# На правах рукописи

# Усюкевич Александр Александрович

## КОГЕРЕНТНЫЕ И НЕКОГЕРЕНТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ СВЯЗАННЫХ СВЧ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

Специальность 01.04.03 - «Радиофизика»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре радиоэлектроники.

Научный руководитель:

кандидат физико-математическх наук, доцент

Новиков Сергей Сергеевич

Официальные оппоненты:

Гошин Геннадий Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники.

Измайлов Игорь Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра квантовой электроники и фотоники.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН» (г. Красноярск).

Защита состоится « 13 » декабря 2012 г. в 14<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36, ауд.119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан « 12 » ноября 2012 г.

Учёный секретарь диссертационного совета \_\_\_\_\_Пойзнер Б.Н.

#### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Явления внешней и взаимной синхронизации периодических движений в системах связанных автогенераторов с парциально одночастотными колебаниями относится к числу наиболее разработанных проблем теории колебаний. Аналогичные по смыслу задачи существуют в теории динамических систем, демонстрирующих движение в форме динамического хаоса. 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. 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 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, которые имеют место при наличии в цепях (каналах) связи диссипативных элементов – нагрузок. Однако параметры реальных каналов связи, описывающих взаимодействие автогенераторов, могут обладать резонансными свойствами, оказывающими существенное влияние на характеристики синхронных движений, включая полную потерю устойчивости синхронных колебаний. Разрушение когерентности в таких системах при развитых автоколебательных режимах парциальных подсистем может обеспечить высокую степень грубости режима динамического хаоса. Проведённый обзор научно-технической литературы показал, что разработка высокостабильных широкополосных СВЧ источников хаоса для коммуникационных целей [1\*–3\*] и радиолокационных систем [4\*] является актуальной. Вместе с тем хаотическая динамика системы двух связанных СВЧ автогенераторов, каждый из которых в парциальном режиме демонстрирует стабильные одночастотные колебания, является мало изученной [5\*]. Результаты теоретического и экспериментального исследования генерации широкополосного динамического хаоса в такой системе могут лечь в основу принципиально нового способа создания источников шумоподобных сигналов.

<u>Цель диссертационной работы.</u> Разработать модель системы двух связанных СВЧ автогенераторов с сильными резонансными свойствами параметра связи с когерентными и некогерентными видами движения, а также экспериментально исследовать эти движения.

Задачи диссертационной работы. Для достижения указанной цели в работе ставятся следующие задачи:

1. Определение условий локальной устойчивости синхронных колебаний системы двух автогенераторов в приближении слабых частотных свойств цепи связи.

2. Определение условий локальной устойчивости синхронных колебаний системы двух автогенераторов при резонансных свойствах параметра взаимной связи.

3. Анализ резонансных свойств пассивных цепей взаимной связи автогенераторов с различными вариантами симметрии, диссипативных потерь и числом общих нагрузок.

4. Экспериментальное исследование режимов взаимной синхронизации системы двух СВЧ автогенераторов.

5. Экспериментальное исследование режима динамического хаоса и бифуркационных переходов от когерентных колебаний в системе СВЧ автогенераторов.

6. Экспериментальное исследование статической неустойчивости синхронного режима в системе двух СВЧ автогенераторов.

<u>Методы исследования.</u> В соответствии с поставленными задачами в диссертационной работе используется комплексный подход, сочетающей в себе теоретические и экспериментальные методы. В частности используются методы теории колебаний, теории устойчивости динамических систем, методы вычислительной математики и методики экспериментального спектрального анализа Фурье и временных характеристик когерентных и некогерентных колебаний системы.

#### На защиту выносятся следующие положения.

1. Цепи связи на основе волновых симметричных и антисимметричных каналов с общими нагрузками обладают резонансными свойствами параметра взаимной связи, достаточными для разрушения когерентности и перехода системы двух автогенераторов с N-образными вольтамперными характеристиками активных элементов в режим динамического хаоса.

2. Динамическая неустойчивость синфазных колебаний в симметричной и противофазных – в антисимметричной системах двух связанных парциально стабильных автогенераторов с N-образными вольтамперными характеристиками активных элементов имеет место при условии, когда параметр  $C_{12}$ , определяющий частотные свойства проводимости взаимной связи, превышает приведенную к полюсам канала связи ёмкость резонансных систем автогенераторов  $N^2C$ :  $|C_{12}| > N^2C$ , где N – коэффициент трансформации выходных цепей автогенераторов.

3. Статическая неустойчивость синфазных колебаний симметричной системы двух связанных парциально стабильных автогенераторов с Nобразными вольтамперными характеристиками активных элементов имеет место:

– при условии, когда параметр  $C_{\rm BX}$  ( $C_{\rm BX} < 0$ ), определяющий частотные свойства входной проводимости канала связи, превышает приведенную к полюсам канала ёмкость  $N^2C$  резонансных систем автогенераторов:  $|C_{\rm BX}| > N^2C$ ;

– при значительных электрических длинах волнового канала взаимной связи:  $l_{\Sigma} > 10\lambda_{\nu}$ , где  $l_{\Sigma}$  – геометрическая длина канала,  $\lambda_{\nu}$  – длина волны;

– при перегруженном канале, достигаемом путем рассогласования общей нагрузки типа  $y_{\rm H} > g_0$ , где  $y_{\rm H}$ ,  $g_0$  – проводимость нагрузки и волновая проводимость канала связи.

## <u>Достоверность защищаемых положений и других результатов</u> <u>работы.</u>

Достоверность первого положения о резонансных свойствах параметра связи автогенераторов для различных цепей подтверждается тем, что указанные свойства описаны и доказаны в рамках классического матричного анализа четырёхполюсников. Разработанная модель канала с резонансными свойствами параметра связи является обобщённой, что делает её применимой к широкому классу цепей. Достоверность второго и третьего положения обеспечивается тем, что аналитические условия неустойчивости получены в рамках стандартной процедуры исследования локальной устойчивости (первого приближения Ляпунова) автоколебательных систем с привлечением классического метода теории колебаний – метода медленно меняющихся амплитуд.

Достоверность всех положений подтверждается соответствием экспериментальных и теоретических результатов исследования, в том числе с результатами других работ.

#### Научная новизна.

1. Первое положение определяет резонансные свойства параметра взаимной связи автогенераторов как основной критический фактор систем связанных автогенераторов, оказывающий влияние на неустой-чивость синхронных колебаний системы.

2. Во втором положении предложена формулировка критерия перехода системы двух связанных парциально стабильных СВЧ автогенераторов от когерентных колебаний к режиму динамического хаоса.

3. В третьем положении предложена формулировка условий статической неустойчивости когерентного режима в симметричной системе двух связанных СВЧ автогенераторов; указанные условия определяют границы стабильности когерентных режимов для случая большой длины канала связи.

4. Впервые показано, что в системе двух связанных парциально стабильных СВЧ автогенераторов могут быть созданы условия для существования как широкополосных хаотических колебаний, так и синхронных режимов сложения или вычитания мощностей. Определены параметры, изменение которых позволяет управлять синхронными и хаотическими режимами колебаний и переходами между ними: расстройка частот автогенераторов, длина, симметрия и потери канала связи, рассогласование общих нагрузок канала связи.

5. Предложен новый способ построения источников динамического хаоса на основе систем связанных СВЧ автогенераторов с разрушени-ем когерентности.

## Научная ценность защищаемых положений и других результатов работы заключается в следующем.

Доказана возможность получения хаотических движений в системе связанных, парциально стабильных одночастотных автоколебательных систем.

В основе теоретических исследований лежит обобщенная модель канала связи автогенераторов, что позволяет применять полученные результаты при изучении свойств многогенераторных систем.

Результаты теоретического раздела диссертационной работы адекватно определяют типы и механизм неустойчивостей когерентных процессов в системе связанных автогенераторов.

Полученные при выполнении работы результаты расширяют представления о возможных колебательных режимах в системах связанных СВЧ автогенераторов.

# Практическая значимость результатов работы.

Система, созданная по научным положениям 1 и 2, обладает полосой спектра хаотических колебаний порядка 1ГГц, не претерпевающего критических изменений при вариациях активных и пассивных параметров: частотных расстроек автогенераторов – (±30МГц), питающего напряжения – (±20%) и рассогласовании общей нагрузки не менее чем в два раза.

# Внедрение результатов диссертационной работы.

Результаты были использованы при выполнении следующих проектов: НИР «Разработка когерентных многогенераторных систем 01200903863, (2009г.); диапазона», № СВЧ НИР: ΦЦП «Многофункциональная аппаратура гигагерцового и терагерцового диапазонов на принципах нелинейной динамики, квазистатических и квазиоптических подходов», № 14.740.110335, (2010-2012г.); проекта «Теоретические экспериментальные исследования РФФИ И релятивистских магнетронных генераторов с направленным СВЧ излучением», №08-08-00555-а, (2008-2010г.); «Разработка нового метода создания управляемых источников хаотических колебаний для систем связи» договор № 9/16926 от 01.08.2012 г. с ООО «Триумф» в рамках государственного контракта № 10710 р/16926 от 13.08.2011 г.

Материалы работы частично внедрены в учебную программу «Устойчивость динамических систем в задачах радиофизики» для подготовки бакалавров по направлению 011800 «Радиофизика». Результаты диссертационной работы целесообразно использовать в организациях, занимающихся применением широкополосных источников сигналов в системах радиосвязи и радиолокации, радиотомографии в частности в Томском гос. ун-те, Саратовском гос. ун-те, в Томском гос. ун-те систем управления и радиоэлектроники.

Апробация работы. Основное содержание диссертационной работы представлено в 16 публикациях, включая 6 статей в отечественных журналах входящих в перечень ВАК, 10 работ в материалах и тезисах российских и международных конференций.

Основные защищаемые положения и результаты диссертационной работы были представлены на: XLVI и XLVIII Международной науч-

ной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2008, 2010); IV и VI Конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора (Томск, 2008, 2010); XI, XII и XIV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники» (Красноярск, 2009, 2010, 2012); на Российской научно-практической конференции с международным участием «Физико-технические проблемы получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения» (Томск, 2009); 16th International symposium on high current electronics (Томск, 2010); III и IV Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2010, 2012); Х Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов» (Самара, 2011); II Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2011).

<u>Личный вклад автора.</u> Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, определении методов и подходов к их решению и анализе полученных результатов. Совместно с научным руководителем обсуждались идеи постановки эксперимента. Все экспериментальные и расчётные результаты диссертационной работы получены лично автором.

<u>Структура и объём работы.</u> Общий объём диссертации 145 страниц машинописного текста, в том числе 58 рисунков, 1 страница приложения и библиографический указатель на 100 наименований.

### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность задач, поставленных перед диссертационной работой, описаны цели исследования, приведены защищаемые положения, научная новизна, показано практическое применение и дана общая характеристика диссертационной работы.

Первая глава посвящена аналитическому обзору литературы, затрагивающей вопросы существования синхронных и хаотических колебаний в системах связанных автоколебательных структур различной природы. В первой части главы кратко описаны история развития науки о синхронизации объектов различной природы и становления науки о детерминированном хаосе – нелинейной динамике. Во второй части рассмотрен ряд работ, посвящённых исследованию синхронизации и хаотизации колебаний в связанных автоколебательных системах. В результате проведённого обзора делается два основных вывода. Вопервых, достаточное большое число современных публикаций по практическому применению генераторов хаоса для целей приёмапередачи информации, радиолокации и т.д. позволяет заключить, что разработка надёжных хаотических источников в настоящий момент является актуальной. Во-вторых, исследуемая система является неизученной, с точки зрения генерации хаотических колебаний на основе разрушения когерентных (синхронных) режимов.

Во второй главе представлена математическая модель системы двух СВЧ автогенераторов при резонансной взаимной связи: приведены дифференциальные уравнения, описывающие колебательные движения системы, приведены параметры, описывающие резонансные (частотные) свойства цепи взаимной связи; определены основные стационарные режимы.

Синхронные движения системы двух автогенераторов полностью описываются с помощью модели общего вида. Два автогенератора (рисунок 1) связанны друг с другом через обобщённый четырёхполюсник Y, содержащий диссипативные элементы-нагрузки. Резонансные системы автогенераторов обладают высокими избирательными свойствами и в системе развивается почти гармонический колебательный процесс:  $\overline{U}_k = U_k(t)e^{j\varphi_k(t)}$ , (k = 1, 2).

$$S_{1}(U_{1}) \begin{array}{c} 1 \\ L_{1} \end{array} \xrightarrow{} C_{1} \end{array} \begin{array}{c} 1 \\ C_{1} \end{array} \begin{array}{c} 1 \\ C_{2} \end{array} \begin{array}{c} 2 \\ C_{2} \end{array} \begin{array}{c} 2 \\ C_{2} \end{array} \begin{array}{c} C_{2} \\ C_{2} \end{array} \end{array}$$

Автогенераторы представлены в виде колебательных контуров:  $C_k$  и  $L_k$  – ёмкости и индуктивности избирательных систем;

Рисунок 1 – Система двух автогенераторов избирательных систем;  $S_k(U_k) = -G_k(U_k) + jB_k(U_k)$  – усредненные по первой гармонике нелинейные комплексные проводимости активных приборов с Nобразными вольтамперными характеристиками. Трансформаторы  $N_k$ обеспечивают необходимое включение общей нагрузки.

Система описывается укороченными дифференциальными уравнениями в символической форме:

$$\left[S_{k}\left(U_{k}\right)+jC_{k}\Delta\omega_{k}+2C_{k}p\right]\overline{U}_{k}+\frac{Y_{kk}(p)}{N_{k}^{2}}\overline{U}_{k}+\frac{Y_{kl}(p)}{N_{1}N_{2}}\overline{U}_{l}=0,$$
(1)

 $\Delta \omega_k = (\omega_0^2 - \omega_k^2)/\omega_0$  – взаимная частотная расстройка контуров генераторов относительно синхронной частоты  $\omega_0$ ;  $\overline{U}_k$ ,  $\overline{U}_l$  – комплексные медленно меняющиеся амплитуды напряжений;  $Y_{kk}(p)$ ,  $Y_{kl}(p)$  – элементы матрицы проводимости четырёхполюсника, в которых формально проведена замена  $j\omega$  на p = d/dt.

Четырехполюсник связи *Y* описывается с помощью обобщенной модели. Полагая, что при синхронном и одновременном возбуждении входов четырехполюсника напряжениями одинаковой амплитуды существует некоторое значение разности фаз  $\Delta \phi = \phi_2 - \phi_1 \equiv \theta$ , при котором входные проводимости полюсов  $Y_{\text{вх}k}$  являются действительными величинами, равными  $g_0$ , получаем:

$$Y_{11} = g_0 - Y_{12} \exp(j\theta) Y_{22} = g_0 - Y_{12} \exp(-j\theta)$$
(2)

 θ – параметр несимметрии. Свойства четырёхполюсника полностью описываются параметром:

$$Y_{12} = -g \exp(j\alpha), \quad g > 0,$$
 (3)

α – определяет фазовые свойства связи. Выражения (2) и (3) представляют собой условие согласования общей нагрузки (или системы нагрузок) канала связи и справедливы для большого класса цепей.

Далее в рамках обобщённой модели вводится параметр  $C_{12}$ , определяющий в первом приближении частотные свойства проводимости взаимной связи  $Y_{12}(p)$ :

$$Y_{12}(p) \approx Y_{12}(\omega_0) + jC_{12}p, \quad C_{12} = \frac{d \operatorname{Im} Y_{12}(j\omega)}{d\omega} \bigg|_{\omega_0}.$$
 (4)

Если общие нагрузки канала связи рассогласованы, то воспользоваться связью параметров четырехполюсника (2) нельзя. В этом случае проводимости  $Y_{kk}(p)$  также записываются в общем виде:

$$Y_{kk}(p) \approx Y_{kk}(\omega_0) + C_{kk}p, \quad C_{kk} = \frac{d \operatorname{Im} Y_{kk}(j\omega)}{d\omega} \bigg|_{\omega_0}.$$
(5)

Рассогласование нагрузок приводит к появлению частотной зависимости входных проводимостей канала связи  $Y_{\text{вх}k}$ , которые также записываются в аналогичной (4) и (5) форме:

$$Y_{\text{BX}\,k}\left(p\right) \approx Y_{\text{BX}\,k}\left(\omega_{0}\right) + C_{\text{BX}\,k}\,p, \quad C_{\text{BX}\,k} = \frac{d\,\text{Im}\,Y_{\text{BX}\,k}\left(j\omega\right)}{d\omega}\bigg|_{\omega_{0}},\tag{6}$$

Параметр  $C_{_{\mathrm{BX}\,k}}$  связан с рассогласованием канала связи. В случае со-гласования:  $Y_{_{\mathrm{BX}}} = Y_{_{\mathrm{BX}}}(\omega_0) = g_0$ ,  $C_{_{\mathrm{BX}\,k}} = 0$ .

Параметры  $Y_{kk}(p)$ ,  $Y_{12}(p)$  и  $Y_{Bx k}(p)$  не являются независимыми, т.к. принадлежат одной цепи. Их связь задается соотношениями:

$$Y_{\text{BX } k}(p) = Y_{kk}(p) + Y_{12}(p) \exp[j\theta(-1)^{k+1}],$$
  

$$C_{\text{BX } k} = C_{kk} + C_{12} \exp[j\theta(-1)^{k+1}].$$

Далее, в соответствии с  $[6^*,7^*]$  вводятся понятия резистивных связей первого ( $\alpha = 0, Y_{12} = -g < 0$ ) и второго ( $\alpha = \pi, Y_{12} = g > 0$ ) типов, как оптимальных по отношению к синфазным и противофазным синхронным режимам. В заключительном разделе главы анализируются стационарные уравнения, получаемые из (1) при p = 0, и для равноамплитудного приближения определяются основные синхронные режимы:

$$\Delta \varphi_0 = \theta, \tag{7a}$$

$$\Delta \varphi_0 = \pi - \theta, \tag{76}$$

 $\Delta \phi_0$  – стационарная разность фаз. Для симметричной системы ( $\theta = 0$ ) решение (7a) соответствует синфазным колебаниям автогенераторов  $\Delta \phi_0 = 0$ , а решение (7б) – противофазным  $\Delta \phi_0 = \pi$ .

В третьей главе проводятся исследования локальной (в первом приближении по Ляпунову) устойчивости стационарных синхронных режимов системы связанных автогенераторов. В приближении равноамплитудности режимов (при идентичности параметров автогенераторов и для резистивных связей) удается найти аналитические выражения корней  $\lambda_1 \div \lambda_4$  характеристических определителей

$$\det[A,\lambda] = 0 \tag{8}$$

при слабых и сильных частотных свойствах параметра взаимной связи.  $[A, \lambda]$  – матрица четвёртого порядка, составленная из коэффициентов вариационных уравнений, полученных в результате линеаризации исходной системы уравнений (1) по малым вариациям (возмущениям) амплитуд ( $u_k = u_{0k} + \delta u'_k$ ) и фаз ( $\phi_k = \phi_{0k} + \delta \phi'_k$ ) относительно их стационарных значений ( $u_{0k}$  и  $\phi_{0k}$ ).

Условия устойчивости синхронных колебаний при слабых частотных свойствах параметра связи (когда  $C_{12} = 0$ ) для резистивной связи второго типа ( $\alpha = \pi$ ) и симметричной системы ( $\theta = 0$ ) имеют вид:

$$2C\lambda_1 = \sigma_{\Pi} < 0, \ (\delta u_1 = \delta u_2 \neq 0, \ \delta \phi_1 = \delta \phi_2 = 0); \tag{9a}$$

$$2C\lambda_2 = 0$$
,  $(\delta u_1 = \delta u_2 = 0, \ \delta \phi_1 = \delta \phi_2 = 0)$ ; (96)

$$2C\lambda_3 = 2g\cos\Delta\phi_0 < 0, \ (\delta u_1 = \delta u_2 = \delta u, \ \delta\phi_1 = -\delta\phi_2); \tag{9B}$$

$$2C\lambda_4 = \sigma_{\Pi} + 2g\cos\Delta\phi_0 < 0, \ (\delta u_1 = -\delta u_2, \ \delta\phi_1 = \delta\phi_2 = \delta\phi).$$
(9r)

(Коэффициент трансформации  $N_1 = N_2 = N$  в записи (9) и (10) опущен.) В скобках приведены соответствующие векторы возмущений.  $\sigma_{1} = u_0 \left( dG(u)/du \right)_{-}$  – прочность предельного цикла,  $C = C_1 = C_2$ . Согласно первому условию, система тестируется на одинаковые возмущения амплитуд. Поэтому неравенство (9а) есть условие амплитудной устойчивости автономного генератора. Так как для N-образных активных приборов  $\sigma_{\Pi} < 0$ , то условие автоматически выполнено. Из (9б) следует естественная нейтральность автоколебательной системы к возмущению начальной фазы. Третье условие определяет реакцию системы на противоположные возмущения фаз, т.е. представляет собой собственно условие устойчивости синхронизма. Из (9в) следует, что  $\lambda_3 < 0$  для:  $\pi/2 < \Delta \phi_0 < 3\pi/2$ . Таким образом, при  $\alpha = \pi$  и  $\theta = 0$  в системе устойчивы противофазные и близкие к ним колебания. Синфазные и близкие к ним колебания из интервала  $-\pi/2 < \Delta \phi_0 < \pi/2$  при этом неустойчивы. Из (9г) следует, что система устойчива к встречному возмущению амплитуд за счет амплитудной ( $\sigma_{\Pi} < 0$ ) и фазовой  $(2g \cos \Delta \phi_0 < 0)$  устойчивостей.

Условия устойчивости для резистивной связи первого типа ( $\alpha = 0$ ) отличается от (9) знаком перед *g*; при данной связи устойчивы синфазные или близкие к ним колебания:  $-\pi/2 < \Delta \varphi_0 < \pi/2$ .

В случае сильных частотных свойств  $C_{12} \neq 0$  и  $C_{11} \neq 0$ , и пренебрегать этими параметрами нельзя. Для симметричной системы ( $\theta = 0$ ) при  $\alpha = 0$ , получаются следующие условия устойчивости синфазного ( $\Delta \phi_0 = 0$ ) вида колебаний:

$$\lambda_1 = \sigma_{\Pi} / 2 (C + C_{BX}) < 0, \ (\delta u_1 = \delta u_2 \neq 0, \ \delta \phi_1 = \delta \phi_2 = 0);$$
 (10a)

$$\lambda_2 = 0$$
,  $(\delta u_1 = \delta u_2 = 0, \quad \delta \phi_1 = \delta \phi_2 \neq 0)$ ; (106)

$$\lambda_3 = -g/(C - C_{12}) < 0, \ (\delta u_1 = \delta u_2 = 0, \ \delta \phi_1 = -\delta \phi_2 \neq 0);$$
 (10B)

 $\lambda_4 = (\sigma_{\Pi} - 2g)/2(C - C_{12}) < 0, (\delta u_1 = -\delta u_2 \neq 0, \delta \phi_1 = \delta \phi_2 = 0).$  (10г) Для противофазного вида колебаний ( $\Delta \phi_0 = \pi$ ) антисимметричной системы ( $\theta = \pi$ ) при  $\alpha = \pi$  получаются четыре аналогичных (10) корня, отличающихся знаком перед  $C_{12}$ .

Далее в главе подробно анализируется неравенство (10в), описывающее реакцию системы на противоположное возмущение фаз. Отсюда следует наиболее важный теоретический результат: устойчивость когерентных колебаний теряется, если  $C_{12} > N^2 C$ . Для оценки этой возможности в обобщенную модель четырехполюсника связи *Y* вводится волновое описание с помощью параметров рассеяния  $S_{kl}$ . В результате для проводимости связи  $Y_{12}(j\omega)$  получена формула

$$Y_{12}(j\omega) = -2s \frac{\cos\alpha_s - 2s - j\sin\alpha_s}{1 + 4s(s - \cos\alpha_s)}, \qquad (11)$$

где  $S_{12} = s \exp(-j\alpha_s)$ . Показано, что параметр *s* лежит в пределах  $s = 0 \div 0.5$ , причем верхнее его значение соответствует отсутствию в канале связи дополнительных, кроме общей согласованной нагрузки, диссипативных элементов Частотный профиль характеристик  $Y_{12}(j\omega)$  при  $\alpha_s \sim \omega$  показан на рисунке 2.



Рисунок 2 — Резонансные свойства проводимости связи  $Y_{12}(j\omega)$ : 1 —  $\operatorname{Re} Y_{12}$ ; 2 —  $\operatorname{Im} Y_{12}$ .

В областях настройки вокруг точек  $\alpha_s = (2n+1)\pi$  имеем Re $Y_{12} > 0$ . Здесь устойчив синхронный режим с противофазными колебаниями. Ширина этой области занимает подавляющую часть интервала  $2\pi$ . На большей его части Im $Y_{12} \approx 0$ и имеет слабый наклон, т.е. можно считать, что  $C_{12} \approx 0$ .

В областях вблизи точек  $\alpha_s = 2n\pi$  параметр связи отличается резонансным поведением, причем  $C_{12} > 0$ . Отрицательный знак Re $Y_{12}$  является признаком устойчивости синфазных колебаний. Из (11) следует, что с увеличением *s* область резонанса сужается и при  $s \rightarrow 0.5$  стягивается в точку. При этом параметр  $C_{12}$  неограниченно возрастает. Если  $C_{12} > N^2 C$ , то условие (10в) не выполняется, и режим синфазных колебаний неустойчив. Противофазные колебания также неустойчивы, поскольку для их устойчивости необходима резистивная связь второго типа Re $Y_{12} > 0$ . Отсюда делается вывод: в системе отсутствует механизм удержания стационарных фазовых соотношений, и ни один из когерентных режимов существовать не может. На этом основании выдвигается предположение, что движение фаз автоколебаний в такой системе на интервале  $[0, 2\pi]$  будет происходить по сложным, нерегулярным траекториям, и система будет демонстрировать режим дина-

мического хаоса. Анализ завершается формулировкой критерия разрушения когерентности

$$C_{12} > N^2 C$$
. (12)

Развивающаяся при этом неустойчивость является динамической.

При выполнении критерия (12) корень λ<sub>4</sub> также становится положительным.

Условию (10а) соответствует одинаковое возмущение стационарных амплитуд. Устойчивость теряется, когда  $C_{\rm BX} < 0$  и  $|C_{\rm BX}| > N^2 C$ . Это возможно при рассогласовании общей нагрузки канала связи, когда входные проводимости приобретают заметные частотные свойства. Параметры  $Y_{\rm BX}$  и  $C_{\rm BX}$  симметричного канала связи описываются соотношениями:

$$Y_{\rm BX} = \frac{y_{\rm H}/g_0 + j0.5 \left[1 - \left(y_{\rm H}/g_0\right)^2\right] \sin 2\theta_{\rm I}}{1 - \left[1 - \left(y_{\rm H}/g_0\right)^2\right] \sin^2 \theta_{\rm I}} g_0, \quad C_{\rm BX} = \left[1 - \left(\frac{y_{\rm H}}{g_0}\right)^2\right] \frac{g_0 l_{\Sigma}}{\nu}, \quad (13)$$

 $2\theta_1 = (l_{\Sigma}\omega/v)$ ,  $l_{\Sigma}$  – электрическая и геометрическая длины канала; v – скорость волны;  $y_{_{\rm H}}/g_0$  – нормированная проводимость общей нагрузки.



Рисунок 3 – Частотные характеристики: 1 – Re  $Y_{12}$ ; 2 – Im  $Y_{12}$ ; 3 – Im  $Y_{ax}(j\omega)$  для  $y_{\mu} > g_{0}$ ; 4 – Im  $Y_{ax}(j\omega)$  для  $y_{\mu} < g_{0}$ ; 5 – ( $-N^{2}$  Im  $Y_{\kappa}(j\omega)$ ).

На рисунке 3 (в нижней части) изображен качественный вид частотных характеристик  $Y_{\text{вх}}(j\omega)$ . Частота синхронных автоколебаний определяется пересечением Im $Y_{\text{вх}}(j\omega)$  с частотной характеристикой колебательных систем  $-N^2 \text{ Im } Y_{\text{к}}(j\omega)$ . Если канал связи недогружен и настроен в область  $2\theta_1 \approx 2n\pi$ ( $y_{\text{н}} < g_0$ , кривая 4) то, как следует из (13), параметр  $C_{\text{вх}} > 0$ 

и условие (10б) выполняется, т.е. синфазный режим устойчив (точка а). Если канал перегружен ( $y_{\rm H} > g_0$ , кривая 3), то  $C_{\rm BX} < 0$ . При достаточно большой длине канала связи  $l_{\Sigma}$  величина  $C_{\rm BX}$  может достигать существенных значений, так что  $|C_{\rm BX}| > N^2 C$ , и условие (10а) наруша-

ется. В этом случае имеется три синфазных решения: среднее (точка а) – неустойчиво; два крайних (точки b,c) – устойчивы. Неустойчивость может проявляться в виде скачков синхронной частоты между устойчивыми ветвями, имеющими гистерезисное перекрытие по частоте. Иначе говоря, в системе может развиваться конкуренция подтипов колебаний. Подобная ситуация может возникать в генерирующих приборах различного типа; так, в [8\*] описано схожее явление в релятивистском импульсном магнетроне со связанными резонаторами. В завершение анализа формулируется условие статической неустойчивости:

$$C_{\rm\scriptscriptstyle BX} > N^2 C, \quad C_{\rm\scriptscriptstyle BX} < 0 \tag{14}$$

В четвёртой главе представлен анализ резонансных свойств параметра взаимной связи автогенераторов для различных конфигураций канала связи.



Рисунок 4 – Волновой канал связи с резонансными свойствами

Простейшая цепь, обладающая сильными резонансными свойствами параметра связи, показана на рисунке 4. Канал связи представляет собой отрезки линии передачи с волновой проводимостью  $g_0$  и с электриче-

скими длинами  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , соединяющие автогенераторы и включенную между ними диссипативную нагрузку. Параметр несимметрии определяется как  $\theta = \theta_2 - \theta_1$ ,  $\alpha_s = \theta_1 + \theta_2 \equiv \theta_{\Sigma}$ . Общая нагрузка согласована при  $g_{\mu} = 2g_0$ . При равенстве отрезков цепь симметрична ( $\theta = \theta_1 - \theta_2 = 0$ ); режим синфазных колебаний для нее является режимом суммирования мощностей автогенераторов. При  $\theta = \theta_1 - \theta_2 = \pi$  цепь антисимметрична; режимом суммирования для нее является режими противофазных колебаний.

Рассматриваемые цепи связи полностью описываются с помощью волновых *S* -параметров:

$$S_{11} = -S_{12}e^{j\theta}, \quad S_{22} = -S_{12}e^{-j\theta}, \quad S_{12} = s\exp(-j\alpha_s).$$

Случай  $s = |S_{12}| = 0.5$  соответствует отсутствию погонных потерь в канале связи. Проводимость связи этих цепей:

$$Y_{12} = \frac{-2s}{(\cos\alpha_s - 2s\cos\theta) + j\sin\alpha_s} g_0.$$
(15)



Рисунок 5 – Расчёт параметра связи  $Y_{12}/g_0$ для различных вариантов симметрии и значений параметра s: 1,3,4,5 - s = 0,4999, 2 – s = 0,48; 1,2 –  $\theta = 0$ , 3 –  $\theta = \pi/10$ , 4 –  $\theta = \pi$ ; 5 –  $\theta = \pi - \pi/10$ .



Рисунок 6 – Четырёхполюсник Y в виде волнового канала с диссипативной неоднородностью

На рисунке 5 приведён расчёт выражения (15) для интервала углов  $\alpha_s \approx (4 \div 5) \pi$ . При  $\theta = 0$ и *s* = 0.4999 (кривые 1) область  $\operatorname{Re} Y_{12} < 0$  очень узка и расширяется при введении несимметрии θ≠0 (кривые 3). Кривые 4 и 5 построены для антисимметричного ( $\theta = \pi$ ) и близкого к нему варианта и демонстрируют поведение резонансное параметра связи в области  $\operatorname{Re} Y_{12} > 0$ . Введение «несимметрии» ( $\theta \neq \pi$ , кривые 5) аналогично приводит к расширению указанной области. Уменьшение параметра *s* для обоих вариантов также приводит к расширению резонансных областей.

Таким образом, симметричные и антисимметричные цепи взаимной связи обладают силь-

ными резонансными свойствами параметра  $Y_{12}$ . Как следует из (10) и (12) для обоих вариантов при достаточно больших значениях  $|C_{12}|$  устойчивость синфазных и противофазных колебаний нарушается. Следовательно, могут быть реализованы условия разрушения когерентности.

Оценка влияния погонных потерь на резонансные свойства проведена для схемы рисунка 6; проводимость связи описывается выражением

$$Y_{12} = -g_0 \left[ \frac{y_{\scriptscriptstyle H}}{g_0} (ch\gamma l_{\scriptscriptstyle \Sigma} - ch\gamma \delta l) + sh\gamma l_{\scriptscriptstyle \Sigma} \right]^{-1},$$

где  $\gamma = \sigma + j\beta$  – постоянная распространения,  $\sigma$  – постоянная потерь;  $\beta = 2\pi/\lambda_{\nu}$  – волновое число;  $l_{\Sigma} = l_1 + l_2$  – полная длина канала связи;  $\delta l = |l_1 - l_2|$ ;  $y_{\mu}$  – приведенная проводимость неоднородности. На рисунке 7 приведены рассчитанные зависимости действительной и мнимой частей  $Y_{12}/g_0$  от полной электрической длины канала связи  $\theta_{\Sigma}$  для согласованной неоднородности ( $y_{\mu} = g_0$ ) в области  $\theta_{\Sigma} = 4\pi$ . (Здесь параметр несимметрии  $\theta = \beta \delta l$ .)



кой: 1 –  $\sigma = 10^{-4}$ ,  $\theta = 0$ ; 2 –  $\sigma = 0.3$ ,  $\theta = 0$ ; 3 –  $\sigma = 10^{-4}$ ,  $\theta = \pi/6$ .

ной схемы  $\theta = \pi$  ( $\delta l = \lambda_v/2$ ) проявляются аналогичным образом.



Рисунок 8 – Цепь связи с тремя нагрузками



Рисунок 9 – Резонансные свойства параметра связи  $Y_{12}$  схемы с тремя нагрузками в канале связи:  $1 - G_0 = 1(\theta = 0); 2 - G_0 = 0, 5(\theta = 0);$  $3 - G_0 = 0(\theta = 0); 4 - G_0 = 0(\theta = \pi/5).$ 

В случае  $\theta = 0$  при малых погонных потерях (кривые 1), область  $\operatorname{Re}(Y_{12}/g_0) < 0$  характеризуется очень узкой полосой настойки. Взаимная связь автогенераторов при этом является предельно сильной:  $s \approx 0.5$ . Увеличение погонных потерь, что эквивалентно s < 0.5 приводит к расширению резонанса (кривые 2). Введение несимметрии (кривые 3) также приводит к расширению области  $\operatorname{Re}(Y_{12}) < 0$ . Частотные свойства антисимметрич-

На рисунке 8 представлен ещё один пример цепи связи с тремя нагрузками, обладающей резонансными свойствами. На рисунке 9 приведены результаты расчета проводимости связи У12 четырёхполюсника. Кривые имеют резонансный характер. На «резонансной» частоте  $\omega_p$ , где  $\theta_0 = \pi/2$ связь является чисто резистивной, не зависит от проводимости боковых нагрузок G<sub>1</sub> и определяется только проводимостью центральной нагрузки:  $Y_{12} = 1/G_0$ . Области частот, в которых  $\operatorname{Re} Y_{12} > 0$ , являются областями настройки противофазных колебаний. С уменьшением G<sub>0</sub> величина связи возрастает, область настройки сужается и в

пределе  $G_0 \to 0$  стремится к нулю (кривые 1,2,3). Введение несимметрии  $\theta \neq 0$  приводит к расширению резонансной области (кривые 4).

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования когерентных и некогерентных процессов в системе связанных СВЧ автогенераторов. Экспериментально исследовалась система двух взаимосвязанных автогенераторов с общей нагрузкой (или несколькими нагрузками) в цепи связи. СВЧ автогенераторы выполнены в виде двух раздельных модулей на биполярных транзисторах типа КТ-640. Генераторы имели электронную перестройку частоты за счёт варикапа (АА620) и соединялись с внешней цепью (каналом связи) с помощью стандартных 50-омных коаксиально – полосковых переходов. Выходная мощность отдельных автогенераторов при работе на согласованную нагрузку 50Ом составляет (30÷60)мВт в полосе (2,9÷3,5)ГГц. Автогенераторы являются абсолютно стабильными: в автономном режиме при изменении питания транзисторов (до ±30%) или при значительном рассогласовании нагрузки (и даже при её отключении) во всем диапазоне перестройки частоты существует стабильный одночастотный режим; уровень гармоник в выходном сигнале не превышает -20dB.



Рисунок 10 – Топология экспериментальной схемы; схема экспериментальной установки

На рисунке 10 изображена топология экспериментальной схемы в общем виде, когда канал связи содержит три нагрузки. Из этой схемы можно получить все варианты цепей с резонансными свойствами. При отключении двух боковых нагрузок имеем симметричную цепь с одной нагрузкой. Отключение центральной и одной боковой нагрузок (или смещение центральной нагрузки на  $\theta_0 = \pi/2$  к одному из генерато-

ров) даёт антисимметричный вариант. Отключение центральной нагрузки даёт систему с двумя нагрузками. С целью уменьшения погонных потерь линии связи и нагрузки были выполнены в виде воздушной несимметричной полосковой линии из латуни с волновым сопротивлением  $\rho_0 = 50 \, \text{Om}$ . Центральная и боковые нагрузки подключались к линии связи в виде Т-соединений. Вся полосковая конструкция располагалась на высоте 1мм от металлического основания. 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) типа Agilent E4405B. Для наблюдения огибающей динамических процессов выходной СВЧ сигнал после детектирования подавался на осциллограф (О) типа Agilent DSO5052A; полоса детектора (Д) составляет 3÷10 ГГц.



Рисунок 11 – Зависимость результирующей мощности системы автогенераторов от частоты в полосах синхронизации при  $\theta_{\Sigma} \approx 5\pi$ : 1 –  $f_2 \approx 3,232 \, \Gamma \Gamma \mu$ ; 2 –  $f_2 \approx 3,284 \, \Gamma \Gamma \mu$ ; 3 –  $f_2 \approx 3,325 \, \Gamma \Gamma \mu$ ; 4 –  $f_2 \approx 3,360 \, \Gamma \Gamma \mu$ ; 5 –  $f_2 \approx 3,391 \, \Gamma \Gamma \mu$ ; 6 –  $f_2 \approx 3,418 \, \Gamma \Gamma \mu$ ; 7 –  $f_2 \approx 3,440 \, \Gamma \Gamma \mu$ ; 8 –  $f_2 \approx 3,460 \, \Gamma \Gamma \mu$ ; 9 –  $f_2 \approx 3,492 \, \Gamma \Gamma \mu$ .

На первом этапе исследовалась симметричная система с одной нагрузкой. Эксперимент проводился следующим образом: при последовательном изменении геометрической длины канала  $l_{\Sigma}$ , параллельном смещении частот автогенераторов и введении их взаимной частотной расстройки наблюдались спектры колебаний и формы огибающей суммарного сигнала, несущей в себе информацию о разности фаз взаимодействующих колебаний; определялись полосы взаимной синхроанализировалась низации И форма мощностно-частотных характеристик (МЧХ). На ри-

сунке 11 представлены МЧХ противофазных колебаний при настройке  $\theta_{\Sigma} \approx 5\pi$ , когда Re $Y_{12} > 0$ . Рисунок 12 отражает трансформацию спектров и форм огибающих. При отстройке порядка 200 МГц (рисунок 12а) в системе существует режим биений; то есть разность фаз колебаний  $\Delta \phi(t)$  проходит полный цикл изменения: 0÷2 $\pi$ . Огибающая суммарного сигнала на периоде биений достигает максимального и минимального уровней (пунктирные линии), соответствующих синфазным и противофазным колебаниям. Спектр колебаний дискретный и широкий и занимает полосу почти 1ГГц. Сближение частот генераторов приводит к увеличению периода биений и сгущению спектра (рисунок 12б) с последующим захватом частот. При уменьшении частотной расстройки автогенераторов стационарная разность фаз приближается к

 $\pi$  и при  $f_1 \approx f_2$ , когда  $\Delta \phi \approx \pi$ , мощности автогенераторов практически полностью вычитаются в общей нагрузке (рисунок 12в), что соответствует минимумам МЧХ на рисунке 11. Введение расстройки обратного знака повышает уровень мощности; далее следует выход из синхронизации и установление режима биений.



Рисунок 12 – Трансформация спектра и формы огибающей выходного сигнала системы при различных частотных расстройках автогенераторов при длине канала  $\theta_{\Sigma} \approx 5\pi$ ; частота второго автогенератора  $f_2 \approx 3,217 \Gamma \Gamma \mu$ 

На серии рисунков 13 отражена трансформация спектра и формы биений суммарного сигнала в общей нагрузке при настройки в резонасную область связи  $\theta_{\Sigma} \approx 4\pi$ , где  $\operatorname{Re} Y_{12} < 0$ . При больших расстройках частот автогенераторов (порядка 80÷100 МГц) в системе имеет место также режим биений; спектр колебаний дискретный и занимает полосу почти 1ГГц (рисунок 13а). Колебания испытывают большую девиацию частоты, что является следствием сильного увлечения (модуляции) фаз генераторов в пределах периода биений за счет сильной взаимной связи. Огибающая суммарного сигнала на периоде биений поочередно достигает максимального и минимального уровней; разность фаз  $\Delta \varphi(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t)$  проходит полный цикл изменения: 0÷2π. При дальнейшем сближении частот спектр, оставаясь дискретным и эквидистантным, сгущается, однако синхронизм не наступает. Вместо этого происходит бифуркация удвоения периода биений (рисунок 13б). Это связано с тем, что разности фаз колебаний в области вокруг  $\Delta \phi = 0$ , вследствие динамической 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  $\Delta \varphi(t)$  и период прохождения фазами интервала  $2\pi$  удваивается.



Рисунок 13 – Трансформация спектра и формы огибающей выходного сигнала системы при различных частотных расстройках автогенераторов при длине канала  $\theta_{\Sigma} \approx 4\pi$ ; частота второго автогенератора  $f_2 \approx 3,290$ ГГц

При этом разность фаз колебаний в точках возврата не достигает  $\Delta \phi = 0$ , и уровень биений в соответствующие моменты становится ниже. Аналогичные процессы происходят в области неустойчивости вокруг  $\Delta \phi = \pi$ . При дальнейшем уменьшении расстройки система через каскад бифуркаций удвоения периода биений переходит к режиму динамического хаоса со сплошным спектром (рисунок 13в). Характерно, что система демонстрирует разрушение когерентности при абсолютном равенстве частот автогенераторов. Введение расстройки другого знака приводит к переходу в режим биений в обратном порядке.

Обусловленность хаотического поведения системы резонансными свойствами канала связи доказывается следующими опытами. В первом опыте, при настройке  $\theta_{\Sigma} \approx 4\pi$ , резонансные свойства параметра снижались путем введения несимметрии  $\theta \sim (10^\circ \div 20^\circ)$ . Поведение системы кардинально изменяется: почти во всем диапазоне перестройки существует стабильный когерентный режим с полосой синхрониза-

ции 100÷250 МГц. При близости парциальных частот мощности генераторов суммируются в общей нагрузке (рисунок 14).



Рисунок 14 — МЧХ несимметричной схемы:  $\theta_{\Sigma} \approx 4\pi$ ,  $\theta \approx \pi/18$ ; 1 —  $f_2 \approx 3,221\Gamma\Gamma\mu$ , 2 —  $f_2 \approx 3,265\Gamma\Gamma\mu$ , 3 —  $f_2 \approx 3,309\Gamma\Gamma\mu$ ,  $f_2 \approx 3,365\Gamma\Gamma\mu$ , 5 —  $f_2 \approx 3,413\Gamma\Gamma\mu$ . Во втором эксперименте в канал связи симметричной схемы вводились погонные потери, снижающие модуль волнового коэффициента передачи  $s = |S_{12}|$  до  $s \approx 0.375$ . Погонные потери вводились с помощью листа проводящей бумаги и калибровались.

На рисунке 15 представлена трансформация спектров и огибающих при последовательном увеличении *s*. При максимальных потерях  $s \approx 0,375$  (рисунок 15а) устойчив режим синфазных коле-

баний с широкой полосой синхронизации порядка  $150 \div 300 \text{ MF}$ ц; МЧХ этого режима подобны МЧХ на рисунке 14. При уменьшении потерь ( $s \approx 0, 39$ ) условия устойчивости синфазных колебаний не выполняется и в области  $\Delta \phi \approx 0$  возникает модуляционная неустойчивость (рисунок 15б).



Рисунок 15 – Трансформация спектра и формы огибающей выходного сигнала системы при различных уровнях погонных потерь при длине канала  $\theta_{\Sigma} \approx 4\pi$ ;  $f_1 \approx f_2 \approx 3,240 \Gamma\Gamma$ ц

При  $s \approx 0,41$  модуляционные возмущения фаз накапливаются и возникают турбулентные выбросы в область противофазных колебаний; в спектре появляется шумовой пьедестал (рисунок 15в) и наблюдается переход в режим перемежаемого хаоса. При  $s \rightarrow 0,5$  ламинарные стадии сокращаются и исчезают, исчезают также регулярные составляющие спектра, и система переходит в режим развитого динамического хаоса (рисунок 13в).

Экспериментально исследовано влияние рассогласования общей нагрузки и различия напряжения питания автогенераторов на режим динамического хаоса. При рассогласовании более чем в два раза и при изменении напряжения питания одного из автогенераторов до 30% система сохраняет признаки хаотического движения.

Режим динамического хаоса в антисимметричной системе и системы с двумя нагрузками реализуется аналогичным образом.

Подробно исследовано поведение симметричной системы с одной нагрузкой при увеличении длины канала связи в областях резонансов. Полоса частот с хаотической динамикой последовательно сужается и реализуется при все более высоких расстройках частот автогенераторов. Характерно, что в области малых расстроек наблюдается чередование хаотических и регулярных (когерентных) режимов. При длинах, превышающих  $\theta_{\Sigma} > 18\pi$ , хаотический режим не обнаруживается. Вместо этого в системе наблюдается неустойчивость другого, статического типа.



Рисунок 16 – МЧХ синхронных колебаний при недогруженном канале связи:  $\rho_{\mu} \approx \rho_{0} \approx 50 \text{ Ом}; \theta_{\Sigma} \approx 22\pi; f_{2} \approx 3,092 \text{ ГГц}$ 

Условия статической нестабильности исследованы в работе также подробно. Так, для  $\theta_{\rm y} \approx 22\pi$  в случае симметричного согласованного канала (сопротивление нагрузки  $\rho_{\rm H} \approx 25 \, \text{Om}$ , сопротивление канала связи  $\rho_0 \approx 50 \, \text{Om}$ ) система с противофазным режимом при переходе через узкие области  $\operatorname{Re} Y_{12} < 0$  скачком перебрасы-

вается в соседнюю область, где  $\operatorname{Re} Y_{12} > 0$ . При этом происходит скачок синхронной частоты. В области скачков две устойчивые ветви противофазных колебаний имеют большое гистерезисное перекрытие. Эти ветви близки к кривым 1 и 2 на рисунке 16. Переключение между

режимами происходит спонтанно при перестройке частот автогенераторов. Режим синфазных колебаний автогенераторов при согласованном канале не обнаружен. При недогруженном канале связи ( $\rho_{\mu} \approx \rho_0 \approx 50 \text{ Om}$ ) в системе появляется третий режим – режим синфазных колебаний (кривые 3 на рисунке 16); соответствующая им ветвь 3 по частоте лежит между ветвями 1 и 2. Таким образом, реализуется тристабильный режим с большим гистерезисным перекрытием. При перегруженном канале ( $\rho_{\mu} < 25 \text{ Om}$ ) ветвь синфазного режима исчезает, что объясняется нарушением условия устойчивости (14). В системе существует два режима противофазных колебаний; МЧХ подобны ветвям 1 и 2 рисунка 16.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Теоретически исследована локальная устойчивость когерентных (синхронных) колебаний в системе связанных СВЧ автогенераторов.

2. Предложена обобщенная модель волнового канала связи, однозначно определяющая резонансные свойства параметра взаимной связи.

3. Введено понятие сильных и слабых частотных (резонансных) свойств параметра взаимной связи.

4. Получены условия локальной устойчивости (когерентных) синхронных колебаний при слабых и сильных частотных свойствах параметра взаимной связи.

5. Сформулирован критерий разрушения когерентности в системе взаимосвязанных СВЧ автогенераторов при резонансе взаимной связи, определяющий условия перехода системы в режим динамического хаоса.

6. Сформулированы условия статической неустойчивости когерентного режима в системе двух связанных СВЧ автогенераторов.

7. Предложен ряд схемных вариантов каналов взаимной связи с различными вариантами симметрии и числом нагрузок, обладающих сильными резонансными свойствами параметра связи.

8. Определены схемные параметры каналов взаимной связи, управляющие резонансными свойствами параметров взаимодействия автогенераторов.

9. Проведено экспериментальное исследование когерентных режимов системы двух связанных транзисторных СВЧ автогенераторов. Определены области параметров, в которых существуют синфазные, противофазные или близкие к ним когерентные режимы. 10. Проведено масштабное экспериментальное исследование некогерентного режима (режима динамического хаоса) системы двух связанных автогенераторов.

11. Обнаружены различные сценарии перехода системы к динамическому хаосу: через последовательность бифуркаций удвоения периода биений, и через режим с перемежаемостью фаз колебаний.

12. Показано, что режим динамического хаоса обладает высоким уровнем стабильности по отношению к вариациям параметров пассивных и активных элементов системы: частотных расстроек автогенераторов, соотношения амплитуд колебаний, рассогласования нагрузок, электрической длины канала взаимной связи.

13. Обнаружена и экспериментально исследована статическая неустойчивость, возникающая при больших длинах канала связи.

14. Получены экспериментальные доказательства определяющей роли резонансных свойств параметра взаимной связи в разрушении когерентности в системе двух СВЧ автогенераторов. В результате разрушения когерентности система переходит в режим динамического хаоса.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

# Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

- 1. Новиков С.С., Усюкевич А.А. Разрушение когерентного режима в системе двух автогенераторов при сильных резонансных взаимных связях // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20. №5. С. 16–30.
- 2. Новиков С.С., Усюкевич А.А. Динамический хаос в системе связанных парциально стабильных СВЧ автогенераторов // Известия вузов. Физика. 2012. №8/3. С.209–210.
- 3. Новиков С.С., Усюкевич А.А. Разрушение когерентного режима в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия вузов. Физика. 2010. №9/2. С.239-240.
- Новиков С.С., Усюкевич А.А. Синхронные режимы системы автогенераторов, связанных через канал большой длины // Известия вузов. Физика. 2010. №9/2. С.241-243.
- 5. Usjukevitch A.A. Dynamic instability in system of two coupled microwave oscillators // Известия вузов. Физика. 2010. №9/2. С.325-326.
- 6. Новиков С.С., Усюкевич А.А. Об условиях разрушения когерентного режима в генерирующих системах с взаимными связями // Известия Вузов. Физика. 2009. №11/2. С. 283-288.

## Статьи в сборниках статей и трудов конференций

- Усюкевич А.А., Новиков С.С. Регулярная и хаотическая динамика в системе двух связанных СВЧ автогенераторов // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. научных тр. / Под ред. Г.Я. Шайдурова. – Красноярск, 2012. С.294–299.
- Усюкевич А.А., Новиков С.С. Спектры колебаний в системе связанных СВЧ автогенераторов с неустойчивым синхронным режимом // Информационно-измерительная техника и технологии: материалы II Научно-практической конференции. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. С. 82–83.
- Novikov S.S., Usjukevitch A.A. Chaotic Oscillation in the Auto-Oscillator System with Resonant Couplings // In Proc. 16th Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk, 2010. – Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS, 2010. pp. 512–515.
- Novikov S.S., Usjukevitch A.A. Instabilities of Coherent Processes in the Self-Oscillating System with Wave Coupling Channels // In Proc. 16th Symposium on High Current Electronics. Russia, Tomsk, 2010. Tomsk: – Publishing House of the IOA SB RAS, 2010. pp. 516–520.
- Усюкевич А.А. Разрушение когерентного режима в системе двух взаимосвязанных автогенераторов // Материалы XLVIII Международной научной студенческой конференции «Студент и научнотехнический прогресс»: Физика / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск, 2010. С. 143.
- Усюкевич А.А., Новиков С.С. Хаотические колебания в системе двух СВЧ-автогенераторов при резонансе взаимной связи // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов под редакцией А.И. Громыко, Г.С. Патрина. – Красноярск: ИПК СФУ, 2010. С.118– 123.
- Усюкевич А.А. Хаотические режимы в системе двух автогенераторов при резонансной взаимной связи / Труды 6-ой конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора. – Томск: Томский государственный университет, 2010. С. 128–133.
- Усюкевич А.А. Динамическая неустойчивость в системе двух автогенераторов при резонансной взаимной связи // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. С. 277–281.
- 15. Усюкевич А.А. Исследование когерентных и некогерентных режимов в системе двух взаимосвязанных автогенераторов // Материалы XLVI Международной научной студенческой конференции «Студент и на-

учно-технический прогресс»: Физика / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск, 2008. С. 21–22.

16. Усюкевич А.А.Исследование когерентных и некогерентных режимов работы системы двух взаимосвязанных автогенераторов / Труды 4-ой конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора – Томск: Томский государственный университет, 2008. – С. 53–56.

#### Цитируемая литература:

1<sup>\*</sup>. Дмитриев А.С. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи / А.С. Дмитриев, А.И. Панас – М.: Наука. 2002. 252 с. 2<sup>\*</sup>. Романов И.В. Роль рассогласования параметров передатчика и приёмника в системе хаотической связи с нелинейностью в виде композиции парабол / И.В. Романов, И.В. Измайлов, А.П. Коханенко, Б.Н. Пойзнер // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55. №8/3. С. 211–212.

3\*. Дмитриев А.С. Сверширокополосные беспроводные сети на основе хаотических радиоимпульсов / А.С. Дмитриев, Л.В. Кузьмин, В.Ю. Юркин // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 4. С. 90–104.

4\*. Лукин К.А. Шумовая радиолокация миллиметрового диапазона / К.А. Лукин // Радиофизика и электроника. Т. 13. Спец. вып. 2008. С. 344–358.

5\*. Кузнецов С.П. Динамический хаос и однородно гиперболические аттракторы: от математики к физике / С.П. Кузнецов // Успехи физических наук. 2011. Т. 181. № 2. С. 121–149.

6\*. Владимиров С.Н. Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем / С.Н Владимиров, А.С. Майдановский, С.С. Новиков. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1993. 203 с.

7\*. Дворников А.А. Фазированные автогенераторы радиопередающих устройств / А.А. Дворников, Г.М. Уткин. – М.: Энергия, 1980. 177 с.

8\*. Винтизенко И.И. Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы / И.И. Винтизенко, С.С. Новиков. Томск: Изд-во НТЛ. 2009. 432 с.