

На правах рукописи



ХАВРОШИН Олег Сергеевич

**ПОДАВЛЕНИЕ АВТОМОДУЛЯЦИОННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ ХАОСОМ**

Специальность 01.04.03–Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Саратов – 2009

Диссертация выполнена на кафедре нелинейной физики Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского

Научный руководитель: доктор физико–математических наук,
профессор Рыскин Никита Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук,
доцент Селезнев Евгений Петрович

кандидат физико–математических наук
Голдобин Денис Сергеевич

Ведущая организация: Саратовский государственный
технический университет

Защита состоится 17 декабря 2009 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан «10» ноября 2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Аникин В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В последние годы большое внимание исследователей привлекает проблема управления хаосом. Впервые этот термин был введен в работе E. Ott, C. Grebogi, J. Yorke (1990), где был предложен метод стабилизации неустойчивых периодических орбит системы с хаотической динамикой путем малых контролируемых воздействий, что позволяет реализовать устойчивое периодическое поведение в той области параметров, где в отсутствие управления динамика является хаотической. В настоящее время управление хаосом превратилось в активно развивающееся направление нелинейной динамики, и этой проблеме посвящено множество работ (см., например, монографию¹). Среди многочисленных методов управления хаосом наибольшую популярность приобрел так называемый метод автосинхронизации запаздывающей обратной связью (K. Pyragas, 1992). Суть этого метода состоит во введении дополнительной обратной связи (ОС) с временем задержки, примерно равным периоду движения, которое желательно стабилизировать. Основным достоинством метода Пирагаса является его конструктивная простота. Работоспособность этого метода была подтверждена многочисленными экспериментами. В частности, в литературе описывается его применение в лазерах, газоразрядных трубках, при стабилизации турбулентности в течении Тейлора–Куэтта, в электрохимических реакциях, для управления ферромагнитным резонансом, а также в биологических системах, например, для подавления сердечной аритмии. Однако метод Пирагаса не лишен ряда недостатков, основным из которых является низкая эффективность в случае стабилизации движения с достаточно малым периодом. В дальнейшем этот метод изучался и совершенствовался во многих работах.²

Следует отметить, что сравнительно мало изучено управление хаосом в распределенных автоколебательных системах (обзор некоторых исследований можно найти в книге Д.И. Трубецкого и А.Е. Храмова³). В частности, практически не охваченными являются системы с запаздывающей обратной связью, которые играют важную роль в самых разных областях физики, таких как радиофизика и электроника, нелинейная оптика, физика и техника ускорителей, физика атмосферы, а также в моделях биологии, медицины, экономики, экологии и социальных наук. Хорошо известно, что подобные системы способны демонстрировать сложное, в том числе, хаотическое поведение⁴. Хотя задача управления хаосом в системах с запаз-

¹ Kapitaniak T. Controlling chaos: Theoretical and practical methods in non-linear dynamics. London: Academic Press, 1996. 196 p.

² Just W., Benner H., Schoell E. Control of chaos by time-delayed feedback: A survey of theoretical and experimental aspects // In: B. Kramer (Ed.), Advances in Solid State Physics. Vol. 43, Springer, Berlin, 2003. P. 589.

³ Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т.2. М.: Наука. Физматлит, 2004, 648 с.

⁴ Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987. 424 с.

диванием рассматривалась ранее^{5,6,7}, следует отметить, что эти работы носят в основном математический характер. Они игнорируют специфические особенности сложной динамики систем с запаздыванием, а возможность практического применения предложенных в них методов для управления хаосом в реальных радиофизических системах вызывает вопросы. Кроме того, отметим, что основное внимание уделялось вопросам стабилизации неустойчивых неподвижных точек. Эта задача важна для ряда приложений, в частности, для обработки информации с помощью нейронных сетей, однако для радиофизики представляет существенно меньший интерес, чем задача о стабилизации высокочастотных периодических колебаний.

Среди автоколебательных систем с запаздыванием особую роль играют приборы вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники, в частности, генераторы на основе таких широко распространенных приборов, как пролетные клистроны и лампы бегущей волны (ЛБВ). Для таких систем весьма актуальной является проблема подавления разного рода паразитных колебаний. Хотя исследования в этом направлении ведутся уже много лет, использование для этой цели методов управления хаосом в них практически не рассматривалось. Можно упомянуть лишь работу А.М. Долова и С.П. Кузнецова, где был предложен способ подавления автомодуляции в лампе обратной волны.⁸ Метод основан на модуляции тока электронного пучка протектированным выходным сигналом, поступающим на модулирующий электрод по цепи внешней обратной связи со специально подобранным временем запаздывания. В отличие от метода Пирагаса, время задержки в данном случае определяется не периодом неустойчивого движения, а периодом автомодуляции, который существенно больше. Это облегчает стабилизацию СВЧ колебаний.

В целом вопросы управления хаосом в радиофизических системах с запаздыванием, в особенности — в приборах микроволновой электроники, изучены сравнительно мало. Представляется весьма актуальным предложить методы управления хаосом в подобных системах, что позволило бы решить практически важную задачу подавления различных паразитных неустойчивостей, приводящих к возникновению автомодуляции, т.е. многочастотных или хаотических режимов генерации. За счет этого можно было бы расширить диапазон параметров, в котором генерируются устойчивые режимы одночастотных колебаний, а также повысить выходную мощность и КПД генерации в одночастотном режиме.

Целью диссертационной работы является разработка эффективного способа подавления автомодуляции в радиофизических распределенных автоколебательных системах с запаздывающей ОС на основе методики

⁵ Bunner M.J. // Chaos. 1999. Vol. 9, No. 1. P. 233.

⁶ Guan X., Chen C., Peng H., Fan Z. // Int. J. Bifurcation and Chaos. 2003. Vol. 13, No. 1. P. 193.

⁷ Guan X., Feng G., Chen C., Chen G. // Physica D. 2007. Vol. 227. P. 36.

⁸ Долов А.М., Кузнецов С.П. // ЖТФ. 2003. Т.73. № 8. С. 139.

управления хаосом, позволяющего расширить диапазон устойчивости одночастотных режимов и повысить выходную мощность генерации.

Объект, предмет и методы исследования. Объектом исследования являются радиофизические распределенные системы с запаздывающей обратной связью. Конкретно рассматриваются кольцевая автоколебательная система типа «усилитель–фильтр–линия задержки» с кубической нелинейностью, модели автогенераторов СВЧ диапазона на основе двухрезонаторного клистрона и ЛБВ, а также кольцевой оптический резонатор, содержащий среду с кубической фазовой нелинейностью (система Икеды). Данные системы исследуются аналитическими и численными методами. Разработаны упрощенные модели в виде точечных отображений, для которых получены аналитические формулы, определяющие границы устойчивости стационарных режимов колебаний. Более сложные модели, описываемые дифференциальными уравнениями с запаздыванием или уравнениями в частных производных с граничными условиями, содержащими запаздывание, исследуются путем компьютерного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Включение в автоколебательную систему с запаздыванием дополнительной цепи обратной связи (ОС), параметры которой подбираются таким образом, что после прохождения двух ветвей цепи ОС компоненты сигналов на основной частоте имеют одинаковую фазу, а компоненты сигналов на паразитных частотах — противоположную, позволяет подавить режимы автомодуляции, включая хаотические со сплошным спектром, и стабилизировать одночастотные колебания в широком диапазоне управляющих параметров.
2. Применение разработанной методики управления хаосом посредством дополнительной обратной связи является наиболее эффективным в случае, когда параметр γ , имеющий смысл произведения времени запаздывания на ширину полосы пропускания системы, достаточно велик ($\gamma \geq 3$). При этом наибольшее повышение порога автомодуляции наблюдается, когда параметр k , определяющий отношение амплитуд сигналов в управляющей и основной цепях ОС принимает значения $k \sim 0.3 \div 0.4$.
3. В клистроне-генераторе введение дополнительной цепи запаздывающей ОС позволяет в 1.8–2 раза повысить ток пучка, при котором возникает автомодуляция, при неизменной глубине ОС. При этом в центре зоны генерации максимально достижимая выходная мощность увеличивается более чем в 1.5 раза, а КПД снижается в 1.25 раза по сравнению с генератором с одной цепью ОС. При отстройке фазы управляющей ОС примерно на π от значения, соответствующего центру зоны генерации, мощность увеличивается более чем в 3 раза.

4. В генераторе на основе лампы бегущей волны введение дополнительной цепи запаздывающей ОС позволяет повысить ток пучка, при котором возникает автомодуляция, примерно в два раза при неизменной глубине ОС. При стабилизации режима генерации основной собственной моды максимально достижимая выходная мощность увеличивается в 1.88 раза, а КПД снижается в 1.25 раза по сравнению с генератором с одной цепью ОС. При стабилизации режимов генерации собственных мод с более высокими частотами выходная мощность может быть увеличена в 3.8 раза, а КПД — в 1.64 раза.

Научная новизна. В диссертации предложен новый метод подавления неустойчивостей в распределенных автоколебательных системах с запаздыванием, основанный на введении дополнительной цепи запаздывающей обратной связи. Метод существенно отличается от известных конструктивной простотой и применимостью для широкого класса систем различных диапазонов длин волн, включая микроволновый и оптический. Впервые изучено применение разработанного метода для подавления автомодуляции, включая хаотические режимы со сплошным спектром, в различных радиофизических системах с запаздыванием: генератор с кубической нелинейностью, генераторы на основе двухрезонаторного пролетного клистрона и лампы бегущей волны, кольцевой оптический резонатор, содержащий среду с кубической фазовой нелинейностью. Выявлены оптимальные параметры, при которых применение метода обеспечивает наибольшее увеличение выходной мощности и, в ряде случаев, КПД в режиме одночастотной генерации по сравнению с традиционными конструкциями, содержащими единственную цепь обратной связи.

Практическая значимость. В диссертации рассматриваются автоколебательные системы с запаздыванием, которые находят широкое практическое применение, в частности, для генерации электромагнитных колебаний различных диапазонов длин волн. Развитие разного рода неустойчивостей в таких системах приводит к возникновению автомодуляции, что ограничивает мощность генерации. Предложенный в диссертации метод подавления автомодуляции позволяет улучшить ряд важных для практики характеристик: значительно (в 2–3 раза) увеличить диапазон управляющих параметров, в котором реализуются устойчивые режимы одночастотной генерации, существенно повысить выходную мощность и, в ряде случаев, КПД генерации. Интерес для ряда приложений представляет обнаруженная возможность переключения между режимами генерации различных собственных мод при варьировании фазы управляющей ОС. Также показана возможность использования дополнительной внешней ОС для подавления пульсаций частотной зависимости коэффициента усиления ЛБВ–усилителя, возникающих за счет отражений.

Результаты диссертации использовались в Саратовском госуниверситете при выполнении НИР, поддержанных грантами РФФИ (№№ 05-02-

16931, 06-02-16773, 09-02-00707) и аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (№ 2.1.1/1738).

Результаты диссертации также используются в учебном процессе на Факультете нелинейных процессов СГУ при чтении лекционного курса «Современные проблемы физики открытых нелинейных систем».

Личный вклад соискателя. Все основные результаты, включенные в диссертацию, получены лично соискателем. Соискателем написаны все программы компьютерного моделирования, проведены численные эксперименты, выполнен теоретический анализ упрощенных моделей. Обсуждение и интерпретация результатов осуществлялись совместно с научным руководителем.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя методов численного моделирования, соответствием результатов теоретического анализа и численного моделирования, совпадением результатов, полученных с помощью различных численных методов, воспроизведением в качестве тестовых расчетов достоверных общепризнанных результатов, известных из литературы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, двух приложений и списка литературы. Работа содержит 141 страницу текста, включая 48 рисунков и графиков, 2 таблицы и список литературы из 122 наименований.

Апробация и публикации. Результаты диссертации неоднократно докладывались на ежегодных школах-конференциях «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (2006–2008), I-IV конференциях молодых ученых «Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2006–2009), 13-й Международной школе-конференции «Foundations & Advances in Nonlinear Science» (Минск, Беларусь, 2006), Международных школах для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике Saratov Fall Meeting (Саратов, 2006–2008), XIII и XIV Зимних школах-семинарах по электронике СВЧ и радиофизике (Саратов, 2006, 2009), VII Международной школе «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2007), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов, 2008), Международной школе-семинаре «Статистическая физика и информационные технологии» StatInfo-2009 (Саратов, 2009). Результаты также обсуждались на объединенных научных семинарах кафедры нелинейной физики и кафедры электроники, колебаний и волн СГУ и на научном семинаре Саратовского филиала ИРЭ РАН. По материалам диссертации опубликовано 18 работ, включая 5 статей в журналах, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть

опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора и кандидата наук, 4 статьи в других изданиях, 9 тезисов докладов. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны ее цели, научная новизна, практическая значимость и сформулированы положения, выносимые на защиту.

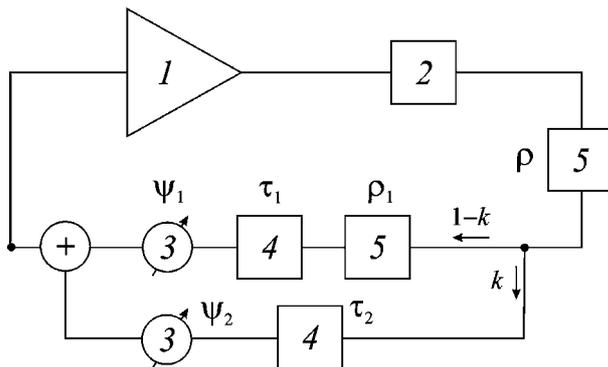


Рис. 1. Схема кольцевого автогенератора с запаздыванием с двумя цепями обратной связи. 1 — усилитель, 2 — фильтр, 3 — фазовращатели, 4 — линии задержки, 5 — аттенюаторы.

В **первой главе** предлагается метод управления хаосом при помощи дополнительной ОС и демонстрируется его применение для подавления автомодуляции на примере обобщенной модели кольцевого автогенератора «усилитель–фильтр–линия задержки» с кубичной нелинейностью. В п. 1.1 рассматривается модель автогенератора, приводятся известные из литературы основные результаты анализа условий самовозбуждения и возникновения автомодуляции.

В п. 1.2 описывается метод управления хаосом, основанный на введении дополнительной цепи ОС.

Схема генератора приведена на рис. 1. Генератор состоит из усилителя 1, фильтра 2 и двух цепей ОС, содержащих фазовращатели 3 и линии задержки 4, которые позволяют регулировать фазы сигналов $\psi_{1,2}$ и времена задержки $\tau_{1,2}$, соответственно. Кроме того, одна из цепей ОС содержит регулируемый аттенюатор 5, контролирующий относительный уровень мощности сигналов. Данная система описывается уравнением

$$\frac{dA}{dt} + \gamma A = \alpha \left[(1-k) (1 - |A_{\tau_1}|^2) A_{\tau_1} \exp(i\psi_1) + k (1 - |A_{\tau_2}|^2) A_{\tau_2} \exp(i\psi_2) \right], \quad (1)$$

где A — комплексная амплитуда сигнала, $A_{\tau_{1,2}} = A(t - \tau_{1,2})$, α — параметр возбуждения, имеющий смысл произведения коэффициента усиления на глубину ОС, γ — параметр диссипации, обратно пропорциональный добротности фильтра, параметр k характеризует долю мощности сигнала, отводимую во вторую цепь ОС.

При $k = 0$, т.е., когда управляющая цепь ОС отсутствует, динамика данной системы подробно изучена (Н.М. Рыскин, А.М. Шигаев, 2002). Возникновение автомодуляции в подобных системах обусловлено наличи-

ем достаточно крутого падающего участка на амплитудной характеристике усилителя (амплитудный механизм автомодуляции).

Основная идея предлагаемого метода состоит в подборе параметров $\tau_{1,2}$ и $\psi_{1,2}$ таким образом, чтобы компоненты сигналов на основной частоте после прохождения двух ветвей цепи ОС поступали бы на вход усилителя в фазе, а компоненты сигналов на автомодуляционных частотах — в противофазе и, таким образом, подавляли бы друг друга. Рассмотрение прохождения через цепь ОС модулированного сигнала, в спектре которого присутствуют основная частота ω и паразитные частоты $\omega \pm \Omega$ показывает, что если выбирать параметры ОС в соответствии с соотношениями

$$\psi_1 - \psi_2 - \omega(\tau_1 - \tau_2) = 2\pi n, \quad (2)$$

$$\Omega(\tau_1 - \tau_2) = 2\pi m + \pi, \quad (3)$$

сигналы на частотах $\omega \pm \Omega$, проходящие через различные ветви цепи ОС, оказываются в противоположных фазах и ослабляются. В то же время, параметры генерируемого сигнала на основной частоте будут точно такими же, как в генераторе с одной цепью ОС, т.е. управление является невозмущающим.

В п. 1.3 развита упрощенная модель генератора в виде четырехмерного точечного отображения

$$A_n = \frac{\alpha}{\gamma} \left[(1-k) \left(1 - |A_{n-1}|^2 \right) A_{n-1} \exp(i\psi_1) + k \left(1 - |A_{n-2}|^2 \right) A_{n-2} \exp(i\psi_2) \right], \quad (4)$$

справедливая в пределе $\gamma \gg 1$, т.е. когда в полосу пропускания системы попадает большое число собственных мод генератора. Для нее получены аналитические выражения для границ области одночастотной генерации и показано, что максимальное повышение порога автомодуляции достигается при $k = 1/3$. При этом мощность генерации может быть повышена в 1.33 раза по сравнению с системой с одной цепью ОС.

В п. 1.4 анализируется более строгая модель генератора, описываемая дифференциальным уравнением с запаздыванием (1). Представлены результаты численного моделирования, которые показывают, что имеется возможность подавления автомодуляционных режимов, включая хаотические, в широком диапазоне параметров. Обнаружено, что применение метода наиболее эффективно в случае $\gamma \gg 1$, т.е. как раз в той области параметров, где справедливо описание на основе точечного отображения (4). Аналитические результаты для отображения хорошо согласуются с численными уже начиная с $\gamma = 3$. На рис. 2 приведены зависимости порога автомодуляции от параметра k при различных значениях γ (кривые 1–3) и соответствующая зависимость для отображения (кривая 4). Также исследована чувствительность метода к расстройке параметров управляющей

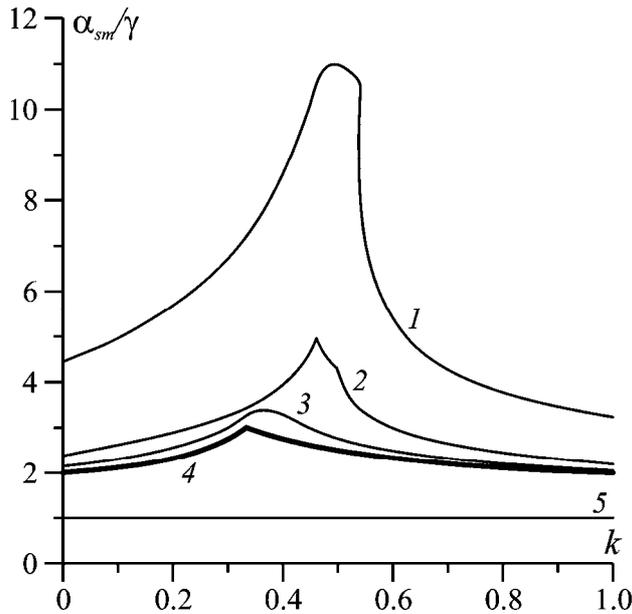


Рис. 2. Зависимости порога автомодуляции от параметра k для уравнения с запаздыванием (1), построенные при $\tau_1 = 1.0$, $\psi_1 = 0$ и различных значениях γ : 0.3 (1), 1.5 (2), 3.0 (3). Линией (4) показана граница устойчивости для отображения (4). Линия (5) соответствует порогу самовозбуждения.

другой моды, т.е. осуществить управляемую мультистабильность. В п. 1.6. проводится сравнение предлагаемого метода с другими методами управления хаосом в системах с запаздыванием, подтверждающее оригинальность метода и наличие ряда преимуществ перед известными ранее.

Вторая глава посвящена изучению подавления автомодуляции в автогенераторе СВЧ диапазона на основе двухрезонаторного пролетного клистрона с помощью метода, предложенного в гл. 1. Ранее была подробно изучена сложная динамика клистрона с запаздывающей ОС (Н.М. Рыскин, А.М. Шигаев, 2001–2006) на основе математической модели генератора в виде системы уравнений с запаздыванием. В п. 2.1 получено обобщение этой модели на случай генератора с двумя цепями ОС:

$$\frac{dF_1}{dt} + \gamma F_1 = \gamma \left[(1-k) F_2(\tau-1) \exp(-i\psi_1) + k F_2(\tau-\Delta\tau) \exp(-i\psi_2) \right], \quad (5)$$

$$\frac{dF_2}{dt} + \gamma F_2 = -2i\alpha J_1(|F_1|) \frac{F_1}{|F_1|}. \quad (6)$$

Здесь $F_{1,2}$ — безразмерные комплексные амплитуды колебаний в первом и втором резонаторах соответственно, J_1 — функция Бесселя первого рода,

ОС. Показано, что предложенный метод управления хаосом является достаточно «грубым»: при отстройке фазы ψ_2 и времени задержки τ_2 от оптимальных значений в пределах нескольких процентов порог автомодуляции снижается не более чем на 10%.

В п. 1.5 рассматривается возможность подавления режимов гиперхаоса, возникающих в окрестности границ зон генерации, где происходит слияние аттракторов, сформировавшихся на базе двух различных собственных мод (Кац В.А., Кузнецов С.П., 1987; Рыскин Н.М., Шигаев А.М., 2002). Показано, что подбором параметров управляющей цепи ОС, можно стабилизировать периодические колебания на базе как одной, так и

управляющие параметры α , γ , $\psi_{1,2}$ и k имеют тот же смысл, что и в модели генератора с кубической нелинейностью.

По аналогии с гл. 1, в п. 2.2 анализируется упрощенная модель на основе точечного отображения

$$F_{n+1} = -\frac{2i\alpha}{\gamma} \left[(1-k) J_1(|F_n|) \frac{F_n}{|F_n|} \exp(-i\psi_1) + k J_1(|F_{n-1}|) \frac{F_{n-1}}{|F_{n-1}|} \exp(-i\psi_2) \right]. \quad (7)$$

В целом, динамика данной системы аналогична динамике модели с кубической нелинейностью (4). Максимальный порог автомодуляции наблюдается при $k = 1/3$. Однако необходимо отметить, что параметр α можно изменять, варьируя как ток пучка, так и глубину ОС. Если считать, что глубина ОС остается неизменной, то ток пучка увеличивается примерно в 1.8 раза, а выходная мощность — примерно в 1.5 раза. При этом происходит незначительное снижение КПД. Если же увеличивается глубина ОС при постоянном токе пучка, эффект увеличения мощности отсутствует.

В п. 2.3 приводятся результаты численного моделирования для системы дифференциальных уравнений с запаздыванием (5), (6). Как и для системы с кубической нелинейностью, наиболее эффективно метод работает при больших значениях γ . В центре зоны генерации ($\psi_{1,2} = -\pi/2$) результаты хорошо согласуются с моделью в виде точечного отображения. Далее анализируется поведение системы при отстройке от центра зоны генерации. Обнаружено, что при этом амплитуда сигнала во входном резонаторе падает, а в выходном — растет (рис. 3). Физически такое поведение объясняется тем, что при больших α электронный пучок сильно перегруппирован, и при уменьшении входного сигнала амплитуда гармоники тока, возбуждающей выходной резонатор, увеличивается. В результате, при значении фазы $\psi_2 = \pi/2$ можно еще больше увеличить выходную мощность (примерно в три раза при $\gamma = 10.0$).

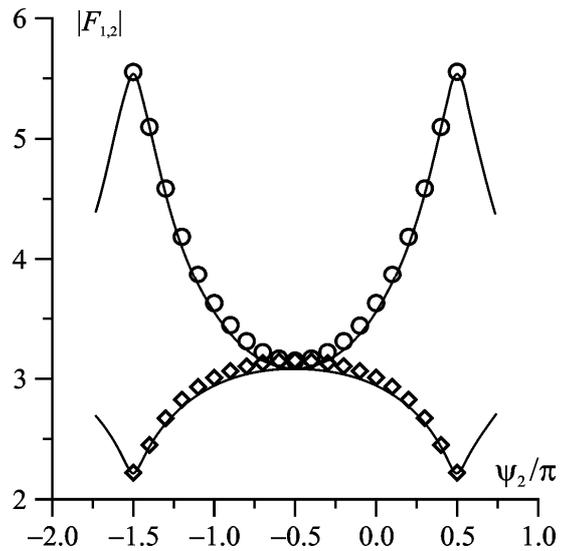


Рис. 3. Зависимости амплитуды колебаний во входном (\diamond) и выходном (\circ) резонаторах от фазы управляющей ОС ψ_2 при $\gamma = 1.0$, $\alpha = 5.0$, $k = 0.33$, $\Delta\tau = 3.41$, $\psi_2 = -\pi/2$.

В третьей главе применение метода демонстрируется для генератора на основе лампы бегущей волны. В п. 3.1 приводятся известные из литературы уравнения нестационарной нелинейной теории ЛБВ

$$F_\tau + F_\xi = -LI, \quad (8)$$

$$\theta_{\xi\xi} = -L^2 \operatorname{Re}[F \exp(i\theta)]. \quad (9)$$

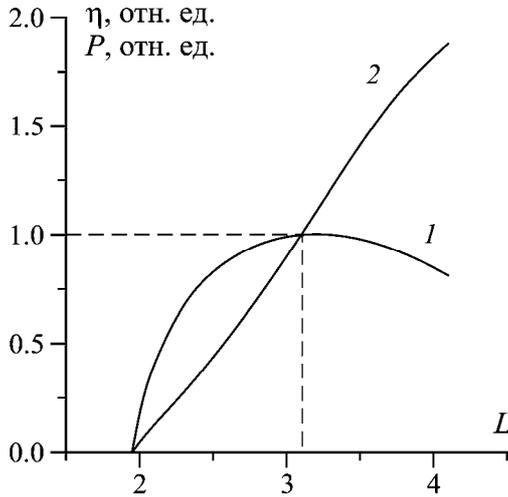


Рис. 4. Зависимости КПД (кривая 1) и выходной мощности (кривая 2) в относительных единицах от параметра L . Порог автомодуляции в системе с одной цепью ОС $L = 3.1$.

Здесь F — нормированная амплитуда электромагнитной волны, синхронной с пучком, I — комплексная амплитуда первой гармоники сгруппированного тока, θ — фаза электрона в поле волны, L — нормированная длина области взаимодействия, ξ и τ — безразмерные координата и время. Нижними индексами обозначаются соответствующие частные производные. Таким образом, в данном случае метод подавления автомодуляции применяется к пространственно распределенной системе, которая описывается

уравнениями в частных производных. Граничное условие для поля, адаптированное на случай генератора с двумя цепями ОС, имеет вид

$$F(\xi = 0; \tau) = \rho \left[(1 - k) e^{i\nu_1} F(\xi = 1; \tau - \tau_1) + k e^{i\nu_2} F(\xi = 1; \tau - \tau_2) \right]. \quad (10)$$

Параметры ρ , k , $\tau_{1,2}$, $\psi_{1,2}$ имеют тот же смысл, что и выше.

В отличие от систем с амплитудным механизмом автомодуляции, рассмотренных в гл. 1,2, в ЛБВ-генераторе автомодуляция возникает по частотному механизму, и ее появление обусловлено наличием вогнутого участка на амплитудно-частотной характеристике усилителя (Ю.П. Блюх и др., 1993). Важно, что возникновение автомодуляции происходит жестко. Тем не менее, предложенный метод хорошо работает и в этом случае. Результаты численного моделирования, приведенные в п. 3.2, показали возможность повышения тока пучка, при котором возникает автомодуляция, примерно в два раза по сравнению с системой с одной цепью ОС. Вначале рассматривается случай, когда параметры подобраны таким образом, что стабилизируется основная собственная мода. При этом выходная мощность увеличивается в 1.88 раза, а КПД снижается и составляет примерно 0.81 от максимального значения, которое в отсутствие управления достигается вблизи порога автомодуляции (см. рис. 4). Еще большего увеличе-

ния мощности можно добиться, если выбрать параметры управляющей ОС таким образом, чтобы стабилизировать колебания на одной из более высокочастотных мод, которые более эффективно взаимодействуют с пучком за счет эффекта нелинейного торможения. Этот процесс иллюстрирует рис. 5, где показан пример установления стационарных колебаний при стабилизации высшей моды. Видно, что вначале практически устанавливаются колебания на основной моде, однако затем после длительного переходного процесса происходит установление высшей моды, амплитуда которой значительно больше, чем у основной. Расчеты показывают, что при этом удастся повысить мощность в 3.8 раза, а КПД — в 1.64 раза.

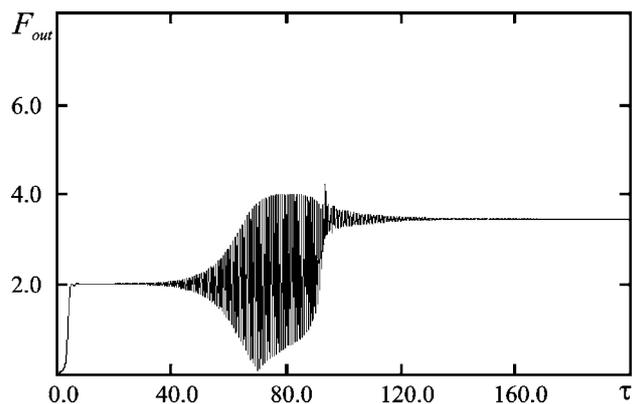


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала ЛБВ-генератора от времени при установлении колебаний в процессе стабилизации высшей собственной моды.

Как известно, отражения от границ замедляющей системы формируют паразитную ОС, что может привести к сильной изрезанности частотной зависимости коэффициента усиления ЛБВ и даже к самовозбуждению усилителя. Если при этом пренебречь взаимодействием с несинхронной попутной волной, система описывается теми же уравнениями, что и в случае внешней ОС, с временем запаздывания, которое зависит от разности между скоростью пучка и групповой скоростью волны. В п. 3.3 показано, что введение дополнительной внешней ОС с таким же временем задержки позволяет сгладить пульсации коэффициента усиления и предотвратить самовозбуждение. При этом необходимо, чтобы глубина внешней ОС равнялась модулю коэффициента отражения, а фаза отличалась на π .

Четвертая глава посвящена анализу подавления автомодуляции в кольцевом нелинейном резонаторе, содержащем среду с кубичной фазовой нелинейностью. Данная система играет большую роль в нелинейной оптике (К. Ikeda, 1979). В п. 4.1 сформулирована модель системы, которая описывается нелинейным уравнением Шредингера (НУШ)

$$i(A_t + VA_x) + \omega_0'' A_{xx}/2 + \beta|A|^2 A = 0 \quad (11)$$

с запаздывающим граничным условием

$$A(0, t) = A_{in} e^{i\omega t} + \rho \left[(1-k) e^{i\nu_1} A(l, t - \Delta t_1) + k e^{i\nu_2} A(l, t - \Delta t_2) \right]. \quad (12)$$

В уравнениях (11), (12) $A(x, t)$ — медленно меняющаяся комплексная амплитуда сигнала, V — групповая скорость, ω_0'' — параметр дисперсии

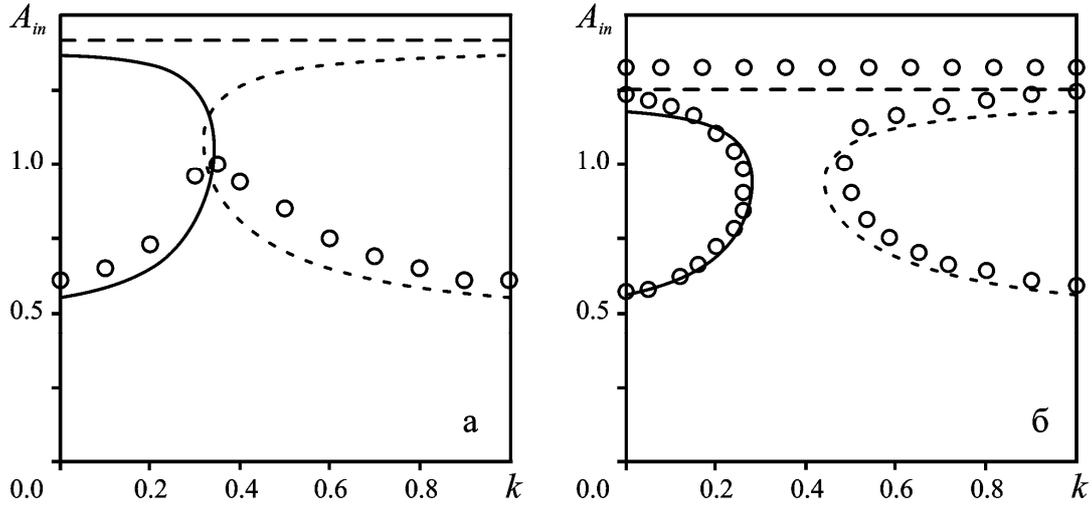


Рис. 6. Границы области устойчивости одночастотного режима на плоскости параметров k , A_{in} для отображения (13) при $\psi_{1,2} = -\pi/3$ (а) и $\psi_{1,2} = 0$ (б). Показаны линии бифуркации удвоения периода (сплошная кривая), Неймарка–Сакера (пунктир) и касательной бифуркации (штриховая линия). Кружки — границы устойчивости для пространственно-временной модели (11), (12).

групповой скорости, β — параметр нелинейности, A_{in} и ω — амплитуда и частота внешнего сигнала, l — протяженность нелинейной среды. Смысл параметров ρ , k , $\Delta t_{1,2}$ и $\psi_{1,2}$ тот же, что и ранее. В п. 4.2 развита упрощенная модель в виде четырехмерного точечного отображения

$$A_{n+1} = A_{in} + \rho \left[(1-k) A_n \exp(i|A_n|^2 + i\psi_1) + k A_{n-1} \exp(i|A_{n-1}|^2 + i\psi_2) \right], \quad (13)$$

являющегося обобщением известного отображения Икеды. Модель справедлива в случае, когда дисперсия в среде пренебрежимо мала. Проведен теоретический анализ устойчивости неподвижных точек отображения (13), найдены аналитические выражения, определяющие границы возникновения различных бифуркаций в пространстве управляющих параметров. Также рассмотрен случай малой добротности резонатора, когда можно описать систему двумерным отображением и сократить число управляющих параметров. Представлены результаты численного моделирования, которые хорошо согласуются с аналитической теорией. В зависимости от значений фаз $\psi_{1,2}$ область устойчивости на плоскости параметров k , A_{in} может иметь различную структуру. В одном случае (рис. 6(а)), максимальный порог автомодуляции определяется точкой пересечения линий бифуркаций удвоения периода и Неймарка–Сакера при $k = 1/3$, аналогично отображениям (4) и (7). При других значениях фаз присущая системе Икеды мультистабильность приводит к тому, что верхней границей области устойчивости служит линия складки (рис. 6(б)). При этом в области $k \sim 0.3 \div 0.4$ можно получить одночастотные колебания в широком диапазоне изменения интенсивности внешнего сигнала.

В п. 4.3 рассматривается более строгая пространственно-временная распределенная модель системы, описываемая уравнениями (11), (12). Обнаружено, что в случае слабой дисперсии результаты хорошо согласуются с поведением точечного отображения (13), хотя границы, рассчитанные для пространственно-временной модели, лежат несколько выше (рис. 6). В случае сильной дисперсии, когда нестационарное поведение в основном обусловлено не неустойчивостью Икеды, а модуляционной неустойчивостью, динамика системы является более сложной вследствие конкуренции различных собственных мод резонатора. Однако при соответствующем подборе времени задержки и фазы в управляющей цепи обратной связи удается стабилизировать одночастотные режимы в широкой области параметров. В целом, в зависимости от параметров, развитый метод позволяет увеличить пороговую амплитуду входного сигнала, при которой возникает автомодуляция, в 1.5–2 раза.

В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

В **Приложениях 1,2** описываются конечно-разностные методы численного моделирования ЛБВ–генератора с запаздыванием и кольцевого нелинейного резонатора, соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В настоящей диссертационной работе идея управления хаосом используется для подавления паразитных неустойчивостей в радиофизических распределенных автоколебательных системах с запаздыванием. Предложен способ подавления автомодуляции, основанный на введении дополнительной цепи обратной связи (ОС), параметры которой подбираются таким образом, что после прохождения двух ветвей цепи ОС компоненты сигналов на основной частоте имеют одинаковую фазу, а компоненты сигналов на паразитных частотах — противоположную, подавляя таким образом друг друга. Сопоставление с известными из литературы методами управления хаосом в системах с запаздыванием показывает, что предложенный метод является оригинальным и имеет ряд существенных преимуществ. Он отличается конструктивной простотой и может использоваться, вообще говоря, для широкого класса автогенераторов с запаздыванием различных диапазонов длин волн. Метод устойчив к расстройке управляющих параметров: изменение фазы и задержки в управляющей цепи ОС в пределах нескольких процентов от оптимальных значений приводит к снижению порога автомодуляции не более чем на 10%.

Применение метода продемонстрировано на примере широкого круга систем с запаздыванием, в которых автомодуляция возникает по различным механизмам. Рассмотрены кольцевая автоколебательная система типа «усилитель–фильтр–линия задержки» с кубичной нелинейностью,

модели автогенераторов СВЧ диапазона на основе двухрезонаторного клистрона и ЛБВ, а также кольцевой оптический резонатор, содержащий среду с кубичной фазовой нелинейностью (система Икеды). Показана возможность подавления автомодуляции, в том числе, хаотической, включая режимы гиперхаоса, которые возникают вблизи границ зон генерации. При этом значительно расширяется диапазон параметров, в котором устойчивы одночастотные режимы колебаний, и увеличивается мощность одночастотной генерации.

Развиты упрощенные модели рассматриваемых систем в виде четырехмерных точечных отображений, для которых найдены аналитические выражения, определяющие границы устойчивости одночастотного режима на плоскостях управляющих параметров. Обнаружено, что максимальное увеличение порога автомодуляции достигается при $k = 1/3$, где k — параметр, определяющий отношение амплитуд сигналов в управляющей и основной ветвях цепи ОС.

Показано, что наибольшее увеличение мощности генерации обеспечивается в случае, когда число мод, попадающих в полосу пропускания системы достаточно велико, т.е. $\gamma \gg 1$, где параметр γ имеет смысл произведения времени задержки на ширину полосы пропускания. В частности, для кольцевого автогенератора с кубичной нелинейностью диапазон параметров, в котором стационарный режим является устойчивым, расширяется примерно в 2.5 раза, а максимальная мощность колебаний увеличивается примерно на 40%. Для клистрона-генератора в центре зоны генерации ток пучка, при котором возникает автомодуляция, увеличивается в 1.8–2 раза при неизменной глубине ОС. При этом мощность генерации увеличивается в 1.5 раза, а КПД уменьшается в 1.25 раза. При отстройке фазы управляющей ОС примерно на π от значения, соответствующего центру зоны генерации, удается увеличить мощность более чем в 3 раза.

Для ЛБВ-генератора применение развитого метода позволяет повысить ток пучка, при котором возникает автомодуляция, примерно в два раза. Когда стабилизируются колебания на основной собственной моде, выходная мощность увеличивается в 1.88 раза, а КПД снижается и составляет примерно 0.81 от максимального значения, которое в отсутствие управления достигается вблизи порога автомодуляции. Если же стабилизировать одночастотные колебания на собственных модах с более высокими частотами, удастся повысить выходную мощность в 3.8 раза, а КПД — в 1.64 раза. Также показана возможность использования дополнительной внешней ОС для подавления пульсаций частотной зависимости коэффициента усиления ЛБВ-усилителя, возникающих за счет отражений.

Следует, однако, заметить, что исследование подавления автомодуляции в генераторах на основе ЛБВ и клистронов проведено для случая, когда модуляция по скорости полагается малой, а также не учитываются силы пространственного заряда. Таким образом, приведенные выше коли-

ческие характеристики относятся к случаю, когда КПД генерации достаточно мал.

Установлено, что применение метода позволяет стабилизировать режимы стационарной генерации на различных собственных модах. При этом, изменяя фазу управляющей цепи ОС при неизменных остальных параметрах, можно осуществлять переключения между различными модами, т.е. реализовать управляемую мультстабильность.

Показана возможность подавления различных неустойчивостей в кольцевом резонаторе, содержащем среду с кубической фазовой нелинейностью. При слабой дисперсии, когда автомодуляция обусловлена неустойчивостью Икеды, в зависимости от фазы обратной связи возможны два типа зависимости порога автомодуляции от параметра k . В одном случае максимальная амплитуда входного сигнала, при которой возникает неустойчивость, определяется точкой пересечения линий бифуркаций удвоения периода и Неймарка–Сакера при $k = 1/3$. В другом случае, когда эти линии не пересекаются, границей устойчивости одночастотного режима служит линия складки, и в области $k \sim 0.3 \div 0.4$ можно получить одночастотные колебания в широком диапазоне изменения интенсивности внешнего сигнала. В целом, в зависимости от параметров, развитый метод позволяет увеличить амплитуду входного сигнала, при которой возникает автомодуляция, в 1.5–2 раза.

В случае сильной дисперсии, когда динамика системы определяется модуляционной неустойчивостью, на стадии автомодуляции происходит возбуждение нескольких собственных мод резонатора. В этом случае необходимо подбирать параметры управляющей цепи ОС таким образом, чтобы условия подавления приблизительно выполнялись для различных паразитных мод. При этом также удается повысить пороговое значение амплитуды входного сигнала примерно в два раза.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Емельянов В.В., Рыскин Н.М. Хаврошин О.С. Подавление автомодуляции в автогенераторе с запаздыванием при помощи методики управления хаосом // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 6. С. 719-725.
2. Ryskin N.M., Khavroshin O.S. Suppressing self-modulation instability in a delayed feedback traveling wave tube oscillator using controlling chaos technique // IEEE Trans. Electron Devices. 2008. Vol. 55, No. 2. P. 662-667.
3. Балякин А.А. Рыскин Н.М. Хаврошин О.С. Нелинейная динамика модуляционной неустойчивости в распределенных резонаторах под внешним гармоническим воздействием // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 9. С. 800-820.
4. Рыскин Н.М. Хаврошин О.С. Управление хаосом в системе Икеды. Упрощенная модель в виде точечного отображения // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 2. С. 66-86.

5. Рыскин Н.М. Хаврошин О.С. Управление хаосом в системе Икеды. Пространственно–временная модель // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 2. С. 87-98.
6. Хаврошин О.С. Управление хаосом в системе Икеды // «Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2006» Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2007. С. 24-27.
7. Емельянов В.В., Хаврошин О.С. Подавление автомодуляции в автогенераторе с запаздыванием при помощи методики управления хаосом // «Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2007» Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2007. С. 150-153.
8. Рыскин Н.М. Хаврошин О.С. Подавление автомодуляции в вакуумных СВЧ–автогенераторах с запаздыванием при помощи дополнительной обратной связи // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2008). Материалы межд. науч.-тех. конф-ции. Саратов, 24-25 сентября 2008. Саратов: СГТУ, 2008. С. 20-25.
9. Ryskin N.M., Khavroshin O.S., Emelyanov V.V. Suppressing of self-modulation instability in time-delayed dynamical systems by using controlling chaos technique // Proc. III Int. Conf. “Frontiers of Nonlinear Physics 2007”. Nizhny Novgorod, Russia, July 3-9, 2007. Institute of Applied Physics, RAS. P. 68–69.
10. Ryskin N.M., Khavroshin O.S. Using controlling chaos technique to suppress self-modulation in a delayed feedback traveling wave tube oscillator // Abstracts of IEEE Pulsed Power and Plasma Science Conference. Albuquerque, NM, June 17-22, 2007. P. 592.
11. Ryskin N.M., Khavroshin O.S. Time–delayed control of chaos in the Ikeda system // The 3rd Int. IEEE Scientific Conference on Physics and Control (PhysCon 2007). September 3–7, 2007. Universitätsverlag Potsdam, 2007. P. 326.
12. Балякин А.А., Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. Управление хаотическими электромагнитными колебаниями в нелинейном кольцевом резонаторе // Материалы XIII Зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике. 31 января – 5 февраля 2006 г. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж». С. 94-95.
13. Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. Управление хаосом в автогенераторе с запаздыванием при помощи дополнительной цепи обратной связи // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. Тез. докл. III конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2008. С. 176-178.
14. Рыскин Н.М., Хаврошин О.С. Подавление автомодуляции в клистронегенераторе с запаздывающей обратной связью на основе методики управления хаосом // Материалы XIV Международной зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике. Саратов: Изд. центр «РАТА», 2009. С. 87.
15. Хаврошин О.С., Рыскин Н.М. Стабилизация одночастотных колебаний в двухрезонаторном клистронегенераторе при помощи метода управления хаосом // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика: Тез. докл. IV конф. молодых ученых. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2009. С. 136-139.

Хаврошин Олег Сергеевич

ПОДАВЛЕНИЕ АВТОМОДУЛЯЦИОННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ
В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РАДИОФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С
ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДИКИ УПРАВЛЕНИЯ ХАОСОМ

Автореферат

Подписано в печать 29.10.09
Формат 60x84 1/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 120 экз. Заказ № 203-Т

Типография СГУ.
410012, Саратов, Б. Казачья, 112а.
Тел.: (8452) 27-33-85

