quad (1)$$

Система (1) была исследована экспериментально и теоретически. При отсутствии внешнего стимула ($E_{en}(t)=0$), построены теоретически и экспериментально бифуркационные диаграммы, разделяющие плоскость параметров (R, E) на области, соответствующие различным режимам генерации (рис. 2).

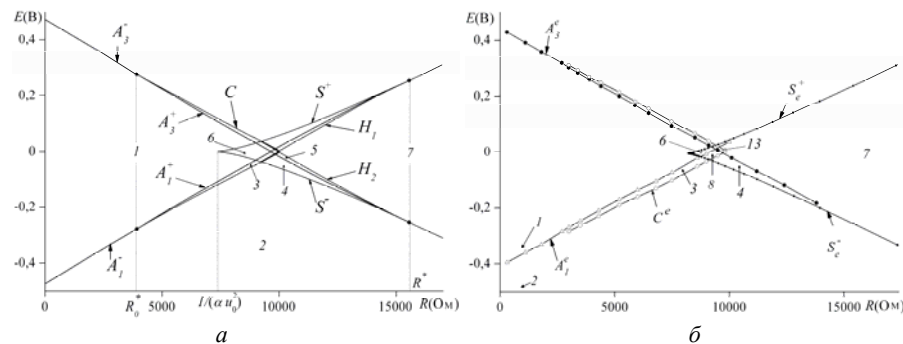


а



б

Рис. 1. а – схема генератора ФитцХью-Нагумо; б – вольт-амперная характеристика нелинейного элемента, квадратами отмечены экспериментальные данные, линии соответствует кубическая функция $F(U)$



а

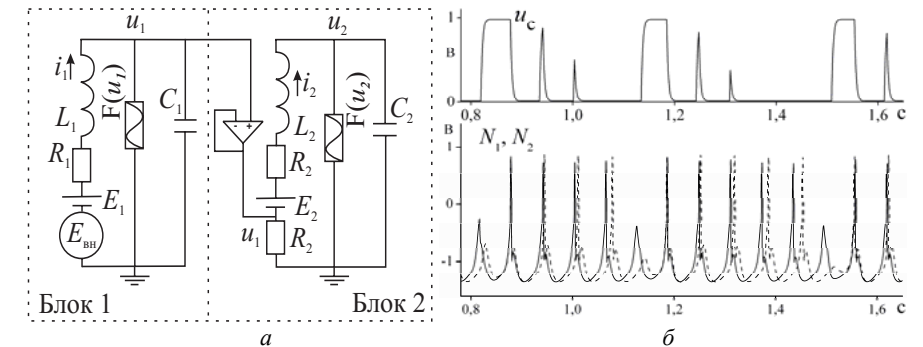
б

Рис. 2. а – бифуркационная диаграмма системы (1); б – экспериментальная бифуркационная диаграмма

На рис. 2а кривые S^+ и S^- отвечают седло-узловым бифуркациям состояний равновесия и разделяют плоскость на две области, в которых система (1) име-

ет либо одно O , либо три состояния равновесия O_1, O_2 и O_3 , где O_2 является седлом. Кривые A_1, A_3 соответствуют бифуркациям Андронова-Хопфа состояний равновесия O, O_1 и O_3 , в результате которых происходит рождение устойчивых или неустойчивых предельных циклов. Кривые H_1, H_2 отвечают нелокальным бифуркациям “малых” петель сепаратрис седла, а кривые H_{21}, H_{12} (не указаны на рисунке) “больших” (охватывающих все три состояния равновесия) петлю сепаратрис седла и соответствуют рождению неустойчивых предельных циклов при их разрушении. Кривая C отвечает бифуркации двукратных предельных циклов. Бифуркационные кривые разделяют плоскость (R, E) на 14 областей, отвечающих существованию колебательного, возбуждимого, и различных мультистабильных режимов, переключение между которыми может осуществляться за счет выбора соответствующих параметров или за счет внешнего кратковременного воздействия $E_{en}(t) \neq 0$ (в случае мультистабильных режимов). Бифуркационная диаграмма полученная экспериментально, представлена на рисунке 2б. Заметим, что она достаточно хорошо согласуется с теоретической. Однако, некоторые из бифуркационных кривых (например, бифуркация большой петли сепаратрис седла), находящихся близко друг к другу на плоскости (R, E) на (рис. 2а) экспериментально различить не удалось.

Генератор, моделирующий динамику нейронов с подпороговой активностью. Генератор состоит из двух блоков, рис. 3а. Первый блок представляет генератор в колебательном режиме, а второй блок отвечает за генерацию импульсов возбуждения. Блоки соединены через повторитель, который обеспечивает однонаправленную связь между ними. Характерными режимами такого генератора являются генерация одиночных импульсов возбуждения (спайков) на пике подпороговых колебаний, а также генерация серий импульсов – берстов, на верхнем полупериоде подпороговых колебаний.



а

б

Рис. 3. а – генератор, моделирующий нейрон с подпороговой активностью; б – режим перемежающейся синхронизации

Экспериментально была исследована динамика двух таких генераторов (далее обозначим их N_1, N_2), взаимодействующих через подавляющую обрат-

ную связь. Частоты блоков, отвечающих за генерацию подпороговых колебаний, различались на несколько процентов, а сами генераторы находились в режиме генерации одиночных спайков на фоне подпороговых колебаний. Генераторы связаны сопротивлением $R(u_c)$, значение которого зависит от управляющего напряжения u_c . Петля обратной связи изменяет сопротивление $R(u_c)$ между генераторами следующим образом. Если N_1 или N_2 генерирует спайк, то сопротивление $R(u_c)$ возрастает, т. е. связь между элементами становится малой на интервал времени τ , где τ является параметром, величину которого можно изменять. Показано, что в зависимости от значения параметра τ в системе могут наблюдаться различные режимы синхронизации, начиная от полной до так называемой перемежающейся синхронизации. В режиме перемежающейся синхронизации существуют временные интервалы, в течение которых спайки синхронны, а вне этих интервалов синхронизации спайков нет. При этом интервалы синхронизации появляются во времени нерегулярно. Отметим, что такие режимы синхронизации наблюдаются и играют важную роль в формировании кластеров активности оливо-мозжечковой системы.

Генератор, моделирующий динамику нейронов с последеполяризацией. Блок-схема такого генератора приведена на рисунке 4а. Характерная особенность нейронов с последеполяризацией состоит в том, что после генерации потенциала действия возбудимость нейронной мембраны временно повышается (рис. 4б), и для повторного возбуждения достаточно сравнительно небольшого стимула. Для реализации свойства последеполяризации был построен генератор с дополнительным блоком обратной связи. Если в генераторе возникает импульс возбуждения, то он активирует дополнительный блок генерации экспоненциального импульса, которой затем поступает на вход генератора, тем самым увеличивая его возбудимость.

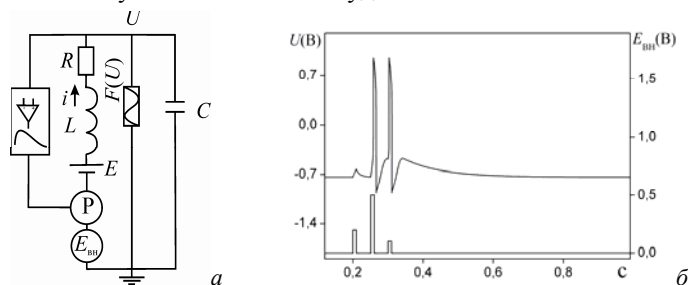


Рис. 4. а – генератор, моделирующий нейрон со свойством последеполяризации; б – последовательное воздействие трех внешних стимулов различной амплитуды

Отметим, что нейроны со свойством последеполяризации входят в так называемую систему краткосрочной (или рабочей) памяти, осуществляющую хранение информации. Таким образом, данный генератор может быть использован в качестве базового элемента для построения искусственной системы хранения информации.

Во второй главе проведено экспериментальное исследование двух типов ансамблей взаимодействующих генераторов, представленных на рис. 5а,в. Изучена пространственно-временная динамика ансамбля из шестнадцати генераторов ФитцХью-Нагумо последовательно соединенных сопротивлениями связи R_c (рис. 5а). Показано, что в таком ансамбле, в зависимости от значений параметров, возможно распространение импульсов возбуждения и волновых фронтов переключения двух типов “кинков” и “антикинков”. Экспериментально изучено взаимодействие волновых фронтов и импульсов возбуждения. Установлено, что волновые фронты переключения и импульсы возбуждения могут аннигилировать при взаимодействии друг с другом, либо проявлять частицеподобные свойства, т. е. отражаться при взаимодействии друг с другом и границами цепочки (рис. 5б). Эффекты отражения волновых паттернов наблюдаются, когда параметры каждого генератора находятся вблизи бифуркационной границы C (см. рис. 2). Изучена пространственно-временная динамика импульсов возбуждения в ансамбле связанных автогенераторов,

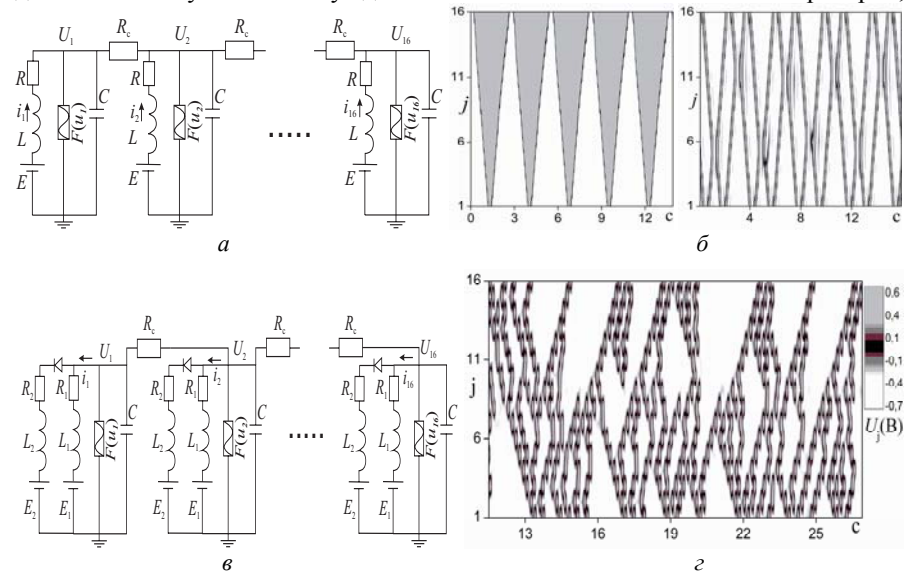


Рис. 5. а – цепочка резистивно связанных генераторов ФитцХью-Нагумо; б – пространственно-временные диаграммы, в случае отражения фронтов переключения от границ и прохождение импульсов возбуждения друг через друга и отражение от границ ансамбля; в – цепочка генераторов с двумя нелинейными проводимостями; г – пространственно-временные структуры хаотической активности импульсов возбуждения

с дополнительной проводимостью (рис. 5в) в которых, по сравнению с предыдущим случаем, каждый генератор имеет две нелинейные проводимости (кубическую – $F(U)$ и нелинейность диода). Показано, что динамика токов и напряжений цепочки таких генераторов, при определенном соотношении параметров, может быть сведена к системе следующего вида:

$$\begin{cases} C \frac{dU_j}{dt} = -F(U_j) - i_j + \frac{1}{R_c}(U_{j-1} - 2U_j + U_{j+1}), \\ \frac{L_1}{R_1} \frac{di}{dt} = R_1 G(U_j) - R_1 i_j - E_1, \end{cases} \quad G(U) = \begin{cases} \frac{1}{R_1} U, U < 0 \\ \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) U, U \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$j = 1, 2, \dots, 16, \quad U_0(t) \equiv U_1(t), \quad U_{17}(t) \equiv U_{16}(t)$

В таком ансамбле генераторов были экспериментально обнаружены самоподдерживающиеся хаотические структуры импульсов возбуждения, появляющиеся в результате неустойчивости импульсов по мере распространения вдоль цепочки (рис. 5г).

Проведено теоретическое исследование волновых паттернов, для цепочки идентичных генераторов с дополнительной нелинейной проводимостью, в рамках длинноволновой аппроксимации. В этом случае, в безразмерных переменных, профили волн описываются системой следующего вида

$$\begin{cases} \dot{u} = y, \\ \dot{y} = cy + \Phi(u) - I + z, \\ \dot{c}z = -\varepsilon z - cg'(u)y, \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\Phi(u) = -f(u) + g(u)$, а функции $f(u)$ и $g(u)$ соответствуют функциям $F(U)$ и $G(U)$, точкой обозначено дифференцирование по бегущей координате. Бифуркационный анализ системы (3) показал, что она имеет три состояния равновесия типа седло-фокус. Два из этих состояний равновесия O_1 и O_3 , имеют неустойчивое одномерное и устойчивое двумерное многообразия, а состояние равновесия O_2 , наоборот, имеет устойчивое одномерное и неустойчивое двумерное многообразия. Методом двумерных систем сравнения, локализуемых в фазовом пространстве устойчивые и неустойчивые многообразия седловых состояний равновесия O_1 и O_3 , было доказано существование гетероклинических траекторий (рис. 6). Этим траекториям соответствуют распространяющиеся с постоянной скоростью волновые фронты (кинки и антикинки) в цепочке генераторов.

Показано, что кроме волновых фронтов в цепочке возможно распространение импульсов возбуждения, которым в системе (3) отвечают гомоклинические орбиты. На плоскости (I, c) установлены значения параметров, отвечающие бифуркации гомоклинических траекторий (множества Γ_1, Γ_3), а также множества H^+ и H^- , отвечающие гетероклиническим орбитам, которые определяют зависимость скорости c , для волновых импульсов и фронтов переключения, от параметра деполяризации I (см. рис. 6).

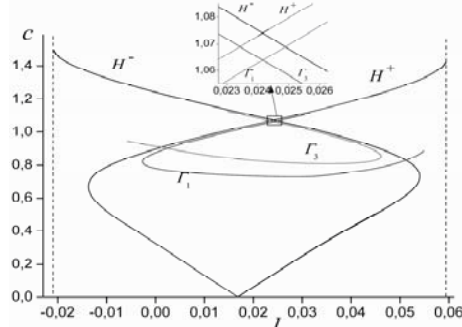


Рис. 6. Бифуркационные множества H^+ , H^- и Γ_1, Γ_3 , отвечающие существованию соответственно гетероклинических и гомоклинических орбит в системе (3)

Показано, что бифуркационные множества $\Gamma_1, \Gamma_3, H^+, H^-$, имеют несколько точек пресечения, которые отвечают существованию в фазовом пространстве системы (3) сложных гетероклинических контуров, образованных сепаратрисными многообразиями седло-фокусов O_1 и O_3 с положительной седловой величиной. В окрестности таких контуров, в частности, существует нетривиальное гиперболическое множество, содержащее бесконечное множество седловых периодических траекторий. Таким образом, для значений параметров, взятых в окрестности данных структур, система для бегущих волн демонстрирует чрезвычайно сложную динамику, что показывает сложное пространственно-временное поведение исходного ансамбля генераторов. В частности, это подтверждается экспериментально наблюдаемыми режимами хаотической импульсной активности (рис. 5г).

Третья глава посвящена фазово-управляемым колебаниям в ансамбле генераторов, описывающем процессы в сети нейронов с подпороговыми колебаниями. Рассмотрен эффект фазовой автоперестройки при воздействии на генератор внешним импульсом. На примере автогенератора ФитцХью-Нагумо находящегося в режиме подпороговых колебаний показано, что установившаяся фаза не зависит от момента воздействия внешнего стимула (или

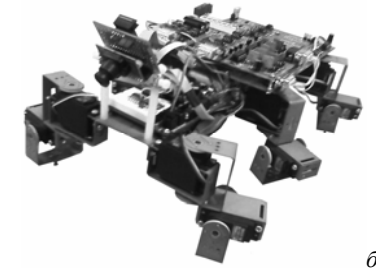
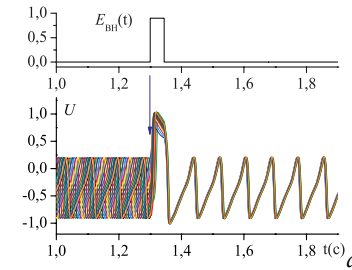


Рис. 7. а – эффект фазовой автоперестройки; б – шагающий робот

от начальной фазы), а определяется лишь интенсивностью внешнего импульса, рис. 7а. Изучена зависимость точности переустанавливаемой фазы от характеристик импульса. Показана возможность использования данного эффекта для импульсно управляемой синхронизации неидентичных автогенераторов. Реализован ансамбль с центральным генератором, относительно которого устанавливаются фазы всех остальных генераторов. В таком ансамбле возможно формирование фазовых паттернов, любой наперед заданной конфигурации. На основе такого ансамбля генераторов, обладающих эффектом фазовой автоперестройки, была построена система управления шагающим роботом, рис. 7б. Экспериментально были установлены базовые шаблоны задающие движение робота (по плоской поверхности) “вперед”, “влево” и “вправо”. Система управления, используя базовые шаблоны движения и входной (сенсорный) сигнал с видеокamеры, формирует новые моторные шаблоны движения, позволяющие роботу следовать за целью.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Реализован аналоговый автогенератор ФитцХью-Нагумо, демонстрирующий колебательный, возбудимый (генерация одиночного импульса – спайка) и мультистабильные режимы. Проведено аналитическое и экспериментальное исследование бифуркационных границ, отвечающих смене динамических режимов. Установлены области параметров генератора, которым отвечают периодические (подпороговые) колебания, возбудимый режим, бистабильные и мультистабильные режимы, характеризующиеся сосуществованием нескольких устойчивых режимов, переключение между которыми возможно за счет короткого внешнего импульса. Аналитически и численно были изучены локальные и нелокальные бифуркации в системе уравнений описывающей динамику токов и напряжений такого генератора, и проведено их сравнение с экспериментальными результатами.
2. Построен генератор, обладающий колебательной активностью ниже порога возбуждения, для которого характерны генерация спайков или берстов (последовательностей спайков) на пиках подпороговых колебаний.
3. Экспериментально исследована динамика двух генераторов обладающих колебательной активностью ниже порога возбуждения, охваченных импульсно-управляемой подавляющей обратной связью. Показано, что такая связь позволяет формировать самоподдерживающиеся режимы спайковой синхронизации (полной, перемежающейся и др.)
4. Реализован и исследован генератор, моделирующий динамику нейронов, обладающих свойством последеполяризации (понижение порога возбуждения после генерации спайка).
5. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование волновых движений в двух типах ансамблей из шестнадцати резистивно связанных автогенераторов: в цепочке генераторов ФитцХью-Нагумо и цепочке генераторов с двумя нелинейными проводимостями. В таких ансамблях экспериментально установлено распространение импульсов возбуждения и волновых фронтов переключения. Показано, что в зависимости от значений параметров волновые фронты и импульсы обладают различными свойствами: либо импульсы возбуждения и волновые фронты переключения при столкновении друг с другом и границами ансамбля аннигилируют, либо демонстрируют частицеподобные свойства, т. е. отражаются при взаимодействии друг с другом и от границ цепочки.
6. В ансамбле генераторов с двумя нелинейными проводимостями, установлена область параметров, которой отвечает хаотическое поведение импульсов возбуждения, появляющееся в результате их неустойчивости по мере распространения вдоль цепочки.
7. Исследована трехмерная нелинейная система, описывающая волновые движения в цепочке связанных генераторов. Изучены гомоклинические и гетероклинические орбиты такой системы и ассоциирующиеся с ними волны – импульсы возбуждения и волновые фронты переключения.
8. Экспериментально показано, что автогенератор ФитцХью-Нагумо обладает эффектом фазовой автопереустановки, который позволяет управлять фазой колебаний. При подаче на генератор прямоугольного импульса фаза колебаний переустанавливается к новому значению, которое не зависит от момента воздействия внешнего импульса (или от начальной фазы), а определяется лишь интенсивностью импульса, т. е. его амплитудой и длительностью.
9. Реализован ансамбль из генераторов, обладающих эффектом фазовой автопереустановки, в котором формируются паттерны синхронных колебаний, с заданными сдвигами по фазе. Показано, что образование паттернов возможно и в случае неидентичных генераторов, имеющих разброс по частотам.
10. Построена многопараметрическая система управления шагающим роботом на основе ансамбля генераторов, моделирующих эффект фазовой автопереустановки нейронов нижних олив.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Престунов В. А., Щапин Д. С., Казанцев В. Б., Некоркин В. И. Эффекты синхронизации и десинхронизации в системе двух динамических связанных автогенераторов. //Труды (седьмой) науч. конф. по радиофизике, посвященной 90-летию со дня рождения В.С. Троицкого / ред. А. В. Якимов. Н. Новгород: ТАЛАН. 2003. С. 120.
2. Prestunov V. V., Shapin D. S., Kazantsev V. B., and Nekorkin V. I. The dynamics of two oscillators with pulse-controlled coupling. Abstr. Int. Symp. "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics". Nizhny Novgorod. Russia. 2003. P. 74-75.
3. Щапин Д. С., Престунов В. А., Казанцев В. Б., Некоркин В. И. Модель нейрона с подпороговыми колебаниями // Тезисы докл. Конф. молодых ученых "Нелинейные волновые процессы (XII науч. школа "Нелинейные волны-2004)". Н. Новгород, 2004. С. 92-93.
4. Престунов В. А., Щапин Д. С. Динамика модели нейрона с подпороговой активностью // Тезисы докладов IX Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины), Н. Новгород, 2004. С.120.
5. Дмитричев А. С., Щапин Д. С., Казанцев В. Б., Некоркин В. И. Сложная волновая динамика в ансамбле взаимосвязанных элементов ФитцХью-Нагумо и сепаратрисные контура // Матер. VII междунар.школы "Хаотические автоколебания и образование структур - 2004". Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 2004. С.119-120.
6. Престунов В. А., Щапин Д. С., Казанцев В. Б., Некоркин В.И. Управление фазой автоколебаний релаксационного генератора при помощи внешнего стимула // Матер. VII междунар. школы "Хаотические автоколебания и образование структур - 2004". Саратов: Изд-во ГосУНЦ "Колледж", 2004. С.120-121.
7. Shapin D. S., Kazantsev V. B., and Nekorkin V. I. Synchronization and time binding in two neuronal oscillators with inhibitory feedback : abstr. // Int. Symp. "Topical Problems of Nonlinear Wave Physics", Nizhny Novgorod, 2005. P. 95-96.
8. Щапин Д. С. Фазовая автопереустановка и синхронизация релаксационных автоколебательных систем // Тезисы докл. X Нижегородской сессии молодых ученых (естественнонаучные дисциплины). Н. Новгород, 2005. С. 160-161.

9. Некоркин В. И., Дмитричев А. С., Щапин Д. С., Казанцев В. Б. Динамика модели нейрона со сложно-пороговым возбуждением // Математическое моделирование. 2005. Т. 17, №6. С. 75-91.
10. Щапин Д. С. Импульсное блокирование связи в сети нейроноподобных элементов в физическом эксперименте. Тезисы докладов конференции молодых ученых "Нелинейные волновые процессы". Н. Новгород. 2006. С. 169.
11. Kazantsev V. B., Dmitrichev A. S., Shapin D. S. and Nekorkin V. I. Multi-threshold excitability in a nonlinear network of neuron-like units // The 14-th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. Dijon. France. 2006. P. 69-72.
12. Kazantsev V. B., Shapin D. S. and Nekorkin V. I. Phase clusters in oscillatory neuronal network with inhibitory feedback // The 14-th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. Dijon. France. 2006. P. 73-77.
13. Shapin D. S. Phase control in nonlinear electronic circuit modeling oscillatory neurons // The 15th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. Tokushima. Japan. 2007. P. 194-196.
14. Щапин Д. С. Управление фазой колебаний в нелинейной электронной схеме модели нейрона // 8-я международная школа "ХАОС-2007": Тез. докл.- Саратов: Изд. СГУ, 2007. С.100.
15. Некоркин В. И., Щапин Д. С., Дмитричев А. С. Сложная волновая динамика ансамбля нейроноподобных элементов со сложно-пороговым возбуждением // Изв. ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, №1. С. 3-22.
16. Щапин Д. С. Экспериментальное исследование динамики модели нейрона с подпороговыми колебаниями // XIV научная школа "Нелинейные волны - 2008". Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики. Конференция молодых ученых : тезисы докладов. Н. Новгород. 2008. С. 177.
17. Shapin D. S. The dynamics of two coupled neuron-like electronic elements with inhibitory feedback // Topical problems of nonlinear wave physics (NWP - 2008). Proc. of the 16th Int. Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES – 2008). Nizhny Novgorod, 2008. P. 87-88.
18. Nekorkin V. I., Shapin D. S., Dmitrichev A. S., Kazantsev V. B., Binczak S., Bilbault J. M. Heteroclinic contours and self-replicated solitary waves in a reaction-diffusion lattice with complex threshold excitation // Physica D. 2008. V. 237. P.2463-2475.
19. Щапин Д. С. Динамика двух нейроноподобных элементов с подавляющей обратной связью // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, №2. С. 185-195.
20. Щапин Д. С., Дмитричев А. С., Казанцев В. Б., Некоркин В. И. Генерация моторных паттернов и их перестройка по сенсорному сигналу в нейродинамической системе управления шагающего робота // XV Научная школа "Нелинейные волны - 2010". Фундаментальные и прикладные задачи нелинейной физики. Конференция молодых ученых : тезисы докладов. Н. Новгород. 2010. С. 136.
21. Shchapin D.S., Dmitrichev A. S., Kazantsev V. B., Nekorkin V. I. Phase cluster based motor pattern generation in oscillatory network controller of hexapod robot walking gates // Chaos and dynamics in biological networks - 2010. Cargès – France, 2010. P. 12.
22. Клинышов В. В., Щапин Д. С., Некоркин В. И. Моделирование нейродинамической системы рабочей памяти // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, №7. С. 812-817.

ЩАПИН Дмитрий Сергеевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОГЕНЕРАТОРНЫХ МОДЕЛЕЙ
НЕЙРОННЫХ СИСТЕМ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 6.07.2011 г.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 66(2011).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,
603950 г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46