

## Краткие сообщения

09

### О сценарии перехода к режиму широкополосной генерации в макете низковольтного виркатора

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов, Н.Н. Кузнецов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
410012 Саратов, Россия  
e-mail: StarodubovAV@gmail.com

(Поступило в Редакцию 16 апреля 2012 г.)

Работа посвящена экспериментальному исследованию сценария перехода от узкополосного (одночастотного) режима генерации к широкополосной шумоподобной генерации в макете низковольтного генератора на виртуальном катоде. Рассмотрены экспериментальная установка и используемое контрольно-измерительное оборудование. Проведено детальное экспериментальное исследование динамики изменения временных реализаций сигналов, генерируемых лабораторным макетом при изменении выбранных управляющих параметров. Анализ спектров мощности, временных реализаций выходных сигналов, фазовых портретов и бифуркационной диаграммы, построенных при изменении выбранных управляющих параметров, показал, что переход от режима одночастотной генерации к режиму широкополосной генерации происходит через каскад бифуркаций удвоения периода — реализуется классический сценарий Фейгенбаума.

#### Введение

В последние годы большой интерес вызывает применение хаотических сигналов в системах передачи и обработки информации, в системах связи, радиолокации и др. [1–3]. К основным преимуществам хаотических сигналов относятся широкая полоса частот, обеспечивающая высокую помехоустойчивость по сравнению с узкополосными сигналами, быстро спадающую автокорреляционную функцию, что позволяет использовать их в системах многопользовательских коммуникаций, передавая в одном и том же частотном диапазоне несколько сообщений на основе кодового разделения каналов, а также легкую управляемость характеристиками.

В настоящее время в качестве рабочих частот различных систем связи и телекоммуникаций широко используется сверхвысокочастотный (СВЧ) диапазон электромагнитных волн. Представляет интерес рассмотрение вакуумных источников СВЧ-излучения, которые являются основными элементами мощных систем радиолокации, связи и телекоммуникаций [3]. Такие вакуумные источники мощного СВЧ-излучения, как генераторы с внутренней электронной обратной связью или низковольтные виркатеры, привлекают большое внимание исследователей, поскольку они обладают рядом существенных достоинств. Прежде всего такие источники характеризуются простой конструкцией и легкостью перестройки режимов генерации. Принцип работы подобных устройств основан на формировании в интенсивном электронном потоке внутренней электронной распределенной обратной связи за счет наличия в пространстве дрейфа тормозящего электрического поля и в ряде случаев неоднородного магнитного поля. Ранее в работах [4–

8] теоретически и экспериментально были исследованы выходные характеристики подобных устройств, получено хорошее качественное совпадение теоретически и экспериментально полученных результатов. Однако, несмотря на то, что были рассмотрены различные режимы генерации подобных устройств, вопрос о том, каким образом происходит переход от одного режима в другой, в частности от режима генерации одночастотных колебаний к режиму широкополосной генерации, остался открытым. Ответ на этот вопрос также позволит выявить свойства генерируемого широкополосного излучения, в частности относятся ли генерируемые широкополосные сигналы к хаотическим (т.е. реализуется ли сценарий Фейгенбаума, например) или к шумовым. Таким образом, целью настоящей работы было проведение экспериментальных исследований сценария перехода от режима одночастотной к режиму широкополосной генерации в лабораторном макете широкополосного генератора с внутренней распределенной электронной обратной связью (низковольтный виркатор).

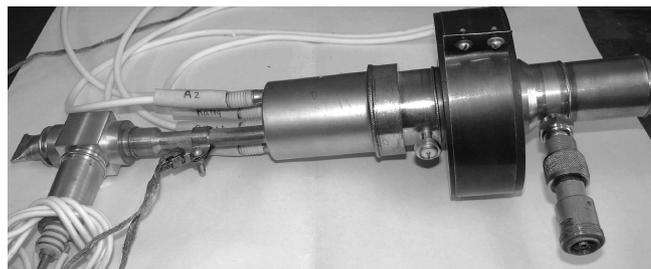


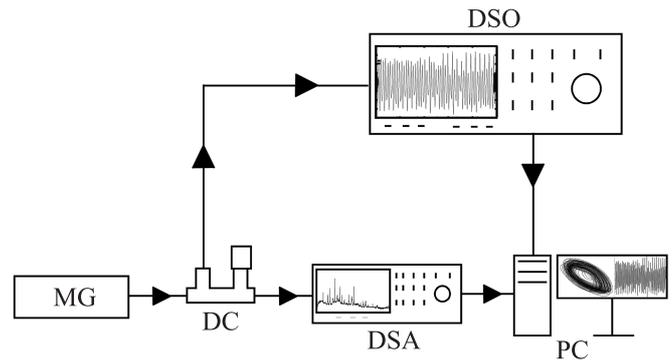
Рис. 1. Фотография исследуемого макета генератора широкополосного шумоподобного излучения.

## Лабораторный макет и экспериментальная установка

В настоящей работе сценарий перехода от режима одночастотной генерации к режиму широкополосной генерации был рассмотрен на примере лабораторного макета низковольтного виркатора. Внешний вид лабораторного макета приведен на рис. 1. Он представляет собой электровакуумный прибор с выходной мощностью до 1 W в диапазоне генерируемых частот до 3 GHz. Для формирования внутренней распределенной обратной связи в подобных приборах используется дополнительное торможение электронного потока за счет подачи тормозящего напряжения  $U_{inh}$  на коллектор ( $U_{inh} < U_0$ , где  $U_0$  — ускоряющее напряжение). Таким образом, в пространстве дрейфа создается электрическое поле, которое тормозит электронный пучок, инжектируемый с катода. Питание экспериментального образца генератора осуществлялось в непрерывном режиме. В качестве основных управляющих параметров были выбраны величина ускоряющего напряжения  $U_0$  и напряжение на коллекторе  $U_{inh}$ . Наблюдение и анализ динамики макета низковольтного виркатора осуществлялись по спектрам мощности и временным реализациям генерируемых сигналов. Для регистрации спектров мощности сигнала использовался цифровой анализатор спектра Agilent Technologies ESA-E Series Spectrum Analyzer E4402B (9.1 kHz–3.0 GHz). Регистрация временных реализаций выходных СВЧ-сигналов осуществлялась с использованием цифрового запоминающего осциллографа реального времени Agilent Technologies Infiniium DSO 81004B Series oscilloscopes.

## Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальное исследование сценария перехода от режима генерации одночастотных колебаний к режиму широкополосной генерации проводилось следующим образом. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Выходной сигнал с макета низковольтного виркатора подавался на вход цифрового анализатора спектра, а также через направленный ответвитель на входной канал цифрового запоминающего высокочастотного осциллографа реального времени. Значение ускоряющего напряжения  $U_0$ , подаваемого на макет низковольтного виркатора, было выбрано равным  $U_0 = 800$  V и далее в ходе эксперимента не изменялось. После этого проводилось пошаговое изменение значения тормозящего напряжения  $U_{inh}$  от момента, при котором наблюдался режим одночастотной генерации ( $U_{inh} \approx 725$  V), до значения, при котором осуществлялся режим широкополосной генерации ( $U_{inh} \approx 780$  V). При каждом значении тормозящего напряжения  $U_{inh}$  осуществлялась регистрация спектра мощности и временной реализации выходного сигнала лабораторного

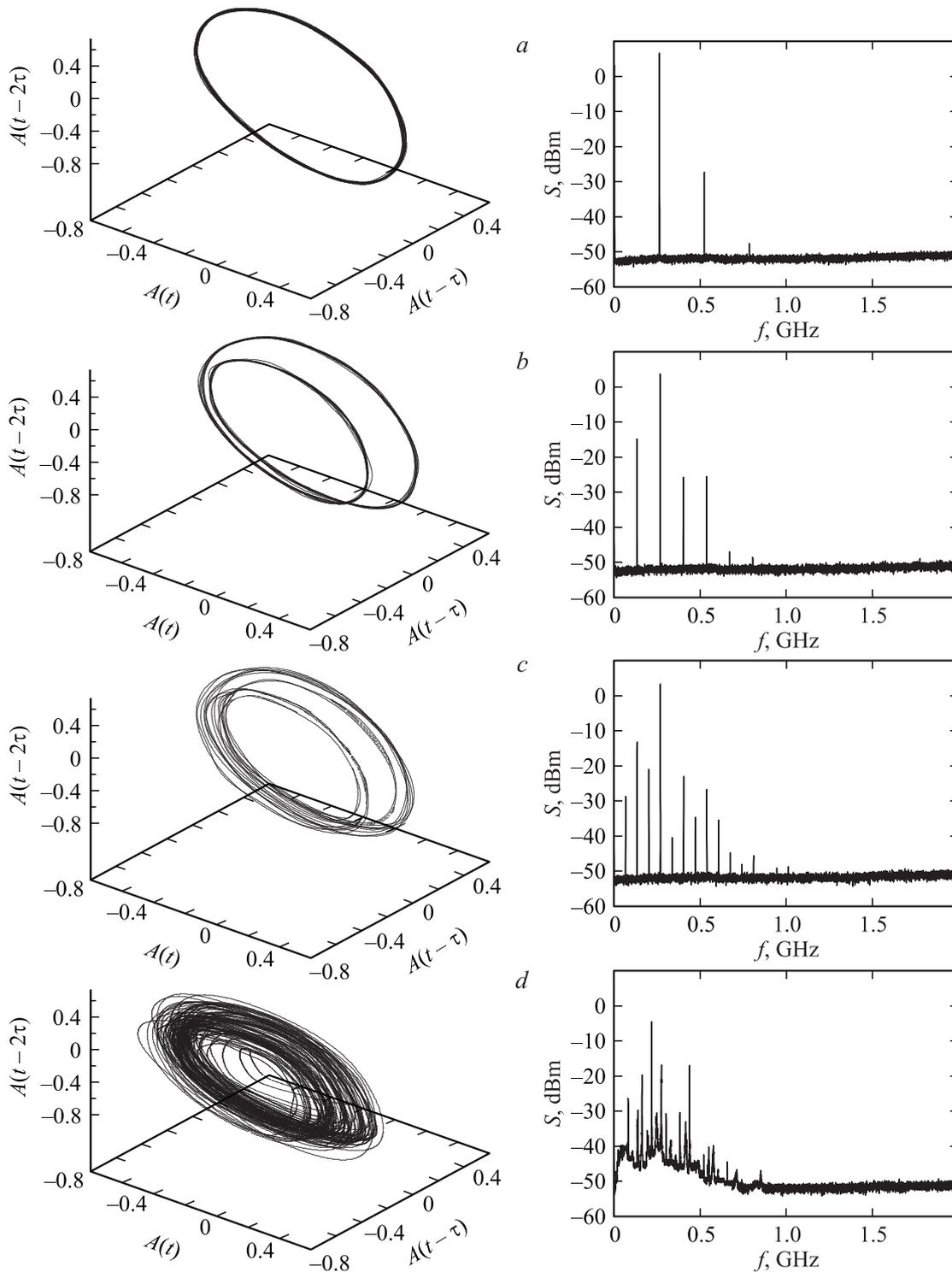


**Рис. 2.** Принципиальная схема экспериментальной установки. MG (microwave generator) — экспериментальный лабораторный макет СВЧ-сверхширокополосного генератора, DC (directional coupler) — направленный ответвитель, DSA (digital spectrum analyzer) — цифровой анализатор спектра, DSO (digital storage oscilloscope) — цифровой запоминающий осциллограф, PC — вычислительная станция.

макета генератора. Оцифровка временной реализации происходила с частотой 40 GHz, длительность каждой временной реализации составила  $50 \cdot 10^{-6}$  s.

Далее, используя оцифрованные временные реализации генерируемых выходных сигналов, были построены фазовые портреты динамики исследуемой системы при каждом значении тормозящего напряжения  $U_{inh}$ . Построение фазовых портретов осуществлялось по методу Такенса [9,10].

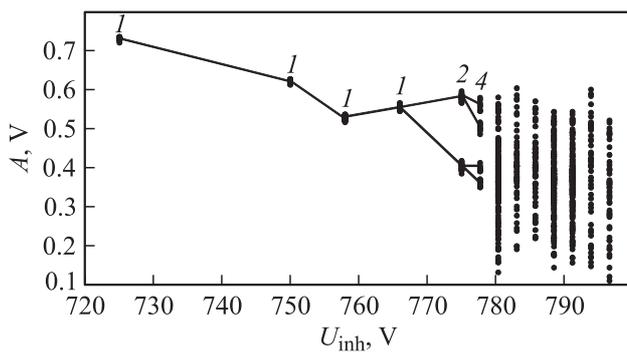
Обработка временных реализаций выходных сигналов позволила построить бифуркационную диаграмму изменения динамики лабораторного макета низковольтного виркатора при изменении значения тормозящего напряжения  $U_{inh}$ . Построение бифуркационной диаграммы осуществлялось следующим образом. В каждой временной реализации был проведен поиск локальных максимумов зависимости значения амплитуды выходного сигнала от времени. Найденный массив значений максимумов наносился на плоскость „значение локального максимума амплитуды сигнала  $A$  — значение напряжения на коллекторе  $U_{inh}$ “. В случае реализации режима периода 1 зависимость амплитуды выходного сигнала от времени носит синусоидальный характер. Локальные максимальные значения амплитуды в данном случае представлены одним значением, которое повторяется через определенный период. Таким образом, на зависимости значения локального максимума амплитуды сигнала  $A_{max}$  от значения напряжения на коллекторе  $U_{inh}$  имеется только одна точка для данного значения ускоряющего напряжения. В случае реализации режима периода 2, временная реализация выходного сигнала характеризуется уже двумя чередующимися локальными максимумами. Таким образом, на зависимости  $A_{max}(U_{inh})$  будет присутствовать уже две точки для данного значения ускоряющего напряжения. Для цикла периода 4 на временной реализации будут наблюдаться уже 4 ло-



**Рис. 3.** Результаты экспериментальных исследований. Фазовый портрет (слева) и спектр мощности (справа), полученные при значении напряжения на коллекторе, равном: *a* —  $U_{inh} = 725$  В, *b* —  $U_{inh} = 775$  В, *c* —  $U_{inh} \approx 777$  В, *d* —  $U_{inh} \approx 790$  В.

кальных максимума, которые будут чередоваться через определенный период, и соответственно на зависимости  $A_{max}(U_{inh})$  будет присутствовать уже четыре точки для данного значения ускоряющего напряжения. В случае реализации широкополосного режима генерации на

бифуркационной диаграмме мы увидим, что значения локальных максимумов амплитуды сигнала практически полностью заполняют промежуток от минимального до максимального значения локального максимума при данном значении  $U_{inh}$ .



**Рис. 4.** Результаты экспериментальных исследований. Бифуркационная диаграмма динамики изменения состояния лабораторного макета генератора при увеличении напряжения на коллекторе: 1 — цикл периода 1, 2 — цикл периода 2, 4 — цикл периода 4.

## Результаты экспериментальных исследований

Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены на рис. 3, 4. На рис. 3 приведены спектры мощности выходного сигнала и фазовые портреты, полученные при увеличении значения тормозящего напряжения. Из рисунка видно, что при увеличении значения тормозящего напряжения исследуемая система демонстрирует каскад бифуркаций удвоения периода, т.е. последовательное появление в спектре сигнала частот  $f_0/2$ ,  $f_0/4$ , где  $f_0$  — основная частота генерации в спектре выходного излучения рассматриваемого лабораторного макета генератора. Хорошей иллюстрацией к вышеописанному являются также представленные изображения фазовых портретов. К сожалению, использование аналоговых источников питания не позволило пронаблюдать более двух каскадов бифуркаций удвоения периода.

На рис. 4 приведена бифуркационная диаграмма зависимости динамики исследуемого лабораторного макета низковольтного виркатора от значения тормозящего напряжения. На бифуркационной диаграмме также отчетливо прослеживается переход к широкополосным хаотическим колебаниям через каскад бифуркаций удвоения периода при увеличении значения напряжения на коллекторе  $U_{inh}$ .

## Выводы

Таким образом, в настоящей работе проведено экспериментальное исследование эволюции динамики низковольтного виркатора от режима генерации одночастотного сигнала до режима широкополосной генерации при изменении одного из управляющих параметров, а именно величины напряжения на коллекторе. Установлено, что при определенном значении ускоряющего напряжения в процессе перехода к режиму широкополосной ге-

нерации в макете низковольтного виркатора реализуется каскад бифуркаций удвоения периода, другими словами, реализуется классический сценарий перехода к хаосу — сценарий Фейгенбаума. Последнее позволяет установить то, что рассматриваемый режим широкополосной генерации при данных значениях управляющих параметров экспериментальной установки является принципиально хаотическим.

Авторы выражают благодарность А.С. Фокину за помощь в проведении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 10-02-00256-а и 12-02-90022-Бел\_а).

## Список литературы

- [1] Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
- [2] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [3] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1, 2. М.: Физматлит, 2003, 2004.
- [4] Коллективная монография „Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот“. Т. 2 / Под ред. Д.И. Трубецкого, А.А. Короновского, А.Е. Храмова. М.: Физматлит, 2009.
- [5] Калинин Ю.А., Куркин С.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. Вып. 9. С. 53–55.
- [6] Калинин Ю.А., Стародубов А.В. Перспективные сверхширокополосные генераторы хаоса в диапазоне высоких и сверхвысоких частот. Краткие сообщения по физике. 2010. Т. 37. № 5. С. 3–5.
- [7] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 139–142.
- [8] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Лёвин Ю.И., Храмов А.Е. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 1. С. 51–64.
- [9] Takens F. Dynamical Systems and Turbulence / Ed. by D. Rand, L.-S. Young. Berlin: Springer, 1981. P. 366.
- [10] Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001.