



## РАЗРУШЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО РЕЖИМА В СИСТЕМЕ ДВУХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ ПРИ СИЛЬНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ВЗАИМНЫХ СВЯЗЯХ

*С. С. Новиков, А. А. Усюкевич*

Проверена гипотеза о разрушении когерентного режима в системе двух взаимосвязанных СВЧ автогенераторов, каждый из которых в автономном режиме генерирует стабильные одночастотные колебания. Экспериментально показано, что при сильных резонансных связях синхронные колебания неустойчивы, в результате чего система переходит в режим динамического хаоса.

*Ключевые слова:* Устойчивость, синхронизация, резонанс параметра связи, динамический хаос.

### Введение

Явления внешней и взаимной синхронизации периодических движений в системах связанных автогенераторов с парциально одночастотными колебаниями относятся к числу наиболее разработанных проблем теории колебаний [1–4]. Аналогичные по смыслу задачи существуют в теории динамических систем, демонстрирующих движение в форме динамического хаоса, например, [5–8]. Интерес к этой проблеме обусловлен возможностью использования генерирующих систем с динамическим хаосом как источников широкополосных электрических (электромагнитных) сигналов для информационных систем как радио, так и оптического диапазонов [9,10]. Несмотря на определенную феноменологическую идентичность указанных явлений, получение синхронного хаотического отклика на приемной стороне радиоканала СВЧ диапазона представляет собой более сложную техническую проблему, что вызвано высокой чувствительностью хаотической динамики активных систем (приемника и передатчика) к начальным условиям и к неидентичности параметров. Последнее связано, по-видимому, с тем, что механизм локальной неустойчивости траекторий в фазовом пространстве для большинства известных схем формируется за счет взаимодействия динамических переменных системы на общей нелинейности. С этой точки зрения, более предпочтительными являются системы, колебательные степени свободы которых имеют собственные нелинейности; простейшими из

них являются системы взаимосвязанных по основному тону автогенераторов. В таких системах существование режимов синхронных колебаний определяется устойчивостью соответствующих фазовых соотношений и непосредственно не связано с нелинейностью активных элементов автогенераторов.

Принято считать, что взаимная связь автоколебательных систем с близкими частотами всегда приводит к возникновению когерентных колебаний с тем или иным распределением фаз и амплитуд. Оптимальными, с точки зрения устойчивости, являются так называемые резистивные связи [1,11], которые имеют место при наличии в цепях (каналах) связи диссипативных элементов – нагрузок. Однако реальные каналы связи могут обладать резонансными свойствами, оказывающими существенное влияние на характеристики синхронных движений [11–13]. В [4,11] при исследовании несимметричных систем связанных СВЧ автогенераторов показано, что сильное резонансное взаимодействие является характерным признаком многогенераторных систем, цепи связи которых построены на основе волновых каналов, не содержащих, вообще говоря, избирательных элементов. Влияние этих свойств на устойчивость синхронных колебаний системы двух автогенераторов в достаточно общей постановке было проведено в [4], где были получены аналитические оценки, указывающие на возможность потери устойчивости когерентного режима. В работе [14] было высказано предположение о динамическом характере неустойчивости и о невозможности существования синхронного режима при сильных резонансных связях; в [15,16] обсуждались некоторые экспериментальные результаты.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка гипотезы о разрушении когерентности в системе двух взаимосвязанных СВЧ автогенераторов при сильных резонансных свойствах канала связи.

## 1. Неустойчивость синхронных режимов в системе автогенераторов с резонансной взаимной связью

Влияние резонансных свойств канала взаимной связи на устойчивость когерентных движений в системе двух автогенераторов может быть рассмотрено с помощью модели общего вида (рис. 1). Автогенераторы представлены комплексными (усредненные по первой гармонике) проводимостями активных элементов  $S_k(U_k)$  и комплексными проводимостями колебательных систем  $y_k(j\omega)$ ,  $k = 1, 2$ . Колебательные системы, одночастотные (в парциальном смысле), обладают достаточно высокими избирательными свойствами, так что в автогенераторах в автономном режиме развивается почти гармонический колебательный процесс. Цепь взаимной связи  $Y$  содержит диссипативные элементы-нагрузки и задается коэффициентами матрицы проводимостей  $y_{km}(j\omega)$ . При близости парциальных частот в системе могут существовать синхронные колебания; в случае равенства частот и полной симметрии системы им соответствуют разности фаз  $\Delta\varphi = 0, \pi$ .

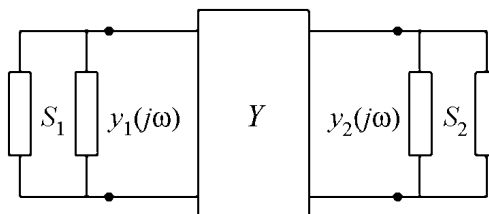


Рис. 1. Система двух автогенераторов

Определим параметры четырехполюсника  $Y$ . Полагаем, что при когерентном возбуждении его полюсов волнами одинаковых амплитуд с некоторой разностью фаз  $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \Theta$  ( $|\Theta| < \pi/2$ ) мощности падающих волн полностью поглощаются некоторой общей нагрузкой (или системой нагрузок), так что цепь со стороны обоих полюсов согласована; угол  $\Theta$  называется параметром несимметрии. При разности фаз  $\Delta\varphi = \pi + \Theta$  коэффициенты отражения  $\Gamma_k$  в общем случае отличны от нуля. Так как в последнем режиме мощность в указанные нагрузки не поступает, то естественно считать, что модули коэффициентов  $\Gamma_k$  описывают дополнительные, кроме общих нагрузок, диссипативные элементы. Несложно показать, что данные условия соответствуют следующей связи параметров рассеяния цепи  $Y$ :

$$S_{kk} = -S_{12} \exp [j(-1)^m \Theta] = 0.5\Gamma_k, \quad m \neq k. \quad (1)$$

(Здесь учитывается, что цепь связи является пассивной и взаимной:  $S_{12} = S_{21}$ .) Если дополнительные диссипативные нагрузки отсутствуют, то  $|\Gamma_k| = 1$ ; случай  $\Gamma_k = 0$ , очевидно, соответствует полной развязке генераторов. Таким образом, величина волнового параметра  $S_{12}$  лежит в интервале  $0 \leq |S_{12}| = s \leq 0.5$ , причем верхнее значение соответствует предельной (сильной) связи автогенераторов. Условиям (1) удовлетворяют все возможные варианты трехдецибелльных делителей-сумматоров, используемых в технике распределения мощностей [11].

Автоколебательные решения и критерии их устойчивости формулируются в терминах токовых характеристик, при этом четырехполюсник для указанных выше условий описывается параметрами матрицы проводимости  $y_{kk}(j\omega)$ ,  $y_{12}(j\omega)$ , а именно:

$$y_{11} = g_0 - y_{12} \exp(j\Theta), \quad y_{22} = g_0 - y_{12} \exp(-j\Theta). \quad (2)$$

Вводя  $S_{12} = s \exp(-j\alpha)$  и учитывая (1), получаем для обобщенной схемы выражение проводимости связи

$$y_{12} = \frac{-2s}{(\cos \alpha - 2s \cos \Theta) + j \sin \alpha} g_0. \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  описывает фазовые свойства параметра связи; проводимость  $g_0$  формально связана с нормировкой матриц четырехполюсников, практически она отождествляется с волновой проводимостью входных линий передачи.

Если полагать, что аргумент волнового параметра  $S_{12}$  зависит от частоты  $\alpha(\omega)$ , то соотношение (3) в полной мере описывают резонансные свойства проводимости связи  $y_{12}(j\omega)$ . Действительно, в некоторой малой области частот вблизи  $\alpha = 2n\pi$  имеем  $\operatorname{Re} y_{12} < 0$  и  $|\operatorname{Im} y_{12}| < |\operatorname{Re} y_{12}|$ . При данном (первом) типе резистивной связи в указанной области устойчивы синфазные или близкие к ним синхронные колебания автогенераторов [1,4,11]. В случае симметричной системы ( $\Theta = 0$ ) при  $s \rightarrow 0.5$  эта область сужается и в пределе стягивается в точку. Введение несимметрии ( $\Theta \neq 0$ ) расширяет область «резонанса» параметра  $y_{12}(j\omega)$ .

В области частот вблизи  $\alpha = (2n + 1)\pi$ , где  $|\operatorname{Im} y_{12}| < |\operatorname{Re} y_{12}|$ , имеем резистивную связь второго типа  $-\operatorname{Re} y_{12} > 0$ ; при данной связи устойчивы противофазные или близкие к ним колебания. В случае антисимметричной системы ( $\Theta = \pi$ )

при  $s \rightarrow 0.5$  имеем также резонансное поведение параметра  $y_{12}(j\omega)$ . Как видим, резонансный характер проводимости взаимной связи является общим свойством симметричных и антисимметричных схем.

Важным элементом изучения динамических систем является анализ локальной устойчивости стационарных периодических решений. В [4] для несимметричной системы двух автогенераторов с сильной резонансной взаимной связью в приближении равноамплитудности были получены аналитические условия локальной устойчивости синхронных когерентных режимов. В рамках метода медленно меняющихся амплитуд проводимости  $y_k(j\omega)$  и  $y_{12}(j\omega)$  заменяются их приближенными выражениями вблизи частоты синхронных колебаний  $\omega_0$

$$y_k(j\omega_0) = y_k(j\omega_0) + j2C_k(\omega - \omega_0), \quad y_{12}(j\omega) \approx -g_{12} + j2C_{12}(\omega - \omega_0). \quad (4)$$

Параметр  $C_k = 0.5d(\text{Im } y_k(j\omega))/d\omega|_{\omega_0}$  пропорционален крутизне фазовой характеристики колебательной системы и аналогичен емкости колебательного контура,  $2C_{12} = d(\text{Im } y_{12}(j\omega))/d\omega|_{\omega_0}$ . Параметры связи  $g_{12}$  и  $C_{12}$  непосредственно определяются из (3) и для первого типа связи ( $\alpha = 2n\pi$ ) задаются простыми выражениями

$$y_{12}(j\omega_0) \equiv -g_{12} = -2sg_0(1 - 2s \cos \Theta)^{-1} < 0, \quad (5a)$$

$$C_{12} = 2s\tau g_0(1 - 2s \cos \Theta)^{-2} > 0. \quad (5b)$$

Здесь  $\tau = d\alpha(\omega)/d\omega|_{\omega_0}$ . Как видно из (5b), параметр  $C_{12}$  для симметричной схемы ( $\Theta = 0$ ) при  $s \rightarrow 0.5$  может достигать теоретически сколь угодно больших значений. При этом величина связи  $g_{12}$  может существенно превышать характерную проводимость  $g_0$ . Для описания параметров связи варианта  $\Theta = \pi + \Theta'$ , ( $|\Theta'| < \pi/2$ ),  $\alpha = (2n + 1)\pi$  можно использовать выражения (5a,б), если изменить знаки перед ними и произвести замену  $\Theta \rightarrow \Theta'$ .

В случае полной симметрии системы для синфазных колебаний ( $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ ) условия устойчивости существенно упрощаются [14]; одно из них, описывающее реакцию системы на малое (локальное) возмущение разности фаз, имеет вид

$$g_{12}/(C - 2C_{12}) > 0. \quad (6)$$

Здесь  $C_1 = C_2 = C$  – эквивалентная емкость резонансных систем автогенераторов. В случае слабых частотных свойств связи ( $2C_{12} < C$ ) условие (6) всегда выполняется, и в системе может существовать синфазный режим. Если частотные свойства достаточно сильные, так что  $2C_{12} > C$ , то этот режим становится неустойчивым. Так как противофазные колебания также неустойчивы (для их устойчивости необходимо иметь связь типа  $\text{Re } y_{12} > 0$ ), то когерентный режим на частоте  $\omega_0$  невозможен. Поскольку система не имеет других стационарных синхронных решений, то следует ожидать ее перехода в режим динамического хаоса. Аналогичными свойствами обладает противофазный когерентный режим ( $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$ ) в антисимметричной схеме ( $\Theta = \pi$ ).

## 2. Цепи взаимной связи автогенераторов с резонансными свойствами

Ниже приведены примеры простейших цепей связи, обладающих резонансными свойствами параметра  $y_{12}$ . Схемы на вставках рис. 2 представляют собой волновой канал с чисто диссипативной нагрузкой  $y_H$ . Параметр  $y_{12}$  описывается выражением

$$y_{12} = -g_0 \left[ \frac{y_H}{2g_0} (\operatorname{ch}\gamma l_\Sigma - \operatorname{ch}\gamma \delta l) + \operatorname{sh}\gamma l_\Sigma \right]^{-1}, \quad (7)$$

где  $\gamma = \sigma + j\beta$ ,  $\sigma$  – коэффициент погонных потерь,  $\beta = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны в линии,  $g_0$  – волновая проводимость линии,  $l_\Sigma = l_1 + l_2$  – полная геометрическая длина линии,  $\delta l = |l_1 - l_2|$  – параметр несимметрии,  $\alpha = \beta(l_1 + l_2) \equiv \Theta_\Sigma$ ,  $\Theta = \beta(l_2 - l_1)$ . Случай отсутствия погонных потерь ( $\sigma = 0$ ) соответствует  $s = 0.5$ . На рис. 2, *a* показаны рассчитанные по (7) зависимости действительной и мнимой частей  $y_{12}/g_0$  от электрической длины канала  $\alpha$  для симметричного ( $l_1 = l_2 = l$ ) канала и согласованной ( $y_H = 2g_0$ ) нагрузки. При уменьшении погонных потерь ( $\sigma \rightarrow 0$ ) область устойчивости синфазных колебаний типа  $\operatorname{Re} y_{12} < 0$  вблизи  $\Theta_\Sigma = 4\pi$  стягивается в точку, что соответствует в (5)  $s \rightarrow 0.5$  и  $C_{12} \rightarrow \infty$ . Рис. 2, *б* демонстрирует резонансные свойства почти симметричного ( $\Theta = \pi/20$ ) и почти антисимметричного ( $\Theta = \pi - \pi/20$ ) каналов связи в случае  $\sigma = 0$ . Как видим, проводимость  $y_{12}$  в области устойчивости противофазных колебаний ( $\operatorname{Re} y_{12} > 0$ ) вблизи  $\Theta_\Sigma = 5\pi$  ведет себя также резонансным образом; при  $\Theta \rightarrow \pi$  эта область стягивается в точку.

На рис. 3 приведены частотные зависимости реальной и мнимой частей  $y_{12}/g_0$  симметричного четырёхполюсника с тремя диссипативными нагрузками. Несложно видеть, что на резонансной частоте  $\omega_0$ , для которой  $\Theta_0 = \pi/2$ ,  $\Theta_1 = \pi$ ,  $2\pi$ , в режиме равноамплитудных противофазных колебаний и в случае  $y_H = g_0$  цепь согласована. При этом мощность распределяется по боковым нагрузкам; в центральной нагрузке  $y_0$  мощность не рассеивается.

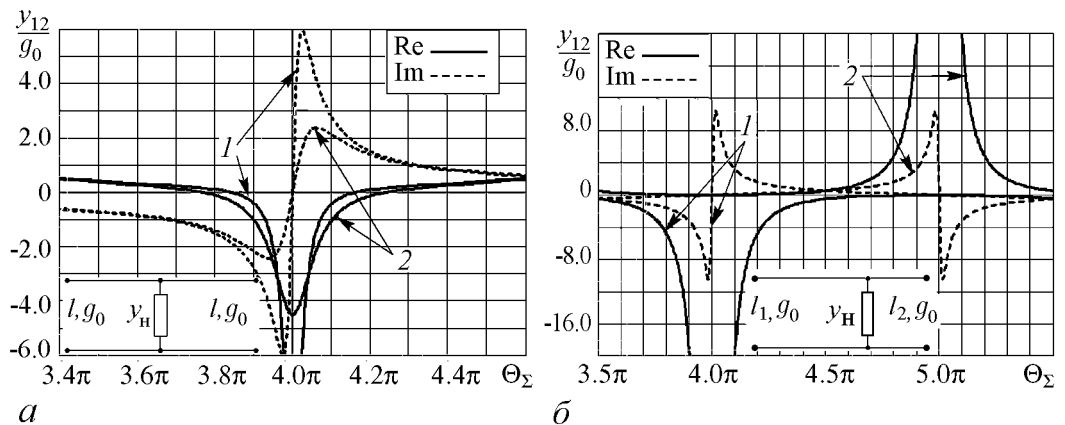


Рис. 2. Резонансное поведение параметра связи. *a* – зависимости параметра  $y_{12}$  цепей связи симметричной схемы от потерь  $\sigma$ : 1 – 0.3, 2 – 0.5; *б* – зависимости параметра  $y_{12}$  цепей связи от несимметрии  $\Theta$  при малых потерях ( $\sigma \rightarrow 0$ ): 1 –  $0.05\pi$ , 2 –  $\pi - 0.05\pi$

Схема на рис. 3 также удовлетворяет общим соотношениям (1) и (2), в которых следует положить  $\Theta = \pi$ . Режим противофазных колебаний устойчив в области частот с резистивной связью второго типа ( $\text{Re } y_{12} > 0$  и  $|\text{Im } y_{12}| < |\text{Re } y_{12}|$ ). На частоте  $\omega_0$  величина проводимости связи равна  $y_{12} = g_0^2/y_0$  и зависит только от проводимости центральной нагрузки. С уменьшением  $y_0$  величина связи возрастает, область настройки сужается и в пределе  $y_0 \rightarrow 0$  стягивается в точку.

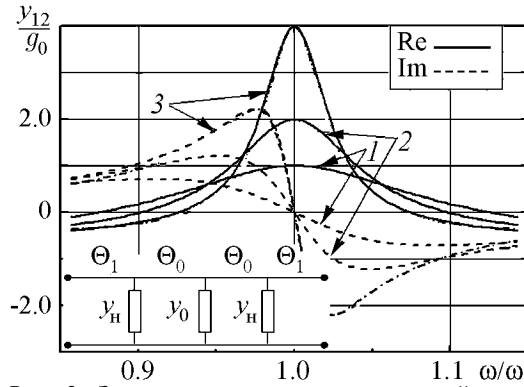


Рис. 3. Зависимости параметра  $y_{12}$  цепей связи симметричной схемы с тремя нагрузками от частоты для различных значений центральной нагрузки  $y_0$ : 1 -  $g_0$ ; 2 -  $0.5g_0$ ; 3 -  $0.25g_0$

### 3. Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование проведено на системе двух перестраиваемых по частоте транзисторных СВЧ автогенераторов (рис. 4); его предварительные результаты обсуждались в [15,16]. Автогенераторы собраны в виде отдельных несимметричных полосковых конструкций на транзисторах  $T_k$  типа КТ640 и варикапах  $D_k$  типа АА620. Линии канала связи и нагрузок образуют Т-образные соединения; для уменьшения погонных потерь они выполнены на отрезках воздушной несимметричной полосковой линии. Платы генераторов и канала связи соединяются с помощью стандартных 50-омных коаксиальных разъёмных соединений.

Топология канала связи в общем случае соответствует схеме на рис. 4. При отключении боковых линий ( $y_n = 0$ ) получаем симметричную конфигурацию с согласованной (с помощью четвертьволнового трансформатора) выходной линией. При отключении центральной линии ( $y_0 = 0$ ) и одной боковой имеем антисимметричную схему. Следует заметить, что полная цепь взаимной связи кроме собственно волнового канала включает в себя элементы выходной цепи автогенераторов, в том числе, параметры транзисторов. (Обсуждаемая здесь схема соответствует частичному включению внешней цепи в резонансный контур генератора.) Расчеты показывают, что независимо от конфигурации выходных цепей, они не изменяют описанных выше резонансных свойств, а лишь смещают частоту «резонанса» проводимости  $y_{12}(j\omega)$ . Для измерения уровня выходной мощности системы в канал центральной нагрузки включался измеритель мощности (ИМ), часть сигнала через направленный ответвитель (НО) подавалась на анализатор спектров (АС). Для наблюдения огибающей динамических процессов выходной СВЧ сигнал после детектирования подавался на осциллограф (О); полоса детектора (Д) составляет 3...10 ГГц.

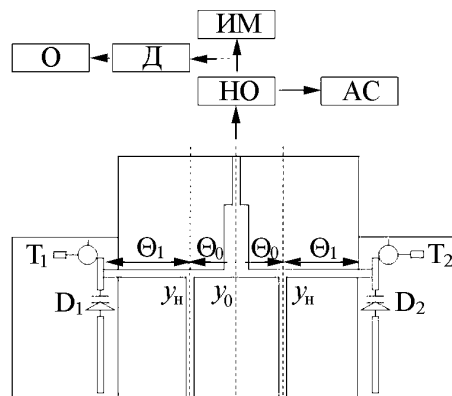


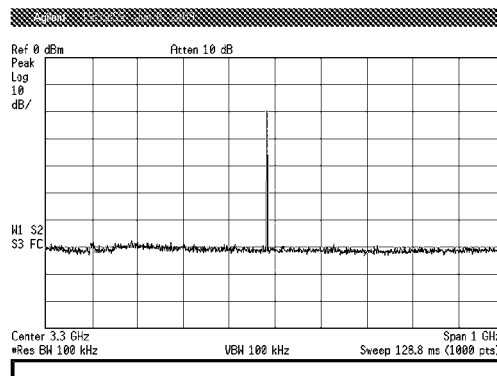
Рис. 4. Экспериментальная схема

В автономном режиме при работе на согласованную нагрузку выходная мощность автогенераторов составляет (35...45) мВт в полосе перестройки (2.9...3.5) ГГц. Специально подчеркнем, что автономные автогенераторы во всем диапазоне перестройки частоты при изменении питания транзисторов (до  $\pm 30\%$ ) или при значительном рассогласовании нагрузки демонстрируют стабильный одночастотный режим; уровень гармоник в выходном сигнале не превышает  $-20$  дБ.

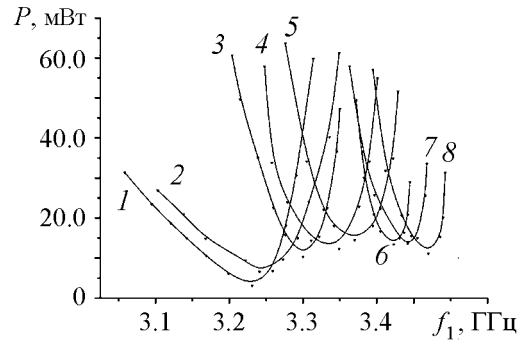
На первом этапе эксперимента исследовалась симметричная система с одной нагрузкой при последовательном переборе электрической длины канала связи в интервале  $3\pi \leq \Theta_{\Sigma} \leq 4.5\pi$ . Шаг изменения  $\Theta_{\Sigma}$  не превышал  $0.1\pi$ , благодаря чему удалось получить полную картину трансформации спектрального состава колебаний и вида мощностно-частотных характеристик (МЧХ) при изменении расстройки парциальных частот автогенераторов  $f_1$  и  $f_2$ . Наблюдение спектра колебаний в нагрузке позволяло идентифицировать режимы взаимной синхронизации и динамического хаоса.

Как и ожидалось, доминирующим когерентным режимом является режим противофазных синхронных колебаний; он занимает подавляющую часть периода  $\Theta_{\Sigma}$ , где  $\text{Re } y_{12} > 0$ . В пределах полос синхронизации спектр одночастотный (рис. 5, а), а МЧХ имеют характерный параболический вид (рис. 5, б). В центре полос при равенстве парциальных частот генераторов их колебания противофазны и вычитаются в общей нагрузке. (Достаточно высокий уровень мощности в минимумах МЧХ объясняется неравенством амплитуд колебаний автогенераторов.)

Область с резонансным поведением параметра связи находится между соседними противофазными областями ( $\Theta_{\Sigma} \approx 4\pi$ ) и занимает примерно  $0.3\pi$ ; признаки регулярного когерентного движения здесь полностью утрачиваются. На рис. 6 отражена трансформация спектра колебаний при изменении расстройки парциальных частот (полоса обзора 1.2 ГГц). При больших взаимных расстройках частот автогенераторов (80...100) спектр колебаний является весьма насыщенным и занимает полосу почти один гигагерц (рис. 6, а, е). Это указывает на большую девиацию частоты, что является следствием сильного увлечения (модуляции) фаз генераторов в пределах периода биений за счет сильной взаимной связи. Однако с уменьшением



а



б

Рис. 5. Вид спектра (а) и МЧХ (б) симметричной схемы в полосе синхронизации для  $\Theta_{\Sigma} \approx 3\pi$  различных частот  $f_2$  ГГц одного из генераторов: 1 – 3.232, 2 – 3.284, 3 – 3.325, 4 – 3.360, 5 – 3.391, 6 – 3.418, 7 – 3.440; 8 – 3.460

расстройки «ожидаемого захвата» не происходит. Вместо этого спектр насыщается большим числом (20...30) дискретных составляющих и после каскада двух–трех бифуркаций удвоения периода биений (рис. 6, б), формируется сплошной спектр шириной порядка 1 (рис. 6, в, з, д).

Область хаотических колебаний антисимметричной схемы при включении одной боковой нагрузки (или двух боковых нагрузок) реализуется путем увеличения (или уменьшения) длины канала на  $\lambda/2$  (см. рис. 2, б). Преобразование спектров здесь подобно приведенному на рис. 6.

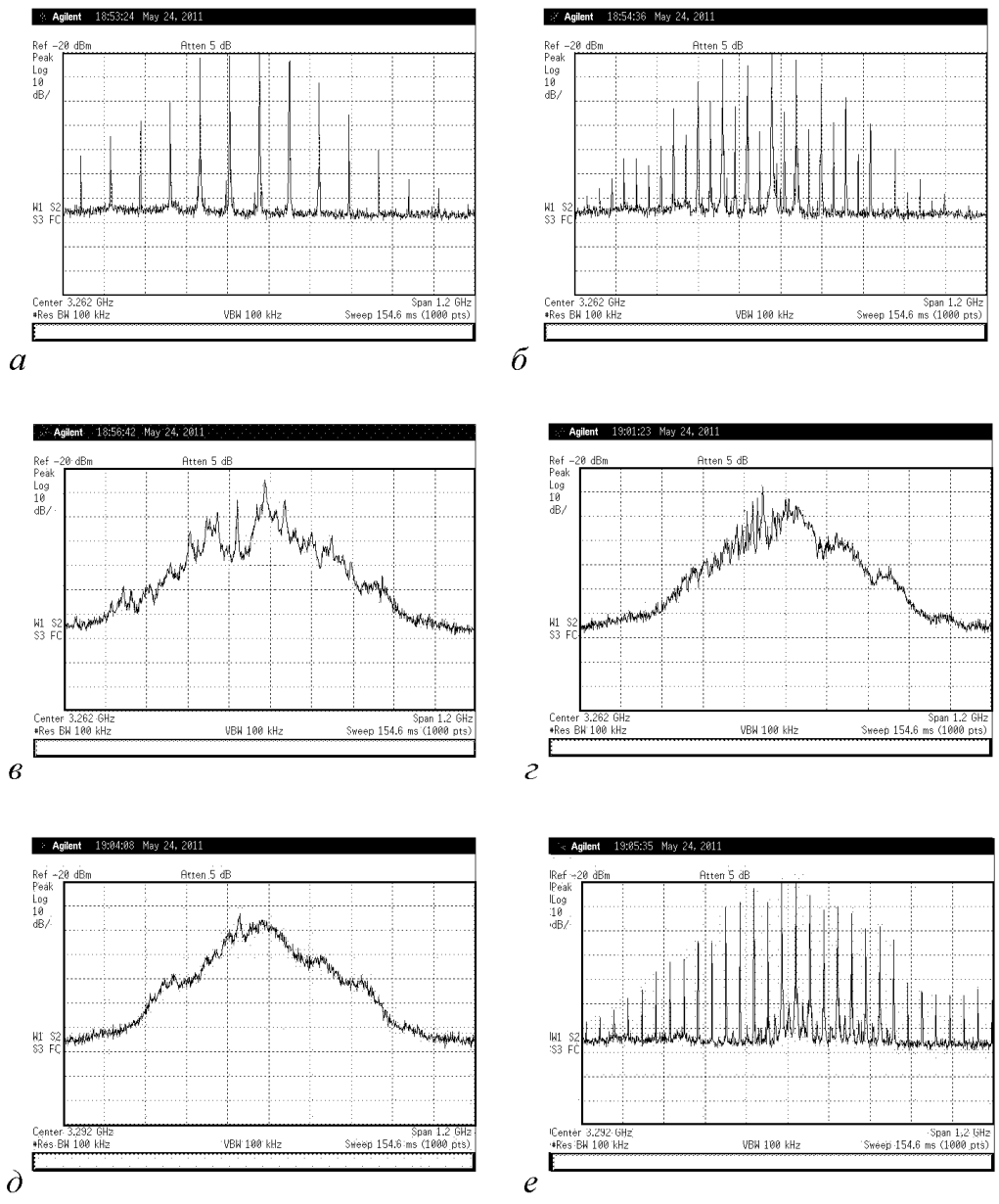


Рис. 6. Трансформация спектра системы при различных частотных расстройках автогенераторов для длины канала  $\Theta_{\Sigma} \approx 4\pi$ ; частота первого автогенератора  $f_1$  равна 3.281 ГГц. а –  $f_2 \approx 3.220$  ГГц; б –  $f_2 \approx 3.274$  ГГц; в –  $f_2 \approx 3.282$  ГГц; з –  $f_2 \approx 3.323$  ГГц; д –  $f_2 \approx 3.352$  ГГц; е –  $f_2 \approx 3.363$  ГГц



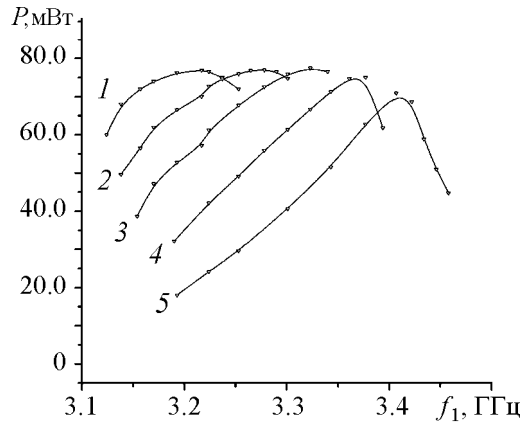


Рис. 7. МЧХ несимметричной схемы в полосе синхронизации для  $\Theta_{\Sigma} \approx 4\pi$  и различных частот  $f_2$  ГГц одного из генераторов: 1 – 3.221, 2 – 3.265, 3 – 3.309, 4 – 3.365, 5 – 3.413

Обусловленность хаотического поведение системы автогенераторов резонансными свойствами канала взаимной связи доказывается следующими опытами. В первом из них резонансные свойства параметра связи схемы с одной нагрузкой снижались путем введения несимметрии  $\Theta$  порядка  $10^\circ \dots 20^\circ$ . Поведение системы кардинально изменяется: при той же длине канала связи  $\Theta_{\Sigma}$  почти во всем диапазоне перестройки автогенераторов существует стабильный режим взаимной синхронизации в полосе 100...250 МГц. МЧХ имеют характерный несимметричный вид (рис. 7); при близости парциальных частот мощности генераторов суммируются в общей нагрузке.

Во втором эксперименте в канал связи симметричной схемы без изменения  $\Theta_{\Sigma}$  вводились погонные потери, снижающие коэффициент передачи  $|S_{12}|^2$  до  $-8.5$  Дб, что соответствует  $s \approx 0.38$ . Это, как сказано выше (см. (56)), уменьшает величину  $C_{12}$ . Действительно, динамический хаос и сопутствующие бифуркационные явления здесь также полностью исчезают. При этом в системе существует только режим когерентных колебаний с широкой полосой синхронизации порядка 150...300, характерной для сильной связи [4,11], с суммированием мощностей в центре МЧХ.

Наконец, включение в канал связи с двумя боковыми нагрузками центральной нагрузки (см. рис. 3) с проводимостью  $y_0$  порядка 0.02...0.01 Ом<sup>-1</sup> также подавляет хаотический режим. Вместо него существуют когерентные колебания с полосами синхронизации до 200 МГц. В центре полос синхронизации при близости частот автогенераторов их колебания противофазны, при этом мощности в боковых нагрузках равны парциальным мощностям, а в центральной нагрузке – в 15...20 раз ниже.

На рис. 8 приведены осциллограммы огибающих колебательного процесса симметричной системы для резонансной области связи, поясняющие механизм хаотизации колебаний. В режиме взаимной синхронизации напряжение на выходе детектора имеет постоянный уровень. Верхней пунктирной горизонтальной линией отмечен максимальный уровень сигнала режима суммирования мощностей  $\Delta\varphi \approx 0$ . Нижняя линия соответствует противофазному когерентному режиму  $\Delta\varphi \approx \pi$  с вычитанием мощностей. При больших частотных расстройках парциальных систем (рис. 8, а) синхронизм отсутствует и в системе имеет место режим биений, их спектр подобен спектру на рис. 6, а. Огибающая суммарного сигнала на периоде биений поочередно достигает максимального и минимального уровней; это означает, что разность фаз колебаний автогенераторов  $\Delta\varphi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t)$  проходит полный цикл изменения:  $0 \dots 2\pi$ . Очевидно, что скорость этого изменения не является постоянной, так как зависит от величины мгновенной разности фаз. Так, в некоторой области разности фаз вокруг  $\Delta\varphi(t) = 0$  фазы колебаний, вследствие описанной неустойчивости, «испытывают» тенденцию к расталкиванию. При достаточно

малой расстройке парциальных частот, то есть при малой средней скорости изменения разности фаз, в указанной области происходит смена знака производной  $\Delta\varphi(t)$ . В результате период прохождения фазами интервала  $2\pi$  удваивается, то есть происходит бифуркация удвоения периода биений (рис. 8, б). При этом разность фаз колебаний в точках возврата не достигает  $\Delta\varphi(t) = 0$ , и уровень биений в соответствующие моменты становится ниже. Аналогичные процессы с чередованием минимумов уровня биений происходят в области неустойчивости вокруг  $\Delta\varphi(t) = \pi$ . Трансформация сигнала биений при последующих бифуркациях удвоения происходит аналогично. Следует также обратить внимание на характерный излом сигнала биений на рис. 8, а, б, который отражает явление подтягивания фаз колебаний.

Здесь заметим, что модуляция фаз, естественно, сопровождается модуляцией амплитуд автогенераторов, однако ее вклад в процесс не является решающим. Во-первых, амплитудная модуляция, вследствие инерционности амплитудных процессов, вряд ли имеет большой уровень, во-вторых, она не может породить спектры типа рис. 6, а, б.

На рис. 8, в приведена типичная временная реализация огибающей процесса при близости парциальных частот автогенераторов. Как видим, колебания разности фаз  $\Delta\varphi(t)$  происходят в средней части областей между двумя неустойчивыми состояниями  $\Delta\varphi = 0, \pm\pi$ , лишь иногда выходя на их уровни; форма колебаний обладает всеми признаками нерегулярности, присущими динамическому хаосу. Подобный случайный закон модуляции фаз колебаний автогенераторов формирует непрерывный спектр типа рис. 6, в, г, д.

Характерной особенностью динамического хаоса исследуемой системы является слабая зависимость его спектральных и временных характеристик от возмущений параметров активных элементов автогенераторов. Так, изменение напряжения питания одного из генераторов на 20...30%, замена транзисторов или замена варикапов конструктивными емкостями не вызывает качественной перестройки характера хаотического движения и формы спектра. Основными управляющими параметрами являются собственные частоты автогенераторов и параметр резонансных свойств канала связи  $C_{12}$ ; их регулировка с целью информационного управления динамическим хаосом может быть весьма эффективной.

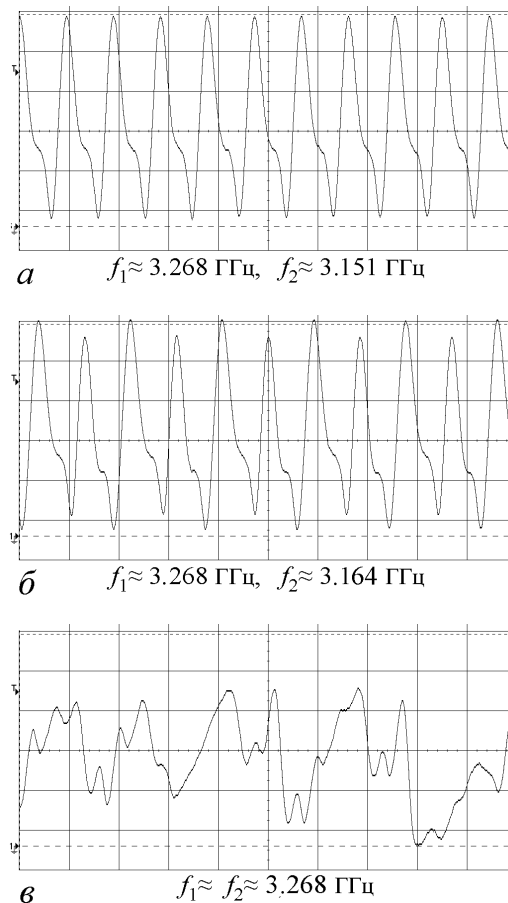


Рис. 8. Временные реализации огибающей выходного сигнала системы в области резонанса связи: а -  $f_1 \approx 3.268$  ГГц,  $f_2 \approx 3.151$  ГГц; б -  $f_1 \approx 3.268$  ГГц,  $f_2 \approx 3.164$  ГГц; в -  $f_1 \approx f_2 \approx 3.268$  ГГц

## Заключение

В работе получены экспериментальные результаты, подтверждающие возможность разрушения когерентного режима в системе двух, парциально стабильных и одночастотных взаимосвязанных СВЧ автогенераторов при сильных резонансных свойствах взаимной связи. Показано, что резонансным поведением параметра связи обладают простые симметричные или антисимметричные цепи на основе волновых каналов с нагрузками. Специальное введение таких связей в резонансные системы парциально стабильных автогенераторов или генерирующих приборов может дать простой и эффективный способ получения широкополосных сигналов в СВЧ диапазоне.

## Библиографический список

1. *Дворников А.А., Уткин Г.М.* Фазированные автогенераторы радиопередающих устройств. М.: Энергия, 1980.
2. *Демьянченко А.Г.* Синхронизации генераторов гармонических колебаний. М.: Энергия, 1976.
3. *Рубаник В.П.* Колебания квазилинейных систем с запаздыванием. М.: Наука, 1969.
4. *Владимиров С.Н., Майдановский А.С., Новиков С.С.* Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993.
5. *Кальянов Э.В.* Особенности принудительной синхронизации бистабильного генератора с хаотической динамикой // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 22. С. 1.
6. *Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Геншафт А.М.* Синхронизация двух связанных клистронных автогенераторов с запаздыванием // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16, № 2. С. 51.
7. *Анищенко В.С., Астахов В.В., Вадивасова Т.Е., Стрелкова Г.И.* Синхронизации регулярных, хаотических и стохастических колебаний. М.-Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008.
8. *Овчинников А.А., Москаленко О.И., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Экспериментальное исследование обобщенной синхронизации хаотических колебаний в присутствии шума // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 4. С. 1.
9. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Наука, 2002.
10. *Владимиров С.Н., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н.* Нелинейно-динамическая криптология. Радиофизические и оптические системы. М.: Физматлит, 2009.
11. *Майдановский С.А., Новиков С.С.* Симметричные и несимметричные системы сильно связанных автогенераторов // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 5. С.595.
12. *Дворников А.А., Огурцов В.И.* О резонансно связанных автогенераторах // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22, № 5. С. 1003.
13. *Jonathan J. Lynch, Robert A. York.* Synchronization of oscillators coupled through narrow-band networks // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. 2001. Vol. 49, № 2. P. 237.

14. *Novikov S.S.* Dynamic and static instabilities of coherent self-oscillating system with controlled couplings // Proc. of 14th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 2006. P. 427.
15. *Новиков С.С., Усюкевич А.А.* Об условиях разрушения когерентного режима в генерирующих системах с взаимными связями // Изв. вузов. Физика. 2009, № 11/2. С. 283.
16. *Novikov S.S., Usjukevitch A.A.* Chaotic Oscillation in the Auto-Oscillator System with Resonant Couplings // Proc. of 16th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 2010. P. 512.

*Томский государственный  
университет*

*Поступила в редакцию 06.03.2012  
После доработки 12.04.2012*

### **DESTRUCTION OF THE COHERENT MODE IN SYSTEM OF TWO OSCILLATORS AT THE STRONG RESONANT MUTUAL COUPLINGS**

*S. S. Novikov, A. A. Usjukevich*

The hypothesis about destruction of a coherent mode in system of two mutual couplings microwave oscillators is examine, each of which in a stand-alone mode generates stable unifrequent oscillations. It is experimentally shown, that at strong resonant couplings synchronous oscillations are unstable, therefore the system go over in in a mode of dynamic chaos.

*Keywords:* Stability, synchronisation, a resonance of parametre of couplings, dynamic chaos.



*Новиков Сергей Сергеевич* – родился в Красноярске (1950). Окончил радиофизический факультет Томского государственного университета. После защиты кандидатской диссертации (1986) и по настоящее время работает доцентом ТГУ. Область научных интересов – когерентные и некогерентные колебательные процессы в генерирующих СВЧ-системах со многими степенями свободы, вариантность структур взаимодействий в системах с ансамблевой организацией и их влияние на устойчивость. Автор монографий «Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем» (1993) и «Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы» (2009).

634050, Томск, пр. Ленина 36  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: nss@sibmail.com



*Усюкевич Александр Александрович* – родился в 1987 году. Окончил радиофизический факультет Томского государственного университета (2009). В настоящее время является аспирантом и ассистентом кафедры радиоэлектроники. Имеет 14 публикаций.

634050, Томск, пр. Ленина 36  
Национальный исследовательский Томский государственный университет  
E-mail: usjukevitch@sibmail.com