

На правах рукописи

РЕМПЕН Ирина Сергеевна

УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ В
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ,
СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОТОКИ СО
СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ТОКОМ

01.04.03 – Радиофизика

01.04.04 – Физическая электроника

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2007

Работа выполнена на кафедре электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов и в Научно-исследовательском институте естественных наук (отделение физики нелинейных систем) Саратовского государственного университета.

Научные руководители: чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор,
Трубецков Дмитрий Иванович
д.ф.-м.н., профессор,
Храмов Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н., профессор,
Казанцев Виктор Борисович
д.ф.-м.н., профессор,
Железовский Борис Емельянович

Ведущая организация: Челябинский государственный университет
г. Челябинск

Защита состоится “9” ноября 2007 г. в 17:30 часов 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 СГУ.

Автореферат разослан “3” октября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы. Исследование сложного поведения распределенных динамических систем и управление их динамикой представляет собой актуальную задачу современной радиофизики, физической электроники и науки о колебаниях и волнах¹.

Сложные динамические системы, образуемые множеством более простых или элементарных систем или элементов, взаимосвязанных и взаимодействующих, всегда находились в центре интересов исследователей. Одним из важных направлений в их изучении является исследование процессов управления. Более того, процессы, происходящие в динамической системе, можно трактовать как результат некоторых управляющих воздействий, направленных на реализацию определенной цели. Основным способом достижения цели управления являются обратные связи. К ним иногда добавляются стабилизирующие или корректирующие связи. В свете сказанного целесообразно использовать единый подход к анализу динамических систем, в основе которого лежит синтез двух подходов, а именно: 1) расчленение сложной системы на части и рассмотрение ее движения как следствия преобразований, осуществляемых ее взаимодействующими частями и 2) использование качественной теории нелинейных колебаний и волн². Подобный подход в разное время относили к разным научным направлениям – к теории автоматического регулирования, к теории динамических систем, к системному анализу³, к кибернетике⁴. Качественно новое взаимодействие естествознания и теории управления началось с развития теории хаоса при появлении области исследований, называемой “управление хаосом”. Начало развития нового подхода связывают с появлением статьи Э. Отта, Ч. Гребоджи и Дж. Йорке “Управление хаосом”⁵, благодаря которой теорию управления ассоциируют с нелинейной динамикой.

Развитие теории динамических систем привело к появлению нового научного направления, посвященного вопросам управления в физических системах. Большинство работ в этой развивающейся области посвящено изучению вопросов управления хаотической динамикой с помощью различных типов обратной связи в системах с малым числом степеней свободы. Существенно меньше работ, в которых рассматривались бы задачи управления хаотической динамикой распределенных автоколебательных систем.

¹ Рабинович М.И., Трубецков Д.И. *Введение в теорию колебаний и волн*. М.–Ижевск: РХД, 2000.
Трубецков Д.И., Храмов А.Е. *Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков*, Т. 1,2. М.: Физматлит, 2003, 2004.

² Неймарк Ю.И. *Динамические системы и управляемые процессы*. М.: Наука, 1978

³ Моисеев Н.Н. *Математические задачи системного анализа*. М.: Наука, 1981.

⁴ Винер Н. *Кибернетика или управление и связь в животном и машине*. М.: Наука, 1983.
Фрадков А.Л. *О применении кибернетических методов в физике*. УФН. **175** (2005) 113.

⁵ Ott E., Grebogi C., Yorke J.A. *Controlling chaos*. Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 1196.

При изучении данных вопросов исследователи чаще всего рассматривают модельные колебательные системы, представляющие собой либо цепочки связанных осцилляторов, либо модельные системы уравнений в частных производных (например, комплексные уравнения Гинзбурга-Ландау или уравнения Свифта-Хогенберга), в то время как модели реальных распределенных систем анализируются значительно реже.

Классическими примерами реальных распределенных автоколебательных систем со сложной динамикой являются электровакуумные приборы сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники, содержащие в качестве активной среды электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями, которые являются объектами исследования в радиофизике и в физической электронике. В настоящее время наблюдается активизация исследований в области сложной динамики приборов и устройств СВЧ-диапазона, предназначенных прежде всего для технологических целей, радиолокации, радиопротиводействия, информационно-телекоммуникационных систем передачи и обработки информации и т.д. на основе идей динамического хаоса⁶. Потребности вышеназванных областей техники и технологий стимулируют развитие методов управления сложной динамикой подобных систем, что делает актуальным разработку и исследование методов управления хаосом в распределенных электронно-волновых системах СВЧ-диапазона, в частности, с помощью различных типов обратной связи.

Другим способом управления хаосом является воздействие на систему внешнего сигнала. В 1980-х годах была показана возможность превращения хаотической динамики под воздействием внешнего гармонического сигнала в периодическую, что можно рассматривать как управление через подавление хаоса⁷. Поэтому управление хаосом через воздействие внешних сигналов на автоколебательные системы СВЧ-электроники представляется весьма перспективным и важным направлением исследований, позволяющим осуществить эффективное управление электронно-волновыми системами наряду с методами, основанными на использовании различных обратных связей.

Вышеназванные направления исследований (управление хаосом в системах радиофизики и физической электроники) представляются весьма важными и актуальными, так как позволяют решить целый ряд прикладных задач, а именно стабилизацию частоты и фазы ВЧ излучения мощных генераторов, возможность получения близкой к одночастотной генерации или, наоборот, установление режимов хаотической генерации, фазировку гене-

⁶ Дмитриев А.С., Панас А.И. *Динамический хаос: новые носители информации для систем связи*. М.: Физматлит, 2002.

Special Issue on Applications of Nonlinear Dynamics to Electronic and Information Engineering / Proc. IEEE. 2002. V.90, № 5.

⁷ Неймарк Ю.И., Ланда П.С. *Стохастические и хаотические колебания*. М.: Наука, 1987.

раторов для повышения выходной мощности путем сложения ВЧ излучения (фазированные антенные решетки на сверхмощных СВЧ-генераторах), в ряде случаев повышение к.п.д. и мощности выходного излучения неавтономных СВЧ-систем.

Среди активных устройств СВЧ-электроники, демонстрирующих пространственно-временное хаотическое поведение, особый интерес вызывают электронные системы со сверхкритическим током, которые характеризуются разнообразными режимами колебаний и с точки зрения теории допускают математическое описание на разном уровне сложности (гидродинамическое описание колебаний электронного потока со сверхкритическим током в диоде Пирса; приближенное описание с помощью метода Галеркина; метод частиц для описания колебаний виртуального катода, формирующегося в пучке со сверхкритическим током; дискретные модели типа клеточного автомата). Характерной особенностью всех подобных систем является сложный спектральный состав СВЧ-колебаний пространственно-заряда электронного потока. Потребности практики диктуют необходимость изучения методов управления сложной динамикой СВЧ-устройств со сверхкритическими токами (диод Пирса, релятивистские виркаторы, низковольтные виркаторы)⁸.

Сказанное выше позволяет считать тему диссертации, посвященную исследованию различных методов управления хаотическими колебаниями в электронных СВЧ устройствах со сверхкритическим током, актуальной и важной для современной радиофизики и физической электроники.

Поскольку исследуемые в диссертации объекты (электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями) являются предметом изучения физической электроники, а используемые методы исследования и анализа сложных нестационарных режимов колебаний относятся к области радиофизики и нелинейной теории колебаний и волн, то можно заключить, что диссертационная работа выполнена на стыке двух специальностей: 01.04.03 – радиофизика и 01.04.04 – физическая электроника.

Цель диссертационной работы определена кругом вышеперечисленных вопросов и заключается в изучении возможностей управления сложными режимами пространственно-временных колебаний в системах сверхвысокочастотной электроники типа “электронный поток со сверхкритическим током — электромагнитное поле” с помощью воздействия внешних

⁸ Дубинов А.Е., Селемир В.Д. *Электронные приборы с виртуальным катодом*. РЭ, **47** (2002) 575.

Анфиногентов В.Г., Трубецков Д.И. *Хаотические колебания в гидродинамической модели диода Пирса*. РЭ, **37** (1992) 2251.

Привезенцев А.П., Фоменко Г.П. *Сложная динамика потока заряженных частиц с виртуальным катодом*. Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. **2**, 5 (1994) 56.

Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. *Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом*. Физика плазмы, **31** (2005) 1009

сигналов и различных типов обратной связи.

Для достижения этой цели в диссертационной работе решены следующие задачи.

1. Теоретически изучено влияние внешней запаздывающей обратной связи на хаотические колебания в электронном потоке со сверхкритическом током в режиме без образования виртуального катода в гидродинамической модели диода Пирса и конечномерной модели на основе Галеркиновской аппроксимации.

2. Предложены методы выделения неустойчивых периодических пространственно-временных состояний хаотической динамики в гидродинамической модели диода Пирса и рассчитаны различные характеристики выделенных неустойчивых состояний.

3. Исследованы методы стабилизации неустойчивых периодических пространственно-временных состояний с помощью различных типов непрерывной обратной связи на примере гидродинамической модели диода Пирса.

4. Теоретически и экспериментально изучены возможности управления спектральными характеристиками и режимами генерации в низковольтных электронно-волновых системах с виртуальным катодом, формирующемся в тормозящем поле, с помощью воздействия внешнего сигнала.

5. Теоретически исследованы совместные колебания и управление ими в связанных системах с виртуальным катодом за счет изменения связи между виртуальными катодами, формирующимися во встречных электронных потоках.

Обоснование и достоверность полученных в работе численных результатов подтверждается их воспроизводимостью, совпадением с данными аналитических исследований, соответствием известным из литературы экспериментальным результатам для аналогичных моделей и приборов, обоснованным выбором параметров численных схем. Часть теоретических результатов подтверждена проведенным экспериментальным исследованием.

Научная новизна. В диссертации получены следующие основные научные результаты:

- Впервые изучено влияние внешней запаздывающей обратной связи на хаотические колебания в электронном потоке со сверхкритическом током в режиме без образования виртуального катода в рамках гидродинамической модели диода Пирса и конечномерной модели на основе Галеркинской аппроксимации. Показано, что подключение к системе со сверхкритическом током цепи обратной связи с малым временем запаздывания приводит к подавлению хаотических колебаний и установлению периодических колебаний, причем переход к регулярным колебаниям происходит через обратный каскад бифуркаций удвоения периода. Подобное поведение системы

определяется динамикой системы вблизи неустойчивого состояния равновесия.

- Предложен метод выделения неустойчивых периодических пространственно-временных состояний хаотической динамики в гидродинамической модели диода Пирса. Определены количественные характеристики неустойчивых периодических пространственно-временных состояний (период, максимальная ляпуновская экспонента, распределение времен возврата).

- Впервые использованы различные модификации метода стабилизации неустойчивых периодических пространственно-временных состояний с помощью различных типов непрерывной обратной связи на примере гидродинамической модели диода Пирса. Показана возможность управления хаосом через стабилизацию неустойчивых периодических пространственно-временных состояний хаотической динамики в диоде Пирса, рассчитаны характеристики стабилизируемых состояний и выделены области в пространстве параметров, в которых возможна стабилизация неустойчивых состояний.

- Впервые теоретически (в рамках одномерной математической модели, основанной на решении самосогласованной системы уравнений Пуассона–Власова методом частиц) и экспериментально (с помощью макета низковольтной системы с виртуальным катодом для разборной вакуумной установки) изучены методы физического управления характеристиками генерации в низковольтных электронно-волновых системах с виртуальным катодом, формирующимся в тормозящем поле, с помощью воздействия внешнего гармонического сигнала. Экспериментально и теоретически обнаружен эффект синхронизации колебаний виртуального катода в низковольтном виркаторе, а также возможность перестройки режимов генерации низковольтного виркатора при изменении частоты и мощности внешнего гармонического сигнала. Аналогичные результаты впервые получены при численном исследовании совместных колебаний двух виртуальных катодов в системе со встречными электронными потоками.

Личный вклад. Постановка задач, разработка методов их решения, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены совместно с научными руководителями и другими соавторами научных работ, опубликованных соискателем. Основные результаты диссертации получены лично автором. В большинстве совместных работ автором выполнены все численные и аналитические расчеты. Экспериментальные результаты, изложенные в 3 главе, получены совместно с научной группой д.т.н., проф. Ю.А. Калинина в НИИ ЕН (отделение физики нелинейных систем) СГУ.

Научная и практическая значимость Исследования возможностей управления нелинейной динамикой распределенных систем, содержащих электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями,

проведены на основе моделей, являющихся базовыми для физической электроники, а также для нелинейной теории колебаний и волн. Полученные в диссертации результаты позволяют продвинуться в понимании таких проблем как управление сложной динамикой в системах со сверхкритическим током с помощью введения различных типов обратной связи и воздействия внешнего сигнала. Предложенные методы исследования нелинейных распределенных динамических систем позволяют провести выделение неустойчивых периодических пространственно-временных состояний распределенных систем и анализ таких их количественных характеристик как максимальная ляпуновская экспонента и распределение времен возврата.

Наряду с этим, проведенные исследования имеют практическую направленность и могут найти применение при решении задач, связанных с разработкой электровакуумных приборов СВЧ-электроники, с возможностью управления энергетическими (уровень генерируемой мощности) и спектральными (частота, ширина полосы, модовый состав) характеристиками их выходного излучения с помощью различных типов обратной связи и внешних сигналов. Анализ физических процессов, приводящих к усложнению динамики в системах СВЧ-электроники, позволяет дать обоснованные рекомендации специалистам, проектирующим электровакуумные приборы сверхвысоких частот, по достижению необходимых выходных характеристик данных устройств, а также по созданию методов управления выходными характеристиками генераторами с виртуальным катодом.

Результаты диссертации использованы при выполнении ряда НИР и научных грантов, названных в конце автореферата. Материалы диссертационной работы внедрены в учебный процесс в Саратовском государственном университете на факультете нелинейных процессов и физическом факультете по специальности 013800 Радиофизика и электроника и по направлению подготовки бакалавров по направлению 03510 Радиофизика.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 160 страниц текста и 49 иллюстраций. Библиографический список содержит 176 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, описана новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы и приведены основные результаты, выводы и положения диссертационной работы, выносимые на защиту, дано краткое изложение содержания работы.

В первой главе диссертационной работы приведены результаты исследования влияния внешней запаздывающей обратной связи (ОС), а также изменения плотности нейтрализующего ионного фона на сложную нели-

нейную динамику электронного потока со сверхкритическим током в распределенной пучково-плазменной системе.

В качестве исследуемой модели распределенной электронной системы со сверхкритическим током выбран диод Пирса⁹. Рассмотрение проведено в рамках гидродинамического приближения. Диод Пирса представляет собой плоский пролетный промежуток, ограниченный входной и выходной заземленными сетками, находящимися на расстоянии L друг от друга, в который инжектируется плоский, бесконечно широкий однородный на входе электронный поток, имеющий начальную скорость v_0 и плотность ρ_0 . Движение пучка предполагается одномерным. Пространство между сетками заполнено нейтрализующим фоном неподвижных ионов, плотность которых равна невозмущенной плотности пространственного заряда электронного потока. Единственным управляющим параметром системы является параметр Пирса, который представляет собой невозмущенный угол пролета электрона по плазменной частоте ω_p : $\alpha = \omega_p L / v_0$. При $\alpha > \pi$ в системе формируется виртуальный катод, от которого часть электронов отражаются обратно к плоскости инжекции¹⁰. Однако, при $\alpha \sim 3\pi$ существует возможность полного прохождения электронного потока через диодный промежуток. В этом случае моделирование сложной пространственно-временной динамики электронной жидкости в диоде Пирса может быть осуществлено с помощью гидродинамического приближения, которое заключается в решении самосогласованной системы уравнений движения, непрерывности и Пуассона:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \alpha^2 (\rho - n), \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$v(0, t) = 1, \quad \rho(0, t) = 1, \quad \varphi(0, t) = \varphi(1, t) = 0, \quad (2)$$

где φ , ρ , v — безразмерные переменные потенциала поля пространственного заряда, плотности и скорости электронной жидкости, соответственно; $n = |\rho_i / \rho_0|$ — безразмерная плотность ионного фона. В небольшой области значений параметра $\alpha \in [2, 7\pi; 3\pi]$ данная система демонстрирует разнообразные колебательные режимы, от периодических колебаний до развитого хаоса; переход между этими режимами осуществляется через каскад бифуркаций удвоения периода.

В начале первой главы приведены результаты решения задачи управления колебаниями в диоде Пирса с помощью запаздывающей обратной связи. Внешняя обратная связь вводилась в рассматриваемую систему путем модуляции разности потенциалов между входной и выходной сетками

⁹ Pierce J., *Limiting currents in electron beam in presence ions*, J.Appl.Phys., **15** (1944) 721

¹⁰ Godfrey B.B., *Oscillatory nonlinear electron flow in Pierce diode* Phys. Fluids, **30** (1987) 1553

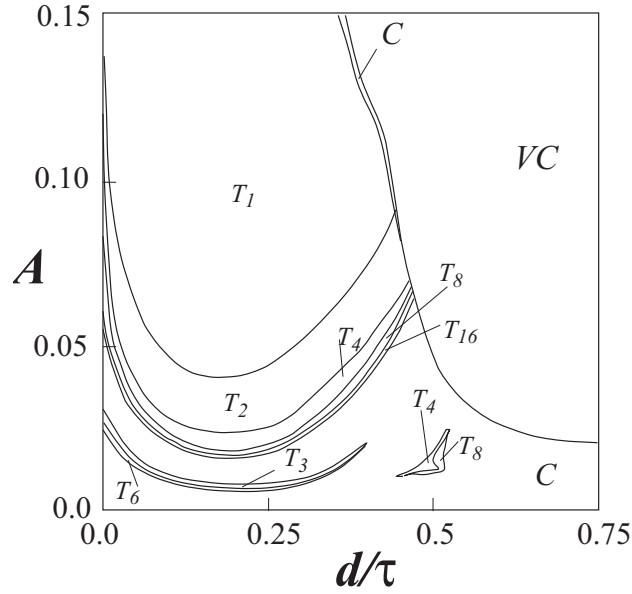


Рис. 1: Динамическая карта режимов на плоскости параметров обратной связи A и d . Символами T_n обозначены области периодических колебаний с циклами периода n . C - хаотические автоколебания, VC - область появления виртуального катода. $\alpha = 2.774\pi$ (соответствует случаю хаотического режима в автономной системе).

диода сигналом, снимаемым из некоторого сечения пространства взаимодействия. В качестве такого сигнала использовались колебания плотности пространственного заряда $\rho(x_{OC}, t)$. В модели это учитывалось путем изменения граничного условия для потенциала на правой границе системы.

$$\varphi(1, t) = f_{OC}(t) = A(\rho(x_{OC}, t - d) - \rho_0), \quad (3)$$

где A – коэффициент ОС, характеризующий, какая часть мощности колебаний ответвляется в цепь обратной связи, d – запаздывание в цепи ОС.

Исследования предложенной численной модели показало, что в зависимости от значений основных управляющих параметров d и A в системе возможно подавление хаотической динамики электронного потока и установление регулярных колебаний (см. рис. 1). При малых амплитудах сигнала ОС возможна эффективная перестройка динамических режимов в исследуемой системе в пределах значений длительности задержки в цепи ОС $(0,1 - 0,5)\tau$, где τ - характерное время колебаний в автономной системе. С ростом амплитуды ОС в системе наблюдается переход от хаотических колебаний к регулярным через обратный каскад бифуркаций удвоения периода.

При больших $d > \tau/2$ в системе наблюдается усложнение хаотических колебаний, заканчивающееся формированием ВК и появлением отраженных частиц в потоке, что делает неприменимым гидродинамическое описание.

Были рассмотрены физические процессы, сопровождающие воздействие обратной связи на механизмы хаотизации динамики электронного пуч-

ка. Было показано, что возможность приближения системы к состоянию неустойчивого однородного равновесия ($\rho_0 = 1; v_0 = 1; \varphi_0 = 0$) отвечает за процесс хаотизации колебаний. Также обнаружено, что в зависимости от длительности задержки в цепи обратной связи, сигнал обратной связи может способствовать уменьшению накопления заряда в выходной области диода, не позволяя системе приблизиться к состоянию неустойчивого равновесия, или же, напротив, приводить к увеличению амплитуды электронных волн, и, как следствие, усложнению динамики пучка.

Таким образом, сигнал внешней ОС, воздействуя на распределение поля в пространстве взаимодействия, позволяет осуществлять управление динамикой электронного пучка со сверхкритическим током.

Исследование влияния обратной связи было также проведено в рамках конечномерной модели динамики электронного потока¹¹, построенной на базе Галеркинской аппроксимации и описывающей поведение амплитуд трех колебательных мод с максимальной энергией. Результаты, полученные с помощью конечномерной модели, находятся в хорошем качественном и количественном соответствии с результатами исследования пространственно-распределенной гидродинамической модели диода Пирса.

Также в первой главе рассмотрен вопрос о влиянии изменения степени нейтрализации неподвижного ионного фона, заполняющего пролетный промежуток, на сложные режимы колебаний электронного потока со сверхкритическим током. Обнаружено, что с ростом плотности ионного фона происходит расширение области значений параметра Пирса α , в которой поддерживается колебательная динамика с полным пролетом электронного потока через диодный промежуток и, в частности, области, в которой имеют место хаотические колебания. При этом существует оптимальное значение плотности ионного фона $n \approx 1.03$, при котором ширина указанной области превышает соответствующую величину при $n = 1.0$ более чем в 3 раза. Ширина области значений параметра Пирса, в которой наблюдаются хаотические колебания, также расширяется с ростом n и достигает максимума при $n \sim 1.02 \div 1.04$.

Исследованы механизмы возникновения хаотической динамики в диоде Пирса при изменении плотности положительного заряда ионного фона и показано, что основным сценарием перехода к хаосу в распределенной электронной системе является каскад бифуркаций удвоения периода. Одновременно, были обнаружены жесткие переходы между различными типами периодической и хаотической динамики при изменении управляющих параметров, которые связаны с существованием мультистабильных состояний в электронной системе.

¹¹ Анфиногентов В.Г. *Электронный поток в диодном промежутке и пространстве дрейфа (нелинейные явления, хаос и образование структур)*. Дисс. . . к.ф.-м.н. Саратов (1997)

Во второй главе диссертационной работы приведены результаты изучения применения методов управления пространственно-временным хаосом в распределенной электронной системе со сверхкритическим током, описываемой гидродинамическими уравнениями (1). Управление хаосом осуществлялось, во-первых, путем стабилизации состояния неустойчивого однородного равновесия ($\rho_0 = 1; v_0 = 1; \varphi_0 = 0$) в электронном потоке с помощью непрерывной обратной связи. Во-вторых, были выделены неустойчивые пространственно-временные состояния хаотической динамики (соответствующие периодическим неустойчивым орбитам систем с малым числом степеней свободы), и осуществлена их стабилизация с помощью различных типов обратной связи.

Для стабилизации состояния неустойчивого равновесия в режиме сложной хаотической динамики активной среды использовалась следующая схема управления с помощью непрерывной внешней ОС¹². Обратная связь осуществлялась путем изменения значения потенциала на правой границе системы:

$$\varphi(x = 1.0, t) = f_{fb}(t) = K(\rho(x_{fix}, t) - \rho(x_{fix}, t - d)), \quad (4)$$

где K – коэффициент обратной связи и d – длительность задержки в цепи обратной связи, $\rho(x_{fix}, t)$ представляет собой колебания плотности пространственного заряда в фиксированной точке $x = x_{fix}$ пространства ($x_{fix} = 0.2$). В случае установления режима стабилизации неустойчивого состояния, когда система находится точно в неустойчивом состоянии равновесия, сигнал обратной связи f_{fb} очень мал. Преимущество данной схемы заключается в том, что сигнал ОС приводит к изменению только граничных условий (которые становятся нестационарными), что делает подобную схему управления более простой для реализации на практике¹³.

Показано, что для стабилизации неустойчивого состояния равновесия длительность задержки d в цепи непрерывной обратной связи (4) должна быть достаточно малой $d < T_p/2$, где T_p – характерный временной масштаб колебаний в распределенной системе без обратной связи. Было показано, что при подключении непрерывной ОС к распределенной автоколебательной системе, находящейся в режиме развитого хаоса, в диоде Пирса наблюдается быстрое уменьшение амплитуды колебаний, заканчивающееся стабилизацией состояния неустойчивого равновесия. После короткого переходного процесса управляющий сигнал в цепи обратной связи становится относительно малым по сравнению с сигналом до начала стабилизации (он составляет менее 0.01% по амплитуде). Последнее означает,

¹² Pyragas K., *Continuous control of chaos, by self-controlling feedback*, Phys. Lett. A, **170** (1992) 421–428

¹³ Долов А.М., Кузнецов С.П., *Применение методики контроля хаоса для устранения автомодуляции в лампе обратной волны*, ЖТФ, **73** (2003) 139–142

что в предложенной и рассмотренной схеме реализуется управление хаосом (стабилизация неустойчивого состояния системы) за счет обратной связи с весьма малой амплитудой управляющего сигнала. Для точного определения областей значений управляющих параметров K и d обратной связи, в которой возможно управление хаосом в пучково-плазменной системе, были построены карты динамических режимов для различных значений параметра Пирса, соответствующих разным режимам хаотических колебаний.

Был также рассмотрен вопрос о стабилизации неустойчивого состояния равновесия в присутствии флуктуаций в системе. Показано, что в этом случае также возможна успешная стабилизация состояния неустойчивого равновесия с помощью схемы (4), а присутствие шума приводит только к увеличению средней по времени амплитуды управляющего сигнала в цепи ОС $\langle |f_{fb}(t)| \rangle$ и флуктуациям системы возле состояния равновесия.

Подробно рассмотрены неустойчивые периодические пространственно-временные состояния (НППВС) распределенной активной среды, которые аналогичны неустойчивым периодическим орбитам хаотического аттрактора динамической системы с малым числом степеней свободы¹⁴. Для выделения наборов НППВС были построены гистограммы времен возврата фазовой точки в восстановленном фазовом пространстве к фиксированным “стартовым” состояниям, а также исследовалось распределение $p(\tau)$ по длительности времен возврата τ фазовой траектории к тем или иным “особым” состояниям и показано, что, как и для случая систем с малым числом степеней свободы, оно хорошо подчиняется степенной зависимости $p(\tau) \sim e^{-\tau/\langle \tau \rangle}$, где $\langle \tau \rangle$ – среднее время возврата.

Для стабилизации НППВС исследуемой распределенной системы использовалась схема (4), где в качестве длительности задержки в цепи обратной связи выбиралась величина $d = T_k$, равная временному периоду k -го неустойчивого периодического состояния. Численное моделирование показало, что подобная схема является весьма эффективной для стабилизации НППВС с небольшими периодами. Количественный анализ устойчивости того или иного состояния стабилизируемой распределенной хаотической системы с управляемой обратной связью производился с помощью расчета максимального ляпуновского показателя Λ , а также среднего значения $\langle \xi \rangle$ сигнала в цепи ОС, которые показаны на рис. 2 для случая стабилизации НППВС с наименьшим периодом.

Однако стабилизация в режиме развитого хаоса неустойчивых состояний с периодом $T_k > 4.2$, как показал численный эксперимент, оказывается невозможной, поскольку для эффективной стабилизации неустойчивых периодических орбит с помощью непрерывной обратной связи вида (4),

¹⁴ Lathrop D.P., Kostelich E.J. *Characterization of an experimental strange attractor by periodic orbits*, Phys. Rev. A, **40** (1989) 4028–4031

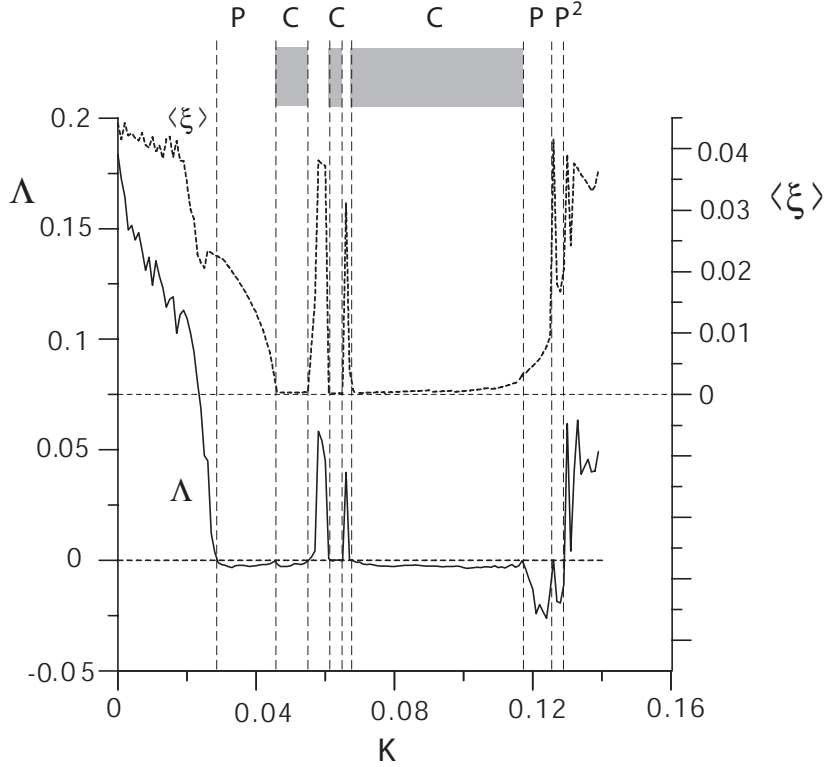


Рис. 2: Зависимость максимальной ляпуновской экспоненты Λ (сплошная линия) и среднего значения сигнала в цепи обратной связи (штриховая линия) от коэффициента обратной связи K в режиме спирального хаоса ($\alpha = 2.857\pi$). Область C – режим стабилизации неустойчивого периодического состояния наименьшего периода $T = 4.173$ (сигнал в цепи обратной связи близок к нулю: $\langle \xi \rangle \approx 0$), $\Lambda < 0$. Область P – периодические колебания, сигнал в цепи обратной связи велик, но $\Lambda < 0$; область P^2 – режим удвоения периода.

должно удовлетворяться условие $\Lambda T_k \leq G$, где G – константа, зависящая от исследуемой системы.

Для стабилизации НППВС с высшими периодами T_k исследуемой распределенной системы использовалась следующая схема:¹⁵

$$\varphi(x = 1.0, t) = K(1 - r) \sum_{m=1}^M r^{m-1} (\rho(x_{\text{fix}}, t) - \rho(x_{\text{fix}}, t - md)) = K\xi(t), \quad (5)$$

где K – сигнал обратной связи, d – длительность запаздывания обратной связи, выбираемая равной периоду T_k неустойчивого состояния, M – достаточно велико ($M \gg 1$), а величина r ($0 \leq r < 1$) характеризует вклад в сигнал обратной связи предыдущих состояний системы. В этом случае сигнал непрерывной обратной связи формируется таким образом, что на поведение системы в момент времени t оказывает влияние не только состояние системы в момент времени $(t - T_k)$, но и в моменты времени $(t - mT_k)$ с

¹⁵ Franceschini G., Bose S., Schöll, E. *Control of chaotic spatiotemporal spiking by time-delay autosynchronization*, Phys. Rev. E. **60** №5 (1999) 5426-5434

некоторыми весовыми коэффициентами. Как показали исследования, при использовании схемы (5) становится возможной стабилизация неустойчивых периодических состояний высших периодов.

В третьей главе изложены результаты численного и экспериментального исследования управления хаосом в электронном потоке с виртуальным катодом с помощью воздействия внешнего сигнала на динамику системы. Внешний сигнал вводился путем предварительной скоростной модуляции электронного потока, а также с помощью воздействия встречного потока с виртуальным катодом через общее поле пространственного заряда.

В качестве объекта исследования используется диодная схема с тормозящим полем (схема низковольтного виркатора)¹⁶, в которой электронный пучок, формируемый электронно-оптической системой, инжектируется в диодный промежуток, ограниченный двумя сеточными электродами. На первую сетку подается ускоряющий потенциал V_0 , а на вторую сетку – тормозящий (отрицательный по отношению к первой) потенциал V_2 . Движение пучка предполагается одномерным. Моделирование нелинейных нестационарных процессов в одномерном приближении осуществлялось методом частиц в ячейке, самосогласованное высокочастотное поле пространственного заряда рассчитывалось в квазистатическом приближении с помощью одномерного уравнения Пуассона¹⁷.

Полученные численные результаты в рамках одномерной модели качественно подтверждаются данными экспериментальных исследований. Последние проводились на разборном вакуумном макете низковольтного виркатора¹⁸. Для анализа колебаний в электронном пучке использовались отрезок спирали, нагруженный на поглощающую вставку, а также отрезок широкополосной коаксиальной линии — ВЧ-зонд, дополненный тормозящей сеткой для анализа спектра скоростей электронов.

При превышении критического значения тормозящего поля в электронном потоке происходит образование виртуального катода, от которого часть электронов отражается обратно к первой сетке. В зависимости от значений основных управляющих параметров (ток пучка I и тормозящий потенциал V_2), система демонстрирует разнообразные колебательные режимы, начиная от регулярных колебаний с простым спектральным составом и заканчивая сложными хаотическими колебаниями. Как показали исследования, характерная частота колебаний виртуального катода практически линейно зависит от тормозящего потенциала.

¹⁶ Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. *Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом*. Физика плазмы, **31** (2005) 1009

¹⁷ Рошаль А.С., *Моделирование заряженных пучков*, М.: Атомиздат, 1979.

¹⁸ Исследования проводились совместно с научной группой д.т.н., профессора Калинина Ю.А.

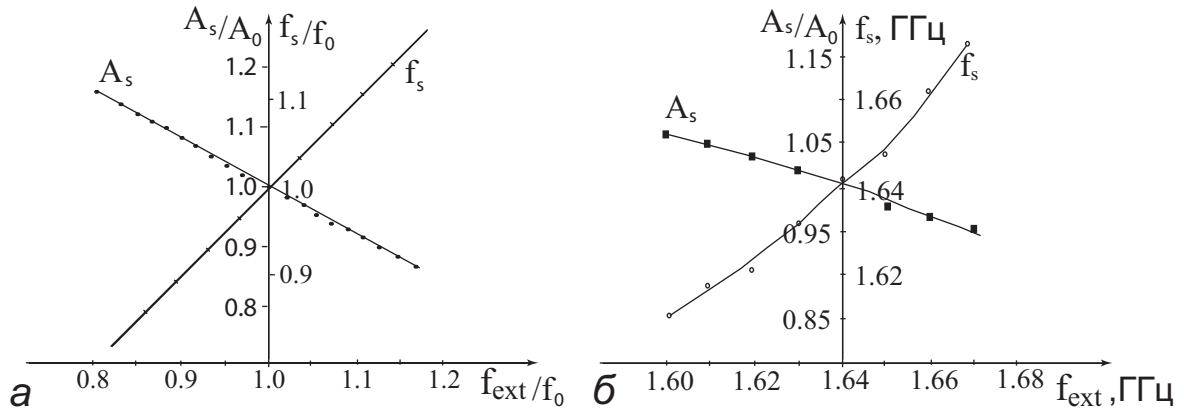


Рис. 3: Зависимость частоты и амплитуды выходного излучения низковольтного виркатора от частоты управляющего сигнала: *a* – численное исследование, *б* – эксперимент.

На первую сетку подавался управляющий гармонический сигнал с амплитудой, намного меньшей значения постоянного потенциала сетки, в результате воздействия которого осуществлялась предварительная модуляция электронного потока по скорости $v(x=0) = v_0(1 + M \sin \omega_1 t)$, где M – глубина модуляции, ω_1 – частота внешнего сигнала.

Для подробного изучения влияния внешнего сигнала на колебания виртуального катода были построены карты динамических режимов на плоскости управляющих параметров “амплитуда внешнего управляющего сигнала” – “частота внешнего управляющего сигнала” – “тормозящий потенциал” для различных значений параметра Пирса α .

При сближении частоты внешнего сигнала и собственной частоты (что может быть достигнуто путем изменения как частоты управляющего сигнала, так и величины тормозящего напряжения), на карте режимов можно видеть клювы, соответствующие синхронизации колебаний виртуального катода, которые расширяются по мере роста амплитуды управляющего сигнала.

На рис. 3 показаны зависимости частоты и амплитуды выходного сигнала от частоты внешнего управляющего сигнала внутри области регулярных колебаний (клюва синхронизации), полученные из численного расчета (*a*) и из эксперимента (*б*). Как можно видеть, имеет место захват частоты колебаний виртуального катода в низковольтном виркаторе.

Также было показано, что режимы синхронизации с установлением одночастотных колебаний ВК возможны при соотношении частот внешнего воздействия и собственной частоты колебаний виртуального катода как 1:1 и 1:2. Было обнаружено расширение клювов синхронизации за счет режима “квазисинхронизации” (режим, которому соответствует спектр выходного сигнала, где на фоне шумового пьедестала выделяется частота, соответ-

ствующая управляющему сигналу¹⁹). Помимо этого, система демонстрирует различные сложные режимы колебаний: биения, а также хаотические колебания, характеризующиеся качественно различными видами спектров мощности. Переходы между различными режимами осуществляются либо мягким образом, либо через перемежаемость.

В работе были также исследованы физические процессы, протекающие в электронном потоке в диодном промежутке, и определяющие динамику системы. Для анализа состояния электронного потока в области виртуального катода была использована такая характеристика как распределение по скоростям электронов, прошедших через область виртуального катода ко второй сетке. Было проведено рассмотрение распределения по скоростям для различных значений тормозящего потенциала и амплитуды управляющего сигнала. Показано, что с ростом тормозящего поля в диодном промежутке в автономном режиме и для малых значений амплитуды управляющего сигнала, средняя скорость электронов, прошедших виртуальный катод, уменьшается, а разброс скоростей увеличивается. Спектр скоростей становится более изрезанным, что связано с усложнением электронных структур, формирующихся в потоке. Однако, с увеличением амплитуды сигнала, когда в системе наблюдается режим синхронизации, средняя скорость электронов начинает возрастать, в то время как разброс скоростей уменьшается. В натурном эксперименте с помощью дополнительной тормозящей сетки снимались аналогичные характеристики, и при сравнении их с полученными при численном моделировании наблюдалось хорошее качественное соответствие. Таким образом, физически управляющее воздействие внешних сигналов сводится к влиянию на формирование и взаимодействие электронных структур в электронном потоке.

При наблюдении хорошего качественного совпадения картин динамики системы, получаемых из численного и натурального эксперимента, было показано, что совместное действие предварительной модуляции электронного потока и тормозящего потенциала обеспечивает возможность эффективно управления колебаниями виртуального катода.

В рамках исследования способов управления динамикой систем с виртуальными катодами также численно изучено поведение двух электростатически связанных виркаторов²⁰. Система представляет собой два ускорителя, каждый из которых формирует электронный поток, направленный навстречу другому потоку, при этом в каждом из потоков формируется виртуальный катод. Связь между ними осуществляется через общее поле

¹⁹ Трубецков Д.И., Короновский А.А., Храмов А.Е., *Синхронизация распределенных автоколебательных систем электронно-волновой природы с обратной волной*, Изв. вузов. Радиофизика. XLVII №5-6 (2004) 343–372

²⁰ Hendricks K.J., Adler R., Noggle R.C., *Experimental results of phase locking two virtual cathode oscillators* J.Appl.Phys., 68 (1990) 820–828

пространственного заряда.

Проанализированы характерные режимы динамики такой системы в зависимости от входных токов обоих виркаторов. В результате численного эксперимента на плоскости управляющих параметров выделены области одночастотных колебаний в каждом из виркаторов, области биений, широкополосных хаотических колебаний с шумоподобным спектром. Подробно изучен режим взаимной синхронизации колебаний в виркаторах. Изучены физические процессы, протекающие в обоих генераторах, рассмотрена связь электронных структур, формирующихся в потоках, со сложными режимами колебаний в системе. Показано, что хаотизация колебаний связана с возникновением дополнительных внутренних структур в области виртуального катода, связанных с воздействием на поток внешнего сигнала за счет встречного потока.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ВЫВОДЫ И ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. В гидродинамической модели диода Пирса в режиме хаотических колебаний при включении запаздывающей обратной связи наблюдается подавление хаотической динамики и установление различных типов периодических колебаний. Переход от хаотической динамики к регулярной имеет место при длительности задержки в цепи ОС меньшей половины характерного временного масштаба колебаний и происходит через обратный каскад удвоений периода.

2. Хаотизация динамики пучка в диоде Пирса с обратной связью определяется приближением системы к неустойчивому состоянию однородного равновесия, и, как следствие, повышению неустойчивости колебаний в электронном потоке. При длительностях запаздывания обратной связи порядка характерного временного масштаба колебаний сложность колебаний увеличивается в результате увеличения амплитуды колебаний, и, как следствие, роста нелинейности. При увеличении уровня мощности сигнала, ответвляемого в цепь обратной связи, механизм нелинейного ограничения развития неустойчивости разрушается, так что развитие неустойчивости заканчивается формированием виртуального катода.

3. В гидродинамической модели диода Пирса наблюдается существенное расширение области колебательной динамики в электронном потоке со сверхкритическим током без образования виртуального катода, в том числе и хаотических автоколебаний, при превышении плотностью $|\rho_i|$ положительного заряда неподвижного ионного фона плотности $|\rho_0|$ пространственного заряда электронного пучка.

4. Для управления сложной динамикой в гидродинамической модели диода Пирса предложены схемы с непрерывной обратной связью, в которых сигнал обратной связи воздействует только на границе распределенной электронной системы. Предложенные схемы позволяют стабилизировать как неустойчивое состояние равновесия, так и неустойчивые периодические во времени пространственно-временные состояния, аналогичные неустойчивым периодическим орбитам хаотического аттрактора динамических систем с малым числом степеней свободы.

5. Воздействие внешнего гармонического сигнала на колебания электронного потока с виртуальным катодом, формирующимся в тормозящем поле, в низковольтном виркаторе позволяет синхронизовать колебания как на частоте колебаний виртуального катода, так и ее гармониках. При больших отстройках частоты внешнего воздействия от частоты колебаний в автономном низковольтном виркаторе при росте мощности внешнего сигнала наблюдается усложнение динамики электронного потока с виртуальным катодом.

Апробация работы и публикации.

Материалы диссертационной работы использовались при выполнении проектов Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 05-018-08030, 05-02-16286, 06-02-72007), были поддержаны программой “Университеты России – Фундаментальные исследования” (проекты УР.01.01.379, УР.01.01.051, УР.01.01.065); Президентской программой поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-1250.2003.2); программой Министерства образования и науки РФ “Развитие научного потенциала высшей школы” (проекты 332, 333); Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники на 2002–2006 годы» (проект РИ-112/001/240); НОЦ “Нелинейная динамика и биофизика” при СГУ (грант REC-006 of CRDF).

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных семинарах и конференциях, среди которых: 2-я Международная конференция "Фундаментальные проблемы физики" (Саратов, 9-14 октября, 2000); 2-я Международная межвузовская конференция “Современные проблемы СВЧ электроники и радиофизики” (Саратов, 20-24 Марта, 2001). XI Международная зимняя школа-семинар по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 17-20 марта, 2001); XII Международная зимняя школа-семинар по СВЧ электронике и радиофизике. (Саратов, 28 января - 3 февраля, 2003); XIII Международная зимняя школа-семинар по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 31 января - 5 февраля 2006); 6th International School on Chaotic Oscillations and Pattern Formation (Saratov, October 2-7, 2001); 7th Int. School on Chaotic Oscillations and Pattern Formation (Saratov, October 1-6, 2004); VIII Всероссийская школа-семинара "Физика и приме-

нение микроволн" (Звенигород, 26-30 мая 2001); VIII Всероссийская школа-семинар "Нелинейные явления в неоднородных средах" (Красновидово, 22-27 мая 2002); IX Всероссийская школа-семинар "Физика и применение микроволн" (Звенигород, 26-30 мая 2003); IX Всероссийская школа-семинар "Нелинейные явления в неоднородных средах" (Звенигород, 22-26 мая 2004); X Всероссийская школа семинар «Физика и применение микроволн» (Звенигород, 22-26 мая 2005); VI научная конференция "Нелинейные колебания механических систем" (Н.Новгород, 16-19 сентября 2002); 4th IEEE International Vacuum Electron Source Conference (IVESC'2002) (Saratov, Russia, July 15-19, 2002); Всероссийская научная школа "Нелинейные волны – 2002" (Нижний Новгород, 2-9 марта 2002); 14-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Севастополь, Украина, 13-17 сентябрь 2004); 17-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (Севастополь, Украина, 13-17 сентябрь 2006); III Международная конференция "Фундаментальные проблемы физики" (Казань, июнь 2005); Международная научно-технической конференции "Радиотехника и связь" (Саратов, май 2005); XI Школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики" (Звенигород, 26-29 ноября 2006).

Результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научном семинаре кафедры электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов и на научных семинарах НОЦ "Нелинейная динамика и биофизика" СГУ.

По материалам диссертации опубликована в соавторстве глава в монографии [1], 12 статей в научных журналах (в том числе и в рекомендованных ВАК для публикации материалов докторских диссертаций) [2–13] и 26 тезисов докладов в трудах конференций, наиболее значимые из которых приведены в списке публикаций [14–24].

Основные публикации по теме диссертационной работы:

- [1] Трубецков Д.И., Ремпен И.С., Рыскин Н.М., Титов В.Н., Храмов А.Е. Управление сложными колебаниями в распределенных системах СВЧ-электроники / Глава в монографии "Генераторы и усилители СВЧ". Под ред. И.В. Лебедева. М.: Радиотехника. 2005. СС. 336-351.
- [2] Храмов А.Е., Koronovskii A.A., Rempen I.S. Controlling chaos in spatially extended beam-plasma system by the continuous delayed feedback. CHAOS. **16** (2006) 013123
- [3] Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е. Влияние внешнего сигнала на колебания в электронном потоке с виртуальным катодом (эксперимент и численное исследование). Изв. РАН. Сер. физическая. **69**, 12 (2005) 1736–1740

- [4] *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Popov P.V., Rempen I.S.* Chaotic synchronization of coupled electron-wave systems with backward waves. *CHAOS*. **15** (2005) 013705
- [5] *Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Стабилизация нестойчивых периодических состояний хаотической динамики в диоде Пирса. *Изв. РАН. Сер. физическая*. **68**, 12 (2004) 1789-1793
- [6] *Короновский А.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Численное исследование управления хаотической динамикой в распределенной активной среде. *Изв. Вузов. Прикладная нелинейная динамика*. **12**, 1-2 (2004) 51-79
- [7] *Hramov A.E., Rempen I.S.* Investigation of the complex dynamics and regime control in Pierce diode with the delay feedback. *Int. J. Electronics*. **91**, 1 (2004) 1-12.
- [8] *Короновский А.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Исследование неустойчивых периодических пространственно-временных состояний в распределенной активной системе со сверхкритическим током. *Изв. РАН. Сер. физическая*. **67**, 12 (2003) 1705-1708
- [9] *Короновский А.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Управление хаосом в электронном пучке со сверхкритическим током в гидродинамической модели диода Пирса. *Письма в ЖТФ*. **29**, 23 (2003) 67-74
- [10] *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Rempen I.S.* Investigation of Complex Dynamics and Regime Control in Pierce Diode with Delay Feedback. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. **6**, 2 (2003) 687-695
- [11] *Трубецков Д.И., Ремпен И.С., Рыскин Н.М., Титов В.Н., Храмов А.Е.* Управление сложными колебаниями в распределенных системах сверхвысокочастотной электроники. *Радиотехника*. **67**, 2 (2003) 40-52
- [12] *Храмов А.Е., Ремпен И.С.* Влияние обратной связи на сложную динамику в гидродинамической модели диода Пирса. *Радиотехника и электроника*. **47**, 6 (2002) 732-738
- [13] *Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Управление режимами колебаний электронного потока со сверхкритическим током в диоде Пирса. *Изв. РАН. Сер. физическая*. **65**, 12 (2001) 1689-1694
- [14] *Ремпен И.С.* Управление хаосом в распределенной электронно-волновой системе со сверхкритическим током. XI Всероссийская школа молодых ученых "Актуальные проблемы физики". 26 - 29 ноября. Звенигород, 2006, СС.59;
- [15] *Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Управление режимами колебаний электронного пучка в двухпоточковом виркаторе. *Материалы 17-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии"*. 13-17 сентября. Севастополь, Украина, 2006. СС.18.

- [16] *Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Влияние внешнего сигнала на динамику электронного потока в диодном промежутке с тормозящим полем. 15-я Международная конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Материалы конференции. 12-16 сентября 2005 Севастополь, Украина (2005) СС.167.
- [17] *Трубецков Д.И., Короновский А.А., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Развитие методов исследования хаотической синхронизации и выявления направленности связи в системах различной природы с помощью вейвлетного анализа. 3-я Международная конференция "Фундаментальные проблемы физики". Труды конференции. 13-18 июня Казань, Россия (2005) СС.97.
- [18] *Rempen I.S., Hramov A.E.* Controlling Chaos in Distributed Nonlinear Active System by Continuous Delay Feedback. 12th International School-Conference "Foundations and Advances in Non-linear Science". Minsk, Belarus. 27-30 September (2004) PP.68.
- [19] *Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Синхронизация систем на виртуальном катоде. Материалы XII зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике. 28 января - 3 февраля. Саратов, 2003. СС.22-23.
- [20] *Короновский А.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е.* Исследование неустойчивых периодических пространственно-временных состояний хаотической динамики в диоде Пирса. Труды IX Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн". Звенигород, Московская область. 26-30 мая 2003. Часть 2. С.79.
- [21] *Ремпен И.С., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Синхронизация в сверхвысокочастотной электронике. Материалы VI научной конференции "Нелинейные колебания механических систем" (Нижний Новгород, 16-19 сентября 2002). С.132
- [22] *A.E.Hramov and I.S.Rempen* Nonlinear dynamics of electron beam with overcritical current in Pierce diode with delay feedback. // The Proceedings of Fourth IEEE International Vacuum Electron Source Conference (IVESC'2002). July 15-19, 2002, Saratov, Russia. PP.376-378
- [23] *И.С.Ремпен, А.Е.Храмов* Управление режимами колебаний электронного потока со сверхкритическим током в диоде Пирса // Труды VIII Всероссийской школы-семинара "Физика и применение микроволн". Часть 1. 26-30 мая 2001, Звенигород, Россия, СС.96-97.
- [24] *A.E. Hramov and I.S. Rempen* Investigation of the chaotic dynamics and regime control in Pierce diode with the delay feedback // The Book of Abstracts of 6th International School on Chaotic Oscillations and Pattern Formation. October 2-7, 2001. Saratov, Russia. P.29.

РЕМПЕН Ирина Сергеевна

УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ХАОТИЧЕСКИМИ КОЛЕБАНИЯМИ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ,
СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОТОКИ СО
СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ТОКОМ

Автореферат

Ответственный за выпуск — профессор Ю.И. Левин

Подписано к печати 30.09.07.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага “Снегурочка”. Гарнитура “Times”
Усл. печ. л. 1,39(1,5). Тираж 120 экземпляров. Заказ 398

РИО журнала “Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика”.
410012, Саратов, Астраханская, 83.