

09;12

Каскадный клистронный автогенератор с запаздыванием

© Б.С. Дмитриев, Ю.Д. Жарков, В.Н. Скороходов, П.Ю. Семеновых, А.А. Бирюков

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410026 Саратов, Россия
e-mail: DmitreivBS@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2005 г.)

Приводятся результаты экспериментального исследования нового варианта резонансных СВЧ автоколебательных систем со сложной динамикой — каскадного клистронного автогенератора с запаздывающей обратной связью. Показано, что этот автогенератор отличается малыми значениями пускового тока, большим числом зон колебаний, легко может быть переведен в режим сложных, в том числе хаотических, колебаний.

Введение

Автогенераторы с запаздывающей обратной связью на многорезонаторных клистронах при превышении рабочего тока электронного пучка над порогом самовозбуждения в 2–3 раза демонстрируют колебания различной сложности, в том числе и хаотические [1]. Подобные автогенераторы представляют интерес как мощные СВЧ источники для самых различных применений [2,3] с относительно широкой полосой частот, достигаемой в режиме хаотических колебаний. В работе [1] приведены результаты подробных экспериментальных исследований сложной динамики резонансного автогенератора на основе одиночного клистрона.

Настоящая работа посвящена изложению результатов экспериментального исследования нового варианта таких динамических систем — каскадного автогенератора на многорезонаторных клистронах.

Описание каскадного клистронного автогенератора

Каскадный клистронный автогенератор состоит из двух последовательно соединенных почти идентичных многорезонаторных клистронов, когда выход каждого клистрона соединен с входом другого. Отдельный каскад содержит промышленный пятирезонаторный клистрон десятисантиметрового диапазона длин волн среднего уровня мощности. В клистронах использованы двухззорные объемные резонаторы, работающие на противофазном виде колебаний. Для первого клистрона нагруженная добротность входного резонатора 250, выходного 125, собственная добротность 460, резонансная частота 2798 МГц. Для второго клистрона нагруженная добротность входного резонатора 120, выходного 112, собственная добротность 380, резонансная частота 2800 МГц.

Ускоряющие и управляющие напряжения клистронов обеспечивались общим источником питания. Выходной резонатор первого клистрона соединен с входным резонатором второго коаксиальной линией обратной связи. В цепь обратной связи через направленные ответвители

включены измеритель мощности с поляризационным аттенуатором, кристаллический детектор для наблюдения на экране осциллографа фазового портрета сигнала, анализатор спектра, позволяющий исследовать полный спектр генерируемого сигнала, второй кристаллический детектор для наблюдения на экране осциллографа огибающей сигнала, цифровой частотомер и поляризационный аттенуатор, обеспечивающий изменение глубины обратной связи. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Полное время запаздывания вдоль кольца обратной связи, определенное с учетом длины линии обратной связи, времени пролета электронов в пространстве дрейфа и добротности объемных резонаторов обоих клистронов, было порядка $0.6 \mu\text{s}$. В качестве управляющих параметров использовались ток электронного

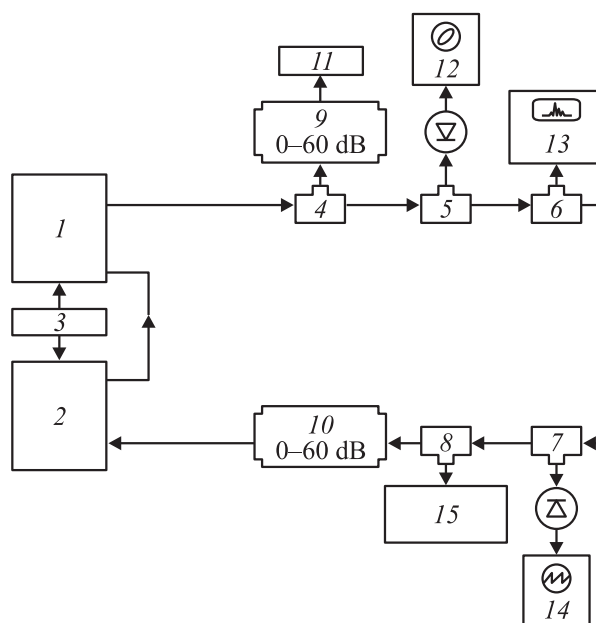


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 2 — многорезонаторный клистрон; 3 — блок питания; 4–8 — направленный ответвитель; 9, 10 — поляризационный аттенуатор; 11 — измеритель мощности; 12 — регистратор фазового портрета; 13 — анализатор спектра; 14 — регистратор огибающей; 15 — электронный частотомер.

пучка, затухание в цепи обратной связи и ускоряющее напряжение клистронов. Описанная установка позволяла достаточно точно идентифицировать характер различных колебательных режимов, включая режимы периодической автомодуляции и хаотических колебаний.

Результаты экспериментальных исследований

Было проведено подробное экспериментальное исследование характеристик каскадного клистронного автогенератора с запаздыванием в различных режимах работы. Исследования проводились в направлении „от простого к сложному“, т.е. по степени усложнения режимов колебаний — от одночастотной генерации к периодической автомодуляции и далее к хаотическим колебаниям. Кроме того, постоянно проводилось сравнение с характеристиками автогенератора на одиночном пятирезонаторном клистроне [1].

Для определения рабочего интервала ускоряющего напряжения была прежде всего изучена зависимость пускового тока каскадного автогенератора от этого управляющего параметра. Каскадный автогенератор, как и автогенератор на одиночном клистроне, характеризуется набором дискретно расположенных зон колебаний.

На рис. 2 приведена экспериментальная зависимость минимального для каждой зоны пускового тока I_0 каскадного автогенератора от ускоряющего напряжения U_0 (кривая 2) в сравнении с аналогичной зависимостью для автогенератора с одиночным клистроном (кривая 1) при одинаковом затухании в цепи обратной связи, равном 6 дБ. На рис. 3 для одной из зон приведена зависимость пускового тока от затухания в цепи обратной связи A для одиночного (кривая 1) и каскадного (кривая 2) клистронных автогенераторов. Из представленных данных ясно видно, что пусковой ток каскадного клистронного автогенератора значительно меньше, поэтому его легче возбудить и легче „перевести“ в режим развитого хаоса, нежели автогенератор на одиночном клистроне.

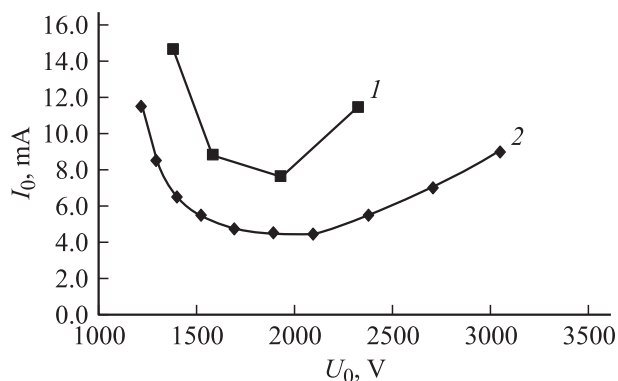


Рис. 2. Зависимость минимального пускового тока от ускоряющего напряжения для одиночного (1) и каскадного (2) клистронных автогенераторов.

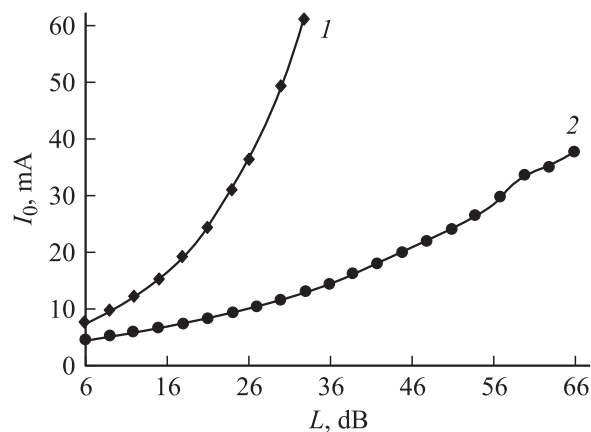


Рис. 3. Зависимость пускового тока от затухания в цепи обратной связи для одиночного (1) и каскадного (2) клистронных автогенераторов.

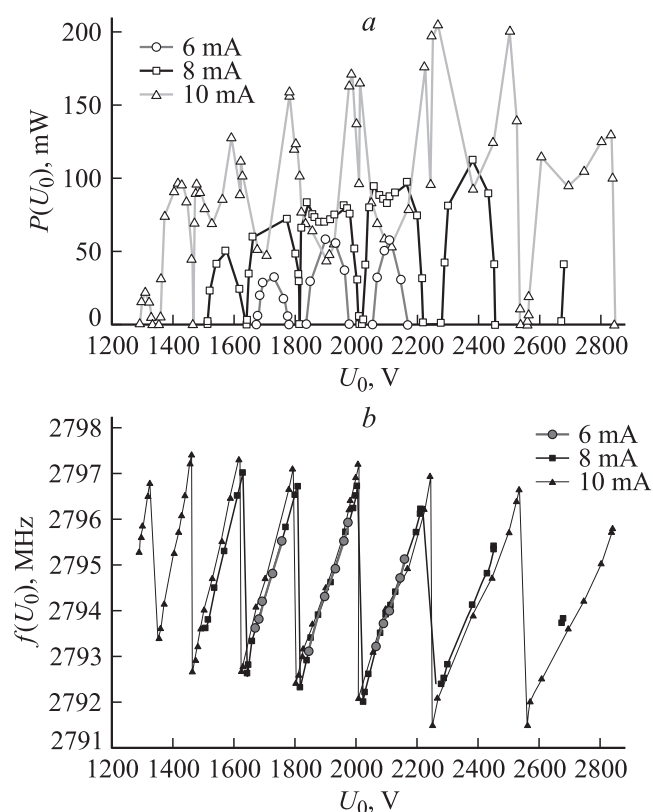


Рис. 4. *a* — зависимости мощности от ускоряющего напряжения для различных значений тока пучка, *b* — зависимости частоты колебаний от ускоряющего напряжения для различных значений тока пучка.

На рис. 4 приведены зависимости мощности P (*a*) и частоты колебаний f (*b*) от ускоряющего напряжения для различных значений тока пучка I . Видно, что с ростом тока зоны колебаний расширяются как по напряжению, так и по частоте, а число их увеличивается. При этом зоны сильно деформируются, максимумы мощности смещаются в область более высоких напря-

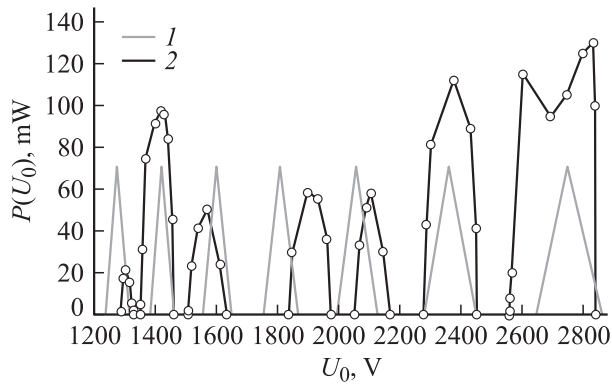


Рис. 5. Теоретические (1) и экспериментальные (2) зависимости мощности от ускоряющего напряжения.

жений. На зависимостях возникают характерные пики, в которых достигается максимальная мощность, следом за ними происходит резкий перескок в соседнюю зону. В окрестностях этих пиков было обнаружено явление гистерезиса по мощности и по частоте. Во многом поведение каскадного автогенератора подобно поведению автогенератора на одиночном клистроне, но с тем существенным отличием, что число зон для каскадного автогенератора значительно больше при одинаковом интервале изменения ускоряющего напряжения и они начинают возбуждаться при значительно меньших токах пучка, нежели в автогенераторе с одиночным клистроном. Например, при токе пучка в клистроне в 10 mA число зон равнялось восьми для каскадного автогенератора, а в генераторе с одиночным клистроном при этом же токе максимальное число зон было равно пяти в одном и том же диапазоне изменения ускоряющего напряжения.

Число зон, их положение и границы можно оценить из фазового условия колебаний. Поскольку для возникновения колебаний набег фазы сигнала по цепи обратной связи должен быть кратен 2π , то это условие для каскадного автогенератора в случае синхронной настройки резонаторов может быть записано в виде

$$2\theta_0 + \omega_0\delta t_1 + \omega_0\delta t_2 = 2\pi n - (k - 1) \cdot \pi.$$

Здесь $\theta_0 = \omega_0 l / \sqrt{2\eta U_0}$ — невозмущенный угол пролета между первым и последним резонатором каждого клистрона; $\eta = e/m$; l — расстояние между этими резонаторами; ω_0 — собственная частота объемных резонаторов; δt_1 — время распространения сигнала по внешней цепи обратной связи, содержащей измерительные приборы; δt_2 — время распространения сигнала по цепи, соединяющей выходной резонатор второго клистрона с входным резонатором первого; k — число резонаторов в каждом клистроне; n — целое число. Границы зон можно найти из аналогичного условия

$$2\theta_0 + \omega_0\delta t_1 + \omega_0\delta t_2 = 2\pi n - (k - 1) \cdot \pi \pm \frac{\pi}{2}.$$

Сопоставление результатов расчета по этим соотношениям с экспериментальными данными приведено на рис. 5.

При повышении тока электронов в клистронах над порогом самовозбуждения в 2–3 раза одночастотный режим сменялся режимом периодической автомодуляции, когда в спектре сигнала появлялись два сателлита, симметрично расположенные относительно основного сигнала, а на фазовом портрете появлялся предельный цикл, похожий на эллипс. Интересно отметить, что

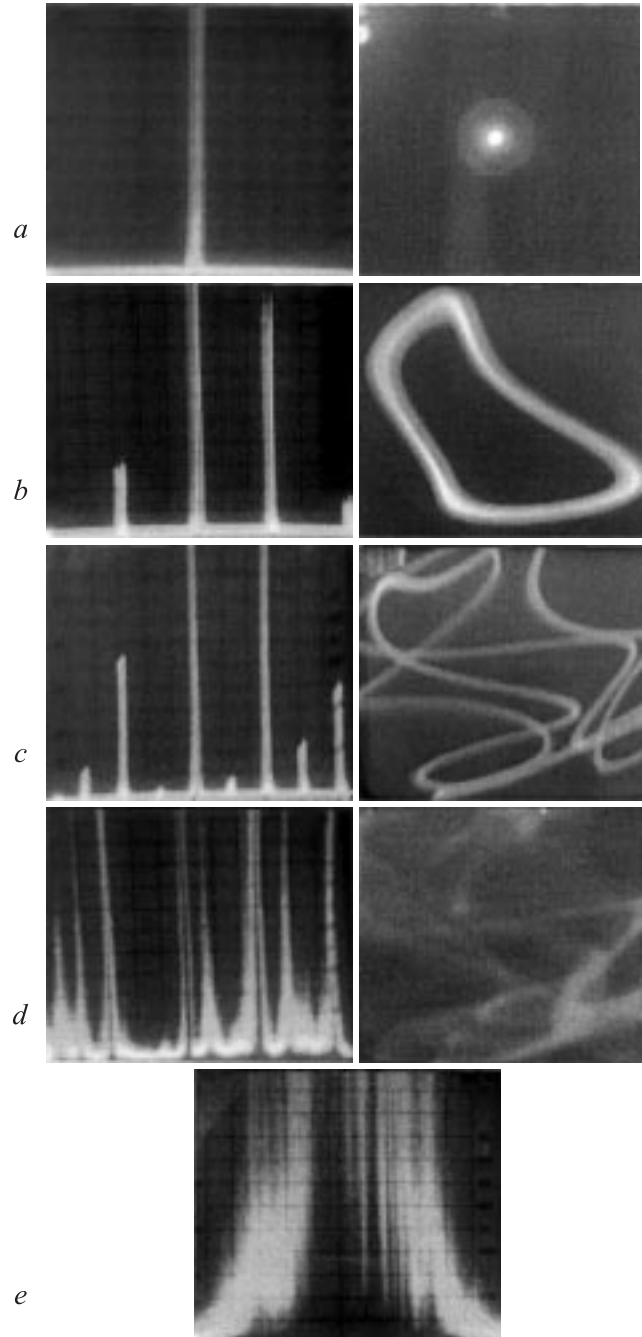


Рис. 6. *a* — режим одиночной генерации, $A = 46$ dB; *b* — режим регулярной автомодуляции, $A = 37$ dB; *c* — режим удвоенного периода, $A = 33$ dB; *d* — режим слабого хаоса, $A = 32.5$ dB; *e* — спектр хаотических колебаний в режиме развитого хаоса, $A = 31$ dB.

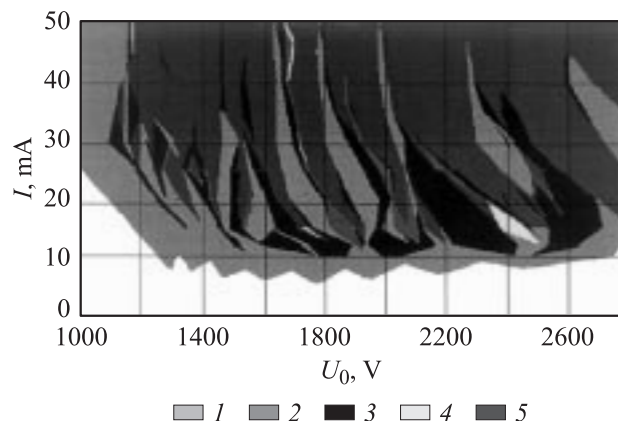


Рис. 7. Карта динамических режимов на плоскости $I_0(U_0)$ для каскадного автогенератора. 1 — одночастотная модуляция, 2 — режим с удвоенным периодом, 3 — автомодуляция, 4 — режим с учетверенным периодом, 5 — хаос.

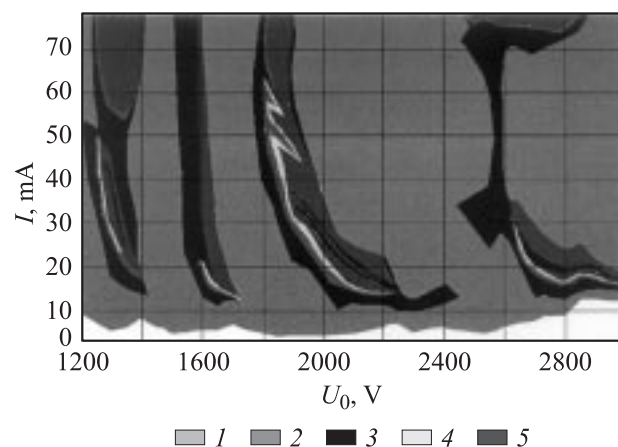


Рис. 8. Карта динамических режимов на плоскости $I_0(U_0)$ для одиночного автогенератора. Обозначения такие же, как на рис. 7.

частота автомодуляции в случае каскадного автогенератора была примерно в два раза меньше, чем в случае автогенератора с одиночным клистроном.

Оценить частоту автомодуляции кристронного автогенератора можно по полному времени запаздывания вдоль замкнутого кольца обратной связи

$$\tau = \frac{L\sqrt{\varepsilon}}{c} + \frac{2l}{v_0} + \frac{2}{\omega_{01}}(3Q_{01} + Q_{in1} + Q_{out1}) + \frac{2}{\omega_{02}}(3Q_{02} + Q_{in2} + Q_{out2}).$$

Здесь L — длина коаксиальной линии в цепи обратной связи клистронов, ε — диэлектрическая постоянная заполнения этой линии, Q_0 — собственная добротность промежуточных резонаторов клистронов, Q_m — нагруженная добротность входных резонаторов, Q_{out} — нагруженная добротность выходных резонаторов клистронов. Расчет с учетом этого соотношения дает для частоты автомодуляции $f_{AM} = 2.5$ МГц, при экспериментальном

значении — $f_{AM} = 3.5$ МГц. Автомодаляция в каскадном клистронном автогенераторе, как в автогенераторе с одиночным клистроном, возникла на падающем участке амплитудной характеристики, обусловленном перегруппировкой электронов, но при значительно меньшем токе пучка или большем затухании в цепи обратной связи.

Переход к хаосу в исследуемом автогенераторе происходил преимущественно по сценарию последовательности бифуркаций удвоения периода. Этот сценарий иллюстрируется фотографиями спектров колебаний и фазовых портретов, когда в качестве управляющего параметра использовалась глубина обратной связи A (рис. 6).

Следует указать, что в отдельных режимах фиксировался переход к хаосу через перемежаемость, квазипериодичку, а также путем жесткого перехода к хаосу из режима одиночной генерации. Карта динамических режимов на плоскости параметров, ток пучка I и ускоряющее напряжение U_0 для каскадного автогенератора приведены на рис. 7. Сравнение с подобной картой для автогенератора с одиночным клистроном (рис. 8) показывает, что режимы развитого хаоса в исследуемом автогенераторе занимают значительно протяженные области, которые при больших токах (выше 40 мА) сливаются по существу в одну область.

Следует также отметить, что измерение мощности и полосы частот для развитого хаоса без подбора режимов работы клистронов показало, что выигрыша ни в мощности, ни в полосе частот каскадный автогенератор из почти идентичных клистронов не дает.

Заключение

Экспериментальные исследования показали, что каскадный клистронный автогенератор с запаздывающей обратной связью отличается низкими значениями пускового тока, обилием областей колебаний, он легко может быть переведен в режим сложных, в том числе хаотических, колебаний, демонстрирует разнообразные сценарии перехода к хаосу. Поэтому этот генератор является исключительно удобным прибором для экспериментального изучения общих закономерностей нелинейной динамики распределенных систем в сверхвысокочастотном диапазоне.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проект № 03-02-16269) и программы „Университеты России — фундаментальные исследования“ (проект № 01.02.021).

Список литературы

- [1] Дмитриев В.С., Жарков Ю.Д., Клоков Д.В., Рыскин Н.М. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 1. С. 105–110.
- [2] Дмитриев А.С., Панас А.И., Старков С.О. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 10. С. 4–26.
- [3] Шалфеев В.Д., Матросов В.В., Корзинова М.В. // Там же. 1998. № 11. С. 44–56.