

На правах рукописи

ХАНЕНКО Марина Владимировна

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ЦЕПОЧЕК И СЕТЕЙ СВЯЗАННЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА
(нелинейная нестационарная теория, синхронизация, влияние шумов)

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 – 2010

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.

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Владимир Иванович Пономаренко,
кандидат технических наук
Владимир Константинович Семенов

Ведущая организация: Федеральное государственное
унитарное предприятие “НПП “Алмаз”

Защита состоится 23 сентября 2010 г. в 18 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 в Саратовском государственном университете (410012, г. Саратов, ул.Астраханская, 83).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке СГУ.

Автореферат разослан “12” июля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.М. Аникин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследуемой проблемы. Исследование нелинейных и нестационарных процессов в распределённых активных средах, содержащих электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями, является одной из важных задач современной сверхвысокочастотной радиофизики и электроники больших мощностей¹. Данные исследования имеют фундаментальное значение, связанное с выявлением общих закономерностей нелинейных нестационарных процессов в релятивистских пучково-плазменных активных системах, с анализом нелинейных процессов и хаотической генерации в распределённых автоколебательных средах, содержащих интенсивные потоки заряженных частиц, взаимодействующие с электромагнитными полями электродинамических систем. Весьма важным представляется и прикладное значение подобных теоретических работ, так как они позволяют провести оптимизацию характеристик существующих и предложить новые модификации мощных вакуумных приборов и устройств СВЧ-диапазона, которые будут иметь новые функциональные возможности.

Способность различных систем сверхвысокочастотной электроники демонстрировать сложное, нерегулярное поведение была известна еще в 70-е годы². В настоящее время наблюдается активизация исследований нелинейной динамики электронно-волновых сред в области электроники больших мощностей, прежде всего в связи с разработкой мощных генераторов многочастотных (в том числе и хаотических) сигналов для целей СВЧ-нагрева плазмы, радиолокации (в том числе и с использованием широкополосных хаотических сигналов), радиопротиводействия, передачи и обработки информации и т.д.³ К числу наиболее перспективных приборов в этом отношении относятся гироприборы, позволяющие получить наибольший уровень мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн⁴. Работы в этом направлении активно ведутся как у нас в стране, так и за рубежом. Подобные источники мощного микроволнового излучения широко используются в ускорительной технике, радиолокации и связи, промышленности. Современные темпы развития вышеуказанных областей применения требуют непрерывного повышения выход-

¹Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2-х томах. М.: Физматлит, 2003, 2004

Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007

²Гинзбург Н. С., Кузнецов С. П., Федосеева Т. Н. Теория переходных процессов в релятивистской ЛОВ. Изв. вузов. Радиофизика. 21 (1978) 1037

Безручко Б. П., Кузнецов С. П., Трубецков Д. И. Экспериментальное наблюдение стохастических автоколебаний в динамической системе электронный пучок – обратная электромагнитная волна. Письма в ЖЭТФ. 29 (1979) 180

Кислов В. Я., Мясин Е. А., Залогин Е. Н. Исследование стохастических автоколебательных режимов в автогенераторах с запаздыванием. РиЭ. 24 (1979) 1118

³Дмитриев А. С., Панас А. И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002

Залогин Н. Н., Кислов В. В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006

Короновский А. А., Трубецков Д. И., Храмов А. Е. Методы нелинейной динамики и хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2. Нестационарные и хаотические процессы. М.: Физматлит, 2009

⁴Felch K. et al. Characteristics and applications of fast-wave gyrodevices. Proc. IEEE. 87 (1999) 752

ных характеристик источников мощного СВЧ излучения: выходной мощности, коэффициента полезного действия, расширения полосы усиливаемых и генерируемых частот и т.д.. Практическая реализация этих задач представляет собой сложную научную проблему, решение которой возможно лишь с привлечением подробного теоретического анализа и математического моделирования физических процессов, происходящих в СВЧ генераторах и усилителях, и их экспериментального изучения. Однако, это лишь прикладная сторона вопроса. Фундаментальная значимость этих исследований состоит в создании теории активных нелинейных распределённых сред на примере уже ставшей эталонной в современной теории колебаний и волн системе «электронный поток — электромагнитная волна» и экспериментальной проверке получаемых результатов по исследованию нелинейной динамики электронных систем на имеющейся экспериментальной базе СВЧ диапазона.

Отметим, что многие из существующих исследований, как правило, не идут дальше констатации наличия сложной динамики, оставляя неисследованными ее свойства и физические механизмы, приводящие к возникновению сложного поведения. Это обусловлено, с одной стороны, чрезвычайной сложностью исследуемых объектов, с другой стороны – недостаточным развитием представлений о нелинейной динамике распределенных автоколебательных систем электронно-волновой природы. Определенное продвижение в этих вопросах было достигнуто в последние годы в ряде теоретических и экспериментальных работ в этом направлении⁵. В частности, было показано, что для распределенных электронно-волновых систем при изменении управляющих параметров, как правило, характерна сложная последовательность смены динамических режимов с несколькими переходами “порядок – хаос” и “хаос – порядок” по различным сценариям. Удалось связать основные бифуркационные переходы с процессами формирования в системе пространственных структур (электронных паттернов), были развиты методы выделения и диагностики когерентных структур из наборов пространственно-временных данных различными методами нелинейной динамики.

В то же самое время, многие важные вопросы пока остаются неисследованными. Так для активных сред «винтовой поток – электромагнитное поле» остается открытым вопрос о влиянии на сложные нестационарные процессы различных типов обратной связи, возможности генерации и подавления хаотических сигналов с заданными спектральными характеристиками, не был проведен анализ для таких связанных сред. Было экспериментально обнаружено подавление сигнала в устройстве, содержащем такую среду⁶, однако теоретического анализа данного эффекта проведено не было. Не уделялось достаточного внимания и задаче об управлении характеристиками хаотических колебаний в устройствах сверхвысокочастотного диапазона. Одним из эффективных подходов здесь, может стать применение цепочек релятивист-

⁵Trubetskov D.I. et al. Nonlinear waves, chaos and patterns in microwave devices. Chaos. 6 (1996) 358

⁶Kawasaki S. et al Resonance absorption of radiation field by an intense relativistic electron beam in inverse cyclotron maser geometry. Appl. Phys. Lett. 52 (1988) 757

ских генераторов, когда сигнал одного является управляющим для другой (ведомой) системы⁷.

Другой важной проблемой современной радиофизики СВЧ является исследование влияния шумов на распределенные нелинейные динамические системы различной природы, демонстрирующие развитые сложные колебания и пространственно-развитой хаос⁸. В основном подобные исследования проводились для систем с конечным числом степеней свободы, существенно меньше работ, рассматривающих распределенные электронные системы под внешним шумовым воздействием⁹.

Также весьма малоизученной является задача о создании эффективных способов излучения, приема и обработки многочастотных (в первую очередь, узкополосных и широкополосных хаотических) сигналов различного уровня мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн. Одним из перспективных методов решения данной задачи является использование так называемых нелинейных антенн¹⁰, которые можно рассматривать как некоторые искусственные “нейроподобные” решетки связанных активных элементов. Однако, слабо изучены вопросы возможности использования подобных многоэлементных систем в качестве излучателей и приемников широкополосных и узкополосных хаотических сигналов, и возможности использования в качестве элементов таких систем релятивистских генераторов для создания сигналов сверхбольшого уровня мощности. В качестве модулей нелинейных антенн можно рассматривать, например, связанные виркаторные среды¹¹. При анализе низковольтных виркаторов¹² как модулей таких связанных систем необходимо корректное моделирование вывода излучения из электронного потока с виртуальным катодом. В качестве первого шага таких исследований важно провести анализ цепочки и сети, составленных из генераторов на основе виркаторов, в рамках простых моделей для апробации методов исследования, диагностики синхронных состояний и выявления основных режимов работы такой сетевой структуры из распределенных активных сред.

Сказанное выше позволяет считать тему диссертации, посвященную исследованию различных методов управления динамикой цепочек и сетей электронных СВЧ устройств, актуальной и важной для современной радиофизики и

⁷Klinger T. et al Chaos control and taming of turbulence in plasma devices. Phys.Plasmas. 8 (2001) 1961

Шалфеев В. Д., Матросов В. В., Корзинова М. В. Динамический хаос в ансамблях связанных фазовых систем. Успехи современной радиоэлектроники. (11) (1998) 44-56

Дубинов А. Е., Селемир В. Д., Царев А. В. Фазированные антенные решетки на основе виркаторов: численные эксперименты. Изв.вузов. Радиофизика. XLIII (8) (2000) 709

⁸Анищенко 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

⁹Четвериков А.П., Фролова Н.Б. Автоколебания в лампе обратной волны при воздействии внешнего шума. РиЭ. 49 (2004) 876

¹⁰Meadows B. K., Heath T. H., Neff J. D., et al Nonlinear antenna technology. Proceedings IEEE. 90 (5) (2002) 882-897

¹¹Храмов А. Е. Колебания в системе связанных генераторов на виртуальном катоде виртодного типа. РиЭ. 44 (1999) 211

¹²Калинин Ю. А., Короновский А. А., Храмов А. Е., Егоров Е. Н., Филатов Р. А. Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом. Физика плазмы. 31 (2005) 1009

физической электроники.

Поскольку исследуемые в диссертации объекты (приборы СВЧ-электроники, содержащие электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями) являются предметом изучения физической электроники, а исследуемые явления в них (генерация хаотических колебаний, образование структур, синхронизация и т.д.) изучаются теорией колебаний и волн, являющейся разделом радиофизики, 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 задач и заключается в выявлении механизмов управления сложными режимами пространственно-временных колебаний в цепочках и сетях связанных распределенных автоколебательных систем сверхвысокочастотной электроники, а также в анализе влияния шумов на сложные автоколебания в устройствах физической электроники.

Для достижения этой цели в диссертационной работе подробно рассматриваются следующие вопросы.

1. Возможность управления нелинейной динамикой цепочки однонаправленно связанных гирогенераторов со встречной волной при различных значениях управляющих параметров.
2. Изучение влияния внешнего гармонического сигнала на автоколебания в распределенной активной среде “винтовой электронный поток — встречная электромагнитная волна” для выявления возможности как подавления хаоса, так и возбуждения хаотических колебаний путем внешнего периодического воздействия; рассмотрение частного случая воздействия на активную среду сигнала, прошедшего по цепи задержанной обратной связи.
3. Выявление особенностей динамики клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью и лампы обратной волны О-типа под воздействием внешних шумов различных интенсивностей; анализ механизмов и особенностей возникновения индуцированной шумом синхронизации в клистронных генераторах хаоса.
4. Теоретическое рассмотрение нелинейной динамики и синхронизации в цепочке и сети, состоящей из связанных низковольтных виркаторов.

Результаты исследований диссертационной работы позволяют выявить основные особенности установления различных динамических режимов, включая режимы синхронизации и генерации хаотических сигналов, в цепочках и сетях связанных пространственно-распределенных систем электронно-волновой природы, а также влияния шумовых воздействий на различные распределенные автоколебательные системы электроники сверхвысоких частот.

В качестве объектов исследований в данной диссертационной работе выбраны как классические системы сверхвысокочастотной радиофизики и физиче-

ской электроники (модели лампы обратной волны, модель гиросгенератора со встречной волной, модель клистронного генератора хаоса), так и новый прибор физической вакуумной электроники (низковольтный виркатор).

Научная новизна диссертационной работы состоит в установлении закономерностей нелинейной динамики цепочек и сетей связанных электронно-волновых генераторов СВЧ диапазона, включая установление синхронных и хаотических режимов генерации в ансамблях систем физической электроники, присущих синхронной динамике больших ансамблей связанных радиофизических хаотических систем. В диссертации получены следующие новые результаты.

1. В рамках нестационарной нелинейной теории изучена цепочка односторонне связанных гиросгенераторов со встречной волной, когда сигнал с выхода первой (ведущей) лампы подается на вход второй (ведомой). Показано, что при изменении параметров ведомой лампы при сравнительно малых токах в цепочке гирос-ЛВВ возможен режим развитой хаотической генерации. В то же время в рассматриваемой системе возможно подавление автомодуляции и установление режима стационарной генерации. Также получено, что в исследуемой системе возможно возникновение режимов синхронизации ВЧ-колебаний в каждом из генераторов.

2. Проведено детальное исследование возникновения и подавления режимов хаотической генерации в неавтономном гиросгенераторе со встречной волной при воздействии на него внешнего гармонического сигнала. Показано, что в рассматриваемой системе при изменении частоты и мощности внешнего сигнала в гирослампе возможно установление как режимов развитой хаотической генерации, так и режимов стационарных одночастотных колебаний. Впервые на плоскости основных управляющих параметров выявлены области, в которых наблюдаются режимы одночастотных и многочастотных колебаний неавтономного гиросгенератора со встречной волной.

3. Исследован гиросгенератор со встречной волной и внешней запаздывающей обратной связью. Показано, что при определенных фазах коэффициента обратной связи наблюдается уменьшение пускового значения параметра неизохронности, т.е. самовозбуждение гирос-ЛВВ облегчается, в то время как порог возникновения режимов автомодуляции выходного сигнала, наоборот, увеличивается.

4. Проведено теоретическое исследование влияния шумов на динамику клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью, находящегося в различных режимах генерации, при изменении основных управляющих параметров системы. Теоретически и экспериментально показано, что в рассматриваемой системе с ростом интенсивности внешнего шума наблюдается подавление собственной динамики, выявлены физические механизмы подобного поведения системы.

5. Изучено воздействие одного и того же источника шума на два клистронных автогенератора, находящихся в режиме хаотической генерации, и впервые

показана возможность установления в системе микроволновых генераторов хаотических колебаний режима индуцированной шумом синхронизации.

6. Проведены теоретические исследования цепочки и сети связанных низковольтных виркаторов, в которых нестационарный колеблющийся виртуальный катод формируется за счет сильного торможения пучка. Показано, что в цепочке низковольтных виркаторов наблюдается снижение величины тока пучка, при котором наблюдается формирование нестационарного виртуального катода. Предложен метод анализа синхронного поведения в сети низковольтных виркаторов, демонстрирующих режимы хаотической генерации, основанный на расчете индекса синхронизации для всей сети хаотических генераторов

Научная и практическая значимость. Исследования механизмов управления нелинейной динамикой распределенных систем, содержащих электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями, проведены на основе моделей, являющихся базовыми для физической электроники и радиофизики сверхвысоких частот, что делает полученные результаты достаточно общими и позволяет обобщить их на более широкий класс электронно-волновых систем. Полученные в диссертации результаты позволяют продвинуться в понимании таких проблем как управление сложной динамикой распределенных активных систем в цепочках связанных генераторов с помощью воздействия различных внешних сигналов. С помощью численного моделирования и экспериментального исследования обнаружены и объяснены новые фундаментальные эффекты, в частности, подавление периодической и хаотической генерации в клистронном генераторе хаоса путем воздействия на автоколебательную систему внешнего источника шума. Разработан новый метод теоретического анализа синхронизации в сетях связанных генераторов хаотического сигнала СВЧ-диапазона.

Наряду с этим, проведенные исследования имеют практическую направленность и могут найти применение при решении задач, связанных с разработкой различных мощных приборов СВЧ-электроники, с возможностью управления энергетическими (уровень генерируемой мощности) и спектральными (частота, ширина полосы) характеристиками их выходного излучения. Кроме того, важное практическое значение имеет выявление особенностей поведения систем, обусловленных шумом. Проведенный анализ физических процессов позволяет дать обоснованные рекомендации специалистам, проектирующим электровакуумные приборы сверхвысоких частот, по достижению необходимых выходных характеристик данных устройств и созданию методов управления ими.

Результаты диссертации использованы при выполнении ряда НИР и научных грантов, внедрены в учебный процесс в Саратовском государственном университете при подготовке студентов по направлению 010800 – Радиофизика.

Обоснование и достоверность полученных в работе численных резуль-

татов 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 проведенными экспериментальными исследованиями.

Личный вклад. Основные результаты диссертации получены лично автором. Постановка задач, разработка методов и их решения, объяснение и интерпретация результатов были осуществлены совместно с научным руководителем. Интерпретация результатов осуществлялась с соавторами научных работ, опубликованных соискателем. В большинстве совместных работ автором выполнены все численные и аналитические расчеты. Экспериментальные результаты, изложенные в главе 2, получены в рамках совместных исследований с научной группой д.ф.-м.н. проф. Ю.Д. Жаркова и д.ф.-м.н. проф. Б.С. Дмитриева.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 179 страниц текста и иллюстраций. Библиографический список содержит 179 наименований.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Воздействие внешнего гармонического сигнала на распределенную автоколебательную систему “винтовой электронный поток — встречная электромагнитная волна” позволяет как подавить хаотическую автомодуляцию и установить режимы стационарных колебаний на частоте внешнего воздействия, так и привести к возникновению режима хаотической генерации для случая, когда в автономной системе наблюдаются режимы стационарной генерации и периодической автомодуляции.

2. В цепочке связанных гирогенераторов при малых параметрах неизохронности электронов винтового пучка наблюдается установление режимов развитой хаотической генерации; с увеличением параметра неизохронности имеет место подавление автомодуляции и установление режимов стационарной генерации, что связано с возникновением в цепочке генераторов режимов синхронизации.

3. В случае воздействия внешнего источника шума на автоколебания в клистронном генераторе хаоса с запаздывающей обратной связью наблюдается: 1) подавление собственной динамики генератора (как периодической, так и хаотической); воздействие шума небольшой интенсивности на клистронный генератор в предпусковом режиме приводит к возникновению колебаний в системе, то есть к снижению пускового тока генератора; 3) воздействие шума на два идентичных клистронных генератора хаоса при определенных значениях управляющих параметров позволяет наблюдать режим индуцированной шумом синхронизации.

4. Воздействие внешнего сигнала на колебания электронного потока с виртуальным катодом в тормозящем поле (низковольтном виркаторе) приводит к снижению пускового тока и расширению области тормозящих потенциалов,

при которых в системе наблюдаются колебания.

5. В цепочке однонаправленно связанных низковольтных виркаторов и в сети низковольтных виркаторов с различными топологиями связи возможно наблюдение режимов синхронизации временных масштабов на различных базовых частотах колебаний в системе, причем переход от асинхронной динамики к синхронизации всей сети осуществляется через формирование синхронного кластера, число элементов которого растет с ростом параметра связи. В случае больших значений коэффициентов связи между генераторами в сети со случайной матрицей связи имеет место усложнение динамики электронных потоков с виртуальным катодом и установление режима генерации широкополосных колебаний со слабой изрезанностью спектра мощности.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы использовались при выполнении проектов РФФИ (гранты 06–02–81013, 08–02–90002), ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”, Президентской программы поддержки научных школ РФ (проект НШ–355.2008.2, руководитель научной школы — чл.-корр. РАН, профессор Д.И. Трубецков), НОЦ “Нелинейная динамика и биофизика” при Саратовском госуниверситете (грант REC-006 U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF)).

Представленные результаты неоднократно докладывались на различных семинарах и конференциях и отражены в тезисах докладов: VIII международной школы “Хаотические автоколебания и образования структур” (Саратов, октябрь 2007), Всероссийской научной школе–конференции “Нелинейные дни в Саратове для молодых” (Саратов, октябрь 2007), XI школы–семинара “Волновые явления в неоднородных средах” (Звенигород, Московская область, май 2008), 18-й и 19-й Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, Украина, сентябрь 2008 и 2009 соответственно), XIV Зимней школы–семинара по СВЧ электронике и радиофизике. (Саратов, февраль 2009), Международной школы–семинара “Статистическая физика и информационные технологии” (Саратов, июнь 2009), Всероссийской научной школы для молодежи “Нелинейные феномены, хаос, критические явления и методы их исследования с помощью вейвлетного, кластерного и спектрального анализа” (Саратов, октябрь 2009) и в трудах конференций (всего 12 статей и тезисов докладов).

Публикации. Результаты работы опубликованы в реферируемых научных журналах (4 статьи), рекомендованных ВАК для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и в трудах конференций (всего 12 статей и тезисов докладов).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, описана новизна и практическая значимость проведенных исследований, сформирована цель работы и приведены основные результаты, выводы и положения диссертаци-

онной работы, выносимые на защиту, дано краткое изложение содержания работы.

В **первой главе** диссертационной работы приведены результаты исследования нелинейной динамики цепочки связанных гиросгенераторов со встречной волной, возможности подавления и возбуждения многочастотных хаотических сигналов в гирос-ЛВВ путем воздействия внешнего гармонического сигнала на коллекторном конце лампы, влияние внешней обратной связи на гирос-ЛВВ.

В разделе 1.1 дается краткий обзор предыдущих исследований, посвященных возможности управления нелинейной динамикой в цепочках связанных распределенных автоколебательных систем.

В разделе 1.2 формулируется нелинейная нестационарная математическая модель цепочки связанных гиросгенераторов со встречной волной, когда сигнал с выхода ведущей лампы подается на вход ведомой лампы. Модель представляет собой самосогласованную систему уравнений движения электронов слаборелятивистского винтового пучка и уравнений возбуждения встречной волны электронным потоком¹³:

$$\frac{d\beta_{1,2}}{d\xi} - j\mu_{1,2} (1 - |\beta_{1,2}|^2) \beta_{1,2} = F_{1,2}, \quad (1)$$

$$\frac{dF_{1,2}}{d\tau} - \frac{dF_{1,2}}{d\xi} = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \beta_{1,2} d\theta_0, \quad (2)$$

где индексы "1" и "2" обозначают номер элемента цепочки (индекс "1" соответствует ведущей, а индекс "2" – ведомой гирос-ЛВВ); μ – параметр неизохронности электронов–осцилляторов, β – комплексный радиус траекторий электронов ансамбля, $F = F(\xi, \tau)$ – медленно меняющаяся комплексная безразмерная амплитуда поля встречной волны, ξ – безразмерная продольная координата и τ – безразмерное время. Однонаправленная связь между генераторами цепочки записывается в виде следующих граничных условий для амплитуды ВЧ поля:

$$F_1(\xi = A, \tau) = 0, \quad F_2(\xi = A, \tau) = RF_1(\xi = 0, \tau), \quad (3)$$

где $R = r \cdot e^{j\varphi}$ – комплексный коэффициент связи между гирослампамы со встречной волной, A – длина пространства взаимодействия. В разделе 1.3 рассматриваются методы численного интегрирования самосогласованной системы уравнений движения электронов слаборелятивистского винтового пучка (1) и уравнений возбуждения встречной волны электродинамической системы (2), проводится ряд тестовых расчетов автономного гиросгенератора со встречной волной.

¹³Юлпатов В.К. Нелинейная теория взаимодействия непрямолинейного периодического электронного пучка с электромагнитным полем. Вопросы радиоэлектроники. Сер. I: Электроника. (12) (1965) 15

Дмитриев А.Ю., Трубецков Д.И., Четвериков А.П. Нестационарные процессы при взаимодействии винтового электронного пучка со встречной волной в волноводе. Изв.вузов. Радиофизика. 34 (1991) 595

Раздел 1.4 посвящен исследованию нелинейной динамики цепочки связанных гиросгенераторов со встречной волной для различных случаев, определяемых режимами каждого из генераторов цепочки. В параграфе 1.4.1 исследуется управление характеристиками выходных колебаний цепочки гиросламп при изменении параметров ведомой лампы. Параметры ведущей лампы фиксировались так, чтобы автономный гиросгенератор демонстрировал режим автомодуляции. Рассматривалась динамика цепочки при изменении параметра неизохронности μ_1 ведомой лампы так, чтобы она последовательно находилась в режимах стационарной генерации, автомодуляции и хаотической генерации. Если автономная ведомая гирос-ЛВВ находилась в режиме стационарной генерации, то воздействие на нее сигнала ведущей гирос-ЛВВ сравнительно большой амплитуды приводит к возникновению режима периодической автомодуляции в большом диапазоне изменения амплитуды связи r . При больших величинах амплитуды коэффициента однонаправленной связи динамика ведомой гирос-ЛВВ хаотизируется, и спектр генерации становится сплошным.

Воздействие внешнего сигнала с ведущей лампы на гиросгенератор со встречной волной, демонстрирующий в автономном случае режим автомодуляции, приводит к установлению развитой хаотической динамики системы уже при небольших значениях амплитуды коэффициента связи. Важным обнаруженным эффектом здесь стал эффект подавления автомодуляции выходного сигнала гирос-ЛВВ и установление режимов стационарной генерации на выходе цепочки гирос-ЛВВ.

В параграфе 1.4.2 рассматривается нелинейная нестационарная динамика цепочки связанных гирос-ЛВВ при изменении параметров ведущей лампы. На рис. 1 показана карта режимов на плоскости управляющих параметров “параметр неизохронности μ_1 ведущего гиросгенератора со встречной волной – амплитуда коэффициента связи r ”, на которой выделены характерные области колебаний цепочки в целом. Ведомая лампа в этом случае находится в режиме стационарной генерации ($\mu_2 = 2$). Из карты режимов следует, что в цепочке гиросгенераторов в этом случае можно наблюдать различные режимы генерации: стационарную генерацию (область S на рис. 1), периодическую (область A) и хаотическую (область C) модуляцию выходного сигнала ведомого генератора цепочки.

В режиме стационарной генерации S колебания в ведомой лампе происходят на частоте внешнего воздействия. Область захвата частоты генерации ведомой лампы внешним сигналом (сигналом ведущей лампы), в то время как амплитуда демонстрирует различные типы как периодической, так и хаотической модуляции (режим квазисинхронизации колебаний ¹⁴) соответствует области, которая на карте режимов (рис. 1) ограничена пунктирной линией.

Важным выводом, который следует из проведенного анализа, является то, что в исследуемой цепочке возможны хаотические колебания при значениях

¹⁴Трубецков Д. И., Короновский А. А., Храмов А. Е. Синхронизация распределенных автоколебательных систем электронно-волновой природы с обратной волной. Изв.вузов. Радиофизика. 2004 Т.XLVII. С. 343

параметра неизохронности ведомой лампы $\mu_1 < 2$, когда в каждом из гиросгенераторов в автономных режимах наблюдается стационарная генерация. В свою очередь при больших μ_1 , когда выходной сигнал уже демонстрирует многочастотный спектр генерации, существует возможность подавить сложную динамику в цепочке gyro-ЛВВ и установить стационарную одночастотную генерацию. Более подробно этот эффект рассматривается в разделе 1.5 диссертации. Также в данном параграфе исследованы случаи, когда параметры ведомой лампы соответствуют режимам периодической и хаотической автомодуляции. Полученные результаты показали, что использование цепочки gyro-ЛВВ в этом случае позволяет значительно снизить порог возникновения хаотической генерации в системе.

В параграфе 1.4.3 обсуждаются физические процессы в неавтономной электронно-волновой системе. Показано, что установление хаотической генерации в цепочке связанных гиросгенераторов со встречной волной связано с эффектами перегруппировкой пучка и сложным поведением первой гармоники сгруппированного тока винтового потока вдоль длины пространства взаимодействия.

В разделе 1.5 исследуется возможность возникновения и подавления стационарной и хаотической генерации в гиросгенераторе со встречной волной под внешним периодическим воздействием. Фактически это означает, что исследуется влияние внешнего гармонического воздействия на различные автоколебательные режимы в ведомой активной среде.

При близости частоты внешнего воздействия к собственной частоте стационарной генерации автономной системы имеет место режим стационарной генерации. Отметим, что с ростом параметра неизохронности гиросламп до величины $\mu < 3$ область стационарной генерации расширяется. С увеличением параметра неизохронности гиросгенератора область стационарной генерации становится асимметричной, сдвигаясь в сторону меньших отстроек частот внешнего сигнала от частоты генерации автономного гиросгенератора со встречной волной.

Одновременно, при больших отстройках частоты гармонического сигнала от частоты лампы с увеличением параметра неизохронности μ ($\mu \geq 1.5$) в ведомом гиросгенераторе со встречной волной наблюдается возникновение ре-

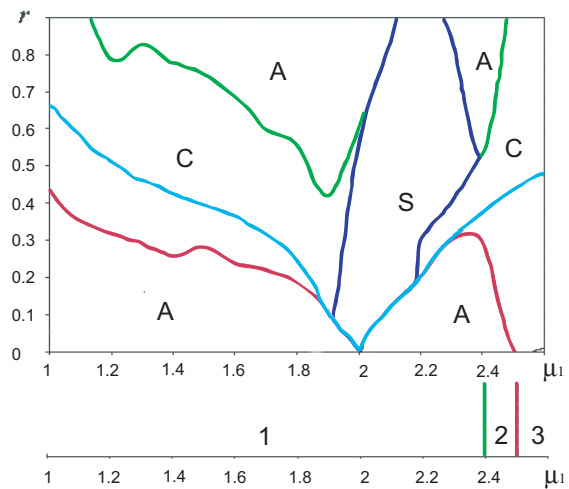


Рис. 1: Области реализации различных режимов колебаний в цепочке связанных gyro-ЛВВ на плоскости управляющих параметров “параметр неизохронности μ_1 ведущего гиросгенератора – амплитуда связи r ”. Символом “S” обозначена область стационарной генерации, “A” – автомодуляция, “C” – хаотическая генерация. Область захвата частоты генерации ведомой лампы (область квазисинхронизации) отмечена пунктирной линией

жимов хаотической генерации.

При дальнейшем увеличении параметра неизохронности гиrolампы $\mu \geq 4$ она переходит в автомодуляционный режим. В этом случае режим стационарной генерации возникает уже при конечных значениях амплитуды сигнала, воздействующего на ведомую гиrol-ЛВВ, причем чем больше параметр неизохронности ведомого гилогенератора, тем больше должна быть величина амплитуды внешнего сигнала. Область хаотических колебаний с ростом параметра неизохронности ведомого гилогенератора сдвигается в сторону меньших значений амплитуды сигнала, воздействующего на ведущую гиrolампу, и наблюдается уже несколько областей хаотической генерации, которые начинают сливаться между собой по мере роста параметра неизохронности.

Наконец, в разделе 1.6 рассматривается гилогенератор со встречной волной и внешней запаздывающей обратной связью. Показано, что при тех значениях фазовых коэффициентов обратной связи, когда одна из частот ω_s кольцевой резонансной системы, сформированной электродинамической системой гиrol-ЛВВ и цепью обратной связи, близка к частоте, соответствующей максимум активной мощности взаимодействия винтового пучка с обратной волной, наблюдается уменьшение пускового значения параметра неизохронности, т.е. самовозбуждение гиrol-ЛВВ облегчается. Изменение длительности задержки в цепи ОС не оказывает существенного влияния на вид зависимости порога самовозбуждения гиrol-ЛВВ от фазы коэффициента обратной связи, сдвигая ее на некоторую величину, определяемую запаздыванием. Если собственная частота ω_s лежит вблизи частоты генерации гиrol-ЛВВ, то порог самовозбуждения лампы снижается, но частоты автомодуляционных компонент с ростом μ возникают вдали от собственных частот резонатора, так что порог возникновения автомодуляции в свою очередь растет.

В заключительном разделе 1.7 полученные выше результаты сравниваются с результатами известных экспериментальных исследований неавтономной динамики гиrol-ЛВВ¹⁵, формулируются основные выводы по первой главе диссертационной работы.

Во **второй главе** диссертации исследуется влияние внешнего шумового воздействия на клистронный генератор хаоса, а также явление индуцированной шумом синхронизации в генераторах СВЧ диапазона. В разделе 2.1 обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, дается краткий обзор известного материала о влиянии внешних шумов на динамику приборов СВЧ электроники, формулируются основные цели исследования, проведенного во второй главе диссертации.

В разделе 2.2 приводится описание экспериментальной установки, где в качестве источника шума используется лампа бегущей волны, работающая в режиме без входного сигнала, а в качестве клистронного автогенератора – пятирезонаторный промышленный усилительный клистрон сантиметрового

¹⁵Kou C. S. et al Experimental study of an injection-locked gyrotron backward-wave oscillator. Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 924

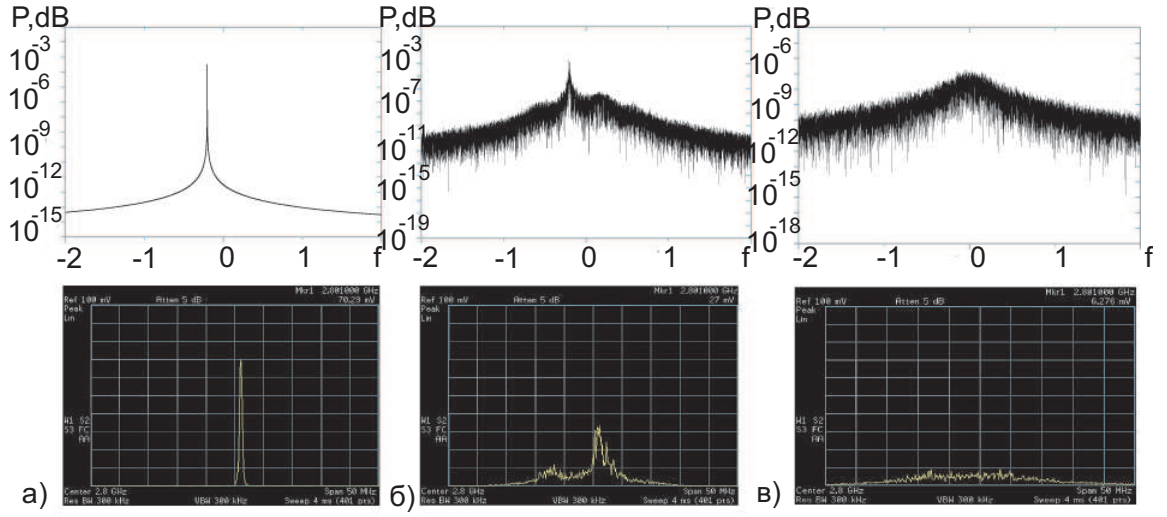


Рис. 2: Теоретические (сверху) и экспериментальные (снизу) спектры мощности генерации клистронного автогенератора в случае одночастотной автономной генерации для следующих интенсивностей внешнего шумового сигнала: (а) $P_n/P_{out} = 0$; (б) $P_n/P_{out} = 0.09$; (в) $P_n/P_{out} = 0.22$, где P_n и P_{out} – мощность шумового сигнала и автономного генератора, соответственно

диапазона длин волн с внешней запаздывающей обратной связью¹⁶. В разделе 2.3 формулируется математическая модель двухрезонаторного клистронного автогенератора с внешней обратной связью под действием шума, представляющая собой систему дифференциальных уравнений с запаздыванием¹⁷:

$$\frac{\partial F_1(\tau)}{\partial \tau} + \gamma F_1(\tau) = \gamma F_2(\tau - \Delta\tau) + \gamma \xi(\tau), \quad (4)$$

$$\frac{\partial F_2(\tau)}{\partial \tau} + \gamma F_2(\tau) = 2\alpha J_1(|F_1(\tau)|) F_1(\tau)/|F_1(\tau)|, \quad (5)$$

где $F_1(\tau)$ и $F_2(\tau)$ – медленно меняющиеся амплитуды колебаний напряжений на зазорах входного и выходного резонаторов соответственно, τ – безразмерное время, $\Delta\tau = 1$ – безразмерное время задержки в цепи обратной связи, $\gamma = 1$ – параметр затухания, α – параметр возбуждения резонатора, имеющий смысл произведения коэффициента усиления на глубину обратной связи и пропорциональный току электронного пучка. $\xi(\tau)$ представляет собой случайный дельта-коррелированный гауссовский шум с нулевым средним: $\langle \xi(\tau) \rangle = 0$, $\langle \xi(\tau)\xi(\tau') \rangle = D\delta(\tau - \tau')$, где D – интенсивность шума.

Результаты экспериментального исследования влияния шумов на динамику клистронного автогенератора приводятся в разделе 2.4, теоретического – в

¹⁶Экспериментальные результаты получены в рамках совместных исследований с научной группой д.ф.-м.н. проф. Ю.Д. Жаркова и д.ф.-м.н. проф. Б.С. Дмитриева.

¹⁷Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Рыскин Н. М., Шигаев А. М. Теоретическое и экспериментальное исследование хаотических колебаний клистронного генератора с запаздыванием. РиЭ. 46 (2001) 604

Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Кижяева К. К., Клокотов Д. В., Рыскин Н. М., Шигаев, А. М. Сложная динамика многорезонаторных клистронных автогенераторов с запаздывающей обратной связью. Изв.вузов. Прикладная нелинейная динамика. 10, 5 (2002) 37

разделе 2.5. На рис. 2 представлена эволюция спектра мощности генерации системы с увеличением мощности внешнего источника шума, полученная в ходе численного и экспериментального исследования. Показано, что в рассматриваемой системе при изменении основных управляющих параметров системы (интенсивность шумового воздействия, параметр возбуждения α) наблюдается подавление собственной динамики клистронного автогенератора. Построена граница подавления колебаний в клистронном генераторе при изменении интенсивности D внешнего шумового воздействия и безразмерного тока пучка α . Показано, что с ростом тока пучка при переходе в режим хаотической генерации необходимая для полного подавления хаотического сигнала мощность внешнего шума резко уменьшается. Сравнение результатов теоретического и экспериментального исследования показало, что они находятся в хорошем качественном и количественном соответствии.

В разделе 2.6 исследуются физические механизмы подавления генерации в клистронном генераторе хаоса под воздействием внешнего источника шума. Показано, что влияние шума приводит к сильной разгруппировке электронного пучка в пространстве дрейфа, что приводит к подавлению автоколебаний в системе. Также получено, что для значения параметра возбуждения резонатора $\alpha = 2.5$, который соответствует току пучка меньше пускового значения (но близкого к нему), воздействие шумового сигнала приводит к самовозбуждению автогенератора и соответственно снижению пускового тока генератора.

Наконец, в разделе 2.7 показана возможность наблюдения индуцированной шумом синхронизации¹⁸ в системе двух несвязанных идентичных клистронных генераторов, демонстрирующих хаотическую динамику и находящихся под одинаковым шумовым воздействием. Построена зависимость интенсивности шумового воздействия, требующаяся для установления режима индуцированной шумом синхронизации, от параметра α .

Третья глава диссертации посвящена исследованию влияния внешних шумов на динамику лампы обратной волны O-типа.

В разделе 3.1 приводится краткий обзор работ, посвященных исследованию влияния шумов на различные системы. Обсуждаются различные анализируемые в главе модели лампы обратной волны O-типа.

В разделе 3.2 исследуется влияние шумов на клистронную модель лампы обратной волны O-типа. В параграфе 3.2.1 рассматриваются математическая и численная модели исследуемой системы, проводятся тестовые расчеты. В параграфе 3.2.2 с помощью клистронной модели ЛОВ O-типа показано, что в рассматриваемой системе с ростом интенсивности шума наблюдается усложнение собственной динамики, что сопровождается исчезновением ряда периодических режимов и возникновением хаотических колебаний под действием внешнего источника шума малой интенсивности.

Раздел 3.3 посвящен исследованию влияния шумов на динамику лампы об-

¹⁸Toral R., Mirasso C. R., Hernández-García E., Piro O. Analytical and numerical studies of noise-induced synchronization of chaotic systems. *Chaos*. 11 (2001) 665

ратной волны в рамках нестационарной нелинейной однопараметрической модели ЛОВ О-типа. Обсуждается способ интегрирования уравнений в частных производных модели ЛОВ с учетом шумового стохастического воздействия. Проведенные исследования показали, что с ростом интенсивности шумового воздействия окна периодичности, наблюдающиеся в динамике ЛОВО при увеличении длины системы становятся уже, и при довольно большом значении шума наблюдается их полное исчезновение. Результаты, полученные с помощью нестационарной самосогласованной модели находятся в хорошем соответствии с результатами, полученными в рамках анализа простейшей клистронной модели ЛОВО в виде точечного комплексного отображения.

В четвертой главе диссертационной работы проведены теоретические исследования цепочки и сети связанных низковольтных виркаторов, в которых нестационарный колеблющийся виртуальный катод формируется за счет сильного торможения пучка.

В разделе 4.1 рассматривается схема низковольтного виркатора, а также способ введения внешнего сигнала в систему за счет модуляции потока на входе в пространство взаимодействия с помощью отрезка спирали. В разделе 4.2 формулируется исследуемая нелинейная нестационарная математическая модель электронного потока с виртуальным катодом основанная на методе частиц в ячейке. Динамика потока полагается одномерной, для нахождения самосогласованного поля пространственного заряда рассчитывается уравнения Пуассона. Обсуждается вопрос моделирования вывода ВЧ мощности из низковольтного виркатора с помощью метода эквивалентных схем.

Раздел 4.3 посвящен исследованию нелинейной динамики и синхронизации в цепочке однонаправленно связанных низковольтных виркаторов. Показано, что воздействие внешнего сигнала на колебания электронного потока с виртуальным катодом в тормозящем поле приводит к снижению пускового тока и расширению области тормозящих потенциалов, при которых в системе наблюдаются колебания, то есть к расширению зоны генерации низковольтного виркатора на плоскости управляющих параметров “ток пучка — тормозящая разность потенциалов”.

С ростом интенсивности связи между генераторами цепочки в системе устанавливается режим синхронизации ВЧ колебаний. Для изучения явления синхронизации использовался подход, основанный на введении непрерывного множества фаз хаотического выходного сигнала каждого из генераторов с помощью непрерывного вейвлетного преобразования с комплексным базисом (материнским Морле вейвлетом)¹⁹.

В случае цепочки двух однонаправленно связанных низковольтных виркаторов синхронизация временных масштабов наблюдается вблизи двух характерных временных масштабов колебаний в цепочке связанных генераторов, соответствующих двум базовым частотам в спектре мощности генерации ав-

¹⁹Hramov A. E., Koronovskii A. A. An approach to chaotic synchronization. *Chaos*. 14 (2004) 603

Hramov A., Koronovskii A. Time scale synchronization of chaotic oscillators. *Physica D*. 206 (2005) 252

тономного низковольтного виркатора²⁰.

В разделе 4.4 исследуется возможность установления синхронизации временных масштабов в сети связанных низковольтных виркаторов. Были рассмотрены сети низковольтных виркаторов с различной топологией связей между ними. Связь между генераторами осуществляется путем подачи ВЧ сигналов, с выхода каждого из низковольтного виркатора сети, на вход широкополосного электродинамического элемента, осуществляющего предварительную модуляцию входящего электронного потока. Математически это выражается в записи граничных условий для ВЧ напряжения $U_{in n}(t)$ на левом конце входного отрезка спирали каждого из генераторов сети:

$$U_{in n}(x = 0, t) = \varepsilon \sum_{m=1}^N c_{nm} U_{out m}(x = l, t - \tau), \quad (6)$$

где n – номер текущего элемента сети, ε – коэффициент связи, определяющий уровень ВЧ мощности, ответвляемой в линию связи между генераторами, τ – запаздывание в цепи связи между генераторами, N – число элементов в цепи обратной связи, $U_{out m}(x = l, t)$ – ВЧ колебания, регистрируемые на выходе каждого из генераторов.

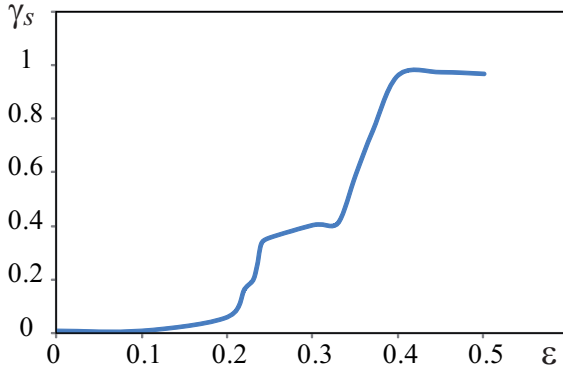


Рис. 3: Индекс синхронизации γ_s как функции коэффициента связи ε для сети из 10 низковольтных виркаторов

всей сети, который определяется следующим образом:

$$\gamma_s = \left| \frac{1}{T} \int_0^T \exp \left[j \frac{2}{N(N-1)} \sum_n^N \sum_{m(m>n)}^N \Delta\varphi_{s nm}(t) \right] dt \right|, \quad (7)$$

где $j = \sqrt{-1}$, T – временной интервал, по которому проводится усреднение фазы (обычно несколько тысяч характерных периодов ВЧ колебаний), $\Delta\varphi_{s nm}(t)$ – разности фаз между каждой парой (n, m) генераторов в сети, вводимая с помощью метода синхронизации временных масштабов. Индекс синхронизации (7) на выбранном временном масштабе s может меняться от 0

Коэффициенты c_{nm} матрицы связи определяют топологию связей между генераторами в сети и принимают только значения 1 или 0. Величина $c_{nm} = 1$ означает, что n -й генератор воздействует на m -й генератор, и, наоборот, $c_{nm} = 0$ означает, что n -й генератор не воздействует на m -й генератор.

Предложен метод анализа синхронного поведения в сети низковольтных виркаторов, демонстрирующих режимы хаотической генерации, основанный на расчете индекса синхронизации для

²⁰Егоров Е. Н., Калинин Ю. А., Короновский А. А., Левин Ю. И., Храмов А. Е. Исследование образования структур и хаотической динамики в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем поле. РиЭ. 51 (2006) 51

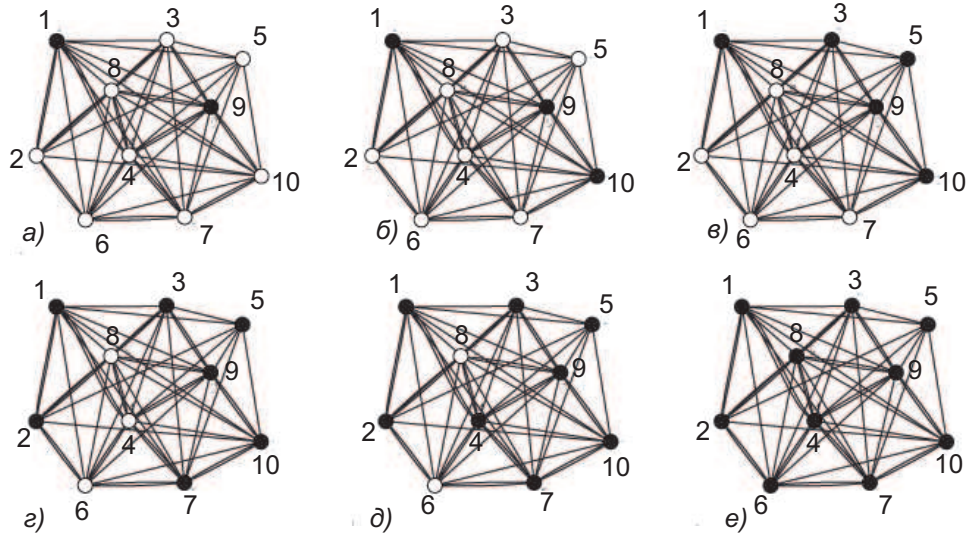


Рис. 4: Изменение синхронного кластера в сети из 10 низковольтных виркаторов. Белыми точками показаны несинхронные генераторы, черными точками — генераторы, вошедшие в режим синхронизации друг с другом. Хорошо видно, что с ростом коэффициента связи между генераторами число синхронизированных друг с другом генераторов растет: (а) $\varepsilon = 0.23$ (число синхронизированных генераторов $M = 2$), (б) 0.24 ($M = 3$), (в) 0.3 ($M = 5$), (г) 0.35 ($M = 7$), (д) 0.37 ($M = 8$), (е) 0.39 ($M = 10$)

до 1, где $\gamma_s = 0$ соответствует случаю временного масштаба, на котором динамика системы асинхронна (все разности фаз $\Delta\phi_{s,i,j}(t)$ являются равномерно распределенными на интервале $(0, 2\pi]$), $\gamma_s = 1$ — случай синхронизации всех элементов сети на выбранном временном масштабе, так как все разности фаз $\Delta\phi_{s,n,m}(t) \approx \text{const}$. Промежуточные значения индекса синхронизации $0 < \gamma_s < 1$ будут соответствовать режимам формирования синхронных кластеров в сети, когда только часть элементов сети M будет демонстрировать синхронную динамику. На рис. 3 показана динамика индекса синхронизации для сети со случайной матрицей связи, из которого следует, что в сети наблюдается постепенный переход от асинхронной динамики к синхронизации временных масштабов всех элементов сети.

Анализ динамики сетей различной топологии с ростом коэффициента связи показал, что переход к синхронизации всей сети осуществляется через формирование синхронного кластера (для всех M элементов синхронного кластера выполняется условие $\Delta\phi_{s,nm}(t) \approx \text{const}$, в то время как для остальных элементов сети $N - M$ синхронное состояние не наблюдается), состоящего из генераторов, находящихся в синхронизме друг с другом. С ростом коэффициента связи генераторы постепенно присоединяются к синхронному кластеру, и при больших коэффициентах связи все генераторы становятся синхронизованными друг с другом. Динамика установления режима синхронизации сети, для которой представлен индекс синхронизации на рис. 3), показана на рис. 4.

После перехода в режим синхронизации дальнейшее увеличение коэффициента связи в случае сети со случайной матрицей связи приводит к значительному усложнению спектра выходного излучения генераторов, составляющих

сеть, что определяется глубокой модуляцией электронного потока несколькими сигналами, подаваемых от различных генераторов сети. Данный режим работы сети низковольтных виркаторов с расстроенными значениями управляющих параметров может использоваться для создания мощных широкополосных шумоподобных колебаний со слабой изрезанностью спектра мощности.

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

1. В рамках нестационарной нелинейной теории изучена цепочка односторонне связанных гиросгенераторов со встречной волной. Показано, что при изменении параметров ведомой лампы при сравнительно малых токах ведущей и ведомой ламп цепочки возможны режимы развитой хаотической генерации. С увеличением тока пучка в рассматриваемой системе возможно подавление автомодуляции и установление режима стационарной генерации, что связано с возникновением в системе режимов синхронизации ВЧ-колебаний в цепочке.

2. Воздействие внешнего гармонического сигнала на автоколебания в гирос-ЛВВ, находящейся в режиме автомодуляции, позволяет подавить модуляцию выходного поля и установить режимы стационарной генерации на частоте внешнего воздействия. С точки зрения физических процессов в электронном пучке, взаимодействующем со встречной волной, воздействие внешнего гармонического сигнала на гирос-ЛВВ сводится к влиянию на внутреннюю распределенную обратную связь, имеющую место в системе с обратной волной.

3. Исследования гиросгенератора со встречной волной и внешней запаздывающей обратной связью показало, что при определенных фазах коэффициента обратной связи наблюдается уменьшение пускового значения параметра неизохронности, т.е. самовозбуждение гирос-ЛВВ облегчается, в то время как порог возникновения режимов автомодуляции выходного сигнала, наоборот, увеличивается.

4. Проведено исследование влияния внешнего источника шума на динамику клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью, находящегося в различных режимах генерации. Теоретически и экспериментально показано, что в рассматриваемой системе с ростом интенсивности шума наблюдается эффект подавления генерации. Анализ теоретической модели показал, что эффект подавления генерации объясняется разгруппировкой пучка под действием внешнего шумового сигнала, модулирующего поток во входном резонаторе, и уменьшением амплитуды первой гармоники сгруппированного тока в выходном резонаторе с увеличением мощности внешнего шумового воздействия.

5. Изучено воздействие одного и того же источника шума на два клистронных автогенератора, находящихся в режиме хаотической генерации, и показана возможность установления в системе микроволновых генераторов хаоса режима индуцированной шумом синхронизации.

6. Проведены теоретические исследования цепочки и сети связанных низко-

вольтных виркаторов. Численный анализ цепочки двух однонаправленно связанных генераторов показал, что воздействие внешнего сигнала на колебания электронного потока с виртуальным катодом в тормозящем поле (низковольтном виркаторе) приводит к снижению пускового тока и расширению области тормозящих потенциалов, при которых в системе наблюдаются колебания. С ростом интенсивности связи между генераторами цепочки в системе устанавливается режим хаотической синхронизации ВЧ колебаний, для исследования которого был применен метод синхронизации временных масштабов.

Рассмотрена динамика сетей низковольтных виркаторов с различной топологией связей между ними. Предложен метод анализа синхронного поведения в сети низковольтных виркаторов, демонстрирующих режимы хаотической генерации, основанный на расчете индекса синхронизации для всей сети, и проведены соответствующие расчеты индекса синхронизации для различных топологий связей между генераторами. Показано, что переход к полной синхронизации сети осуществляется через формирование синхронного кластера, состоящего из элементов, находящихся в синхронизме друг с другом. С ростом коэффициента связи генераторы постепенно присоединяются к синхронному кластеру, и при больших коэффициентах связи все генераторы становятся синхронизованными друг с другом. Дальнейшее увеличение коэффициента связи приводит к значительному усложнению спектра выходного излучения генераторов, составляющих сеть, что определяется глубокой модуляцией электронного потока несколькими сигналами, подаваемых от различных генераторов сети.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:²¹

1. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.), Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование возникновения автомодуляции в гирогенераторе со встречной волной и внешней обратной связью. // Письма в ЖТФ. 2006. Т.32. Вып. 12. С. 1-8.
2. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.), Короновский А.А., Храмов А.Е. Численное исследование нелинейных нестационарных процессов в цепочке связанных гирогенераторов со встречной волной. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т.16. №5. С. 115-126.
3. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.), Короновский А.А., Храмов А.Е. Нелинейные нестационарные процессы в цепочке связанных гирогенераторов со встречной волной. // ЖТФ. 2009. Т.79. №6. С.13-20.
4. Короновский А.А., Ханенко М.В., Храмов А.Е. Возникновение и подавление стационарной и хаотической генерации в неавтономном гирогенераторе со встречной волной. // Радиотехника и электроника. 2010. Т.55. №5. С. 1-7.
5. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.) Численное исследование нестационарных процессов в цепочке связанных гирогенераторов со встречной волной. Материалы VIII международной школы “Хаотические Автоколебания и Образования Структур”, 9-14 октября 2007 г., город Саратов.
6. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.) Исследование возникновения автомодуляции в гирогенераторе со встречной волной и запаздывающей обратной связью. Материалы

²¹ До середины 2009 года автор публиковался под фамилией Белоглазкина М.В.

- VIII международной школы “Хаотические Автоколебания и Образования Структур”, 9-14 октября 2007 г., город Саратов.
7. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.) Нелинейная динамика цепочки связанных гирогенераторов со встречной волной. Труды XI школы-семинара “Волновые явления в неоднородных средах”. Звенигород, Московская область, 26-31 мая 2008 г.
 8. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.), Короновский А.А., Храмов А.Е. Нелинейные нестационарные процессы в цепочке связанных гирогенераторов со встречной волной. Материалы 18 Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” 8-12 сентября 2008 г., Севастополь, Украина.
 9. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.), Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Короновский А.А., Храмов А.Е. Теоретическое и экспериментальное исследование влияния шумов на динамику клистронного автогенератора. Материалы 18 Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” 8-12 сентября 2008 г., Севастополь, Украина.
 10. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.) Нелинейная динамика гиролампы со встречной волной и запаздывающей обратной связью. Нелинейные дни в Саратове для молодых - 2007. Материалы научной школы-конференции. Саратов, 16-20 октября, 2007.
 11. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.) Численное исследование нелинейной динамики цепочки связанных гирогенераторов со встречной волной. Нелинейные дни в Саратове для молодых - 2007. Материалы научной школы-конференции. Саратов, 16-20 октября, 2007.
 12. Белоглазкина М.В. (Ханенко М.В.), Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Короновский А.А., Скороходов В.Н., Храмов А.Е. Исследование влияния шумов на динамику клистронного автогенератора. Материалы XIV Зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике. Саратов, 3-8 февраля, 2009.
 13. Короновский А.А., Ханенко М.В., Храмов А.Е. Исследование влияния внешних шумов на динамику лампы обратной волны. Материалы Всероссийской научной школы для молодежи “Нелинейные феномены, хаос, критические явления и методы их исследования с помощью вейвлетного, кластерного и спектрального анализа”. Саратов, 6-12 октября, 2009.
 14. Короновский А.А., Ханенко М.В., Храмов А.Е. Инициация и подавление хаотической генерации в цепочке связанных гирогенераторов со встречной волной и внешним гармоническим сигналом. Материалы 19 Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” 14-18 сентября 2009 г., Севастополь, Украина.
 15. Короновский А.А., Ханенко М.В., Храмов А.Е. Теоретическое и численное исследование влияния внешних шумов на динамику лампы обратной волны. Материалы 19 Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” 14-18 сентября 2009 г., Севастополь, Украина.
 16. Ханенко М.В. Численное исследование динамики клистронного автогенератора под действием внешнего шумового сигнала. Материалы международной школы-семинара “Статистическая физика и информационные технологии”. Саратов. 2-5 июня, 2009.