

*На правах рукописи*

ОВЧИННИКОВ Алексей Александрович

СИНХРОНИЗАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ  
В ПРИСУТСТВИИ ШУМОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ  
С РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ  
И НЕЙРОННЫМИ АНСАМБЛЯМИ ГОЛОВНОГО МОЗГА  
И ДИАГНОСТИКА ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ ПАТТЕРНОВ

01.04.03 – Радиофизика

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2011

Работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и волн и в отделении физики нелинейных систем научно-исследовательского института естественных наук Саратовского государственного университета.

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор  
**Храмов Александр Евгеньевич**

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор  
**Павлов Алексей Николаевич,**  
д.ф.-м.н., в.н.с.  
**Прохоров Михаил Дмитриевич,**

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского”,  
г. Н.Новгород

Защита состоится “29” июня 2011 г. в 13 часов 00 минут в Большой физической аудитории III корпуса СГУ на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 по специальности 01.04.03 в Саратовском государственном университете (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан “\_\_\_” мая 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

**В.М. Аникин**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследуемой проблемы.** Исследование синхронной динамики сложных автоколебательных систем различной природы и изучение влияния шумов на синхронизацию представляет собой актуальную задачу современных исследований в области радиофизики и нелинейной динамики<sup>1</sup>. Хотя данное направление исследований развивается уже достаточно долго, со времен Х. Гюйгенса, интерес к нему не только не ослабевает, но более того, по мере развития различных смежных с радиофизикой областей науки, увеличивается. Так, если первые работы Ван дер Поля Б., Гапонова В.И., Теодорчика К.Ф., Андропова А.А. и др., посвящённые построению теории синхронизации рассматривали преимущественно взаимодействие электронных, радиотехнических и механических систем, демонстрирующих *периодические* автоколебания, то по мере становления нелинейной динамики с появлением теории динамического хаоса явление синхронизации было обобщено на хаотические колебания в системах различной природы (не только физической, но и химической, биологической, экологической и др.)<sup>2</sup>. В настоящее время по мере развития теории сложных сетей всё чаще явление синхронизации изучается в системах с большим числом взаимодействующих объектов<sup>3</sup>.

Следует отметить, что синхронизация как универсальное нелинейное явление представляет интерес как с фундаментальных позиций, так и с сугубо практических, поскольку может быть применено при решении ряда технических и инженерных задач, а именно для передачи информации<sup>4</sup>, управления радиофизическими системами<sup>5</sup>, анализа и взаимодействия с биологическими и физиологическими системами<sup>6</sup> и т.д. При этом важным представляется изучение влияния шумов на синхронизацию, поскольку любая реальная система,

<sup>1</sup> Пиковский А. С., Розенблум М. Г., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003

Balanov A. G., Janson N. B., Postnov D. E., Sosnovtseva O. V. Synchronization: from simple to complex. Springer, 2009

<sup>2</sup> Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. М.-Ижевск: РХД. 2000

Анщенко В. С., Астахов В. В., Вадивасова Т. Е., Стрелкова Г. И. Синхронизация регулярных, хаотических и стохастических колебаний. М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2008

<sup>3</sup> Афраймович В. С., Некоркин В. И., Осипов Г. В., Шалфеев В. Д. Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации. Горький: ИПФ АН СССР, 1989

Voccaletti S., et al. Complex Networks: Structure and Dynamics // Physics Reports. 424 (2006) 175-308

<sup>4</sup> Короновский А. А., Москаленко О. И., Храмов А. Е. О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации // УФН. 179 (12) (2009) 1281-1310

<sup>5</sup> Шалфеев В. Д., Осипов Г. В., Козлов А. К., Волковский А. Р. Хаотические колебания — генерация, синхронизация, управление // Зарубежная радиоэлектроника. (10) (1997) 27-49

<sup>6</sup> Prokhorov M. D., Ponomarenko V. I., Gridnev V. I., Bodrov M. B., Bespyatov A. B. Synchronization between main rhythmic processes in the human cardiovascular system. Phys. Rev. E. 68 (2003) 041913

Sosnovtseva O. V., Pavlov A. N., Mosekilde E., et al. Synchronization among mechanisms of renal autoregulation is reduced in hypertensive rats. American Journal of Physiology. 293 (2007) F1545

Mosekilde E., Maistrenko Yu., Postnov D. E. Chaotic synchronization, applications to living systems. Series A, Vol. 42. World Scientific, Singapore, 2002

в отличие от модельной, оказывается подверженной их воздействию, которое может существенным образом изменить наблюдаемую картину установления синхронизации как в случае регулярных, так и хаотических колебаний.

Отдельно следует обратить внимание на проблему приложения методов, развиваемых в современной радиофизике и теории колебаний и волн, к задачам обработки сигналов, возникающих в других областях знаний, в первую очередь, в физиологии и нейрофизиологии. В качестве ярких примеров подобных исследований систем живой природы методами радиофизики и нелинейной динамики отметим работы по изучению воздействия внешнего стимула на динамику мозга<sup>7</sup>, по взаимодействию ритмов респираторной и сердечно-сосудистой систем<sup>8</sup>, исследованию особенностей динамики нейронных ансамблей головного мозга человека<sup>9</sup>, перемежающегося поведения в нейронных ансамблях<sup>10</sup>, выделению откликов отдельных нейронов<sup>11</sup> и др. Особую важность такие методы исследований приобретают при анализе динамики нейронных сетей головного мозга, который представляет собой крайне сложный объект, состоящий из большого числа колебательных элементов с собственной сложной динамикой – нейронов, связанных разнообразными связями со сложной топологией<sup>12</sup>.

Для исследования коллективной динамики нейронных ансамблей головного мозга человека и животных широко используется метод регистрации электрической активности – электроэнцефалография. Разработка и внедрение современных методов обработки большого количества данных при многоканальных записях электроэнцефалограмм (ЭЭГ) являются одним из наиболее активно развиваемых и актуальных направлений на стыке современной нейробиологии и радиофизики в плане разработки новых методов обработ-

---

<sup>7</sup> *Tass P. A. et al* Synchronization Tomography: A Method for Three-Dimensional Localization of Phase Synchronized Neuronal Populations in the Human Brain using Magnetoencephalography // *Phys. Rev. Lett.* 90 (8) (2003) 088101

<sup>8</sup> *Anishchenko V. S., Balanov A. G., Janson N. B. et al.* Entrainment between heart rate and weak nonlinear forcing // *Int. J. Bifurcation and Chaos*. 10 (10) (2000) 2339-2348

*Hramov A. E., Koronovskii A. A., Ponomarenko V. I., Prokhorov M. D.* Detecting synchronization of self-sustained oscillators by external driving with varying frequency // *Phys. Rev. E*. 73 (2) (2006) 026208

<sup>9</sup> *Lehnertz K., Bialonski S., Horstmann M. et al.* Synchronization phenomena in human epileptic brain networks // *J. Neuroscience Methods*. 183 (2009) 42-48

*van Luijckelaar G., Hramov A.E., Sitnikova E.Yu., Koronovskii A.A.* Spike-wave discharges in WAG/Rij rats are preceded by delta and theta precursor activity in cortex and thalamus. *Clinical Neurophysiology*. 122, (2011) 687-695

<sup>10</sup> *Perez Velazquez J. L., et al.* Type III intermittency in human partial epilepsy. *European Journal of Neuroscience*. 11 (1999) 2571-2576

*Hramov A. E., Koronovskii A. A., Midzyanovskaya I. S., Sitnikova E., Rijn C. M.* On-Off Intermittency in Time Series of Spontaneous Paroxysmal Activity in Rats with Genetic Absence Epilepsy // *Chaos*. 16 (2006) 043111

<sup>11</sup> *Lee D.* Analysis of phase-locked oscillations in multi-channel single-unit spike activity with wavelet cross-spectrum // *J. Neuroscience Methods*. 115 (2002) 67-75

<sup>12</sup> *Некоржин В. И.* Нелинейные колебания и волны в нейродинамике // *УФН*. 178 (3) (2008)

*Buzsaki G., Draguhn A.* Neuronal Oscillations in Cortical Networks // *Science*. 304 (2004) 1926-1929 313

ки и анализа нестационарных сигналов, что обеспечивает высокий приоритет данного направления исследований в современной нелинейной науке. С точки зрения радиофизики ключевое значение здесь имеют обработка данных с использованием современных методов и подходов, моделирование и исследование общей динамики появления определенных ритмов и осцилляторных паттернов на ЭЭГ. Привлечение мощного аналитического аппарата, созданного и применяемого в области радиофизики и нелинейной динамики (в частности, методов, основанных на вейвлетном анализе)<sup>13</sup>, открывает широкие возможности для создания новых эффективных методов анализа экспериментальных данных, выявления новых закономерностей и автоматизации обработки экспериментальных данных. Существует большое число удачных примеров эффективного применения этих методов к задачам обработки нормальных и патологических ЭЭГ животных и человека, в частности, выделения характерных особенностей сигнала и очистки его от шумов и артефактов. Однако, несмотря на значительное количество публикаций, появившихся в последние годы, привлечение аппарата вейвлетного анализа для решения задач быстрой диагностики и анализа осцилляторных паттернов электроэнцефалограмм, связанных с ритмическими процессами и синхронизацией различных областей в головном мозге, а также для мониторинга мозговой активности, пока еще находится на начальном этапе.

Важно отметить, что подавляющее большинство проведенных в этом направлении работ, в том числе и направленных на решение практических задач, носят достаточно теоретический характер – исследование явления синхронизации проводится либо аналитически либо численно, при этом число экспериментальных работ в этом направлении остаётся достаточно малым. Не отрицая важности аналитических и численных исследований, подчеркнем необходимость экспериментального исследования, поскольку последнее представляет собой надёжный и универсальный метод получения, проверки и апробации научных результатов в естественных науках. В связи с этим важным и актуальным представляется вопрос об экспериментальном исследовании эффектов синхронизации систем со сложной динамикой. В настоящей диссертационной работе рассматриваются вопросы экспериментального изучения синхронизации в радиотехнических и нейрофизиологических системах, влияние шумов на установление синхронного режима, а также вопросы обработки экспериментальных сигналов с применением современных радиофизических методов и подходов, направленных на выделение характерных структур в исследуемых сигналах с использованием вейвлетного анализа.

---

<sup>13</sup> *Короновский А. А., Храмов А. Е.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003

*Sosnovtseva O. V., Pavlov A. N., Brazhe N. A. et al* Interference microscopy under double-wavelet analysis: A new tool to studying cell dynamics // *Phys. Rev. Lett.* 94 (2005) 218103

Таким образом, на основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что круг вопросов, требующих дальнейших экспериментальных исследований в области синхронизации систем со сложной динамикой и воздействия на неё шумов, остаётся широким, а тема диссертационной работы является актуальной и важной для современной радиофизики и нелинейной динамики.

**Цель диссертационной работы** определена кругом вышеперечисленных задач и заключается в изучении особенностей установления режимов синхронизации хаотических систем в радиофизическом эксперименте, влияние на них внешних источников шумов, а также приложение развитых радиофизических методов к изучению эффектов синхронизации в нейрофизиологических системах.

Для достижения данной цели в диссертации подробно рассматриваются следующие вопросы:

- постановка радиофизического эксперимента по изучению явления синхронизации и влиянию на него внешнего шумового сигнала: устройство и особенности экспериментальной установки, проведение измерений;
- экспериментальное исследование перемежающегося поведения вблизи границы синхронизации радиотехнического генератора в присутствии внешнего источника шума;
- экспериментальное изучение влияния шума на порог установления обобщённой синхронизации хаотических колебаний;
- экспериментальное исследование синхронизации временных масштабов и влияния шума на этот тип хаотической синхронизации;
- экспериментальное исследование связи между синхронизацией временных масштабов и традиционно рассматриваемыми типами хаотической синхронизации (полной, обобщённой и фазовой хаотической синхронизацией);
- создание на основе современных радиофизических подходов методики анализа осцилляторных паттернов в нестационарных сигналах нейрофизиологической природы и разработка программно-аппаратного комплекса мониторинга изменения функционального состояния головного мозга лабораторных животных;
- разработка методов анализа пространственно-временной динамики синхронизации различных областей головного мозга человека во время приступов абсанс-эпилепсии и локализации источника патологического состояния по регистрируемой электрической активности головного мозга на основе многоканальных записей электрической активности мозга.

## Положения и основные результаты, выносимые на защиту

1. Экспериментальное распределение длительностей синхронных фаз неавтономного периодического генератора вблизи границы синхронного режима при воздействии на него шумового сигнала подчиняется закономерностям, характерным для ранее теоретически предсказанной перемежаемости типа I с шумом.
2. Режим обобщенной хаотической синхронизации в однонаправленно связанных хаотических осцилляторах характеризуется устойчивостью к внешним шумам и флуктуациям. Это выражается в том, что порог возникновения обобщенной синхронизации в отличие от других типов хаотической синхронизации не изменяется с ростом интенсивности шума, воздействующего на связанные системы, вплоть до мощностей шумового сигнала сравнимых с мощностью автономных колебаний генераторов.
3. Экспериментально наблюдаемая синхронизация временных масштабов является более общим типом хаотической синхронизации по сравнению с традиционно выделяемыми типами синхронизации хаотических осцилляторов (полная, обобщенная и фазовая синхронизации). При этом синхронизация временных масштабов является простым и эффективным методом диагностики синхронной динамики в эксперименте, поскольку в отличие от других методов на процедуру диагностики не оказывает влияния структура аттрактора, нестационарность сигнала и малые величины отношения сигнал/шум.
4. Разработанный метод диагностики различных типов ритмической активности и осцилляторных паттернов на нестационарных сигналах, основанный на анализе мгновенных распределений энергии вейвлетного преобразования с комплексным базисом, позволяет создать систему автоматического распознавания в реальном времени специфических паттернов на сигналах электроэнцефалограмм с высокой точностью и коротким временем принятия решения.
5. Во время приступов абсанс-эпилепсии между отведениями для записи многоканальных электроэнцефалограмм от различных областей головного мозга наблюдается установление режима синхронизации временных масштабов. Тенденцию к установлению синхронного режима еще до начала приступа имеют сигналы, определяемые динамикой нейронного ансамбля фронтальной коры головного мозга, при этом по мере развития эпилептического приступа синхронизация наблюдается между всё увеличивающимся числом отведений из всей коры головного мозга.

**Научная новизна** результатов, представленных в диссертационной работе, заключается в выявлении и экспериментальном подтверждении особенностей синхронизации систем со сложной динамикой различной природы, находящихся под действием шума, создании новых универсальных методов выделения и описания синхронных состояний, не зависящих от природы и свойств сигналов, генерируемых исследуемыми системами.

Получены следующие новые научные результаты:

- Впервые в радиотехническом эксперименте исследовано влияние шума на динамику систем с периодической динамикой, находящихся вблизи границы области синхронизации; установлено, что в случае малой расстройки собственных частот генерации под воздействием шума в динамике связанных систем наблюдается перемежающееся поведение, в то время как в отсутствие шума перемежаемость не наблюдается. Экспериментально доказано, что статистические характеристики перемежающегося поведения соответствуют статистическим характеристикам перемежаемости типа I с шумом;
- Впервые экспериментально изучено влияние шума на установление режимов обобщённой хаотической синхронизации; показано, что введение в связанную систему хаотических осцилляторов шумового сигнала с интенсивностью, сравнимой с интенсивностью сигнала, не оказывает влияния на положение границы области синхронизации;
- Впервые экспериментально в рамках радиотехнического эксперимента изучена синхронизация временных масштабов систем, демонстрирующих хаотическую динамику и находящихся под воздействием шума; установлено, что данный тип хаотической синхронизации может наблюдаться независимо от воздействия на него внешнего шума и независимо от структуры хаотического аттрактора, соответствующего имеющемуся типу хаотической динамики;
- Экспериментально доказано, что метод синхронизации временных масштабов позволяет независимо диагностировать синхронизацию между различными спектральными компонентами исследуемых многочастотных сигналов, при этом структура сигнала и присутствие шума не оказывают влияния на эффективность диагностики;
- Экспериментально исследована связь между известными типами хаотической синхронизации (полной, обобщённой и фазовой хаотической синхронизацией) и синхронизацией временных масштабов; установлено, что



синхронизация временных масштабов имеет место во всём диапазоне параметров связи, в котором наблюдаются другие типы хаотической синхронизации;

- Предложен оригинальный метод выделения в реальном времени состояний паталогической гиперсинхронизированной активности нейронных ансамблей головного мозга лабораторных животных, на базе предложенного метода разработан и внедрён программно-аппаратный комплекс мониторинга функциональных состояний головного мозга лабораторных животных;
- На основе метода синхронизации временных масштабов разработан метод анализа пространственно-временной динамики установления и разрушения гиперсинхронизированного состояния головного мозга человека во время приступа абсанс-эпилепсии. С помощью данного метода изучено установление и разрушение синхронного паталогического состояния мозга, связанного с абсанс-эпилепсией, и показано, что с помощью предложенного метода могут быть локализованы пространственные области (эпилептический фокус), ответственные за начало приступа.

**Личный вклад** Основная часть представленных в диссертации результатов получена лично автором. В большинстве совместных работ автором получены все экспериментальные результаты, а также выполнено большинство численных и аналитических расчетов. Постановка задач, разработка методов их решения, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены либо лично автором, либо совместно с научным руководителем и другими соавторами научных работ, опубликованных соискателем.

**Практическая значимость.** В диссертационной работе решен ряд научных задач, имеющих практическую важность для радиофизики, нелинейной динамики и обработки сигналов в нейрофизиологии, связанных с анализом и диагностикой синхронного поведения систем различной природы в натурном эксперименте и по экспериментальным регистрируемым данным. Радиофизический эксперимент проводился на примере радиотехнического генератора колебаний с 1.5 степенями свободы, демонстрирующего большое разнообразие типов динамики, как периодической, так и хаотической. Данная система является характерным представителем систем с хаотической динамикой, поэтому все полученные для неё результаты имеют общий характер и могут быть распространены на системы различной природы.

Развитие и совершенствование методов анализа совместного поведения систем со сложной динамикой в присутствии шумов позволило предложить универсальные подходы к распознаванию характерных осцилляторных паттернов во временных реализациях различной природы, нечувствительные к

присутствию в сигнале шумовой составляющей. На основании предложенного подхода был создан и внедрён в Дондерсовском центре сознания университета Радбоуд (г. Неймеген, Нидерланды), аппаратно-программный комплекс мониторинга функционального состояния головного мозга лабораторных животных, способный взаимодействовать с мозгом в режиме реального времени. Дальнейшее развитие предложенных подходов к обработке нейрофизиологических сигналов и применение полученного опыта к анализу многоканальных записей электроэнцефалограмм пациентов, страдающих абсанс-эпилепсией, позволило разработать новый метод выделения фокуса эпилептического приступа в головном мозге, а также детально изучить динамику установления и разрушения синхронных состояний в различных областях головного мозга во время эпилептического приступа.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность экспериментально полученных результатов обеспечивается использованием современного контрольно-измерительного оборудования. Достоверность результатов также подтверждается их воспроизводимостью, соответствием результатов, полученных аналитически и в рамках численного или натурального экспериментов, а также отсутствием противоречий между полученными результатами и известными из научной литературы достоверными и общепризнанными научными фактами.

**Апробация результатов и публикации** Настоящая диссертационная работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и в отделении физики нелинейных систем научно-исследовательского института естественных наук (ОФНС НИИ ЕН СГУ) ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных научных конференциях и семинарах и отражены в тезисах докладов: XI Всероссийской научной школе-семинаре «Физика и применение микроволн (Волны-2007)» (Звенигород, май 2007), VII Международной школе «Хаотические автоколебания и образование структур (ХАОС-2007)» (Саратов, октябрь 2007), XIV научной школе «Нелинейные волны — 2008» (Н.Новгород, март 2008), XI Всероссийской научной школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах (Волны-2008)» (Звенигород, май 2008), International Symposium «Topical Problems of Nonlinear Wave Physics (NWP-2008)», Nonlinear Dynamics: Theory and Applications (Nizhny Novgorod, July 2008), XII Всероссийской научной школе-семинаре «Физика и применение микроволн (Волны-2009)» (Звенигород, май 2009), Всероссийская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» (Н.Новгород, май 2009), «17th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems (NDES-2009)» (Switzerland, June 2009), XV научной школе «Нели-

нейные волны — 2010” (Н.Новгород, март 2010), XII Всероссийской научной школе–семинаре “Волновые явления в неоднородных средах (Волны–2010)” (Звенигород, май 2010), VI Международный междисциплинарный конгресс “Нейронаука для медицины и психологии” (Судак, Украина, июнь 2010), IX Международной школе “Хаотические автоколебания и образование структур” (Саратов, октябрь 2010). Результаты, изложенные в диссертационной работе, неоднократно обсуждались на научных семинарах кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ.

Результаты работы опубликованы в центральных реферируемых научных журналах, таких как “Радиотехника и электроника”, “Журнал технической физики”, “Письма в журнал технической физики”, “Известия РАН. Серия физическая”, “Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика”, “Physical Review E”, “Journal of Neuroscience Methods”, “Physics of Wave Phenomena”, “Вестник ТГУ” – всего 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 171 страницу текста, включая 49 иллюстраций и 2 таблицы. Список литературы содержит 227 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, описаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Введение содержит основные положения и результаты, выносимые на защиту, сведения о достоверности и апробации результатов.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена описанию экспериментальной установки, использовавшейся для постановки радиотехнических экспериментов, результаты которых представлены в настоящей работе, и результатов экспериментального исследования перемежающегося поведения в динамике систем с периодической динамикой на границе области синхронизации в присутствии внешнего шума, а также результатов экспериментального исследования влияния внешнего шума на положение границы области обобщённой синхронизации хаотических колебаний.

В первом разделе описывается состав экспериментальной установки: радиотехнический генератор со сложной динамикой, использовавшийся для изучения эффектов синхронизации, генератор внешнего шума и вспомогательные устройства. Радиотехнический генератор представляет собой электрическую цепь, известную в литературе как генератор хаоса с 1,5 степеня-

ми свободы<sup>14</sup>, демонстрирующий большое число различных периодических и хаотических режимов генерации. Генератор представляет собой нелинейный усилитель, охваченный цепью обратной связи, состоящей из двух фильтров нижних частот первого и второго порядка. Режим генерации определялся параметром усиления  $\alpha$  нелинейного усилителя, в эксперименте эта величина изменялась в диапазоне  $[12 \div 25.5]$ . Параметры пассивных компонент генератора были выбран таким образом, что основная частота генерации (т.е. та частота, на долю которой приходится максимальное количество энергии в спектре колебаний) была равна 8.9 кГц. Генератор шума был построен на основе обратносмещённого стабилитрона, работающего в предпробойном режиме. Как известно, в таком режиме работы  $p$ - $n$  переходы являются мощными источниками шума, при этом в достаточно широком диапазоне частот (до 2 МГц) спектр такого сигнала близок к спектру дельта-коррелированного процесса. Поскольку граничная частота, выше которой спектр переставал быть сплошным и равномерным, была существенно выше как собственной частоты генерации, так и частот среза фильтров, входящих в состав исследуемого генератора со сложной динамикой, в дальнейшем предполагалось, что на систему воздействует белый шум. Интенсивность шумового сигнала могла регулироваться в широких пределах и позволяла получать соотношение сигнал/шум близкие к 1.

Во втором разделе первой главы обсуждаются результаты экспериментального исследования закономерностей разрушения синхронизации периодических колебаний в присутствии шума. В данном случае в динамике взаимодействующих систем наблюдается перемежающееся поведение, причём распределение длительностей ламинарных фаз (областей постоянной разности фаз) для случая воздействия шума на систему вблизи границы области синхронизации имеет следующий вид<sup>15</sup>:

$$p(t) = T^{-1} \exp(-t/T), \quad (1)$$

где  $T$  – средняя длительность ламинарной фазы. Экспериментальное исследование этого явления выполнялось для описанного выше генератора со сложной динамикой при значении параметра  $\alpha = 12$ , синхронизируемого внешним периодическим сигналом. Эксперимент выполнялся для различных значений амплитуды синхронизирующего сигнала и шумового сигнала с различной дисперсией. На рис. 1 представлено экспериментальные (точки) и теоретические (пунктир) распределения длительностей ламинарных фаз. Нетрудно видеть хорошее совпадение результатов эксперимента с теоретически предсказанными результатами.

<sup>14</sup> *N.F.Rulkov. Images of synchronized chaos: experiments with circuits // Chaos, V. 6, 1996. p. 262–279.*

<sup>15</sup> *Hramov A. E., Koronovskii A. A., Kurovskaya M. K., Ovchinnikov A. A., Boccaletti S. Length distribution*

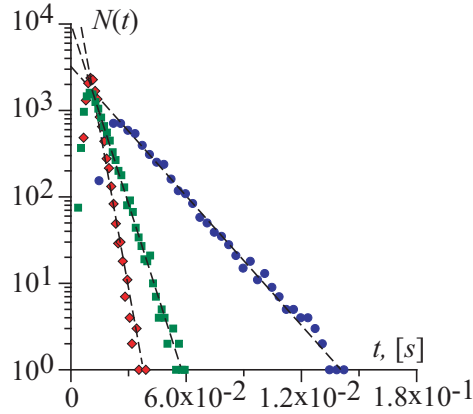


Рис. 1: Распределение длительностей ламинарных фаз для дисперсии шумового сигнала  $\circ$  – 200 мВ,  $\square$  – 400 мВ,  $\diamond$  – 800 мВ. Пунктиром на график нанесены теоретически рассчитанные распределения

В третьем разделе первой главы представлены результаты экспериментального исследования влияния шума на обобщённую синхронизацию хаотических колебаний. К настоящему времени это явление исследовано слабо, в качестве исключения можно отметить работу С. Гуана<sup>16</sup>, в которой рассматривался вопрос о влиянии шума на обобщённую синхронизацию в принципиально разных однонаправленно связанных динамических системах и делался вывод о сильной зависимости влияния оказываемого внешним шумом от особенностей динамики взаимодействующих систем, который мог как спровоцировать установление синхронного режима, так и помешать этому. Однако вопрос о влиянии шума на взаимодействие идентичных систем вблизи границы области синхронизации, несмотря на большую практическую значимость, оставался до недавнего времени открытым.

Обобщённая синхронизация вводится в рассмотрение для двух однонаправленно связанных хаотических осцилляторов, ведущего  $\mathbf{x}(t)$  и ведомого  $\mathbf{u}(t)$  и означает, что между системами устанавливается некоторое функциональное соотношение между их состояниями  $\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}[\mathbf{x}(t)]$ . Одним из методов диагностики обобщённой синхронизации является так называемый метод вспомогательной системы, в основе которого лежит наблюдение за динамикой вспомогательной системы  $\mathbf{v}(t)$  полностью идентичной ведомой системе  $\mathbf{u}(t)$ , на которую действует тот же синхронизирующий сигнал, что и на ведомую. В случае, если между ведущей и ведомой системой отсутствует синхронизация, динамика ведомой и вспомогательной систем остаётся различной, в то время как в режиме обобщённой синхронизации ведомая и вспомогательная систе-

of laminar phases for type-I intermittency in the presence of noise // Phys. Rev. E. 76 (2) (2007) 026206

<sup>16</sup>Guan S., Lai Y.-C., Lai C.-H. Effect of noise on generalized chaotic synchronization. Phys. Rev. E. 73 (2006) 046210

мы демонстрируют идентичную динамику. Такой способ диагностики режима обобщённой синхронизации прост и нагляден, однако его непосредственная реализация в радиофизическом эксперименте затруднена, поскольку требование полной идентичности двух систем принципиально невыполнимо. Для экспериментального исследования обобщённой синхронизации предложен модифицированный метод вспомогательной системы, который был реализован в натурном эксперименте. В качестве ведомой и вспомогательной системы выступал один и тот же генератор. Предварительно записанный синхронизирующий сигнал с подмешанным шумом различной интенсивности с помощью цифро-аналогового преобразователя дважды подавался на ведомый генератор. В результате исследования воздействия шума на хаотические системы, находящиеся вблизи границы области обобщённой синхронизации, показано, что существенных изменений в динамике исследуемых систем не наблюдается, и положение границы режима обобщённой синхронизации остаётся неизменным в широком диапазоне интенсивностей шумового сигнала. На рис. 2 представлены результаты экспериментального изучения зависимости положения границы возникновения режима обобщённой синхронизации от интенсивности шумового воздействия для случаев взаимодействия систем с различной собственной динамикой.

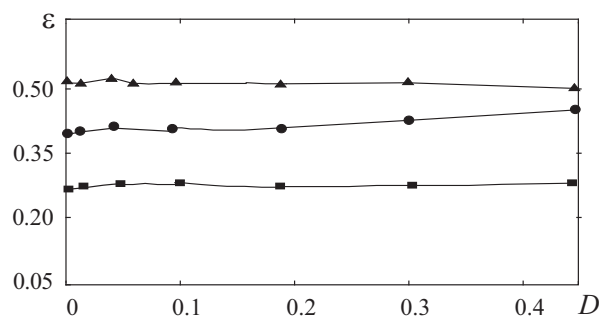


Рис. 2: Величина параметра связи, соответствующая установлению режима обобщенной синхронизации, как функция интенсивности шума: (■) — оба рассматриваемых генератора в автономном режиме характеризуются ленточными хаотическими аттракторами ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 15$ ); (●) — ведущая система характеризуется ленточным хаотическим аттрактором, ведомый осциллятор демонстрирует хаотические колебания типа двойной спирали ( $\alpha_1 = 15, \alpha_2 = 25$ ); (▲) — ведущий и ведомый генераторы в автономном режиме характеризуются хаотическими аттракторами типа двойной спирали ( $\alpha_1 = \alpha_2 = 25$ )

Во **второй главе** диссертационной работы обсуждаются результаты экспериментального исследования нового типа синхронной динамики хаотических систем, а именно синхронизации временных масштабов, влияния на него внешнего шума и связь с традиционно рассматриваемыми типами хаотической синхронизации.

В первом разделе второй главы описываются традиционно рассматриваемые

мые типы хаотической синхронизации: полная, фазовая и обобщенная хаотическая синхронизация, обсуждаются методы их диагностики а также сложности, которые могут встретиться при экспериментальном изучении этих типов синхронизации хаотических систем. В частности, указывается на ограниченную применимость многих методов диагностики для случая зашумлённых систем, а также на чувствительность ряда методов диагностики к структуре сигнала.

Во втором разделе второй главы вводится понятие синхронизации временных масштабов<sup>17</sup>. Метод синхронизации временных масштабов основан на анализе поведения семейства разностей фаз взаимодействующих систем  $\phi_d(s, t)$  и  $\phi_r(s, t)$ , вводимых с помощью непрерывного вейвлетного преобразования исследуемого сигнала  $f(t)$ :

$$W_{s,\tau}(f(t)) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt, \quad (2)$$

где  $\psi(\eta)$  представляет собой некоторую функцию ограниченную во временной и частотной областях и обладающую нулевым средним, параметры  $s$  и  $\tau$  определяют растяжение вейвлетной функции и сдвиг вдоль оси времени соответственно. Выбирая в качестве базовой комплексную функцию можно естественным образом ввести мгновенную фазу вейвлетного преобразования как фазу комплексной величины  $W_{s,\tau}$ , причём такой метод введения фазы оказывается однозначным и не зависит от свойств сигнала. В таком случае о наличии синхронизации между двумя спектральными компонентами  $s_1$  и  $s_2$  сигналов взаимодействующих систем можно говорить, если выполняются следующие условия:

$$|\phi_1(s, t) - \phi_2(s, t)| < \text{const} \quad (3)$$

и

$$\langle E_s \rangle = \int |W(s, \tau)|^2 d\tau > 0 \quad (4)$$

Первое условие (3) представляет собой условие захвата фаз, введенных для некоторого масштаба  $s$ , второе (4) представляет собой требование положительности энергии, приходящейся на данный масштаб, иными словами требование его присутствия в вейвлетном спектре. К достоинствам синхронизации временных масштабов следует также отнести возможность количественно характеризовать синхронизацию. Количественная мера синхронизации может быть введена как отношение энергии, приходящейся на синхронизированные

---

<sup>17</sup> *Hramov A. E., Koronovskii A. A. An approach to chaotic synchronization // Chaos. 14 (3) (2004) 603-610*

временные масштабы к полной энергии колебаний:

$$\gamma = \frac{\int_{s_{synch}} W^2 ds}{\int W^2 ds}. \quad (5)$$

В третьем разделе второй главы представлены результаты экспериментального исследования синхронизации временных масштабов в радиофизическом эксперименте. Рассмотрение проблемы начинается со случая отсутствия внешних источников шума, показывается возможность с помощью описанного метода наблюдать в эксперименте за особенностями установления синхронного режима в системе двух однонаправленно связанных генераторов с хаотической динамикой, демонстрируется возможность наблюдения за установлением синхронизации между спектральными компонентами, на долю которых в спектре колебаний приходится малое (относительно основной частоты генерации) количество энергии. Также демонстрируется возможность количественной оценки синхронизации с помощью меры синхронизации, представляющей собой отношение энергии вейвлетного преобразования, приходящейся на синхронные компоненты к полной энергии преобразования. Далее в третьем разделе обсуждается вопрос о влиянии шума на синхронизацию временных масштабов. Экспериментально показывается, что синхронизация временных масштабов может наблюдаться даже при достаточно больших интенсивностях шумового сигнала, когда последний существенно искажает собственную динамику хаотического генератора. На рис. 3а представлена область синхронизированных масштабов в зависимости от силы связи для различных интенсивностей шумового сигнала. Хорошо видно, что с помощью синхронизации временных масштабов оказывается возможным проследить за установлением синхронизации между различными спектральными компонентами сигнала. На рис. 3б представлена зависимость меры хаотической синхронизации от силы связи для разных значений интенсивности шумового сигнала. Хорошо виден переход к синхронизации временных масштабов, когда мера синхронизации начинает отличаться от нуля, и к полной синхронизации, когда величина  $\gamma \approx 1$ .

В четвертом разделе третьей главы проводится сравнение известных типов хаотической синхронизации и синхронизации временных масштабов. Для выполнения такого сравнения проводятся эксперименты по наблюдению традиционно рассматриваемых типов хаотической синхронизации и синхронизации временных масштабов в отсутствие внешнего шума и при воздействии на ведомую систему шумового сигнала с различной интенсивностью. Экспериментально показывается, что синхронизация временных масштабов может наблюдаться во всём диапазоне параметров связи, в котором наблюдаются остальные типы хаотической синхронизации, при этом синхронизация вре-



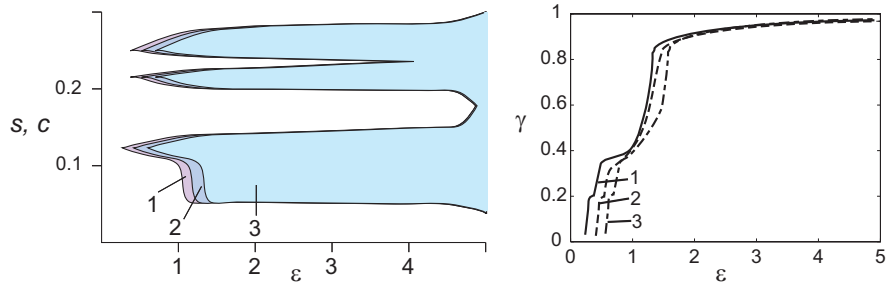


Рис. 3: (а) Область синхронизации и (б) мера синхронизации при различных значениях параметра связи для случаев: 1 – отсутствия шума, 2 – воздействия на ведомую систему шумового сигнала, характеризующегося отношением  $C/Ш = 10$ , 3 – воздействия на ведомую систему шумового сигнала, характеризующегося отношением  $C/Ш = 5$ . Параметр связи определялся как  $\varepsilon = R\sqrt{\frac{L}{C}}$ , где  $R$  – сопротивление связи,  $L$  и  $C$  – индуктивность и ёмкость в фильтре второго порядка ведомого генератора

менных масштабов может диагностироваться также в тех случаях, когда в силу особенностей структуры сигналов методы диагностики других типов хаотической синхронизации оказываются ограничено применимы или неприменимы.

В **третьей главе** диссертационной работы рассматриваются вопросы применения методов, разработанных в современной радиофизике и нелинейной динамике, в частности аппарата вейвлетного анализа и метода синхронизации временных масштабов, к нейрофизиологическим задачам. Подробно обсуждаются достигнутые на настоящий момент успехи в этом направлении и формулируется круг нерешённых задач. Формулируется задача анализа и диагностики функциональных состояний головного мозга, описывается частный случай патологического состояния – абсанс-эпилепсия – с позиции особенностей сигнала, генерируемого нейронным ансамблем мозга во время эпилептического приступа (пик-волнового разряда).

В первом разделе третьей главы представлены результаты разработки метода выделения осцилляторных паттернов, характерных для приступов абсанс-эпилепсии, (пик-волновых разрядов) из записей ЭЭГ в режиме реального времени с использованием аппарата непрерывного вейвлетного анализа. В основе метода лежит обнаруженная особенность изменения спектрального состава ЭЭГ во время эпилептического приступа – в вейвлетном спектре значительно увеличивается доля энергии, приходящейся на компоненты, соответствующие высоким частотам (от 30 до 80 Гц), по сравнению с фоновой активностью. На основе этого факта предлагается диагностировать начало пик-волнового разряда по превышению суммарной энергии в указанном диапазоне частот некоторого порогового значения, подбираемого индивидуально для каждого лабораторного животного, участвующего в эксперименте.

Необходимость подбора индивидуальных пороговых значений обуславливается различиями в физиологических особенностях лабораторных животных и малыми погрешностями в размещении регистрирующих электродов. Демонстрируется эффективность предложенного метода и приводятся результаты создания, верификации и внедрения аппаратно-программного комплекса, производящего мониторинг функционального состояния головного мозга лабораторных животных, в Дондерсовском центре сознания университета Радбоуд, г. Неймеген, Нидерланды. Экспериментально установлено, что созданный аппаратно-программный комплекс правильно распознаёт 97% характерных осцилляторных паттернов, наблюдаемых на ЭЭГ, в режиме реального времени и способен оперативно взаимодействовать с головным мозгом лабораторного животного, применяемого для решения задачи разрушения эпилептического приступа внешним воздействием на головной мозг.

Во второй части третьей главы представлены результаты анализа пространственно-временной динамики установления и разрушения синхронного режима между отдельными областями головного мозга человека, больного абсанс-эпилепсией, во время эпилептического приступа. Многоканальные записи ЭЭГ были предоставлены Саратовским медицинским диагностическим центром. Анализ многоканальных записей ЭЭГ производится при помощи метода синхронизации временных масштабов, подробно описанного во второй главе диссертационной работы. Показано преимущество данного подхода для анализа синхронизации на коротких временных интервалах (случай, характерный для ЭЭГ, содержащих пик-волновые разряды) по сравнению с использовавшимися в работах-предшественниках (метода нелинейной ассоциации и анализа фазовой синхронизации между сигналами от различных отведений). Обнаружено, что синхронизация наблюдается преимущественно между сигналами с отведений, регистрирующих электрическую активность фронтальной коры и её ближайшего окружения, что хорошо согласуется с имеющимися представлениями о локализации абсанс-эпилептического приступа в головном мозге человека. Обнаружено, что в начале эпилептического приступа синхронизируется небольшое количество участков коры головного мозга, по мере развития приступа число синхронизированных областей увеличивается, пока синхронизированным не окажется весь мозг. Затем начинается обратный процесс – все большее число отведения теряют синхронизацию между собой и с очагом приступа, пока к концу пик-волнового разряда синхронная динамика не будет наблюдаться только между теми областями, синхронизация между которыми установилась к началу приступа. Эпилептический приступ заканчивается с разрушением синхронизации между участками коры, синхронизовавшимися первыми. На рис. 4 показан сигнал типичной ЭЭГ из фронтальной области с пик-волновым разрядом, а также эволюция

установления синхронного состояния до, во время и после пик-волнового разряда.

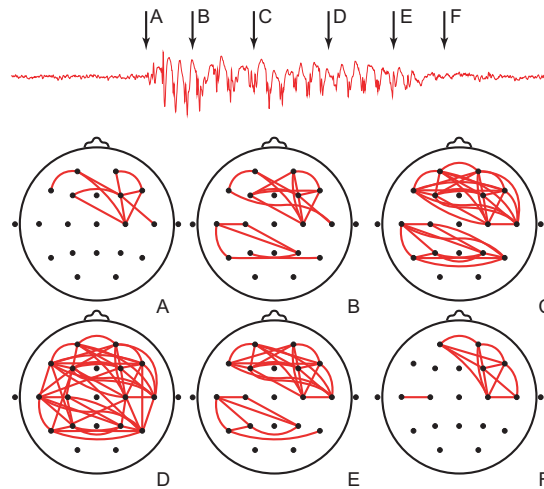


Рис. 4: Динамика пик-волнового разряда с позиции синхронизации различных областей мозга — число синхронизированных областей растёт по мере развития разряда и к концу эпилептического события синхронизированным оказывается весь мозг. Далее происходит разрушение синхронного состояния

В **Заключении** подведены итоги диссертационной работы, сформулированы основные результаты и намечены направления дальнейших исследований в данном направлении.

### Основные результаты и выводы

1. Экспериментально исследовано влияние шума на динамику систем с периодической динамикой, находящихся вблизи границы области синхронизации, и установлено, что в случае малой расстройки собственных частот генерации под воздействием шума в динамике связанных систем наблюдается перемежающееся поведение.

2. Экспериментально изучено влияние шума на установление режимов обобщённой хаотической синхронизации, и показано, что введение в систему шума с интенсивностью, сравнимой с интенсивностью сигнала, не оказывает влияния на положение границы области обобщенной синхронизации.

3. Экспериментально исследована связь между известными типами хаотической синхронизации (полной, обобщённой и фазовой хаотической синхронизацией) и синхронизацией временных масштабов. Установлено, что синхронизация временных масштабов наблюдается во всём диапазоне параметров связи, в котором наблюдаются другие типы хаотической синхронизации.

4. Предложен метод выделения состояний паталогической гиперсинхронизированной активности нейронных ансамблей головного мозга лабораторных

животных, основанный на непрерывном вейвлетном анализе с комплексным материнским вейвлетом.

5. С помощью метода, основанного на синхронизации временных масштабов локализованы области головного мозга, ответственные за начало эпилептического приступа у больных абсанс-эпилепсией. Показана эффективность данного метода для решения задачи анализа расположения и механизма формирования эпилептического фокуса установления и разрушения гиперсинхронизированного состояния головного мозга человека во время приступа абсанс-эпилепсии.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

- [1] Zhuravlev M.O., Koronovskii A.A., Moskalenko O.I., Ovchinnikov A.A., Hramov A.E.//Ring intermittency near the boundary of the synchronous time scales of chaotic oscillators// Phys. Rev. E. 2011. V. 83. p. 027201.
- [2] Короновский А.А., ван Луйтелаар Ж., Овчинников А.А., Ситникова Е.Ю., Храмов А.Е.//Диагностика и анализ осцилляторной нейросетевой активности головного мозга с использованием непрерывного вейвлетного преобразования//Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, вып. 1. С. 86-108.
- [3] Овчинников А.А., Храмов А.Е., Лютъеханн А., Короновский А.А., ван Луйтелаар Ж.//Метод диагностики характерных паттернов на наблюдаемых временных рядах и его экспериментальная реализация в режиме реального времени применительно к нейрофизиологическим сигналам//ЖТФ. 2011. Т. 81, вып. 1. С. 3-10.
- [4] Ovchinnikov A.A., Luttjohann A., Hramov A.E., van Luijtelaaar G//An algorithm for real-time detection of spike-wave discharges in rodents//Journal of Neuroscience Methods. 2010. V. 194, n. 1. p. 172-178.
- [5] Филатова А.Е., Овчинников А.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.//Применение вейвлетного преобразования для диагностики волн-помех звукового и поверхностного типов по цифровым данным наземной сейсморазведки//Вестник ТГУ. 2010. Т. 15, вып. 2. С. 524-528.
- [6] Koronovskii A.A., Ovchinnikov A.A., Hramov A.E.//Experimental Study of the Time-Scale Synchronization in the Presence of Noise//Physics of wave phenomena. 2010. V. 18, n. 4. p. 262-266.
- [7] Москаленко О.И., Овчинников А.А.//Исследование влияния шума на обобщенную хаотическую синхронизацию в диссипативно связанных динамических системах: устойчивость синхронного режима по отношению к внешним шумам и возможные практические приложения//Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, вып. 4. С. 436-449.
- [8] Овчинников А.А., Москаленко О.И., Короновский А.А., Храмов А.Е.//Экспериментальное исследование обобщенной синхронизации хаотических колебаний в присутствии шума//Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 4. С. 1-7.
- [9] Овчинников А.А.//Экспериментальное изучение перемежаемости типа I в присутствии шума на примере генератора, синхронизируемого внешним гармоническим сигналом//Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, вып. 6. С. 119-124.
- [10] Короновский А.А., Москаленко О.И., Овчинников А.А., Храмов А.Е.//Теоретическое исследование обобщенной синхронизации диссипативно связанных хаотических систем в присутствии шума//Изв. РАН. Сер. физическая. 2009. Т. 73, вып. 12. С. 1723-1727.
- [11] Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurovskaya M.K., Ovchinnikov A.A., Boccaletti S.//Length distribution of laminar phases for type-I intermittency in the presence of noise//Phys. Rev. E. V. 76, n. 2. p. 026206.

- [12] Короновский А.А., Куровская М.К., Овчинников А.А., Храмов А.Е. Экспериментальное исследование поведения неавтономных радифизических систем, демонстрирующих перемежаемость типа I в присутствии шума. Материалы VIII международной школы “Хаотические колебания и образование структур” (9-14 октября, 2007, Саратов)
- [13] Овчинников А.А. Экспериментальное исследование перемежаемости типа I в радиотехническом генераторе хаотических колебаний. Материалы конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых” (16-20 октября, 2007, Саратов)
- [14] Боккалетти С., Короновский А.А., Куровская М.К., Москаленко О.И., Овчинников А.А., Храмов А.Е. Перемежаемость типа I в присутствии шума. Материалы X Всероссийской научной школы-семинара “Физика и применение микроволн” (21-26 мая, 2007, Звенигород)
- [15] Короновский А.А., Овчинников А.А., Храмов А.Е. Экспериментальное исследование синхронизации временных масштабов в связанных радиотехнических генераторах хаотических колебаний в присутствии шума. Материалы XIV научной школы “Нелинейные волны – 2008” (1-7 марта, 2008, Нижний Новгород)
- [16] A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, M.K. Kurovskaya, A.A. Ovchinnikov and S. Boccaletti. The Characteristics of Type-I Intermittency in the Presence of Noise. Proceedings of 16th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. (20-26 July, 2008, Nizhny Novgorod, Russia)
- [17] A.A. Ovchinnikov, A.A. Koronovskii and A.E. Hramov. Experimental Study of Time-scale Synchronization in Coupled Electronic Chaotic Generators in the Presence of Noise. Proceedings of 16th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. (20-26 July, 2008, Nizhny Novgorod, Russia)
- [18] Короновский А.А., Овчинников А.А., Ситникова Е.Ю., Храмов А.Е., Ж. ван Люйтелаар. Частотно-временной анализ и классификация ритмических паттернов на электроэнцефалограммах с помощью непрерывного вейвлетного анализа. Материалы Всероссийской конференции “Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях” (13-15 мая, 2009, Нижний Новгород)
- [19] Ситникова Е.Ю., Храмов А.Е., Короновский А.А., Овчинников А.А. Использование непрерывного вейвлетного преобразования с адаптивным вейвлетным базисом для автоматического анализа и классификации сонных веретён на ЭЭГ. Материалы Всероссийской конференции “Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях” (13-15 мая, 2009, Нижний Новгород)
- [20] A.A. Ovchinnikov, A.E. Hramov, E.Yu. Sitnikova, A.A. Koronivskii, G. van Luijtelaar. Analysis and automatic identification of sleep spindles and pike-wave discharges in the EEG using continuous wavelet transform. Proceedings of 17th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. (21-24 June, 2009, Rapperswil, Switzerland)
- [21] O.I. Moskalenko, A.E. Hramov, A.A. Koronovskii, A.A. Ovchinnikov. Effect of Noise on Generalized Synchronization of Chaos in Dissipatively Coupled Dynamical Systems. Proceedings of 17th International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. (21-24 June, 2009, Rapperswil, Switzerland)
- [22] Овчинников А.А., Храмов А.Е., Люттгёханн А., Короновский А.А., Ж. ван Люйтелаар. Диагностика осциляторных паттернов в ЭЭГ в режиме реального времени. Материалы XV научной школы “Нелинейные волны – 2010” (6-12 марта, 2010, Нижний Новгород)
- [23] Овчинников А.А., Храмов А.Е., Люттгёханн А., Короновский А.А., Ж. ван Люйтелаар. Диагностика пик-волновых разрядов на ЭЭГ в реальном времени с использованием аппарата вейвлетного анализа. Материалы VI международного междисциплинарного конгресса “Нейронаука для медицины и психологии” (5-15 июня, 2010, Судак, Украина)

ОВЧИННИКОВ Алексей Александрович

СИНХРОНИЗАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ  
В ПРИСУТСТВИИ ШУМОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ  
С РАДИОФИЗИЧЕСКИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ  
И НЕЙРОННЫМИ АНСАМБЛЯМИ ГОЛОВНОГО МОЗГА  
И ДИАГНОСТИКА ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ ПАТТЕРНОВ

Автореферат

---

Подписано к печати 24.05.2011.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага “Снегурочка”. Гарнитура “Times”

Усл. печ. л. 1,39 (1,5). Тираж 120 экз. Заказ 110–Т.

---

Отпечатано с готового оригинал–макета

Типография СГУ.

410012, Саратов, Большая Казачья, 112а, корпус 8.