

УДК 621.373, 621.311.001.57, 004.451.23

Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы

Новиков С. С., Костерова В. С.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
просп. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Российская Федерация
nss@sibmail.com, vsk727@yandex.ru*

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: Работа посвящена исследованию динамической неустойчивости когерентных режимов системы двух автогенераторов с сильной взаимной резонансной связью. Показано, что данная система может генерировать синхронные колебания на трех различных частотах, которые соответствуют базовым типам колебаний — модам: одной синфазной и двум противофазным. Проведен качественный анализ влияния характеристик резонансной связи на устойчивость собственных синхронных типов колебаний. Сформулирован аналитический критерий неустойчивости синфазных колебаний и условия его выполнения. Обсуждается возможность подавления устойчивости противофазных колебаний. Методом численного моделирования исследованы временные и спектральные характеристики колебательных процессов в различных режимах, включая хаотический. Продемонстрированы варианты поведения системы при конкуренции и подавлении мод, сопровождаемые автомодуляционными процессами. Обсуждаются особенности настройки динамического хаоса и диагностики его составляющих. Показана возможность получения хаотических сигналов с непрерывным спектром в полосе частот, превышающей октаву.

Ключевые слова: неустойчивость, резонансная связь, синхронные колебания, динамический хаос.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Новиков С. С., Костерова В. С. Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 2. С. 218—235.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Новиков, С. С. Устойчивые и неустойчивые динамические процессы в автоколебательной системе с тремя степенями свободы / С. С. Новиков, В. С. Костерова // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 2. — С. 218—235.

1. Введение

В системе двух связанных автогенераторов в зависимости от величины и характера взаимной связи могут возникать различные виды колебаний: как классические синхронные так и некогерентные [1, 2]. Оптимальными с точки зрения устойчивости синхронных режимов являются так называемые резистивные связи, обусловленные введением в каналы связи автогенераторов диссипативных элементов — нагрузок. В зависимости от типа (знака) резистивной связи в системе двух автогенераторов устойчивы либо синфазные, либо противофазные (или близкие к ним) синхронные колебания [3]. Реальные цепи связи обладают резонансными свойствами, влияние которых на устойчивость необходимо учитывать при решении тех или иных практических задач [4—7]. Как показывает опыт, сильные резонансные свойства каналов связи системы двух автогенераторов могут кардинально изменить поведение системы. Оценка влияния резонансных свойств на устойчивость синхронных колебаний была проведена в [8]. Позднее в [9—11] было теоретически и экспериментально показано, что при сильных резонансных связях «базовые» синхронные режимы теряют устойчивость (разрушаются) и на их месте возникает режим динамического хаоса. Существенная особенность модели состоит в том, что каждый из автогенераторов в автономном режиме является абсолютно стабильной одночастотной системой.

В данной работе методом численного моделирования исследуются динамические процессы развития неустойчивостей в системе двух автогенераторов с сильной резонансной связью.

2. Неустойчивости синхронных колебаний

Рассматриваемая в данной работе автоколебательная система имеет три степени свободы, то есть содержит три резонансных структуры. Собственные частоты подобных систем обычно определяются путем решения соответствующих характеристических уравнений, тогда как представления о типе (форме) собственных колебаний часто остается за пределами внимания исследователей. Вместе с тем, при рассмотрении вариантности динамических процессов определенную значимость и физическую наглядность приобретают представления о типах собственных движений и их устойчивости или неустойчивости. Подобная постановка задачи особенно актуальна при исследовании хаотических движений в динамических системах. Действительно, даже простейшие динамические системы в пространстве параметров способны демонстрировать разнообразные виды движений с бифуркационными переходами между ними. Среди них обычно можно вы-

делить базовые; в системах связанных автогенераторов к последним относятся виды синхронных колебаний. Хаотическая динамика возникает, когда все базовые движения неустойчивы, а вокруг них образуются области с неустойчивыми траекториями. Переходы между этими траекториями порождают хаотическую динамику. В связи с этим представляется, что структура указанных областей и их пересечений играет важную роль в развитии хаотической динамики. Это приобретает практическую важность при проектировании управляемых широкополосных источников. Поведение траекторий в процессе переходов несомненно зависит от локализации базовых частот и предопределяет спектрально-корреляционные характеристики динамического хаоса. В системе связанных автогенераторов основными синхронными модами являются синфазный и противофазный режимы. Рассмотрим далее способы реализации их неустойчивости.

Неустойчивость синфазных колебаний, приводящая к разрушению когерентности, может быть обусловлена сильными резонансными свойствами параметров связи. В качестве примера типичных резонансных свойств на рис. 1 приведен [11] профиль частотных характеристик проводимости связи $y_{12}(j\omega)$ простейшей цепи, изображенной на вкладке. 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 данной схемы $\alpha_s = \theta_1 + \theta_2 \equiv \theta_{\Sigma} \sim \omega\tau$, где τ — время распространения сигнала в канале связи; $\theta = \theta_2 - \theta_1$ — параметр несимметрии; $g_n = 2g_0$ — проводимость согласованной общей нагрузки. Резонансные свойства проводимости связи непосредственно вытекают из формулы [2]:

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

где s и α_s — модуль и аргумент элемента матрицы рассеяния $s_{12} = s \exp(-j\alpha_s)$. Величина s лежит в интервале (0—0.5), причем верхнее значение соответствует отсутствию потерь (погонных) в отрезках линии.

Характеристика $Re y_{12}(j\omega)$ является знакопеременной функцией частоты. Область частот последовательного резонанса, где $Re y_{12} < 0$, соответствует резистивной связи первого типа, при которой устойчивы синфазный или близкие к нему режимы колебаний. В области частот с резистивной связью второго типа ($Re y_{12} > 0$) устойчивы противофазный или близкие к нему режимы.

В работе [1] резонансные свойства описываются параметром

$$C_{12} = d(\operatorname{Im} y_{12}(j\omega))/d\omega \Big|_{\omega_0} \quad (2)$$

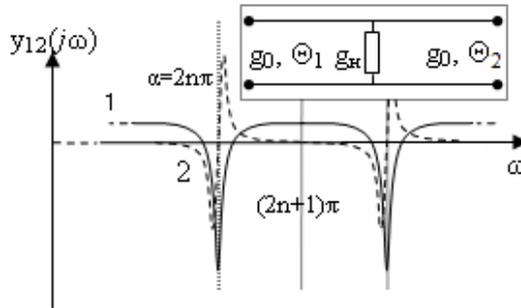


Рис. 1. Резонансные свойства проводимости связи, 1 — Rey_{12} ; 2 — Imy_{12} [11].

Fig. 1. Resonance properties of bond conductivity, 1 — Rey_{12} ; 2 — Imy_{12} [11]

Сильная резонансная связь первого типа реализуется в узких частотных интервалах вблизи $\alpha_s \approx 2\pi, 4\pi, \dots$, где $Rey_{12} < 0$. В этих интервалах в случае почти симметричной цепи ($\theta \approx 0$) и $s \rightarrow 0.5$ параметр C_{12} положителен ($C_{12} > 0$) и может достигать теоретически сколь угодно больших значений. При выполнении критерия

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

где C_{kc} — емкости колебательных систем, синфазный режим становится неустойчивым и происходит переход либо к противофазному режиму (если он устойчив), либо к режиму динамического хаоса. В последнем случае имеет место разрушение когерентности [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 [13].

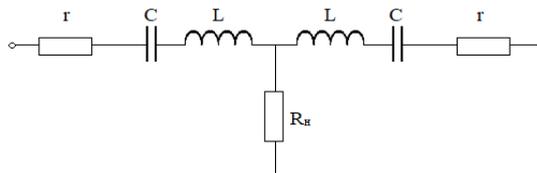


Рис. 2. Схема резонансной цепи связи.

Fig. 2. Scheme of the resonant conduction circuit

На рис. 2 приведена схема четырехполюсника связи исследуемой системы, в соответствии с которой автогенераторы соединяются друг с другом и с общей нагрузкой R_n через последовательные сосредоточенные резонансные контуры. Проанализируем резонансные свойства проводимо-

сти $y_{12}(j\omega)$ четырехполюсника; с целью упрощения будем считать его симметричным. В этом случае частотные характеристики описываются аналитическим выражением

$$y_{12}(j\omega) = -\frac{1}{\left(2 + \frac{z(j\omega)}{R_H}\right)z(j\omega)} \quad (4)$$

где

$$z(j\omega) = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = r + jz(\omega)$$

— комплексное сопротивление последовательных rLC -контуров.

Профиль частотных характеристик показан на рис. 3. Как видно, $Rey_{12}(j\omega)$ является знакопеременной функцией частоты. Характер связи в резонансной области 2 соответствует резистивной связи 1-го типа: $Rey_{12} < 0$. На резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ проводимость связи равна действительной отрицательной величине

$$y_{12}(j\omega_0) = -1/\left(2 + \frac{r}{R_H}\right)r. \quad (5)$$

Ширина резонансной области определяется соотношением

$$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = (2R_H + r)r. \quad (6)$$

Из (6) следует, что при любом R_H ширина резонансной области при уменьшении r сужается, а величина связи возрастает. Очевидно также, что уменьшение резонансной частоты ω_0 путем увеличения индуктивности L сужает указанную область, что соответствует увеличению добротности резонанса. При значительной отстройке частот генераторов от резонанса связи (области 1 и 3) имеем $Rey_{12} > 0$, $Imy_{12} \neq 0$ и $Imy_{12} \gg Rey_{12}$. При данном типе реальной части проводимости связи устойчивы противофазные колебания.

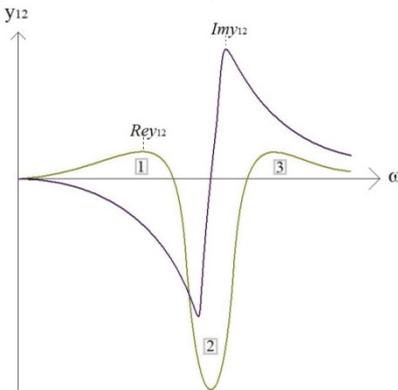


Рис. 3. Частотные характеристики проводимости связи.

Fig. 3. Frequency characteristics of the conduction of the bond

Поведение мнимой части проводимости связи ($Imy_{12}(j\omega)$) в области последовательного резонанса подобно рассмотренному выше примеру. Параметр C_{12} на резонансной частоте ω_0 определяется аналитически и равен

$$C_{12} = \frac{L}{r^2}. \quad (7)$$

Характерно, что (7) с точностью до коэффициента совпадает с выражением, приведенным в [3] в качестве частного примера. Представляет интерес управление устойчивостью синфазных колебаний в резонансной области 2. В соответствии с (3) и (7) устойчивость синфазных колебаний при настройке связи в резонанс может быть получена для любого L путем выбора достаточно большого значения омических потерь r . И, наоборот, при достаточно малых потерях выполняется критерий (3), и синфазный режим становится неустойчивым. Следует отметить, что в пределах области 2 параметр C_{12} изменяется и сохраняет положительный знак в интервале частот, который приближенно оценивается как

$$\omega_3 \approx \omega_0 \pm \frac{r}{2L}. \quad (8)$$

Таким образом, при типичных добротностях 100—200 указанный частотный интервал весьма узкий. Поэтому в общем случае, когда полная цепь связи включает в себя элементы выходных цепей автогенераторов, практическая настройка резонанса связи представляет собой достаточно трудную задачу.

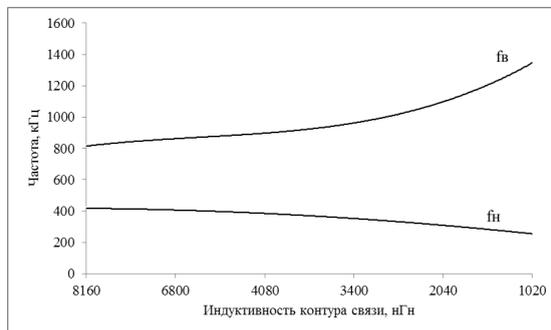


Рис. 4. Частоты противофазных типов колебаний.

Fig. 4. Frequencies of antiphase oscillation types

Рассмотренный выше критерий относится только к синфазной моде. Из соображений симметрии вытекает, что в системе могут существовать также противофазные колебания. Для противофазных колебаний в приближении равноамплитудности напряжение в точке подключения общей нагрузки равно нулю. Расчет собственных частот противофазных мод в

этом случае тривиален; на рис. 4 приведены их зависимости от индуктивности L колебательных контуров генераторов. Расчет проведен для частоты $f_0 = 550$ кГц; в численном эксперименте эта частота равна парциальным частотам автогенераторов, а также частоте синхронного синфазного режима. Таким образом, в системе кроме синфазных колебаний могут существовать две противофазные моды с частотами f_n и f_v , соответственно ниже и выше f_0 . Как видно из рис. 4, при уменьшении индуктивности (и при сохранении резонанса) эти частоты расходятся.

Неустойчивость противофазных мод реализуется другим способом. Так, известно [14], что в автогенераторных схемах при большой положительной обратной связи транзистор работает в сильном перенапряженном режиме; его колебательная характеристика вблизи стационарного состояния имеет большой отрицательный наклон, что приводит к неустойчивости периодических колебаний. (В радиотехнике подобная неустойчивость иллюстрируется с помощью диаграмм Ламерея). Эффективное управление колебательной характеристикой активного элемента — транзистора осуществляется с помощью отрицательной обратной связи по току. Такая связь реализуется включением в цепь эмиттера резистора R_3 (рис. 5).

3. Численное исследование динамических процессов

Исследуемая в численном эксперименте схема (рис. 5) представляет собой два транзисторных автогенератора, соединенных друг с другом через резонансную цепь связи. В модели использовался высокочастотный маломощный (с током до 100 мА) биполярный транзистор. Автогенераторы собраны по схеме емкостной трехточки (цепи питания транзисторов на рис. 5 не показаны). Схема резонансного четырехполюсника связи состоит из последовательных колебательных контуров r , C , L и полностью соответствует рис. 2. Для численных исследований использовалась программа *NI Multisim*. Частота работы автономных автогенераторов $f_0 = 550$ кГц задается элементами $C_{1,2}$, $L_{1,2}$. Для исследования временной динамики колебаний в синфазном и противофазном режимах в цепь базы в качестве начальных условий вводились ступенчатые напряжения одинаковых (++) или разных (+-) знаков.

В ходе экспериментов наблюдались и регистрировались колебательные напряжения, развиваемые автогенераторами на контурах автогенераторов и на общей нагрузке в процессе их возбуждения и развития, а также текущие спектры этих колебаний. Устойчивость синфазного режима при резонансной настройке цепи связи реализуется только при достаточно больших величинах r , когда выполняется неравенство, обратное (3). В

случае полной симметрии схемы и при идентичности автогенераторов частота стационарных синхронных колебаний в синфазном режиме действительно равна парциальным частотам автогенераторов. Противофазный режим на частоте f_0 из-за больших вносимых (со стороны r) потерь существовать не может. Условия устойчивости противофазных колебаний, как уже сказано выше, реализуются в областях 1 и 3 (рис. 3), то есть при достаточно большой отстройке резонанса связи. Такая отстройка автоматически возникает за счет значительного разноса собственных частот противофазных мод (см. рис. 4). Здесь следует заметить, что при произвольном выборе резонанса связи противофазные колебания, как правило, оказываются устойчивыми. Таким образом, с точки зрения устойчивости противофазные моды являются доминирующими.

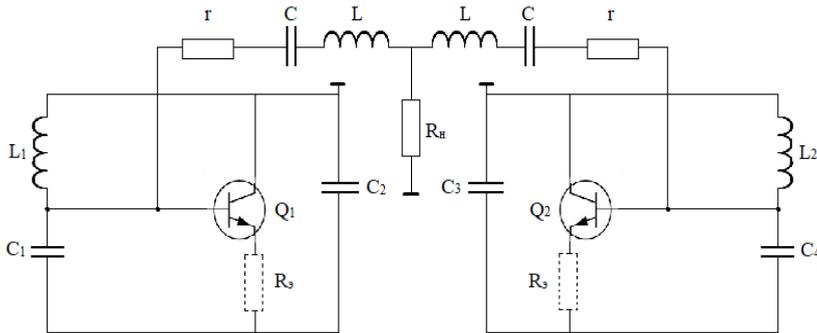


Рис. 5. Высокочастотная схема системы связанных автогенераторов с резонансной связью.

Fig. 5. High-frequency circuit of a system of coupled self-oscillators with resonant coupling

Данная типичная ситуация иллюстрируется следующим экспериментом. При синфазных начальных условиях (++) сначала возбуждаются и нарастают синфазные колебания, затем появляется одна из противофазных мод, которая нарастает и подавляет синфазную моду. Суперпозиция двух колебаний разных частот в переходном процессе представляет собой биеения, огибающая которых сначала нарастает, а затем убывает (рис. 6, 7).

Условия одновременной устойчивости синфазных и противофазных колебания выполняются на краях интервала (8), где $Re\gamma_{12}(j\omega) \approx 0$ и проводимость связи характеризуется значительной реактивной составляющей. В численном эксперименте эти типы колебаний реализуются путем смены начальных условий (++) или (+-).

Дальнейшие представленные эксперименты проводились при резонансной настройке и при выполнении критерия (3). Неустойчивость противофазных мод реализуется путем увеличения степени регенерации системы при последовательном уменьшении сопротивления отрицательной

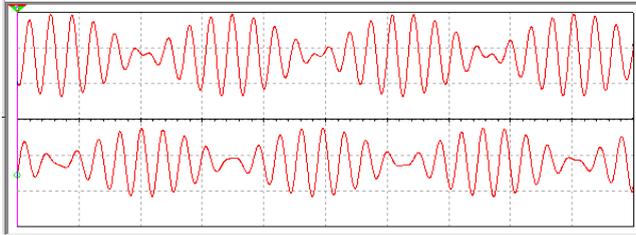


Рис. 6. Осциллограммы колебаний автогенераторов — переход в противофазный режим;
 $L = 4020$ нГн, $C = 20$ нФ.

Fig. 6. Oscillograms of oscillations of self-oscillators – transition to antiphase mode;
 $L = 4020$ nH, $C = 20$ nF

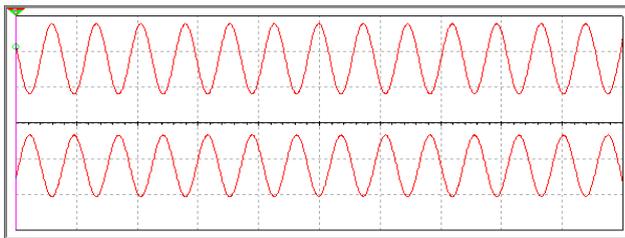


Рис. 7. Осциллограммы колебаний — противофазный режим работы;
 $L = 1020$ нГн, $C = 80$ нФ.

Fig. 7. Oscillograms of oscillations – antiphase mode of operation;
 $L = 1020$ nH, $C = 80$ nF

обратной связи R_3 . Для идентификации базовых мод и их преобразований непосредственно использовались свойства симметрии схемы. Действительно, в процессе развития колебаний при переходе к квазигармоническим или хаотическим режимам фазовая точка обязательно на некоторое время попадает в область притяжения того или иного аттрактора. В результате этого в спектре в области частот соответствующей моды появляется дискретная или континуальная составляющая. Сравнение спектров колебаний автогенераторов со спектром на общей нагрузке позволяет однозначно определить синфазную и противофазную моды. Так, синфазные компоненты спектра и их гармоники суммируются в общей нагрузке, тогда как нечетные гармоники противофазных мод вычитаются, а их четные гармоники — суммируются.

На рис. 8 приведены спектры колебаний на одном из контуров генераторов и на общей нагрузке в установившемся режиме для случая трехчастотных колебаний. (Здесь и далее цена деления по оси ординат — 20 дБ.) Этот вариант соответствует $R_3 = 4$ Ом и следующим параметрам цепи связи: $L = 4080$ нГн, $C = 15$ нФ, $r = 0,021$ Ом. Как видно, в спектре генератора при-

сутствуют три моды: нижняя противофазная мода (384 кГц), синфазная мода (550 кГц) и верхняя противофазная мода (932 кГц). В спектре на общей нагрузке составляющие с частотами 384 кГц и 932 кГц практически отсутствуют, что подтверждает противофазность соответствующих колебаний. Кроме этого в спектрах колебаний присутствует составляющая, соответствующая второй гармонике (768 кГц) нижней противофазной моды. Так как вторые гармоники синфазны, то в общей нагрузке они суммируются.

Следует заметить, что значения приведенных частот отличаются от расчетных не более чем на 1.5 %.

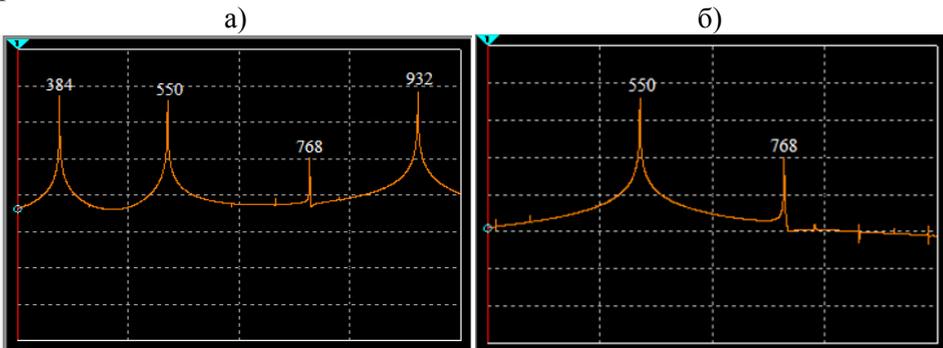


Рис. 8. Спектры трехчастотного режима: а) — на контуре автогенератора; б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—1000 кГц.

Fig. 8. Spectra of the three-frequency regime: а) – on the oscillator circuit; б) – on the total load. Band 320–1000 kHz

На рис. 9 для того же случая приведены осциллограммы колебаний на контурах генераторов (две верхние осциллограммы) и на общей нагрузке (нижняя осциллограмма). Как видно, противофазные составляющие колебаний действительно вычитаются, а синфазные — суммируются

Еще один характерный вариант поведения базовых видов колебаний наблюдается при несколько измененных параметрах системы (также при сохранении резонанса): $L = 5440$ нГн, $C = 11,24$ нФ, $R_3 = 2,9$ Ом. При синфазном возбуждении (++) система начинает сначала генерировать в синфазном режиме, затем через некоторое время система переходит в противофазный режим с частотой 410,64 кГц (рис. 10). В спектре при этом появляются колебания противофазных мод и их гармоник. Следует отметить, что колебания обеих противофазных мод на всем протяжении переходного процесса вычитаются в общей нагрузке. В конце переходного процесса синфазная и верхняя противофазная моды подавляются, и система устойчиво генерирует на частоте нижней противофазной моды 410 кГц с ее гармониками (рис. 11а). Характерно, что нечетные гармоники вычитаются в общей нагрузке, а четные — складываются (рис. 11б).

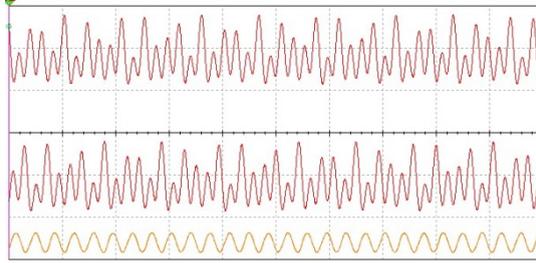


Рис. 9. Осциллограммы колебаний автогенераторов в установившемся режиме:

$L = 4080$ нГн, $C = 15$ нФ, $r = 0,021$ Ом, $R_3 = 4$ Ом.

Fig. 9. Oscillograms of oscillations of self-oscillators in steady state:

$L = 4080$ nH, $C = 15$ nF, $r = 0.021$ Ohm, $R_3 = 4$ Ohm

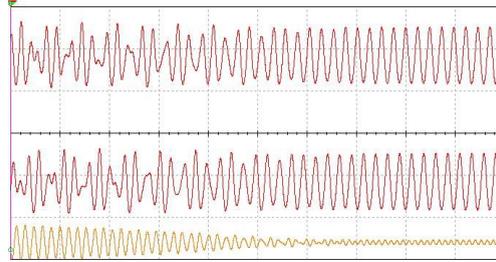


Рис. 10. Осциллограммы колебаний автогенераторов при переходе в противофазный режим: $L = 5440$ нГн, $C = 11,24$ нФ, $r = 0,002$ Ом, $R_3 = 2,9$ Ом.

Fig. 10. Oscillograms of oscillations of self-oscillators during the transition to antiphase mode: $L = 5440$ nH, $C = 11.24$ nF, $r = 0.002$ Ohm, $R_3 = 2.9$ Ohm

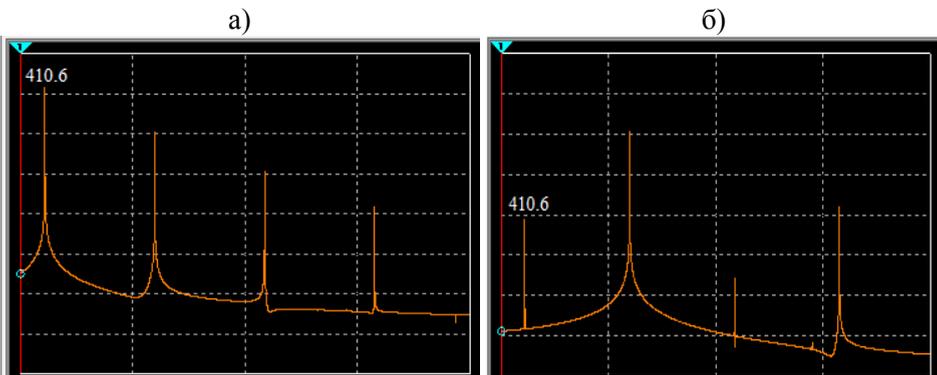


Рис. 11. Спектры колебаний:

а) — на контуре автогенератора; б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—2000 кГц.

Fig. 11. Oscillation spectra:

а) – on the oscillator circuit; б) – on the total load. Band 320–2000 kHz



Рис. 12. Спектры колебаний при возбуждении (+ –):
а) — на контуре автогенератора; б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—2000 кГц.

Fig. 12. Spectra of oscillations during excitation (+ –):
а) – on the oscillator circuit; б) – on the total load. Band 320–2000 kHz

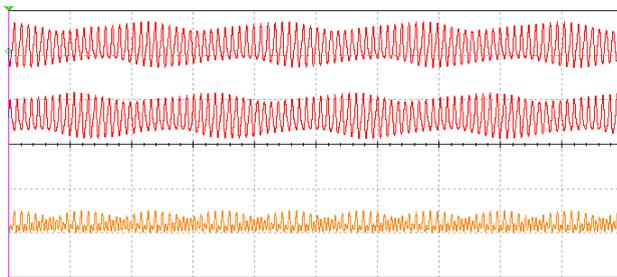


Рис. 13. Осциллограммы колебаний автогенераторов:
 $L = 8160$ нГн, $C = 7,5$ нФ, $r = 0,002$ Ом, $R_3 = 1,61$ Ом.

Fig. 13. Oscillograms of oscillations of self-oscillators:
 $L = 8160$ nH, $C = 7.5$ nF, $r = 0.002$ Ohm, $R_3 = 1.61$ Ohm

Для этого же варианта схемы в случае задания противофазных начальных условий (+–) с самого начала возбуждается верхняя противофазная мода (ее частота 880 кГц совпадает с расчетной) и ее гармоника (рис. 12). Таким образом, при данной настройке в системе существует один из противофазных режимов. При синфазных и противофазных начальных условиях синфазный режим либо подавляется, либо не возбуждается вовсе.

В процессе настройки исследуемой схемы часто наблюдаются автомодуляционные процессы. Пример таких процессов приведен на осциллограммах (рис. 13), где две верхние осциллограммы — это колебания на контурах автогенераторов, а нижняя — на общей нагрузке. Так как «несу-

щие» колебания противофазны, то центральные составляющие нечетных гармоник несущего колебания вычитаются, а четных — суммируются (рис. 14). В то же время, так как закон модуляции почти противофазный, то боковые (модуляционные) составляющие для четных гармоник вычитаются, и суммируются — для нечетных.



Рис. 14. Спектры колебаний при автомодуляции:

а) — на контуре автогенератора; б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—2000 кГц.

Fig. 14. Oscillation spectra during self-modulation:

a) – on the self-oscillator circuit; b) – on the total load. Band 320–2000 kHz

Развитой динамический хаос возникает в системе для варианта $L = 5440$ нГн, $C = 11,24$ нФ, $r = 0,002$ Ом при $R_3 = 0,017$ Ом. Именно при данной или близких настройках происходит существенное изменение динамики развития неустойчивости и поведения системы в целом. При синфазных начальных условиях колебания генераторов первоначально происходят в фазе (рис. 15), а затем быстро, в течение 10—12 периодов, полностью теряют признаки периодичности; при этом их форма сильно отличается от гармонической. При дальнейшем наблюдении форма колебаний еще больше искажается и на осциллограммах (рис. 16) уже невозможно выделить синфазную и противофазные компоненты. В системе устанавливается режим хаотических колебаний.

Расчитанные спектры колебаний хаотического режима на контурах автогенераторов и на общей нагрузке представлены на рис. 17. В спектре присутствуют три характерных компоненты. Первый, самый низкочастотный (395,1 кГц) пик соответствует нижней противофазной моде. «Размытый» максимум в районе 550—580 кГц соответствует синфазной моде. Следующий спектральный пик на частоте 790,2 кГц является второй гармоникой нижней противофазной моды; эти гармоники колебаний автогенераторов синфазны и суммируются в общей нагрузке. Верхняя противо-

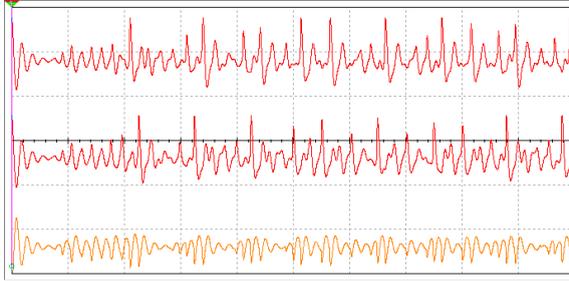


Рис. 15. Осциллограммы колебаний автогенераторов при переходе к хаотическому режиму:
 $L = 5440$ нГн, $C = 11,24$ нФ, $r = 0,002$ Ом, $R_3 = 0,017$ Ом.

Fig. 15. Oscillograms of oscillations of self-oscillators during the transition to a chaotic mode:
 $L = 5440$ nH, $C = 11.24$ nF, $r = 0.002$ Ohm, $R_3 = 0.017$ Ohm

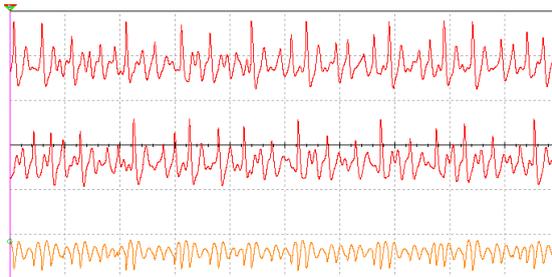


Рис. 16. Осциллограммы колебаний автогенераторов в режиме динамического хаоса:
 $L = 5440$ нГн, $C = 11,24$ нФ, $r = 0,002$ Ом, $R_3 = 0,017$ Ом.

Fig. 16. Oscillograms of oscillations of self-oscillators in the mode of dynamic chaos: $L = 5440$ nH, $C = 11.24$ nF, $r = 0.002$ Ohm, $R_3 = 0.017$ Ohm

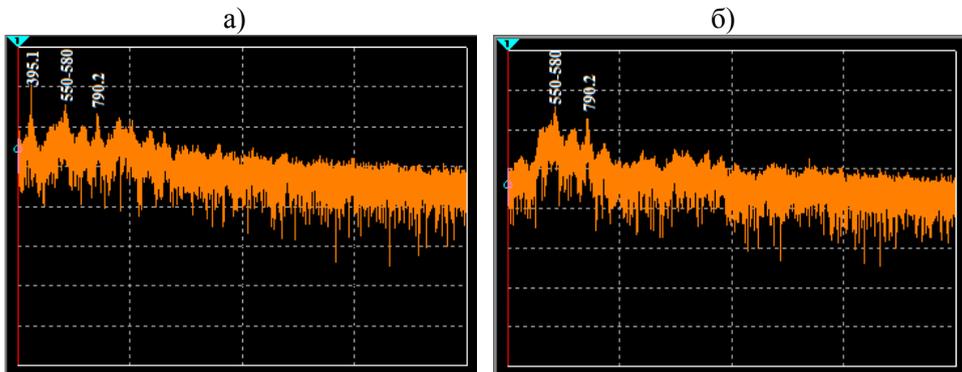


Рис. 17. Спектры хаотических колебаний: а) — на контуре автогенератора;
б) — на общей нагрузке. Полоса обзора 320—3000 кГц.

Fig. 17. Spectra of chaotic oscillations: а) – on the oscillator circuit;
б) – at the total load. Band 320–3000 kHz

фазная мода (по расчету в районе 878 кГц) зашумлена и в спектре не просматривается. Приведенный на рис. 17 шумовой спектр занимает полосу от 320 кГц до 3 МГц, то есть простирается далеко за пределы частоты верхней моды. Полоса шумового сигнала значительно превышает октаву.

Результаты проведенного моделирования позволяют связать способность системы генерировать динамический шум в широкой полосе частот со значительным разномом частот собственных колебаний-мод. Это обусловлено применением резонансной схемы связи на сосредоточенных элементах. Реализация подобных соединений на СВЧ возможна при использовании интегральной технологии.

4. Заключение

В настоящей работе рассмотрена система двух автогенераторов, связанных друг с другом и с общей нагрузкой непосредственно через последовательные резонансные контуры. Показано, что данная система может генерировать на трех частотах различных мод. Проведен анализ частотных характеристик параметра взаимной связи и сформулирован аналитический критерий неустойчивости синфазных колебаний. Для получения неустойчивости противофазных колебаний использовался перенапряженный режим работы транзисторов, регулируемый с помощью отрицательной обратной связи по току. Методом численного моделирования изучен характер процессов развития неустойчивостей при переходах к динамическому хаосу. Показано, что система связанных автогенераторов при разрушении когерентности переходит в режим генерации динамического хаоса с непрерывным спектром в широкой полосе частот.

Список литературы

1. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Неустойчивость синхронных режимов в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 11. С. 51—56.
2. Новиков С. С., Майдановский С. А. Симметричные и несимметричные системы сильно связанных автогенераторов // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 5. С. 595—600.
3. Владимиров С. Н., Майдановский А. С., Новиков С. С. Нелинейные колебания многочастотных автоколебательных систем // Томск : Изд. Том. ун-та, 1993. 203 с.
4. Shigeji N., Jenshan L., Tatsuo I. Mode analysis and stabilization of a spatial power combining array with strongly coupled oscillators // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 1993. V. 41, no.10. P. 1827—1837.
5. Ram R. J., Sporer R., Blank H.-R., York R. A.. Chaotic Dynamics in Coupled Microwave Oscillators // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2000. V. 48, no. 11. P. 1909—1916.

6. Lynch J. J., York R. A. Synchronization of Oscillators Coupled Through Narrow-Band Networks // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2001. Vol. 49, no. 2. P. 237—249.
7. Винтизенко И. И., Новиков С. С. Релятивистские магнетронные СВЧ-генераторы. Томск : Издательство НТЛ, 2009. 430 с.
8. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Разрушение когерентного режима в системе двух автогенераторов при сильных резонансных взаимных связях // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2012. Т. 20, № 5. С. 14—25.
9. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Явление разрушения когерентности в системе двух связанных СВЧ-автогенераторов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57, № 9/2. С. 16—20.
10. Novikov S. S. Hyper-chaos mode in the mutual coupled and partial stable microwave oscillators system // Progress In Electromagnetics Research Symposium : proceedings. St. Petersburg, 2017. P. 1065—1069.
11. Новиков С. С. Бифуркационные переходы в системе двух СВЧ автогенераторов при резонансной взаимной связи. В сб. : Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019. Сборник трудов конференции. Томск, 2019. С. 200—205.
12. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Динамические режимы системы двух связанных СВЧ автогенераторов. В сб. : 24-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2014 (Севастополь, 7—13 сент. 2014 г.). 2014. С. 109—110.
13. Новиков С. С., Усюкевич А. А. Цепи связи для систем свч автогенераторов с хаотической динамикой. В сб. : 25-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2015 (Севастополь, 6—12 сент. 2015 г.). 2015. С. 525—526.
14. Антипов О. И., Неганов В. А., Потапов А. А. Детерминированный хаос и фракталы в дискретно-нелинейных системах / Под ред. и с предисловием акад. Ю. В. Гуляева и чл.-корр. РАН С. А. Никитова. М. : Радиотехника, 2009. 235 с.

Информация об авторах

Новиков Сергей Сергеевич, к. ф.-м. н., доцент Национального исследовательского Томского государственного университета, Российская Федерация.

Костерова Влада Сергеевна, магистрант Национального исследовательского Томского государственного университета, Российская Федерация.

Stable and Unstable Dynamic Processes in a Self-Oscillating System with Three Degrees of Freedom

S. S. Novikov and V. S. Kosterova

National Research Tomsk State University
36, Lenin Ave. Tomsk, 634050, Russian Federation
nss@sibmail.com, vsk727@yandex.ru

Received: May 20, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The work is devoted to the study of the dynamic instability of coherent regimes of a system of two self-oscillators with a strong mutual resonant coupling. It is shown that this system can generate synchronous oscillations at three different frequencies, they correspond to the basic types of oscillations-modes: one in-phase and two anti-phase. A qualitative analysis of the influence of the characteristics of the resonant coupling on the stability of natural synchronous modes of oscillations has been carried out. An analytical criterion for the instability of in-phase oscillations and the conditions for its fulfillment are considered. The possibility of suppressing the stability of antiphase oscillations is discussed. The method of numerical simulation was used to study the temporal and spectral characteristics of oscillatory processes in various modes, including chaotic. Variants of the system behavior under competition and mode suppression accompanied by self-modulation processes are demonstrated. The features of dynamic chaos tuning and diagnostics of its components are discussed. The possibility of obtaining chaotic signals with a continuous spectrum in a band exceeding an octave is shown.*

Keywords: *instability, resonant coupling, synchronous oscillations, dynamic chaos.*

For citation (IEEE): S. S. Novikov and V. S. Kosterova, “Stable and Unstable Dynamic Processes in a Self-Oscillating System with Three Degrees of Freedom,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 2, pp. 218–235, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.2.16. (In Russ.).

References

- [1] S. S. Novikov and A. A. Usjukevitch, “Instability of synchronous mode in a system of two coupled microwave self-oscillators,” *Russian Physics Journal*, vol. 55, no. 11, pp. 1296–1302, Apr. 2013, doi: 10.1007/s11182-013-9959-x. (In Russ.).
- [2] S. S. Novikov and S. A. Maidanovsky, “Symmetric and asymmetric systems of strongly coupled self-oscillators,” *Radiotekhnika i elektronika*, vol. 48, no. 5, pp. 595–600, 2003. (In Russ.).
- [3] S. N. Vladimirov, A. S. Maidanovsky, and S. S. Novikov, *Nonlinear oscillations of multi-frequency self-oscillating systems*, Tomsk: Tomsk Univ., 1993. (In Russ.).
- [4] S. Nogi, Jenshan Lin, and T. Itoh, “Mode analysis and stabilization of a spatial power combining array with strongly coupled oscillators,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 10, pp. 1827–1837, 1993, doi: 10.1109/22.247929.

- [5] R. A. York, H.-R. Blank, R. Sporer, and R. J. Ram, "Chaotic dynamics in coupled microwave oscillators," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 48, no. 11, pp. 1909–1916, 2000, doi: 10.1109/22.883871.
- [6] J. J. Lynch and R. A. York, "Synchronization of oscillators coupled through narrow-band networks," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 2, pp. 237–249, 2001, doi: 10.1109/22.903084.
- [7] I. I. Vintzenko and S. S. Novikov, *Relativistic magnetron microwave generators*, Tomsk: NTL Publishing House, 2009. (In Russ.).
- [8] S. S. Novikov and A. A. Usyukevich, "Destruction of the coherent regime in a system of two self-oscillators with strong resonant mutual coupling," *Izv. vuzov. Applied nonlinear dynamics*, vol. 20, no. 5, pp. 16–30, 2012. (In Russ.).
- [9] S. S. Novikov and A. A. Usyukevich, "Phenomenon of destruction of coherence in the system of two coupled microwave self-oscillators," *Izv. vuzov. Physics*, vol. 57, no. 9/2, pp.16–20, 2014. (In Russ.).
- [10] S. S. Novikov, "Hyper-chaos mode in the mutual coupled and partial stable microwave oscillators system," *Progress in Electromagnetics Research Symposium: proceedings*. St. Peterburg, pp. 1065–1069, 2017.
- [11] S. S. Novikov, "Bifurcation transitions in a system of two microwave self-oscillators with resonant mutual coupling," *Actual problems of radiophysics APR 2019: Proceedings of the conference*. Tomsk, pp. 200–205, 2019. (In Russ.).
- [12] S. S. Novikov and A. A. Usyukevitch, "Dynamic modes of two coupled microwave oscillators," *Proc. 24th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Sevastopol, Crimea, Russia, pp.109–110, 2014. (In Russ.).
- [13] S. S. Novikov and A. A. Usyukevitch "Coupling circuits for microwave self-oscillator systems with chaotic dynamics," *Proc. 25th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology"*, Sevastopol, Crimea, Russia, pp. 525–526, 2015. (In Russ.).
- [14] O. I. Antipov, V. A. Neganov, and A. A. Potapov, *Deterministic Chaos and Fractals in Discrete Nonlinear Systems*, Moscow: Radiotekhnika, 2009. (In Russ.).

Information about the authors

Sergey S. Novikov, Ph.D., Associate Professor, National Research Tomsk State University, Russian Federation.

Vlada S. Kosterova, master student of the National Research Tomsk State University, Russian Federation.