



## ГЕНЕРАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ С ПОМОЩЬЮ КЛИСТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ\*

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

Изучена возможность использования клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью в качестве источника хаотических радиоимпульсов. Приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных на специальной измерительной установке. Показано, что клистронный автогенератор под внешним импульсным воздействием способен переходить в режим развитого хаоса и может генерировать хаотические радиоимпульсы.

### Введение

К настоящему времени предложено заметное количество динамических систем различной природы, генерирующих хаотические сигналы. Актуальным стал вопрос о практическом использовании динамического хаоса, в первую очередь в информационных технологиях, электронике и технике связи. Можно отметить, что электроника и радиотехника явились важным экспериментальным полигоном для исследования свойств хаоса. Это объясняется возможностью получения хаотических колебаний с помощью довольно простых по структуре электронных устройств. В последние годы был предложен ряд способов передачи информации, использующих хаотическую динамику, и тем самым созданы предпосылки для появления новых направлений в системах связи. Одним из таких направлений является передача информации с помощью прямохаотических систем связи [1, 2]. В таких системах передачи ввод информации осуществляется непосредственно в хаотический сигнал, генерируемый в радио- или СВЧ-диапазоне. Прямохаотические системы связи имеют ряд преимуществ перед традиционными системами передачи информации - стабильность спектра передаваемых широкополосных хаотических радиоимпульсов при изменении длительности этих радиоимпульсов, помехоустойчивость, потенциально высокая скорость передачи информации и др. [1, 2].

Основным понятием в прямохаотических системах связи является понятие хаотического радиоимпульса, который представляет собой фрагмент прямохаотического сигнала с длительностью, превышающей длительность квазипериода хаотических

\*Статья подготовлена на основе лекции, прочитанной на XIII зимней школе-семинаре по СВЧ электронике и радиофизике (Саратов, 31 января – 5 февраля 2006 г.).



огибающей сигнала на экране осциллографа 7; электронный частотомер 8 и второй поляризационный аттенюатор 3, обеспечивающий изменение глубины обратной связи. В качестве источника внешнего воздействия был выбран генератор стандартных сигналов 14, сигнал которого модулировался генератором импульсов 15 и усиливался ЛБВ 13. Система внешнего воздействия через ферритовые вентили 11 и тройник 12 подключалась к линии обратной связи клистрона.

### Экспериментальные результаты

Прежде всего необходимо было определить области генерации хаотических импульсов в исследуемой системе. Выбирался такой режим работы автономного клистронного автогенератора, при котором обеспечивалась одночастотная генерация на пороге возникновения регулярной автомодуляции. Как известно, физической причиной возникновения автомодуляции, а затем и хаотических колебаний в клистронном автогенераторе с запаздыванием, как и в других автогенераторах, является наличие крутого падающего участка на амплитудной характеристике, обусловленного перегруппировкой электронов при больших уровнях входного сигнала. Нелинейная перегруппировка электронов и запаздывание реакции резонансной автоколебательной системы на начало действия нелинейности и приводит к возникновению автомодуляции и к дальнейшей хаотизации колебаний. Подача внешнего импульсного сигнала от ЛБВ в указанном режиме вызывает смещение рабочей точки на амплитудной характеристике в область развитого хаоса. Это приводит к возникновению хаотических колебаний, то есть к генерации хаотических радиоимпульсов, только в течение внешнего импульсного воздействия.

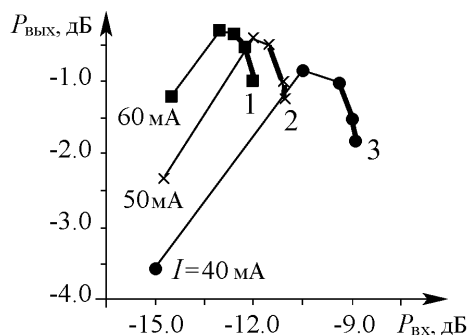


Рис. 2. Экспериментальная зависимость выходной мощности от входной

обратной связи аттенюатором до полного подавления сигнала. Затем затухание уменьшалось, и снималась зависимость выходной мощности от величины затухания. Входная мощность, подаваемая на клистрон после тройника 12, определялась из соотношения

$$P_{вх} = \frac{P_{вых}}{A},$$

где  $A$  – затухание в цепи обратной связи. Нормировка  $P_{вх}$  и  $P_{вых}$  производилась по максимуму выходной мощности ( $P_{вх}/P_{вых\ макс}$ ,  $P_{вых}/P_{вых\ макс}$ ), и строилась зависимость  $P_{вых}$  от  $P_{вх}$  в двойном логарифмическом масштабе

$$P_{\text{вых, dB}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вых макс}}},$$

$$P_{\text{вх, dB}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых макс}}}.$$

Возникновению регулярной автомодуляции в автономном режиме соответствуют точки 1, 2, 3 на этих зависимостях. Выделенными линиями показан возможный диапазон работы автогенератора для получения хаотических радиоимпульсов при внешнем импульсном воздействии. Установлено, что диапазон возникновения хаотических радиоимпульсов увеличивается с ростом тока.

Были сняты зависимости выходной мощности клистрона в неавтономном режиме  $P$  от частоты внешнего воздействия  $f$  и выделены две области появления хаотических радиоимпульсов (рис. 3). Эксперименты показали, что в случае большой отстройки частоты внешнего воздействия от рабочей частоты клистрона получить хаотические импульсы не представляется возможным, так как практически отсутствует воздействие внешнего сигнала. Так же и с приближением частоты внешнего воздействия к рабочей частоте клистрона наблюдалось исчезновение хаотических импульсов, что, видимо, связано с синхронизацией по частоте двух генераторов. Этим объясняется наличие «окна» между двумя областями хаоса.

Обнаружено, что области развитого хаоса занимают достаточно широкую полосу по частоте при увеличении тока клистрона до 60 мА. Хорошо видно, что эти области заметно расширяются при небольшом увеличении тока. Это связано с особенностями работы клистронного автогенератора, который, как показано, легко переходит в хаотический режим при больших токах и высоких напряжениях.

Эксперименты проводились с импульсами длительностью от 1 до 10 мкс. Исследования не показали принципиальной зависимости работы системы от длительности импульсов при скважности от 2 до 100.

Для практического приложения представляет интерес зависимость выходной мощности автогенератора в автономном режиме от тока пучка клистрона. Для одного из режимов эта зависимость приведена на рис. 4. Хорошо заметно, что мощность практически линейно увеличивается с ростом тока пучка.

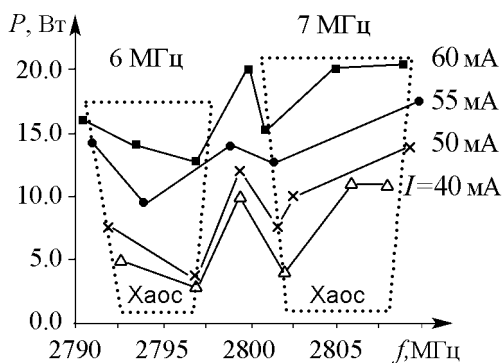


Рис. 3. Экспериментальная зависимость выходной мощности от частоты ГСС

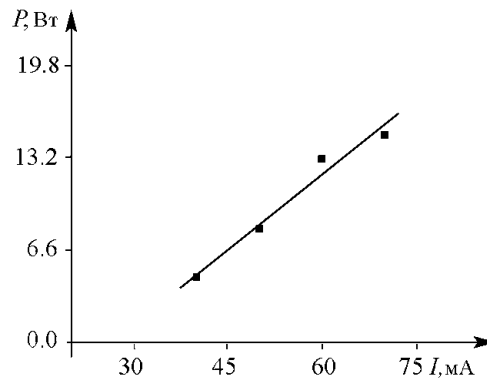


Рис. 4. Экспериментальная зависимость выходной мощности от тока пучка

Представляет интерес зависимость частоты внешнего воздействия, необходимого для возникновения хаотических радиоимпульсов, от затухания  $A$  в цепи обратной связи.

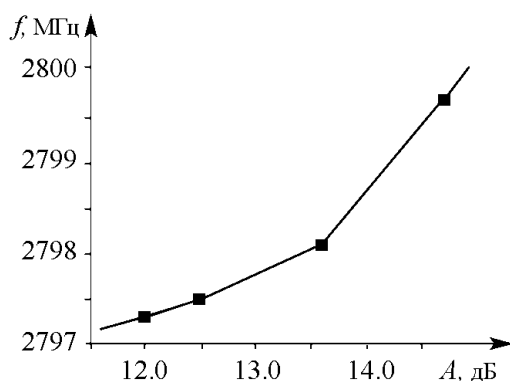


Рис. 5. Экспериментальная зависимость частоты внешнего воздействия от затухания в цепи обратной связи при  $I = 36.5$  мА,  $U = 2500$  В

На приведенном графике (рис. 5) видно, как необходимо изменять частоту внешнего воздействия в зависимости от затухания для получения хаотических радиоимпульсов в системе. При достаточной отстройке частоты внешнего сигнала от частоты работы автогенератора необходимо уменьшать затухание в цепи обратной связи.

Для иллюстрации наблюдаемых явлений на рис. 6 приведены фотографии фазового портрета, спектра и огибающей сигнала, на которых отчетливо видна сложная динамика колебаний в системе. Огибающая сигнала позволяла дополнительно фиксировать наличие хаоса в системе. На последней фотографии

показано заполнение импульсов хаотическим сигналом.

Были проведены прямые эксперименты по передаче и приему в эфире хаотических радиоимпульсов в лабораторных условиях. С этой целью в одном из плеч направленного ответвителя  $I2$  устанавливалась антенна для излучения сигнала. Сигнал от приемной антенны подавался на детекторную камеру, усиливался и фиксировался на экране осциллографа.

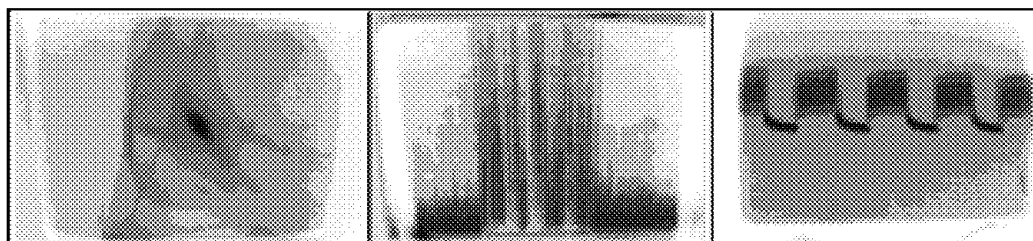


Рис. 6. Фотографии фазового портрета, спектра и огибающей сигнала

### Заключение

На основе полученных экспериментальных данных можно утверждать, что клистронный автогенератор под внешним импульсным воздействием способен генерировать хаотические радиоимпульсы, которые можно передавать по коаксиальной линии или в пространстве с помощью различных антенн. Клистронный автогенератор имеет богатую динамику поведения, что делает его привлекательным в экспериментах такого типа.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 06-02-16451) и Программы по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (шифр НШ- 4167.2006.2).*

## Библиографический список

1. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. *Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1997. № 10. С. 4.
3. *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.
4. *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.

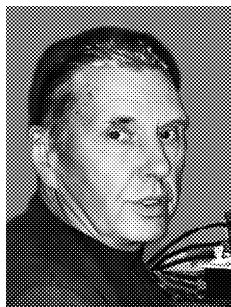
Саратовский государственный  
университет

Поступила в редакцию 30.06.2006

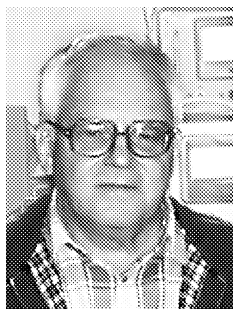
## GENERATION OF CHAOTIC RADIO-FREQUENCY PULSES USING KLYSTRON ACTIVE OSCILLATOR WITH DELAYED FEEDBACK

*B.S. Dmitriev, Yu.D. Zharkov, V.N. Skorokhodov, A.A. Biryukov*

The possibility of usage of klystron active oscillator with delayed feedback as a source of chaotic radio pulses was explored. Experimental results of chaotic radio pulses producing in multicavity active oscillator with delayed feedback by means of the influence of radio-frequency pulses, delivered in the feedback line are presented. Experimental results showed that the initiation of chaotic radio-frequency pulses is possible in the whole zone of amplitude curve (gain characteristic) of autonomous klystron active oscillator.



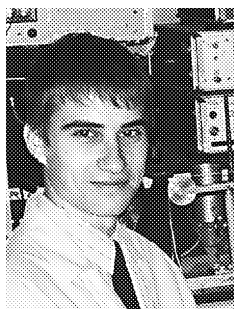
*Дмитриев Борис Савельевич* – родился в Саратове (1937), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1959), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1967). В настоящее время является профессором кафедры нелинейной физики СГУ. Ведет курсы общей физики (механика, молекулярная физика и термодинамика, электродинамика). Область научных интересов - микроволновая электроника и радиофизика. Опубликовал более 120 научных и научно-методических работ и учебных пособий. E-mail: [DmitrievBS@vxfo.sgu.ru](mailto:DmitrievBS@vxfo.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 100 работ, среди них несколько учебных пособий, 20 изобретений.



*Скороходов 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.



*Бирюков Алексей Алексеевич* – родился в 1985 году. Студент 4 курса факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Научные интересы: колебания, волны, сложная динамика в приборах СВЧ-электроники, передача информации в СВЧ-диапазоне. Лауреат фонда некоммерческих программ «Династия», исполнитель гранта РФФИ. Автор 3 статей по данной тематике.