



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**



**Радиофизический
факультет**



**8-я Международная научно-практическая конференция
Актуальные проблемы радиофизики
АПР 2019**

Сборник трудов конференции



**РОССИЙСКИЙ ФОНД
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**1-4 октября 2019 года
г. Томск**

Бифуркационные переходы в системе двух СВЧ автогенераторов при резонансной взаимной связи

Новиков Сергей Сергеевич

Томский государственный университет

E-mail: nss@sibmail.com

ВВЕДЕНИЕ

Хаотическая динамика в автоколебательных структурах часто возникает за счет неустойчивости некоторых базовых регулярных движений и является результатом специфических взаимодействий динамических переменных системы, являющихся компонентами движения. Наиболее эффективным методом исследования устойчивости динамических систем, допускающим аналитические решения, является исследование локальной устойчивости. При этом результат указанных взаимодействий, в силу линейности задачи, имеет аддитивный характер и может, в силу этого, найти достаточно простую физическую интерпретацию. В работах [1,2] теоретически и экспериментально показано, что в системе двух одинаковых автогенераторов с «сильными» резонансными свойствами взаимной связи, синхронный режим теряет устойчивость. Существенная особенность модели состоит в том, что каждый из автогенераторов в автономном режиме является абсолютно стабильной одночастотной системой. Позднее в работе [3] нами сформулирован достаточно простой и универсальный критерий разрушения когерентности и перехода к хаотической динамике. Управляющими параметрами этого критерия являются параметры пассивной цепи связи, доступные для изменения в широких пределах.

Как показывает опыт [5-8], колебательные режимы системы связанных автогенераторов при изменении управляющих параметров в процессе разрушения когерентности и переходе к хаотической динамике демонстрируют бифуркационные переходы, имеющие как характерные признаки классических сценариев, так и особенности, присущие базовым синхронным колебаниям. Сопоставление этих движений на основе представлений о их устойчивости или неустойчивости дает возможность составить феноменологическую картину поведения системы связанных автогенераторов, выявить характерные (детерминистские) признаки колебательных явлений в процессе развития динамического хаоса.

В настоящей работе экспериментально исследуется характер бифуркационных изменений колебательных режимов в системе двух СВЧ автогенераторов в области сильных резонансных связей.

КРИТЕРИЙ РАЗРУШЕНИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ

На рис.1 показана система двух автогенераторов общего вида. Автогенераторы с активными элементами

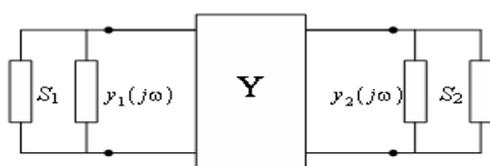


Рис.1. Система двух автогенераторов

$S_k(U_k)$ и резонансными системами $y_k(j\omega)$ связаны через пассивный четырехполюсник Y , содержащий общую диссипативную нагрузку или другие диссипативные элементы. При близости парциальных частот в системе могут существовать синхронные колебания; в случае равенства частот и полной симметрии системы им соответствуют разности фаз $\Delta\varphi = 0, \pi$; эти колебания являются базовыми.

Ранее, в сообщении [1] и позднее в работах [3,5,7], в том числе для конкретных схем, было показано, что при определенных и достаточно сильных резонансных свойствах связи когерентные режимы теряют устойчивость. Как показали экспериментальные исследования [5,6,8], это приводит к разрушению когерентности и переходу системы в режим динамического хаоса. При этом отмечалось, что указанными резонансными свойствами обладают обычные, в том числе простейшие схемы соединения автогенераторов.

Так, в работе [4] было показано, что проводимость связи автогенераторов при минимальных ограничениях в общем виде описывается формулой:

$$y_{12} = \frac{-2s}{(\cos \alpha_s - 2s \cos \theta) + j \sin \alpha_s} g_0, \tag{1}$$

где s и α_s модуль и аргумент элемента матрицы рассеяния $S_{12} = s \exp(-j\alpha_s)$, g_0 – соответствует проводимости входных линий четырехполюсника, θ – параметр несимметрии, его смысл определен ниже. Величина s лежит в интервале (0-0.5), причем верхнее значение соответствует отсутствию в четырехполюснике Y каких-либо дополнительных диссипативных элементов, кроме общей согласованной нагрузки. Если считать, что фазовый параметр α_s зависит от частоты, то проводимость связи $y_{12}(j\omega)$ обладает значительными резонансными свойствами. Эти свойства описываются параметром

$$C_{12} = d(\text{Im } y_{12}(j\omega))/d\omega|_{\omega_0} . \tag{2}$$

Действительно, из (1) непосредственно следует, что в областях вблизи $\alpha_s \approx 2\pi, 4\pi, \dots$ при $s \rightarrow 0.5$ и $\theta \rightarrow 0$ параметр C_{12} положителен ($C_{12} > 0$) и может достигать теоретически сколь угодно больших значений. Аналитический критерий разрушения когерентности, сформулированный в работе [3], имеет вид:

$$C_{12} > C , \tag{3}$$

где $C_1 = C_2 = C$ – емкости колебательных систем $y_k(j\omega)$ автогенераторов. В [3] также показано, что при выполнении (3) неустойчивость развивается одновременно по двум направлениям. Эти направления соответствуют в фазовом пространстве противоположным возмущениям фаз колебаний и противоположным возмущениям их амплитуд.

ЦЕПЬ СВЯЗИ С РЕЗОНАНСНЫМИ СВОЙСТВАМИ

На рис.2 показан профиль частотных характеристик параметра связи $y_{12}(j\omega)$, соответствующий формуле (1). Сильная резонансная связь реализуется в узких частотных интервалах, где $\text{Re}y_{12} < 0$. На вставке этого рисунка изображен простейший вариант цепи связи, в полной мере демонстрирующий указанные резонансные свойства. В соответствии с этой схемой автогенераторы соединяются друг с другом и с общей нагрузкой g_n отрезками линии передачи с электрическими длинами θ_1 и θ_2 и с волновой проводимостью g_0 . Для

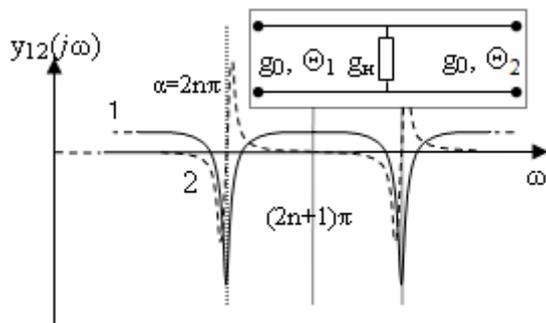


Рис.2 Резонансные свойства проводимости связи, 1 – $\text{Re}y_{12}$; 2 – $\text{Im}y_{12}$

данной схемы $\alpha = \theta_1 + \theta_2 = \theta_2 - \theta_1 - \omega\tau$, где τ – время распространения сигнала в канале связи; $\theta = \theta_2 - \theta_1$ – параметр несимметрии; $g_n = 2g_0$ – проводимость согласованной общей нагрузки. Перечисленные параметры достаточно легко изменяются в условиях реального эксперимента и позволяют управлять параметром C_{12} в широких пределах. Особенно эффективной настройкой является перестройка собственных частот автогенераторов; прецизионное управление частотами в области резонанса связи позволяет выявить тонкие особенности бифуркационных изменений колебательных режимов системы непосредственно при переходе к хаотической динамике.

Еще одним весьма информативным элементом регулировки является введение в отрезки линии канала связи погонных потерь; последние непосредственно уменьшают величину параметра s , расширяют резонансные области и снижают значение параметра C_{12} . Наконец, введение несимметрии θ в канал связи также уменьшает параметр C_{12} .

Указанные сильные резонансные свойства взаимной связи автогенераторов реализуются также в схемах, представляющих собой комбинации отрезков линии передачи и нагрузок: антисимметричных схемах, схемах со многими нагрузками в волновом канале связи, а также в схемах, включающих реактивные элементы [7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БИФУРКАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ

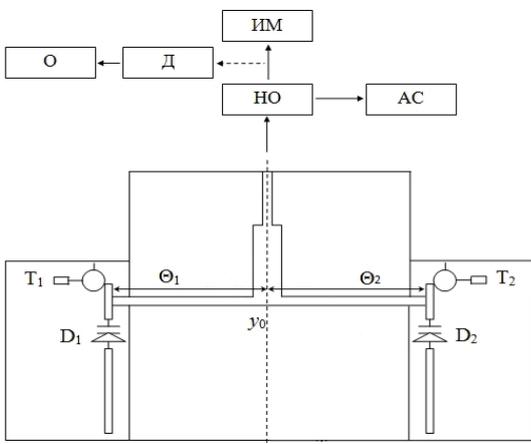


Рис.3. Экспериментальная схема

На рис.3 показана исследуемая схема с измерительным оборудованием. СВЧ автогенераторы имеют идентичные конструкции в виде отдельных плат на транзисторах T1,2 типа КТ640А2. Варикапы D1,2 типа АП320 включены в полосковый резонатор генераторов и обеспечивают перестройку частоты в диапазоне 2.5÷3.1 ГГц. Важно подчеркнуть, что автогенераторы в автономном режиме во всем диапазоне перестройки демонстрируют регулярный одночастотный режим. Автогенераторы соединяются друг с другом по T-образной схеме одинаковыми отрезками воздушной несимметричной полосовой линии. Это обеспечивает малые погонные потери волнового канала связи и близость параметра s к предельному значению 0.5, что гарантирует выполнение условия (3). Регулировка параметра s в пределах 0.5÷0.38 осуществлялась путем введения в воздушный зазор линии

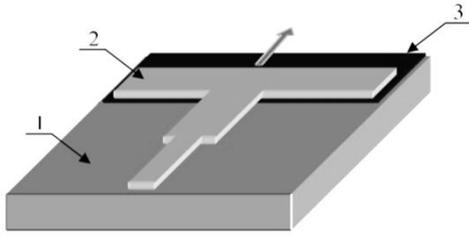


Рис.4. Схема введения потерь в линию связи; 1 – металлическое основание, 2 – полоска линии, 3 – лист проводящей бумаги

синхронных режимах, в том числе, в синфазном и противофазном режимах.

На рис.5-7 представлены столбцы осциллограмм огибающих (левый столбец) и соответствующих спектров (правый столбец) при различных настройках частот автогенераторов или параметров цепи связи.

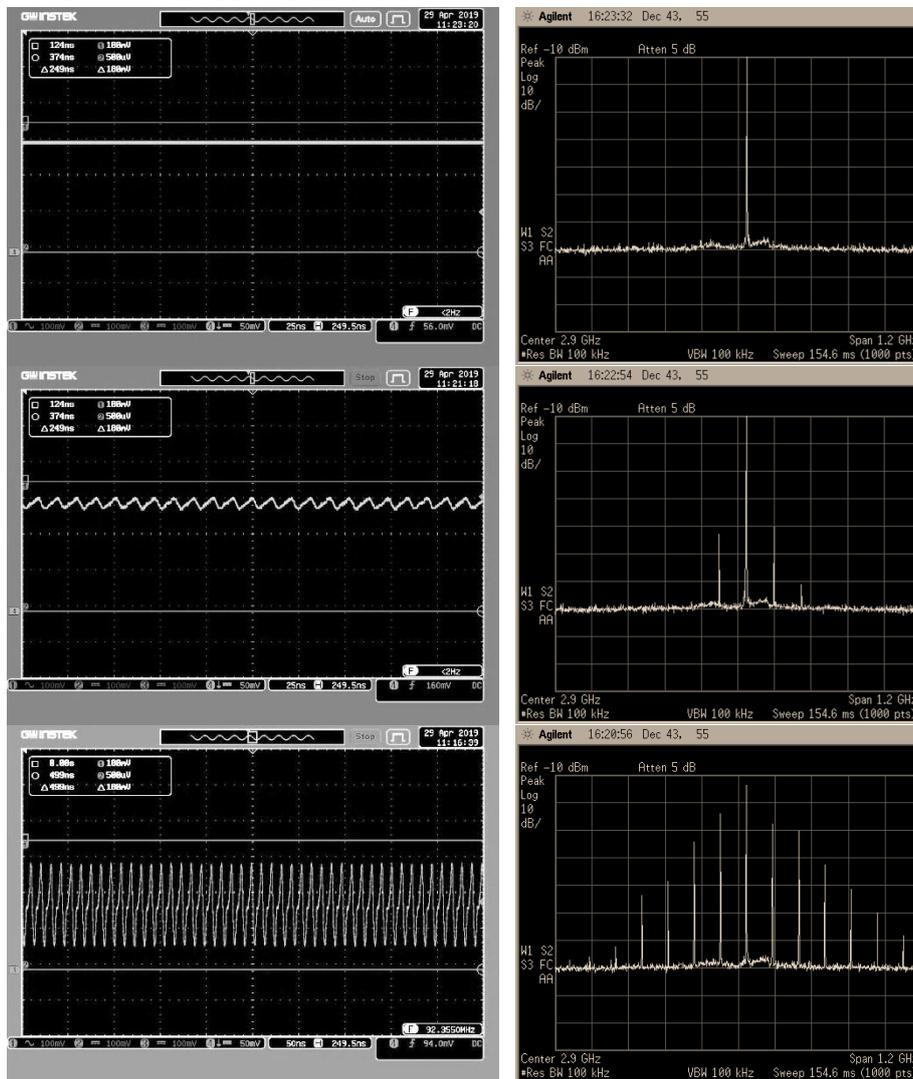


Рис.5. Огибающие и спектры сигналов при уменьшении погонных потерь

Далее степень неустойчивости возрастает, и глубина [авто]модуляции амплитуд генераторов и разности фаз увеличивается; период модуляции занимает около 20÷25 периодов высокочастотных колебаний. Спектр выходного сигнала остается дискретным, но становится более насыщенным, что отражает нелинейный характер взаимодействия колебаний генераторов. При некоторых достаточно малых потерях модуляционный режим

тонкой поглощающей бумаги (рис.4). Платы генераторов и цепи связи соединялись с помощью стандартных коаксиально-полосковых соединений.

Сигнал из канала общей нагрузки через направленный ответвитель (НО) подавался на анализатор спектров (АС) Agilent E4405E. Для наблюдения огибающих колебаний в общей нагрузке СВЧ сигнал детектировался широкополосным детектором Д и подавался на осциллограф Agilent DSO5052A (O); полоса детекторов составляла 3÷10 ГГц. Измеритель мощности (ИМ) использовался на промежуточных этапах эксперимента для тестового контроля параметров автогенераторов в автономном режиме и для оценки уровня выходной мощности в

синхронных режимах, в том числе, в синфазном и противофазном режимах. Нижней горизонтальной линией отмечен нулевой уровень сигнала в общей нагрузке, он соответствует противофазному режиму колебаний генераторов. Верхней линией отмечен уровень синфазных колебаний, при которых мощности генераторов суммируются в общей нагрузке.

Рис.5 отражает результаты эксперимента при последовательном (сверху вниз) уменьшении потерь в канале связи, то есть при увеличении параметра s ; собственные частоты автогенераторов при этом различаются на 20-30 МГц. Сначала, при максимальных потерях ($s \approx 0.38$) устойчив почти синфазный синхронный режим. Уровень мощности в общей нагрузке при этом (с учетом введенных потерь) равен сумме мощностей генераторов. По мере уменьшения потерь синфазный режим теряет устойчивость. Сначала возникает слабая неустойчивость типа периодической модуляции.

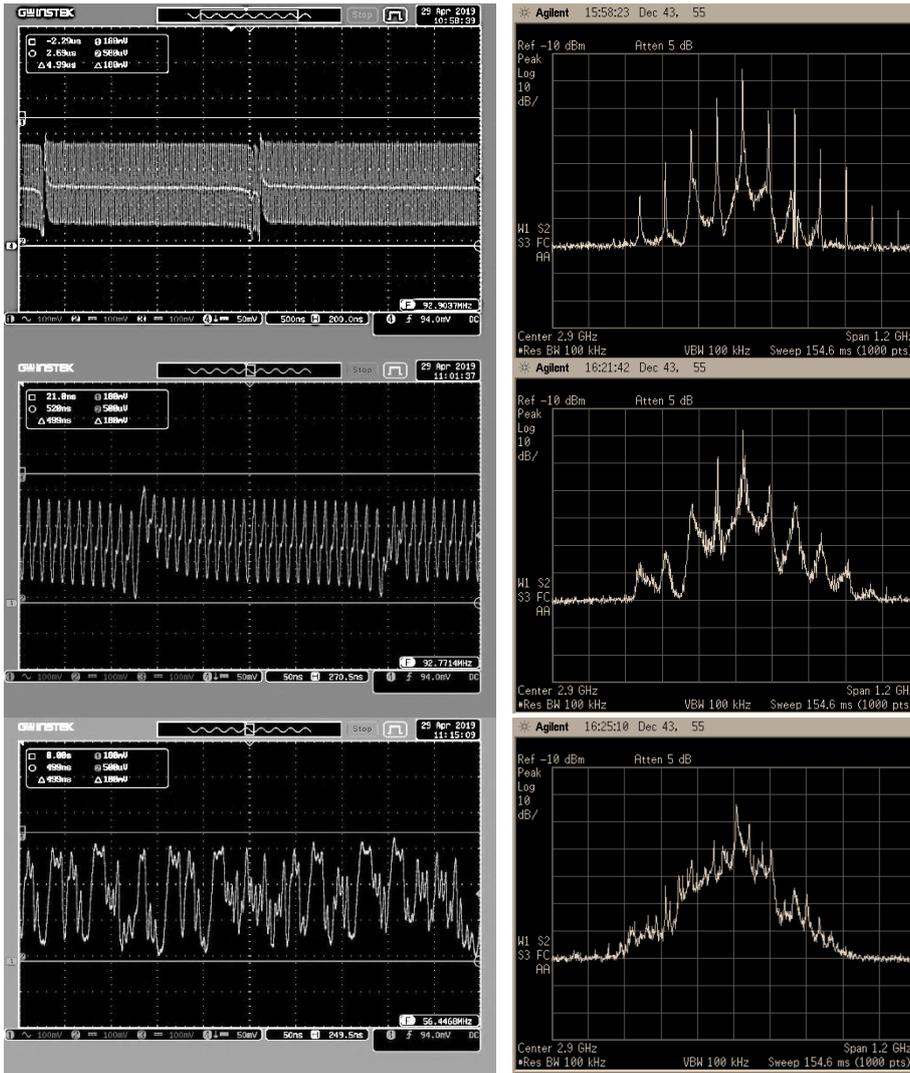


Рис.5. Огибающие и спектры сигналов при уменьшении погонных потерь (продолжение)

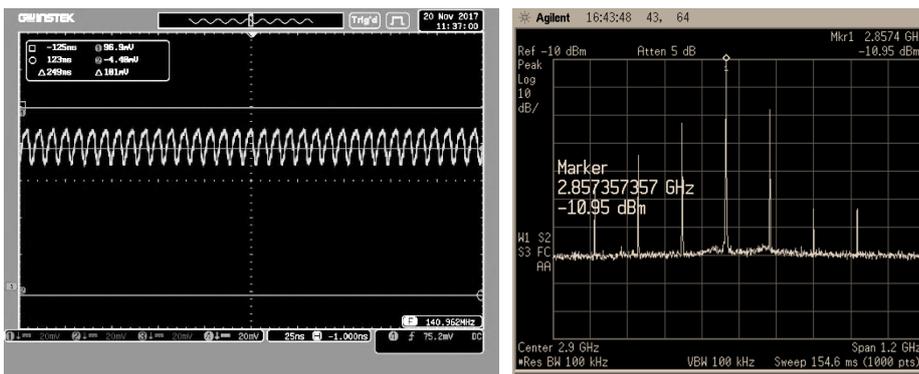


Рис.6. Огибающие и спектры сигналов при бифуркациях удвоения периода

сигнала содержит повторяющиеся фрагменты, что указывает на динамический характер процессов. Этим фрагментам, по-видимому, соответствует набор «дискретных пиков» спектра.

Здесь следует отметить достаточно очевидную, но, вместе с тем, важную с феноменологической точки зрения особенность рассматриваемой модели: динамическими переменными здесь выступают не сами ВЧ колебания, а их огибающие, то есть их амплитуды и разности фаз. Такой взгляд вполне соответствует

приобретает черты перемежаемого хаоса. «Ламинарная» стадия отличается длительным, почти неизменным уровнем автомодуляции выходного сигнала. На данной осциллограмме рис.5 время развертки составляет 500 ns/дел против 50 ns/дел на предыдущей; в экспериментах удавалось зафиксировать длительность стадий до нескольких сотен периодов модуляции. Широкий размах сигнала указывает на значительное изменение разности фаз колебаний. Специальные исследования (см. [8]) показывают, что изменения огибающих амплитуд автогенераторов ламинарной стадии происходят в противофазе; этот факт находится в согласии с теоретическим прогнозом о возможной неустойчивости амплитудных направлений.

В конце ламинарной стадии, когда уровень выходного сигнала почти нулевой (то есть ВЧ колебания почти в противофазе) возникает быстрый «турбулентный» возврат колебаний в синфазную область. Турбулентная стадия вносит в динамику элемент нерегулярности: спектр колебаний, наряду с дискретными компонентами, приобретает характерный шумовой пьедестал. Далее, с увеличением параметра s длительность ламинарной стадии сокращается. Наконец, ламинарная стадия исчезает и процессы изменения амплитуд и разности фаз теряют признаки периодичности. Можно заметить, что огибающая выходного

формализму математического аппарата медленно меняющихся комплексных амплитуд и вытекающих из него следствий и физических представлений об устойчивости амплитуд и фаз.

Переход к динамическому хаосу через бифуркации удвоения периода модуляционных биений также характерен для изучаемой системы и наблюдается в диапазоне частот 100-150 МГц при сближении частот автогенераторов. На рис.6 показана типичная последовательность изменений огибающих сигнала в общей

нагрузке и его спектра при бифуркациях удвоения периода биений. Каждая бифуркация сопровождается появлением в исходном спектре промежуточных составляющих. Обычно две, реже – три бифуркации наблюдается в узкой полосе расстроек (порядка 10-15 МГц) частоты одного генератора относительно другого. При этом характер изменения огибающей и плотность спектра существенно зависят от точности настройки системы на резонанс связи. Из последней осциллограммы на рис.6 можно видеть, что мгновенная разность фаз колебаний автогенераторов эпизодически «посещает» области с разностями фаз $\Delta\varphi=0,\pi$, но, вследствие неустойчивости, не задерживается там. Следует также отметить, что в пределах одной хаотической реализации существует ряд повторяющихся переходов от почти синфазных колебаний к почти противофазным.

Рис.7 представляет еще один динамический вариант, когда система находится вблизи границы устойчивости одного из возможных когерентных колебаний и попеременно автоматически переходит из режима когерентных колебаний в хаотический режим и наоборот. Система здесь генерирует как бы пуги хаотических колебаний, которые по мере изменения частоты одного из генераторов расширяются или разваливаются, формируя непрерывный

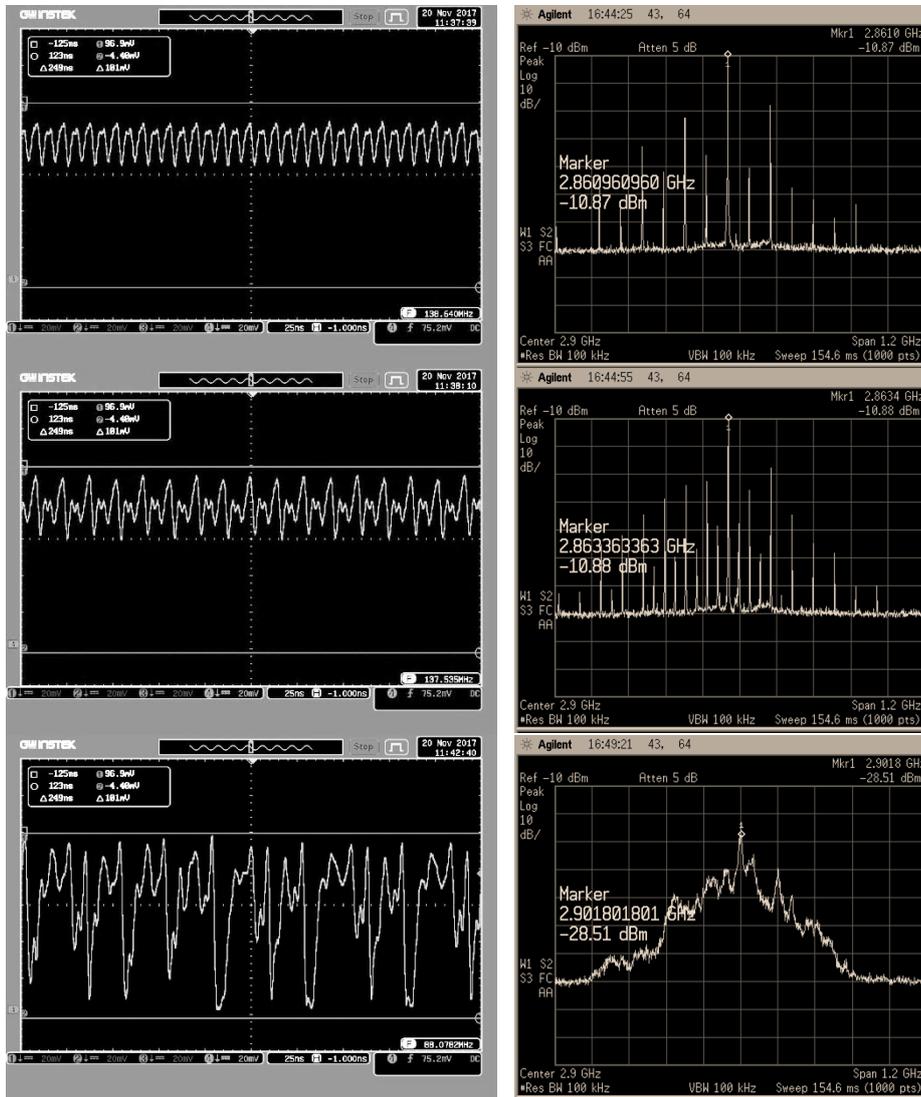


Рис.6. Огибающие и спектры сигналов при бифуркациях удвоения периода (продолжение)

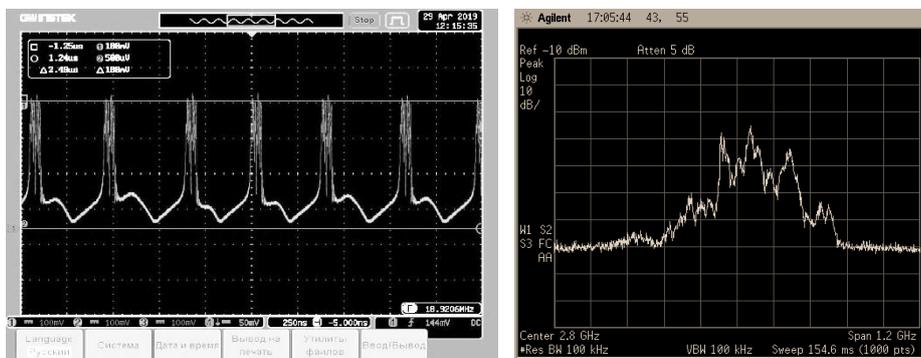


Рис.7. Огибающие и спектры сигналов при автопереходе

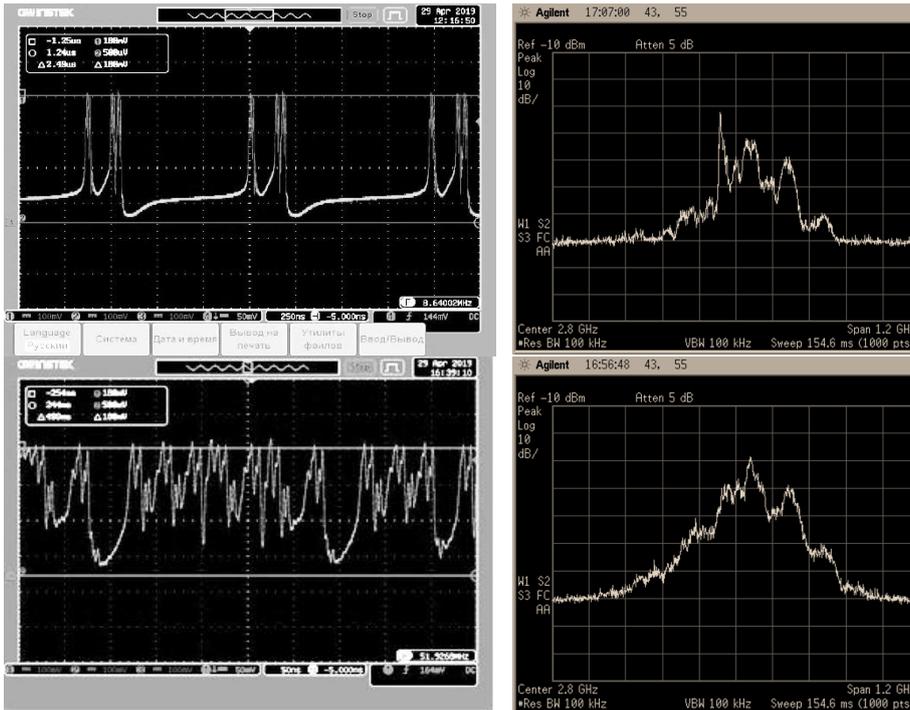


Рис.7. Огибающие и спектры сигналов при автопереходе (продолжение)

хаотический процесс. Из осциллограмм следует, что хаотический процесс формируется в области разностей фаз, содержащей неустойчивый синфазный режим. Когерентные, почти противофазные колебания на некотором временном интервале оказываются устойчивыми, однако степень их устойчивости невелика и снижается, так что хаотический режим становится преобладающим. Подобные автопереходы реализуются в очень узкой области частотных расстройк (порядка 4-5МГц); их наблюдение и регистрация оказались возможными только при применении для смещения варикапов высокоточных регулируемых источников напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, система двух СВЧ автогенераторов в области параметров сильной резонансной связи демонстрирует разнообразные бифуркационные изменения колебаний и их спектров при разрушении когерентности и переходе к динамическому хаосу. Показано, что в исследуемой модели реализуются классические бифуркационные сценарии перехода к хаосу, рассмотрены их феноменологические особенности. Экспериментально показано, что в структуре хаотических колебаний имеются эпизодически повторяющиеся фрагменты колебательных движений, что указывает на их динамический характер. Обнаружены и зарегистрированы процессы, сопровождающиеся автоматическими переходами между элементами синхронных движений и хаотической динамики; автопереходы реализуются в очень узкой области параметров (частот) и, по-видимому, возникают на границе устойчивости базовых синхронных режимов.

Список публикаций:

[1] Novikov S. S., *Dynamic and static instabilities of coherent self-oscillating system with controlled couplings*, Proc. 14-th Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia, pp. 427-430, 2006.
 [2] Novikov S. S., Usjukevitch A. A. *Chaotic oscillation in the auto-oscillator system with resonant couplings*, Proc. 16-th Int. Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia, pp. 512-515, 2010.
 [3] Новиков С.С., Усюкевич А.А. // Изв. вузов. Физика. 2012. Т.55. №11. С. 51-56.
 [4] Майдановский С.А., Новиков С.С. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48. № 5. С. 595-600.
 [5] Новиков С. С., Усюкевич А. А. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20. №5. С. 16-30.
 [6] Novikov S. S., Usjukevitch A. A. *Bifurcation transitions to the dynamic chaos mode in mutual coupled microwave oscillators system*, Proc. 24-th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, Crimea, Russia, pp.107-108, 2014.
 [7] Novikov S. S., Usjukevitch A. A. *Coupling circuits for microwave self-oscillator systems with chaotic dynamics*, Proc. 25-th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, Crimea, Russia, pp.525-526, 2015.
 [8] Novikov S. S. *Hyper-chaos Mode in the Mutual Coupled and Partial Stable Microwave Oscillators System*. Progress In Electromagnetics Research Symposium — Spring (PIERS), St Petersburg, Russia, 22-25 May. pp. 1065-1069, 2017.