



## СИНХРОНИЗАЦИЯ ДВУХ СВЯЗАННЫХ КЛИСТРОННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ\*

*Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, В.Н. Скороходов, А.М. Геншафт*

Приводятся результаты экспериментального исследования синхронизации двух связанных почти идентичных резонансных СВЧ-автогенераторов на многорезонаторных клистронах в режимах периодических и хаотических колебаний. Показано, что в зависимости от характера связи в этих автогенераторах можно осуществить режим взаимного захвата частоты генерации, синхронизацию путем полного подавления хаоса внешним гармоническим сигналом, режим полной синхронизации. Показана возможность использования эффекта подавления хаоса для генерации последовательности хаотических радиоимпульсов.

### Введение

Синхронизация автоколебательных систем, включая хаотическую синхронизацию, давно привлекает внимание исследователей [1]. В настоящее время предметом интенсивных исследований стали проблемы генерации и подавления хаотических колебаний, их взаимодействия и синхронизации с целью практического применения детерминированного хаоса [2]. В частности, большой интерес вызывают различные типы хаотического синхронного поведения связанных динамических систем с целью использования хаотических колебаний как в системах передачи и обработки информации [3], так и при управлении системами сверхвысокочастотной электроники [4]. Хаотические колебания могут использоваться и в шумовом радаре [5].

Для этих приложений весьма перспективными представляются резонансные автогенераторы СВЧ-диапазона с запаздыванием на основе многорезонаторных клистронов, отличающихся высоким уровнем мощности и КПД. Исследование сложной динамики таких автогенераторов представлено в работах [6–8].

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований синхронизации двух связанных СВЧ-автогенераторов на многорезонаторных клистронах в режимах периодических и хаотических колебаний при однонаправленной связи и при взаимной связи.

\*По материалам доклада на Школе «ХАОС–2007», Саратов, 9–14.10.2007.

## 1. Описание установки

Решение сформулированных задач потребовало разработки универсальной измерительной установки, позволяющей реализовать разнообразные режимы синхронизации. На рис. 1 приведена схема измерительной установки.

Каждый автогенератор (K1) и (K2) создан на основе промышленного пятирезонаторного клистрона десятисантиметрового диапазона длин волн среднего уровня мощности. В клистронах использованы двухззорные объемные резонаторы, работающие на противофазном виде колебаний. По конструкции и техническим данным клистроны идентичны. Незначительные различия есть только в значениях добротности объемных резонаторов. Для первого клистрона (K1) нагруженная добротность входного резонатора 250, нагруженная добротность выходного резонатора 125, собственная добротность резонаторов 460. Для второго клистрона (K2) нагруженная добротность входного резонатора 220, нагруженная добротность выходного резонатора 112, собственная добротность резонаторов 420. Частота автоколебаний в центре зоны генерации для первого клистрона 2791 МГц, для второго клистрона 2797 МГц.

Обратная связь в автогенераторах осуществлялась соединением выходного резонатора с входным с помощью стандартных передающих линий. В цепь обратной связи клистронов включены тройники для связи между клистронами и для передачи

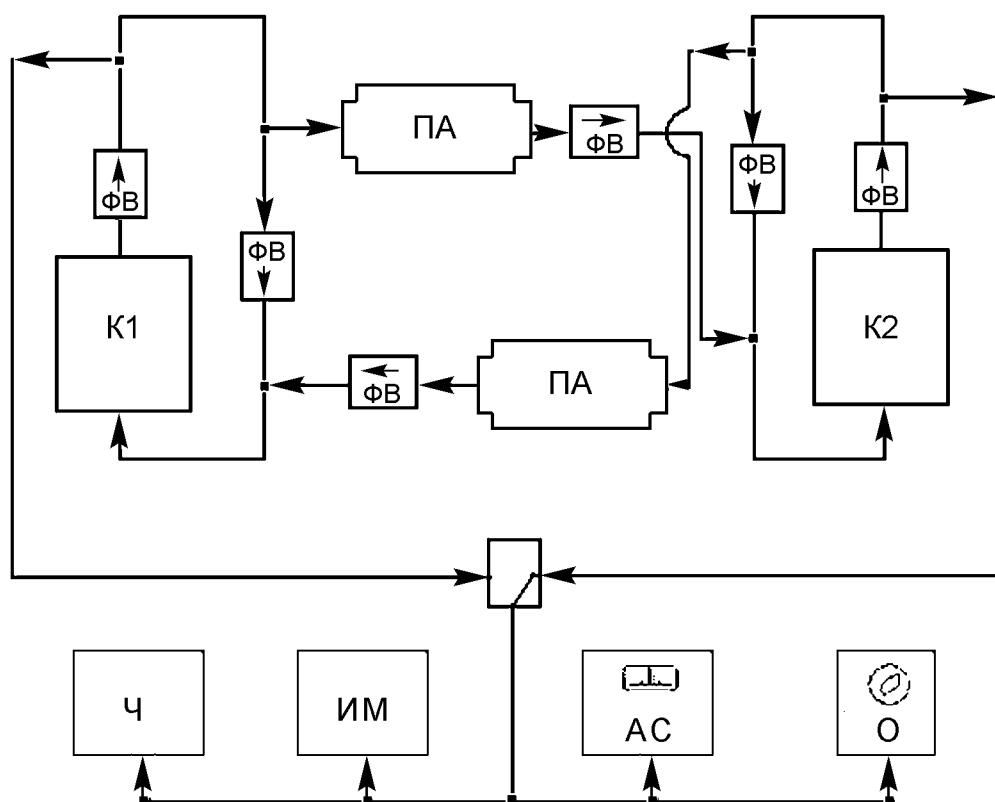


Рис. 1. Схема установки для экспериментального исследования синхронизации связанных клистронных автогенераторов

сигнала с помощью переключателя на общую измерительную цепочку. В эту цепочку через направленные ответвители включены анализатор спектра (АС), электронный цифровой частотомер (Ч), термисторный измеритель мощности (ИМ), кристаллический детектор и осциллограф (О) для наблюдения двухмерной проекции фазового портрета. Глубина связи между клистронами регулировалась с помощью поляризационных аттенуаторов (ПА). При этом сигнал с выхода одного клистронного автогенератора вводился на вход другого через ферритовый вентиль (ФВ). Следует указать, что собранная установка давала возможность изучить работу двух симметрично связанных клистронных автогенераторов при одновременном наблюдении полного спектра генерируемых сигналов, проекции фазового портрета, измерения частоты и уровня выходной мощности сигналов как в автономном режиме, так и в режимах взаимной и однонаправленной связи между клистронами для периодических и хаотических колебаний автогенераторов. Одновременное наблюдение различных характеристик сложной электронно-волновой динамической системы, состояние которой изменяется в соответствии с выбираемым характером эволюции, позволяет детально классифицировать мгновенное состояние системы. Такой анализ сложных явлений, наблюдаемых в нелинейных системах различной физической природы, применяется как в строгих математических моделях, так и в экспериментах с реальными системами и при компьютерном моделировании. Это, в частности, относится к построению и наблюдению фазовых портретов автономных и неавтономных динамических систем, обладающих рядом особенностей [9].

Что касается обсуждаемой задачи о синхронизации клистронных автогенераторов, то можно отметить, что фазовые портреты наряду со спектральными характеристиками позволяют не только наглядно идентифицировать характерные колебательные режимы, но и являются чувствительным индикатором изменения тонкой структуры спектра хаотического сигнала. На этом основана удобная методика выявления различных характеров хаотической синхронизации исследуемых радиофизических систем, что подтверждено проведенными экспериментальными исследованиями и продемонстрировано в данной работе.

В качестве управляющих параметров при проведении эксперимента использовались ток пучка и ускоряющее напряжение каждого клистрона. Выбором этих параметров можно реализовать различные режимы работы клистронных автогенераторов – периодические колебания, автомодуляцию, развитой хаос. Кроме того, ускоряющим напряжением можно плавно подстраивать частоту периодических колебаний автогенераторов.

## **2. Результаты экспериментальных исследований**

Сначала исследовалась взаимная синхронизация двух симметрично связанных почти идентичных клистронных автогенераторов, работающих в режиме автономных периодических колебаний на близких частотах с близкими уровнями выходной мощности. При плавном увеличении взаимной связи наблюдались изменения колебательных режимов, во многом совпадающие с внешней синхронизацией [1]. В самом деле, увеличение связи между клистронами вызывало сначала возникновение биений, затем захват частоты колебаний одного клистрона частотой другого авто-

генератора, а затем иногда и инициирование хаотических колебаний в первом. Но в то же время при малой разности частот и почти равной мощности в автономных режимах и достаточно сильной связи в системе взаимосвязанных автогенераторов наблюдался характерный захват частоты в результате взаимной подстройки автогенераторов, так что частота генерации связанных клистронов оказывалась между частотами автономных клистронов. Полученная зависимость частот установившихся периодических колебаний симметрично связанных клистроновых автогенераторов

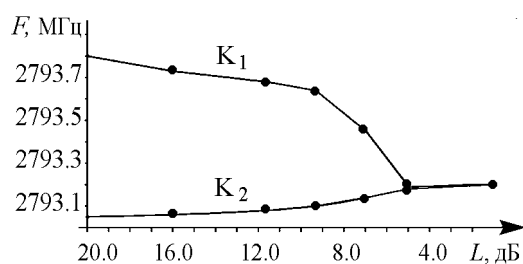


Рис. 2. Зависимость частот установившихся периодических колебаний связанных клистроновых автогенераторов от глубины связи между ними

от глубины связи между ними приведена на рис. 2 ( $L$  – величина затухания в цепи связи между клистронами). Отметим, что применяемые в экспериментах поляризационные аттенюаторы характеризовались значительным динамическим диапазоном изменения затухания (от 0 до 70 дБ), при этом обеспечивалась возможность исключительно плавной регулировки (до десятых долей дБ) и реализация различных режимов связи и синхронизации между автогенераторами.

В работе исследовалась также синхронизация путем полного подавления хаоса периодическим сигналом. Данный вид синхронизации происходил в системе, когда один автогенератор (условно обозначим его «первым») работал в режиме генерации периодических (одночастотных) колебаний, а другой – в режиме развитого хаоса (обозначим его «вторым»). Тогда, если осуществить сильное однонаправленное воздействие со стороны первого автогенератора на второй, то при определенных значениях мощности (глубине связи) и частоты воздействия, близкой к частоте генерации второго в автономном режиме, можно наблюдать срыв хаотических колебаний во втором автогенераторе и установление режима генерации периодических колебаний, по частоте полностью повторяющих вынуждающий сигнал. Явление синхронизации клистроновых автогенераторов путем полного подавления хаоса периодическим сигналом иллюстрируется на рис. 3, на котором приведены фазовые портреты и спектры колебаний при разных значениях затухания в линии однонаправленной связи клистронов.

На рис. 3, а даны спектр и фазовый портрет в автономном режиме работы второго автогенератора (70 дБ). Рис. 3, б демонстрирует преобразование этих характеристик колебаний при увеличении связи между клистронами (затухание 7 дБ в поляризационном аттенюаторе линии связи клистронов). Рис. 3, в иллюстрирует явление синхронизации клистроновых автогенераторов путем полного подавления хаоса одночастотным сигналом первого клистрона, частота которого определяет частоту колебаний второго клистрона (затухание «0 дБ» в поляризационном аттенюаторе линии связи клистронов).

На плоскости параметров «относительная мощность и частота внешнего гармонического воздействия» (рис. 4) обозначена область значений, при которых возникает синхронизация в результате полного подавления хаоса. Видно, что с ростом мощности внешнего сигнала ( $P_{\text{внеш}}$ ) область полного подавления по частоте

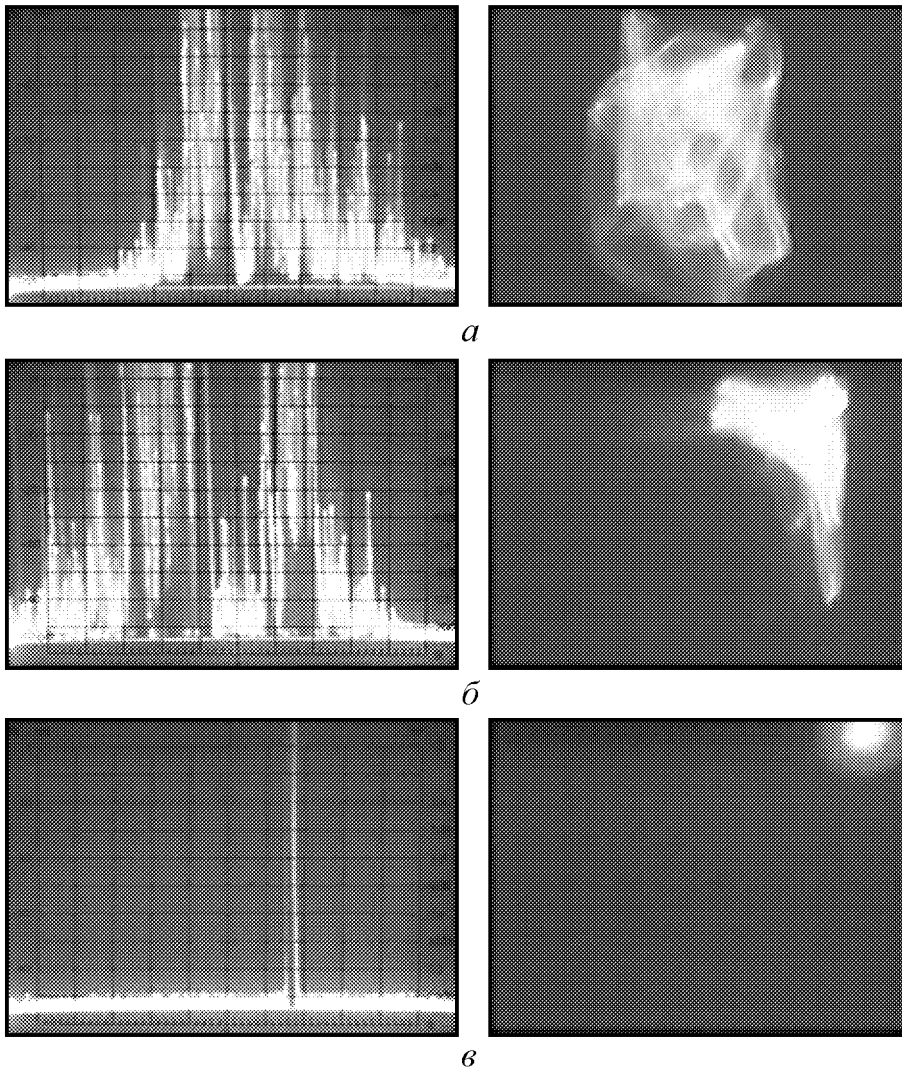


Рис. 3. Эволюция спектра и фазового портрета колебаний клистронного автогенератора при синхронизации, полученной путем полного подавления хаоса

внешнего воздействия расширяется. Приведенный график напоминает классическую картину областей синхронизации (языков Арнольда), но только с тем существенным отличием, что здесь область синхронизации не доходит до оси частот. Другими словами, имеется пороговый уровень мощности внешнего сигнала, приводящий к подавлению хаоса. Для выбранного режима работы клистрона (ток луча 40 мА, ускоряющее напряжение

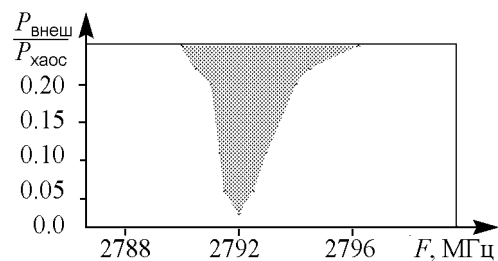


Рис. 4. Область внешней синхронизации в результате полного подавления хаотических колебаний в автогенераторе ( $P_{\text{хаос}} = 1.2$  Вт) внешним гармоническим сигналом

1930 В) этот пороговый уровень составлял 35 мВт. Исследование этого эффекта в более широком диапазоне частот проведено в [10]. Подобные физические эффекты наблюдались и при проведении экспериментов с другим типом СВЧ-генераторов – лампой обратной волны [11].

Явление синхронизации клистронных автогенераторов через полное подавление хаоса может быть использовано для генерации последовательности хаотических радиоимпульсов, применяемых в системах прямохаотической радиосвязи [12]. В этом случае автономный автогенератор вводится в режим генерации развитого хаоса. Если теперь в цепь обратной связи автогенератора подать внешний СВЧ-радиоимпульс, частота и амплитуда которого подобраны для получения полного подавления хаоса, то автогенератор будет генерировать периодическую последовательность хаотических радиоимпульсов, частота следования и длительность которых определяется параметрами внешнего СВЧ-радиоимпульса. Этот способ позволяет расширить область использования клистронных автогенераторов как источников прямохаотического сигнала большой мощности [13].

В ходе экспериментов была также исследована синхронизация почти идентичных клистронных автогенераторов, каждый из которых автономно работал в режиме развитого хаоса при однонаправленной или взаимной связи между ними.

В случае однонаправленной связи (связи типа «управление – подчинение») постепенное увеличение связи приводило к заметным изменениям характеристик ведомого клистрона – уменьшению интегральной мощности, выравниванию спектральной характеристики, значительному расширению интервалов изменения ускоряющего напряжения и тока пучка, при которых наблюдался развитой хаос. Такое поведение естественно. В самом деле, режим развитого хаоса определяется явно выраженным нелинейным режимом автономного клистрона. Подача на его вход хаотических колебаний ведущего автогенератора переводит его в еще более глубокий нелинейный режим, вызывая падение мощности и выравнивание спектральных характеристик. Спектры колебаний и фазовые портреты ведущего и ведомого клистронов приведены на рис. 5. На рис. 5, *а* представлены спектр и фазовый портрет ведущего клистрона. Рис. 5, *б* показывает эти характеристики для автономного режима ведомого клистрона. Рис. 5, *в* дает изменение этих характеристик в результате воздействия первого автогенератора на второй. Следует указать, что на основе подробного исследования (с помощью описанной схемы) изменения спектрального состава сигнала ведомого клистрона при увеличении глубины однонаправленной связи с ведущим автогенератором предложена и разработана новая методика диагностики режима обобщенной синхронизации [14].

В случае сильной взаимной связи наблюдался режим полной синхронизации двух клистронных автогенераторов, генерирующих развитой хаос. В этом режиме спектры и фазовые портреты, сильно отличающиеся друг от друга в автономном режиме, оказываются почти одинаковыми в результате сильного взаимного воздействия.

Явление полной синхронизации иллюстрирует рис. 6, на котором показано изменение спектров колебаний и фазовых портретов клистронов при увеличении

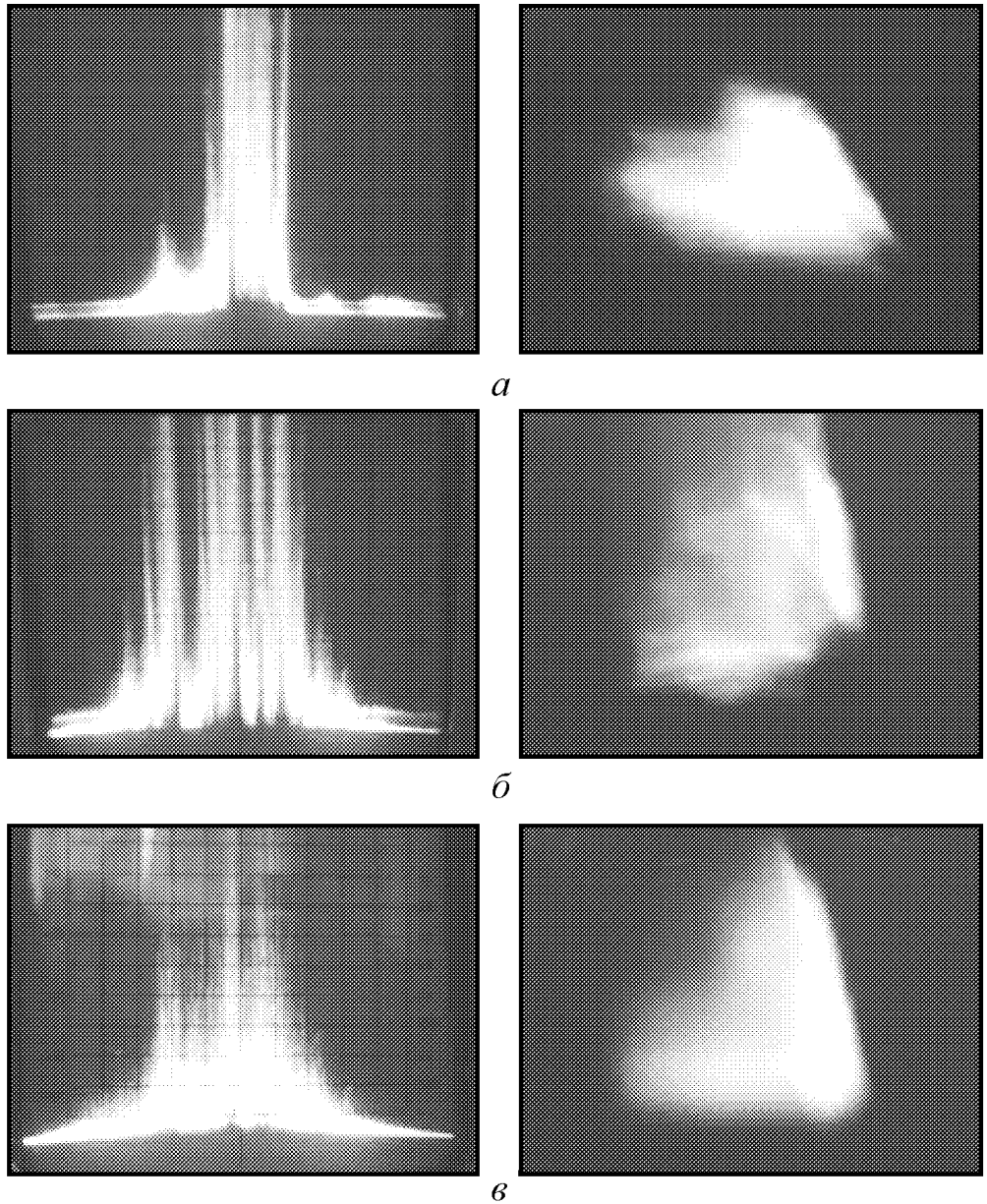


Рис. 5. Синхронизация клистронных автогенераторов, работающих в режиме генерации хаотических колебаний. Однонаправленная связь

взаимной связи между ними. На рис. 6, *а* приведены спектры и фазовые портреты в автономных режимах почти идентичных клистронных автогенераторов (затухание поляризационных аттенюаторов 70 дБ в линиях связи между клистрономми). Рис. 6, *б* показывает, что при затухании «0 дБ» в поляризационных аттенюаторах в линиях связи спектры генерируемых сигналов и фазовые портреты в результате сильного взаимного воздействия почти идентичны, что свидетельствует о реализации режима полной синхронизации, наблюдаемой ранее в связанных лазерах [15].

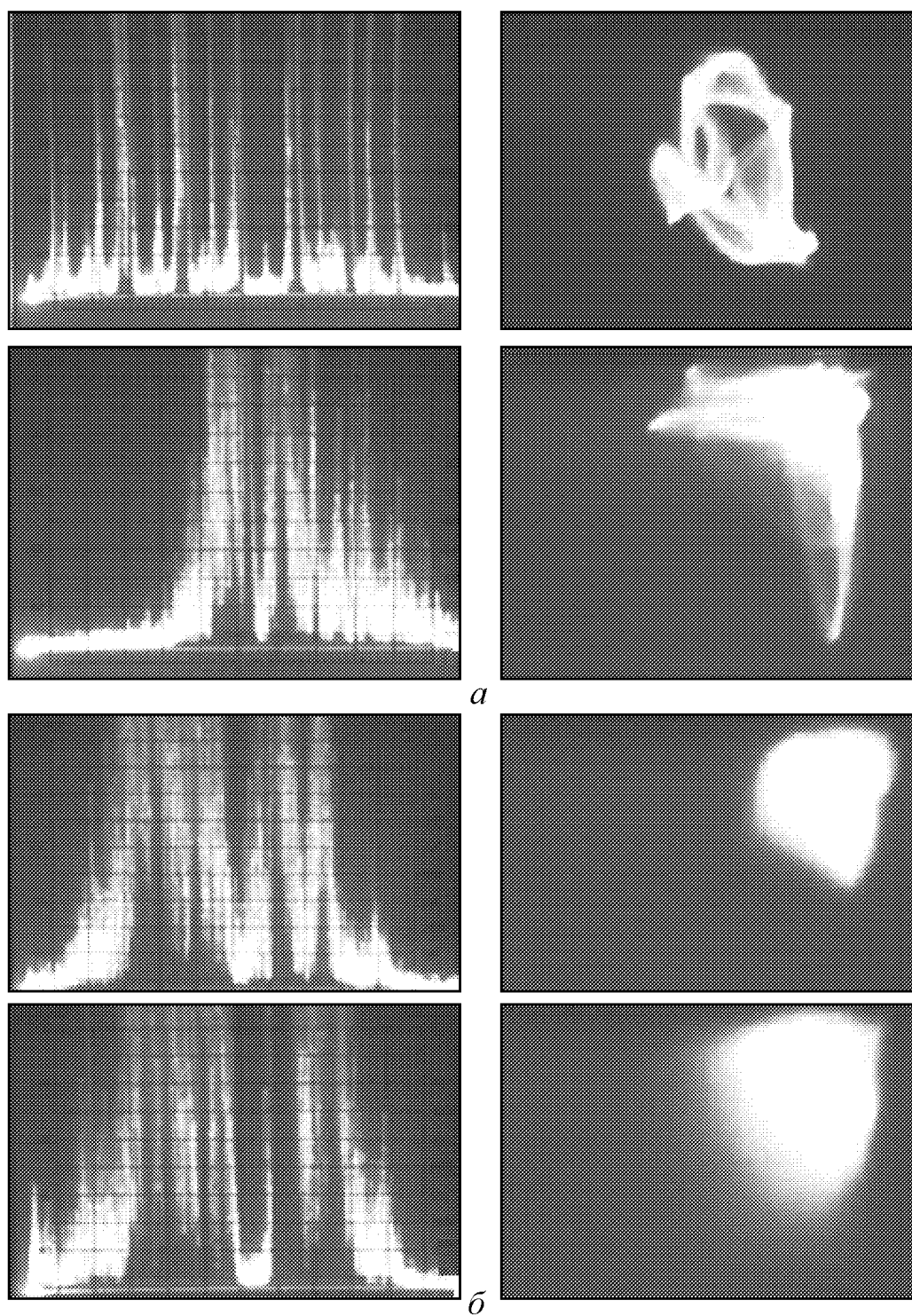


Рис. 6. Эволюция спектров и фазовых портретов клистронных автогенераторов при изменении глубины взаимной связи



## Заключение

Проведены комплексные исследования различных видов синхронизации двух симметрично связанных клистронных автогенераторов с запаздыванием. Исследования показали, что в зависимости от режима колебаний (периодические или хаотические колебания), глубины и характера связи (однонаправленная или взаимная связь) в системе из двух связанных клистронных автогенераторов можно осуществить режим взаимного захвата частоты генерации, синхронизацию путем полного подавления хаоса внешним периодическим сигналом и режим полной синхронизации. Предложено использовать эффект полного подавления хаоса для генерации последовательности хаотических радиоимпульсов большой мощности.

Таким образом, продемонстрирована широкая возможность управления сложной динамикой клистронных автогенераторов с помощью внешних сигналов.

Авторы выражают благодарность члену-корреспонденту РАН, профессору Д.И. Трубецкову за обсуждение и рекомендации по исследованию эффекта полного подавления хаоса внешним сигналом в клистронных автогенераторах.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 06-02-16451) и Программы государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (шифр НШ-355.2008.2).*

## Библиографический список

1. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М. Техносфера, 2003.
2. Шалфеев В.Д., Осипов Г.В., Козлов А.К., Волковский А.Р. Хаотические колебания – генерация, синхронизация, управление // Зарубежная радиоэлектроника. 1997. № 10. С. 27.
3. Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М. Физматлит, 2002.
4. Трубецков Д.И., Короновский А.А., Храмов А.Е. Синхронизация распределенных электронно-волновых автоколебательных систем с обратной волной // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 5–6. С. 343.
5. Lukin K.A. Noise radar technology: the principles and short overview // Applied Radio Electronics. 2005. Vol. 4, № 1. P. 74.
6. Дмитриев Б. С., Жарков Ю. Д., Рыскин Н.М., Шигаев А.М. Теоретическое и экспериментальное исследование хаотических колебаний клистронного автогенератора с запаздыванием // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 5. С. 1.
7. Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М. Экспериментальное исследование сложной динамики в многорезонаторном клистронном автогенераторе с запаздывающей обратной связью // ЖТФ. 2003. Т. 73, вып. 7. С. 105.

8. *Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Yu.D., Ryskin N.M.* Chaotic dynamics of delayed feedback klystron oscillator and its control by external signal // IEEE Transactions On Electron Devices. 2005. Vol. 52, № 5. P. 790.
9. *Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Астахов В.В.* Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999.
10. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Геншафт А.М.* Синхронизация хаотических колебаний путём подавления хаоса в клистронном автогенераторе внешним гармоническим сигналом // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 3. С. 52.
11. *Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Экспериментальное и теоретическое исследование стохастических автоколебаний в лампе обратной волны // Лекции по высокочастотной электронике (5-я зимняя школа). Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1981. С. 25.
12. *Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М., Панас А.И., Старков С.О.* Сверхширокополосная беспроводная связь на основе динамического хаоса // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 10. С. 1193.
13. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Бирюков А.А.* Генерация хаотических радиоимпульсов с помощью клистронного автогенератора с запаздыванием // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14, № 4. С. 36.
14. *Стародубов А.В., Короновский А.А., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Храмов А.Е.* Экспериментальное и теоретическое исследование явления обобщенной синхронизации в клистронных генераторах хаоса // Материалы 17 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. 2007. С. 609.
15. *Roy R., Thoznburg K.S.* Experimental synchronization of chaotic lasers // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 72. P. 2009.

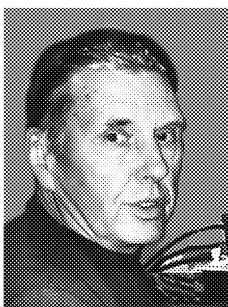
*Саратовский государственный  
университет*

*Поступила в редакцию 22.11.2007  
После доработки 8.02.2008*

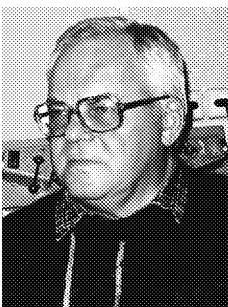
## **SYNCHRONIZATION OF TWO COUPLED KLYSTRON ACTIVE OSCILLATORS WITH DELAYED FEEDBACK**

*B.S. Dmitriev, Yu.D. Zharkov, V.N. Skorohodov, A.M. Genshaft*

Results of experimental research of synchronization of two coupled almost identical resonance microwave active oscillators on multicavity klystrons in the modes of periodic and chaotic oscillations are presented. It is shown that depending on type of coupling it is possible to realize a mode of mutual frequency capture, synchronization by means of chaos full elimination by outer harmonic signal, and full synchronization mode. A possibility of using the chaos elimination effect for generation of sequence of chaotic radio pulses is shown.



*Дмитриев Борис Савельевич* – родился в Саратове (1937), окончил физический факультет Саратовского университета (1959), защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (1967). В настоящее время – профессор кафедры нелинейной физики СГУ. Читает лекции по общему курсу физики, радиофизике и электронике, концепциям современного естествознания. Область научных интересов – микроволновая электроника и радиофизика. Опубликовал более 150 научных работ и учебных пособий, монографию «Относительность – время, пространство, поля» с грифом учебного пособия для вузов, автор 15 изобретений.  
E-mail: DmitrievBS@info.sgu.ru



*Жарков Юрий Дмитриевич* – родился в селе Терса Еланского района Волгоградской области (1931). Окончил физический факультет СГУ (1953). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1961) и доктора (1987) в области радиофизики и электроники СВЧ. В настоящее время – профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – физическое моделирование процессов взаимодействия потоков заряженных частиц с СВЧ-полями, исследование сложной динамики в СВЧ-генераторах с запаздывающей обратной связью. Опубликовал более 200 работ, среди них несколько учебных пособий, 20 изобретений.



*Скорыходов Валентин Николаевич* – родился в 1959 году. Окончил физический факультет СГУ в 1982 году. В настоящее время является заведующим лабораторией кафедры электроники, колебаний и волн. Область научных интересов: нелинейная динамика в СВЧ-электронике. Автор более 15 статей в отечественных и зарубежных журналах.



*Гениафт Алексей Михайлович* – родился в 1984 году. Окончил факультет нелинейных процессов СГУ (2006). В настоящее время зачислен в магистратуру по специальности радиофизика и электроника. Область научных интересов – изучение хаотического поведения систем СВЧ-электроники. Имеет 5 публикаций.