



## АВТОСТОХАСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СВЯЗАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ

*Р. В. Беляев, Э. В. Кальянов, В. Я. Кислов, Б. Е. Кяргинский, М. Н. Лебедев*

Приведены уравнения системы связанных генераторов, учитывающие инерционность и запаздывание в обратной связи в каждом парциальном генераторе, а также запаздывание в элементах связи между генераторами. Приведены результаты численного анализа одного и двух генераторов при емкостной связи. Показано, что хаотические колебания возбуждаются при определенных величинах запаздывания, причем в связанной системе двух генераторов хаотизация колебаний более устойчива и менее критична к параметрам, чем в случае одиночного генератора. Экспериментальные исследования автостохастических систем показали, что в системе двух связанных транзисторных генераторов можно получить в десятисантиметровом диапазоне длин волн автостохастические колебания, подобные шумовым.

### Введение

Системы связанных генераторов исследовались многими авторами. Ранние исследования посвящались в основном изучению явления взаимной синхронизации генераторов с целью повышения мощности синхронных колебаний. При этом изучалась специфика синхронизации различных типов генераторов. С открытием явления динамического хаоса в сложных и простых системах, описываемых нелинейными детерминированными уравнениями, и бурным развитием вычислительной техники, началось интенсивное изучение физических процессов в хаотических системах, в том числе, и в связанных генераторах [1–11].

Известные исследования связанных автостохастических систем носят в основном характер изучения физики процессов, а эксперименты проводятся на низких частотах. Достижения твердотельной электроники в продвижении транзисторов в область сверхвысоких частот определили необходимость исследования возможности создания широкополосных автостохастических транзисторных генераторов на сверхвысоких частотах. Для этого представляется целесообразным исследование высокочастотных связанных систем.

В настоящей работе исследуются связанные генераторы, обладающие спецификой, присущей сверхвысокочастотным генераторам: а именно, запаздыванием и инерционностью. На примере одного и двух генераторов численно анализируется система уравнений таких связанных генераторов. В качестве иллюстрации возможных применений теории приводятся результаты экспериментальных исследований автостохастических транзисторных генераторов.

## 1. Математическая модель

Учитывая уравнения для одного генератора с запаздыванием и инерционностью [12], можно представить в общем виде уравнения многих связанных автоколебательных систем с запаздыванием и инерционностью с учетом запаздывания по связи:

$$d^2 x_i / dt^2 + (\omega_i / Q_i) dx_i / dt + \omega_i^2 x_i = (\omega_i^2 / \sigma_i) d/dt [F_i(y_i)] + \omega_i^2 \sum_{j \neq i} \{C_{ji} \varphi_j [x_j(t - T_{ji}), d/dt [x_j(t - T_{ji})], d^2/dt^2 [x_j(t - T_{ji})]\}, \quad (1a)$$

$$\delta_i dy_i / dt + y_i = x_i(t_i - \tau_i), \quad (1b)$$

где  $i, j = 1, 2, 3, \dots, k$ ,  $k$  – число парциальных генераторов, причем каждый парциальный генератор состоит из замкнутых в кольцо нелинейного элемента, фильтра первого порядка, линии задержки, фильтра второго порядка и дифференцирующего элемента;  $F_i(y_i)$  – характеристика нелинейного элемента  $i$ -го парциального генератора;  $\delta_i$  – постоянная времени фильтра первого порядка;  $\tau_i$  – запаздывание в цепи обратной связи;  $\omega_i$ ,  $Q_i$  – резонансная частота и добротность фильтра второго порядка;  $\sigma_i$  – постоянная времени дифференцирующего элемента;  $\varphi_j$  – функция, определяющая связь между парциальными генераторами;  $C_{ji}$  – коэффициент связи;  $T_{ji}$  – время запаздывания по связи.

Наибольший интерес представляет емкостная связь, так как этот тип связи легче обеспечить в эксперименте на сверхвысоких частотах. Рассмотрим случай емкостной связи, аппроксимируя характеристику нелинейных элементов с помощью унимодальной функции

$$F_i(y_i) = G_i y_i^{m_i} (1 + y_i)^{-n_i}, \quad (2)$$

где  $G_i$ ,  $m_i$ ,  $n_i$  – постоянные коэффициенты, определяющие усиление в кольце парциального генератора (параметр усиления  $G_i$ ) и нелинейность (параметры  $m_i$ ,  $n_i$ ). Параметр нелинейности  $n_i$  определяет крутизну падающего участка характеристики. При  $m_i = 1$  характеристика, описываемая соотношением (2), обеспечивает мягкое возбуждение колебаний в парциальном генераторе, а при  $m_i > 1$  – жесткое.

Полагая в системе (1)  $G_i = \sigma_i B_i$  и учитывая (2) при условии, что  $C_{ji}$  – коэффициент емкостной связи, получим

$$\ddot{x}_i + (\omega_i / Q_i) \dot{x}_i + \omega_i^2 x_i = \omega_i^2 \{B_i [m_i - (m_i - n_i) y_i^{m_i}] [y_i^{m_i - 1} / \delta_i (1 + y_i^{m_i})^2] [x_i(t - \tau_i) - y_i] + \sum_{j \neq i} C_{ji} x_j(t - T_{ji})\}, \quad (3a)$$

$$\delta_i \dot{y}_i + y_i = x_i(t_i - \tau_i), \quad (3b)$$

где точкой обозначено дифференцирование по времени  $t$ .

Будем считать, что парциальные генераторы различаются лишь значениями собственных частот колебательных систем и задержек, а остальные параметры одинаковые, так что  $C_{ji} = C$ ,  $Q_i = Q$ ,  $B_i = B$ ,  $n_i = n$ ,  $\delta_i = \delta$  (при  $j, i = 1, 2$ ). При этом предполагается, что имеют место мягкие режимы возбуждения колебаний, то есть  $m_i = 1$ . При этих условиях, вводя новую переменную, а также простую замену переменных, запишем уравнения для одного и двух генераторов в форме, удобной для расчетов и анализа.

Для одного генератора получим следующие уравнения:

$$\dot{x} = y, \quad (4a)$$

$$\dot{y} = -(\omega_1/Q)y - \omega_1 x^2 + \omega_1^2 \{B[1 - (1-n)x^n][x(t-\tau) - z]/[\delta(1+x^n)^2]\}, \quad (4б)$$

$$\dot{z} = [x(t-\tau) - z]\delta^{-1}. \quad (4в)$$

Для системы двух связанных генераторов получим

$$\dot{x}_1 = y_1, \quad (5a)$$

$$\dot{y}_1 = -(\omega_1/Q)y_1 - \omega_1 x_1^2 + \omega_1^2 \{B[1 - (1-n)x_1^n][x_1(t-\tau_1) - z_1]/[\delta(1+x_1^n)^2] + Cx_2(t-T_{21})\}, \quad (5б)$$

$$\dot{z}_1 = [x_1(t-\tau_1) - z_1]\delta^{-1}, \quad (5в)$$

$$\dot{x}_2 = y_2, \quad (5г)$$

$$\dot{y}_2 = -(\omega_2/Q)y_2 - \omega_2 x_2^2 + \omega_2^2 \{B[1 - (1-n)x_2^n][x_2(t-\tau_2) - z_2]/[\delta(1+x_2^n)^2] + Cx_1(t-T_{12})\}, \quad (5д)$$

$$\dot{z}_2 = [x_2(t-\tau_2) - z_2]\delta^{-1}. \quad (5е)$$

Аналогично можно записать уравнения для расчета большего числа (трех, четырех, пяти и т.д.) связанных генераторов.

## 2. Результаты численного анализа

При численном анализе уравнений, описывающих связанные генераторы с запаздыванием, проводились расчеты реализаций, фазовых портретов, спектров мощностей и бифуркационных диаграмм. При этом использовались программы, описанные в [13], но модернизированные на языке Бейсик применительно к решению уравнений с запаздывающим аргументом. При расчетах использовались как обычный метод Рунге – Кутты 4–го порядка, так и его модификация – метод Рунге – Кутты – Мерсона 4–го порядка [14]. Результаты расчетов по обоим методам практически не отличаются. Однако, поскольку метод Рунге – Кутты – Мерсона менее распространен, для большей простоты воспроизведения полученных результатов в работе приводятся результаты, полученные методом Рунге – Кутты.

Изменение характера колебательного процесса при изменении определенного параметра удобно отображать бифуркационными диаграммами, показывающими разброс (регулярный или хаотический) максимальных значений колебательного процесса. Однако, при уменьшении шага интегрирования с целью повышения точности счета число точек на бифуркационной диаграмме уменьшается, что связано с уменьшением числа экстремальных точек, характеризующих колебательный процесс: число последних тем меньше, чем меньше шаг. Это затрудняет идентификацию характера колебаний, особенно при хаотическом режиме. Поэтому для характерных значений изменяемого параметра диаграммы целесообразно приводить аттракторы колебаний или спектры мощностей. Наглядность спектров мощностей, а зачастую также реализаций и аттракторов, больше, чем бифуркационных диаграмм. Бифуркационные диаграммы облегчают выбор характерных значений параметров, для которых следует рассчитывать аттракторы и спектры мощностей.

Прежде чем перейти к анализу связанных генераторов, описываемых уравнениями (5), целесообразно отметить особенности работы одной автоколебательной системы, описываемой уравнениями (4), так как переход к хаосу в генераторе с запаздыванием и инерционностью не описывается известными простыми сценариями. Существенное влияние оказывает величина запаздывания.

На рис. 1 приведены бифуркационные диаграммы применительно к одному генератору. Они иллюстрируют изменение максимальных значений колебательного процесса  $x(t)$  в зависимости от параметра усиления при относительно малом (рис. 1, а,  $\tau=1$ ) и большом (рис. 1, б,  $\tau=6$ ) запаздываниях и следующих значениях остальных параметров:  $Q=4$ ,  $\delta=0.1$ ,  $\omega_1=1$ ,  $n=4$ . Начальные условия выбраны равными  $x(0)=y(0)=z(0)=x(0-\tau)=0.01$  при шаге интегрирования по времени, равном 0.025. Видно, что в обоих случаях существуют лишь регулярные колебания, причем при большем запаздывании, как это ни парадоксально, наблюдаются более простые движения (однотактные), тогда как при  $\tau=1$  по мере увеличения параметра усиления происходит переход к трехтактным колебаниям. Как выяснено, это обусловлено тем, что при изменении запаздывания, когда остальные параметры постоянны, имеет место периодическое изменение характера колебаний. Расчеты показывают, в частности, что диаграмма, подобная показанной на рис.1, б, имеет место при отсутствии запаздывания ( $\tau=0$ ): возбуждение однотактных колебаний происходит при  $B=0.6$  и этот режим колебаний сохраняется при увеличении параметра усиления до значения  $B=6$ . При увеличении запаздывания до значения  $\tau=0.5$  возбуждение однотактных колебаний происходит при  $B=0.7$ , а при  $B=5.6$  наблюдается бифуркация перехода к трехтактным колебаниям, аналогично тому, как это имеет место в случае  $\tau=1$  при  $B=3.1$ . При дальнейшем увеличении  $\tau$  пусковое значение параметра  $B$  повышается, а его бифуркационное значение перехода к трехтактным движениям снижается. При этом уменьшается интервал значений  $B$  между бифуркацией Хопфа и бифуркацией утроения периода колебаний так, что в случае  $\tau=2$  возбуждение колебаний происходит сразу с трехоборотным предельным циклом при достижении параметром усиления величины  $B=2.2$ , а при  $B>4.4$  происходит хаотизация движений. Это значение запаздывания ( $\tau=2$ ) является, при выбранных величинах остальных параметров, оптимальным с позиций возбуждения хаотических колебаний, хотя при большей величине запаздывания возрастает число степеней свободы. Однако, при дальнейшем увеличении задержки (уже при  $\tau=2.4$ ) снова происходит возбуждение только регулярных колебаний при изменении параметра усиления в интервале  $B \in [0, 6]$ . При  $\tau=5$  бифуркационная диаграмма становится подобной показанной на рис. 1, а.

Расчеты показывают, что интервал значений параметра усиления, которому соответствуют колебания с однооборотным предельным циклом (при  $\tau < 2$ ), закономерно уменьшается с увеличением задержки. При этом увеличивается пусковое значение параметра  $B$ . Так, при  $\tau=0.5$  интервал между пусковым значением параметра усиления и бифуркацией утроения периода равен  $B \in [0.7, 5.6]$ , а при  $\tau=1, 1.25$  и  $1.5$  этот интервал принимает соответственно значения  $B \in [1, 3]$ ,  $B \in [1.2, 2.1]$  и  $B \in [1.4, 1.5]$ .

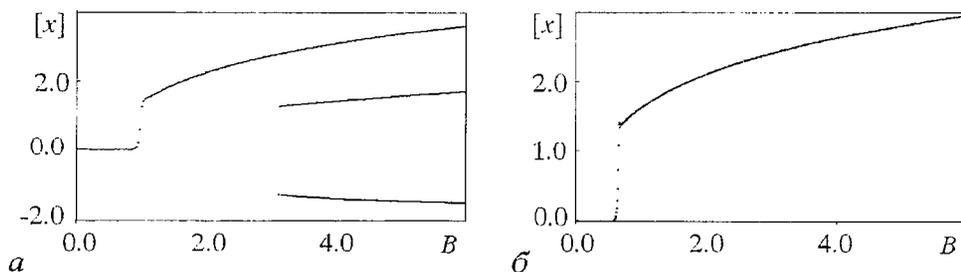


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма изменения максимальных значений колебательного процесса в одиночном генераторе в зависимости от параметра усиления: а – при малом запаздывании  $\tau=1$ ; б – при большом запаздывании  $\tau=6$

На рис. 2, *a–г* приведены аттракторы колебаний, а на рис. 2, *д–з* соответствующие спектры мощности для характерных режимов работы. Начальные условия и шаг интегрирования как на рис. 1. Аттракторы получены в интервале времени  $t \in [200, 450]$ . Простой предельный цикл рис. 2, *a* соответствует однотактным колебаниям, а рис. 2, *б* – трехтактным. Рис. 2, *в* отображает удвоение периода трехтактных колебаний, а рис. 2, *г* – хаотизацию колебательного процесса. Эти процессы иллюстрируются также соответствующими спектрами колебаний.

Следует отметить, что при изменении частоты фильтра второго порядка количественные значения параметра  $B$ , соответствующие бифуркациям колебаний, изменяются, но характер зависимостей сохраняется. Естественно, что на бифуркационные величины параметра усиления влияют также и величины других параметров. В связи с этим при анализе связанных систем наряду с аттракторами, возникающими при взаимодействии колебаний, целесообразно для наглядности

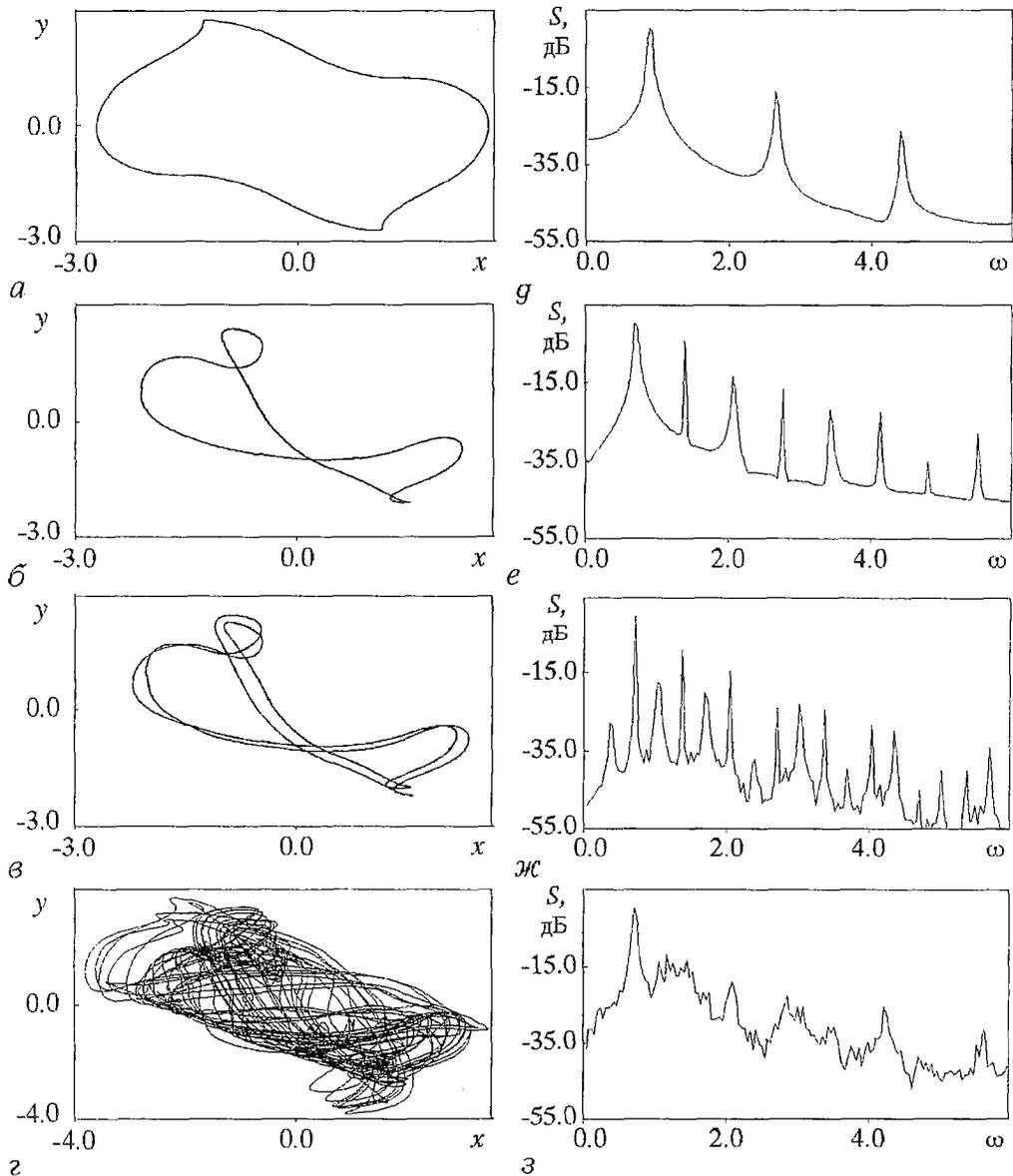


Рис. 2. Аттракторы колебаний (*a–г*) и соответствующие им спектры мощности (*д–з*) при различных режимах работы одиночного генератора: *a, д* –  $\tau=1, B=3$ ; *б, е* –  $\tau=2, B=3.5$ ; *в, ж* –  $\tau=2, B=3.58$ ; *г, з* –  $\tau=2, B=4.8$

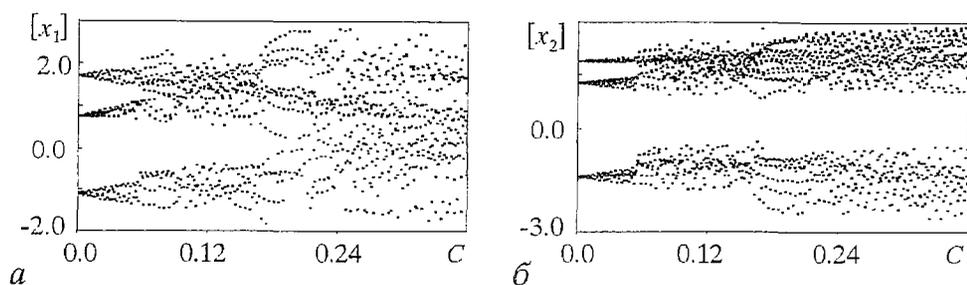


Рис. 3. Изменение максимальных значений колебательных процессов в первом (а) и втором (б) генераторах в зависимости от параметра связи. При этом  $B=2.5$ ,  $\omega_1=1$ ,  $\tau_1=T_{12}=2$ ,  $\omega_2=1.3$ ,  $\tau_2=T_{21}=1.5$

приводить аттракторы (или спектры) для парциальных генераторов при их автономной работе.

На рис. 3 представлены бифуркационные диаграммы при совместной работе двух генераторов. На нем показано изменение максимальных значений колебательных процессов в первом  $[x_1]$  и втором  $[x_2]$  генераторах в зависимости от параметра связи  $C$ . При этом параметры  $n$ ,  $\delta$  и  $Q$  связанной системы такие же, как на рис. 1. Расчеты проводились при начальных условиях  $x_i(0)=y_i(0)=z_i(0)=x_i(0-\tau_i)=x_i(0-T_{ij})=0.01$  ( $i,j=1,2$ ). Для увеличения числа точек, соответствующих максимальным значениям колебательных процессов, шаг интегрирования по времени выбран, в отличие от рис. 1, равным 0.05.

Как видно, при увеличении параметра связи происходит разрушение трехтактных движений, имеющих место при  $C=0$  и отображаемых лишь тремя

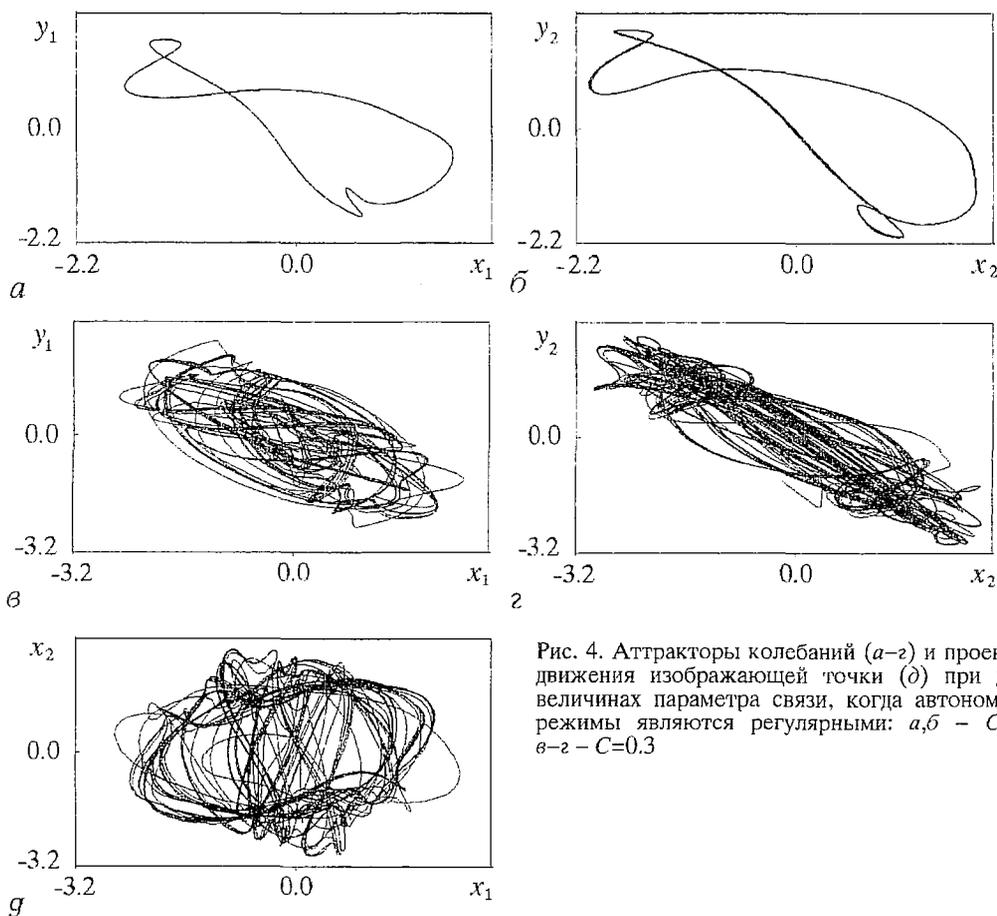


Рис. 4. Аттракторы колебаний (а-г) и проекция движения изображающей точки (д) при двух величинах параметра связи, когда автономные режимы являются регулярными: а,б -  $C=0$ ; в-г -  $C=0.3$

точками на диаграмме. Колебания усложняются и соответственно появляется большое число точек при каждом значении параметра связи. При этом характер изменения  $[x_1]$  и  $[x_2]$  различен: при  $C > 0.18$  на рис. 3, а образуется одна широкая область разброса (случайного или со сложным законом изменения) максимальных значений колебательного процесса, а на рис. 3, б сохраняются две области разброса точек.

Регулярные (при  $C=0$ ) и хаотические колебания (при  $C=0.3$ ) в связанной системе двух генераторов иллюстрируются аттракторами колебаний, показанными на рис. 4, а-г. На рис. 4, д показано движение изображающей точки в проекции на плоскость  $(x_1, x_2)$  для случая взаимодействия связанных генераторов. Аттракторы и проекция движения изображающей точки получены в интервале времени  $t \in [0, 250]$ . Значения всех параметров (за исключением  $C$ ) те же, что и на рис. 3. Начальные условия определялись значениями переменных (с точностью до шестого знака) при соответствующих величинах параметра связи на диаграммах рис. 3.

Аттракторы рис. 4, а, б отображают трехтактные колебания в исходном (автономном) режиме работы парциальных автоколебательных систем. В этом случае аттракторы имеют вид предельных циклов. В случае рис. 4, в, г аттракторы свидетельствуют о хаотическом характере автоколебаний. При этом колебания  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  не синхронизированы, о чем свидетельствует хаотический вид проекции на плоскость  $(x_1, x_2)$  траектории движения изображающей точки в фазовом пространстве.

В практическом плане интересна возможность выравнивания спектра мощности, то есть улучшения спектральных свойств за счет уменьшения регулярных составляющих в спектре колебаний, при использовании связанных автостохастических систем с хаотическими автономными колебаниями. Как показывают расчеты, бифуркационные диаграммы не дают в этом случае наглядного представления об изменении характера колебаний: распределение точек остается случайным (или со сложным законом распределения) во всем интервале изменения параметра связи, что свидетельствует, по крайней мере, о сохранении, в основном, режима динамического хаоса в рассматриваемом интервале изменения параметра связи. Спектры мощности наглядно показывают изменение характера колебаний. На рис. 5 представлены спектры мощности для

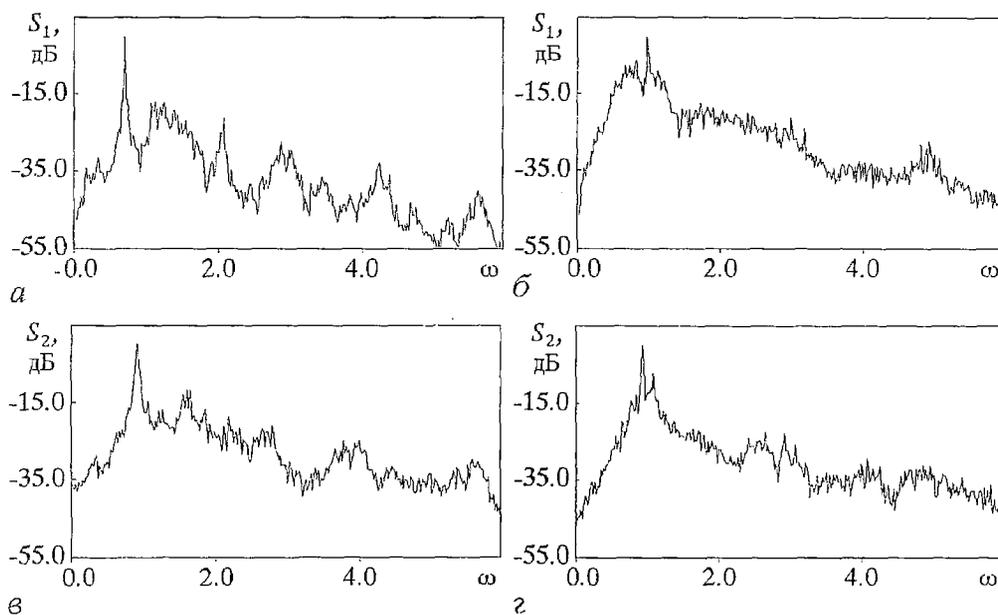


Рис. 5. Спектры мощности при отсутствии связи между генераторами (а, в) и при параметре связи  $C=0.3$  (б, г) для хаотических автономных режимов

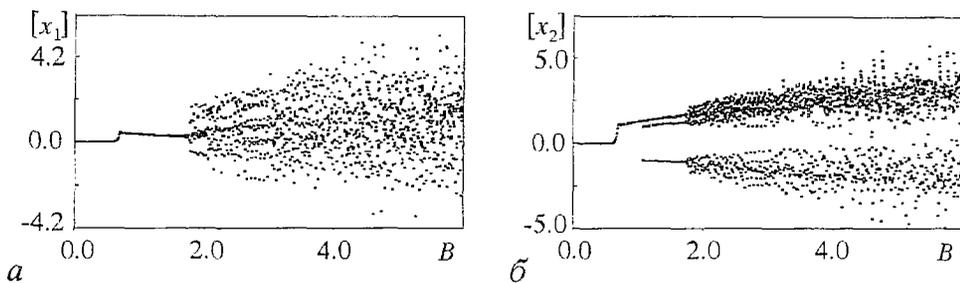


Рис. 6. Бифуркационные диаграммы изменения максимальных значений колебательных процессов в первом (а) и втором (б) генераторах в зависимости от параметра усиления при  $C=0.3$ .

первого (рис. 5, а, б) и второго (рис. 5, в, г) генераторов при отсутствии связи между генераторами ( $C = 0$ ) и при взаимодействии колебаний ( $C = 0.3$ ), когда при автономных режимах генераторов имеют место хаотические колебания. Расчеты спектров мощности, представленных на рис. 5, проведены при  $B = 4.8$ . Остальные параметры, а также шаг интегрирования по времени, имеют те же величины, при которых рассчитывались диаграммы рис. 3. Из сравнения спектров колебаний наглядно видно изменение хаотичности при введении связи: спектры мощности на рис. 5, б, г имеют меньшие выбросы в области резонансных частот.

На рис. 6 приведены бифуркационные диаграммы, иллюстрирующие изменение колебательных процессов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  в зависимости от параметра усиления для фиксированного значения параметра связи  $C$ , равного 0.3. Диаграммы рассчитаны при тех же остальных параметрах (в том числе и при тех же начальных условиях, а также шаге интегрирования), что и диаграммы рис. 3. На рис. 7 представлены спектры мощности для наибольшей величины параметра усиления на диаграммах рис. 6. Начальные условия при расчете спектров определялись значениями переменных при соответствующих величинах параметра усиления на бифуркационных диаграммах рис. 6. Шаг интегрирования по времени равен 0.05.

Как видно из рис. 6, возбуждение колебаний  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  происходит при достижении параметром усиления величины  $B=0.8$ . При этом устанавливаются регулярные колебания, сохраняющиеся при увеличении параметра усиления до значения  $B=1.8$ . В первом генераторе колебательный процесс во всем интервале  $B \in [0.8, 1.8]$  остается однократным, а во втором – при  $B=1.1$  происходит бифуркация утроения периода. При хаотизации колебаний, как и в случае рис. 3, в первом генераторе наблюдается одна область разброса максимальных значений колебательного процесса, расширяющаяся с увеличением параметра усиления, а во втором – две. Спектры мощности колебательных процессов  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  при большой величине параметра усиления ( $B=6$ ), как и бифуркационные диаграммы, различаются между собой.

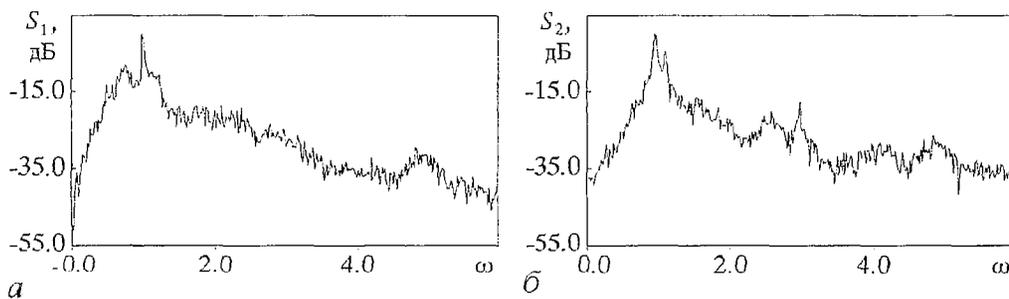


Рис. 7. Спектры мощности первого (а) и второго (б) генераторов при  $C=0.3, B=6$

### 3. Эксперимент

В качестве примера приложения теоретического анализа приведены результаты эксперимента на системе, состоящей из двух связанных генераторов. Эта система создана для работы в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн с использованием биполярных транзисторов типа 2Т640А-2 и стандартной микрополосковой техники. Микрополосковая плата этой системы приведена на рис. 8. Плата имеет размеры  $60 \times 80$  мм<sup>2</sup> и выполнена на материале ФАФ-1. Обозначения на рис. 8 имеют следующий смысл:  $T_1, T_2$  – биполярные транзисторы, соединенные с колебательными контурами в виде отрезков микрополосковых линий 1 и 2;  $C_1, C_2, C_3$  – подстраиваемые емкости;  $C_4, C_5, L_1, L_2$  и  $R_1, R_2$  – соответственно емкости, индуктивности и сопротивления фильтров в цепи питания транзисторов;  $C_6$  – развязывающая емкость в отрезке микрополосковой выходной линии 3; 4 – проводящая перемычка, замыкающая по постоянному напряжению коллекторные цепи обоих транзисторов;  $U_{кб}$  – напряжение питания коллектор – база;  $U_{эб}$  – напряжение смещения эмиттер – база.

Взаимодействие двух генераторов осуществлялось с использованием емкостной связи. Эта связь реализовывалась с помощью отрезка микрополосковой линии 3, включенного между колебательными контурами, выполненными в виде отрезков микрополосковых линий 1 и 2, соединенных каждый со своим парциальным генератором. Указанная линия одновременно служила устройством вывода генерируемых колебаний в нагрузку. Собственные частоты парциальных генераторов находились, как и при численном анализе, в соотношении 1 : 1.3.

В качестве управляющего параметра при экспериментах использовалось напряжение коллектор – база транзисторов ( $U_{кб}$ ). Такой выбор определялся удобством изменения и контроля этого параметра, а также многообразием получаемых при этом режимов генерации и возможностью относительно плавного перехода между ними.

Эксперименты проводились с использованием анализатора спектра типа

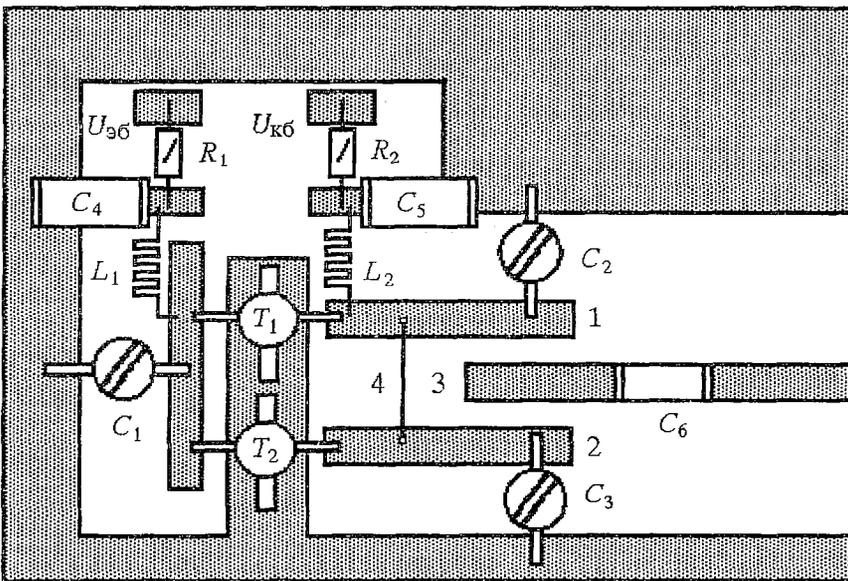


Рис. 8. Микрополосковая плата экспериментальной схемы двух связанных генераторов:  $T_1, T_2$  – транзисторы 2Т640А-2;  $C_1, C_2, C_3=0.1 - 10$  пФ;  $C_4, C_5=50$  пФ;  $R_1, R_2=30$  Ом; 1 и 2 – отрезки микрополосковой линии, включенные в коллекторную цепь транзисторов  $T_1, T_2$ , соответственно;  $C_6=10$  пФ – развязывающая емкость в выходной микрополосковой линии 3; 4 – перемычка, соединяющая по постоянному току коллекторные цепи транзисторов; напряжение питания коллектор – база транзисторов  $U_{кб}=+5$  В; напряжение смещения эмиттер – база транзисторов  $U_{эб}=-0.9$  В

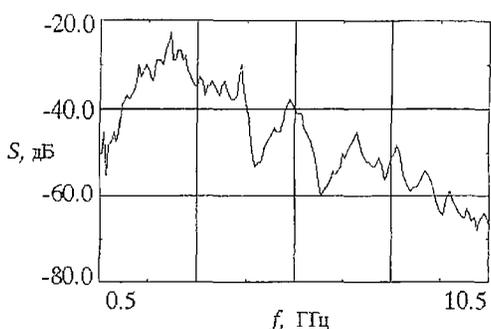


Рис. 9. Спектр мощности, регистрируемый на выходе экспериментальной системы двух связанных генераторов

конструктивной реализации системы связанных генераторов, отличается от теоретической модели элементом связи, совмещающим функции вывода энергии. Определенное влияние на характер распределения мощности по спектру в эксперименте реально оказывает рассогласование, не учитываемое в теории.

На рис. 9 приведен спектр колебаний на выходе системы двух связанных генераторов при оптимальном режиме работы. Как видно, спектр генерируемых колебаний на выходе экспериментального макета находится в хорошем качественном соответствии с теоретическими спектрами мощности, представленными на рис. 7, несмотря на отмеченные выше различия теоретической модели с экспериментальным макетом.

Качественное соответствие выражается в том, что на частотах колебательных контуров в обоих случаях имеется явно выраженный пик мощности. Спад мощности по диапазону сопровождается также ее повышением, хотя и «размытым», на частотах кратных резонансным частотам колебательных контуров.

### Заключение

Приведенная математическая модель системы связанных генераторов позволяет рассмотреть работу нескольких генераторов с учетом инерционности и запаздывания в цепях обратной связи и в элементах связи между генераторами. Она отражает специфику генераторов сверхвысоких частот в случае соизмеримости их размеров и расстояния между ними с длинами волн генерируемых колебаний.

Расчеты показывают, что существует периодическая зависимость режима колебаний от величины запаздывания и имеется оптимальная величина запаздывания, при которой возбуждаются хаотические колебания. Область этих значений запаздывания относительно узкая, так что настройка одного генератора в режим хаотических колебаний критична.

При работе двух связанных генераторов с запаздыванием, как и следовало ожидать, колебательные процессы сложнее, чем в случае одного автономного генератора, и хаотизация колебаний менее критична к параметрам. Система связанных генераторов позволяет осуществить более устойчивые режимы хаотических колебаний.

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности создания генераторов с шумоподобным спектром в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн на основе связанных систем с динамическим хаосом. Спектр широкополосных колебаний, наблюдаемый в экспериментальном макете связанных генераторов, имеет структуру, подобную структуре спектра, рассчитанного для математической модели.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 98-02-16722).*

НР-8566А и аппаратуры для регистрации электрических параметров схемы генератора. Анализатор спектра имел выход на компьютер, что позволяло отображать в цифровом представлении спектры, наблюдаемые на выходе схемы.

Точное количественное сопоставление теории и эксперимента на СВЧ едва ли возможно. Это обусловлено тем, что в эксперименте нельзя точно определить значения таких важных в данном случае параметров, как запаздывание и величина связи между парциальными генераторами. Практическая схема эксперимента, удобная для

## Библиографический список

1. *Афраймович В.С., Веричев Н.Н., Рабинович М.И.* Стохастическая синхронизация колебаний в диссипативных системах // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. XXIX, № 9. С. 1050.
2. *Ланда П.С., Перминов С.М.* Взаимодействие периодических и стохастических автоколебаний // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т.28, № 4. С. 424.
3. *Неймарк Ю.И., Ланда П.С.* Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987. 424 с.
4. *Анищенко В.С.* Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990. 312 с.
5. *Кальянов Э.В., Лебедев М.Н.* Стохастические колебания в системе связанных генераторов при наличии инерционности // РЭ. 1985. № 8. С. 1570.
6. *Сбитнев В.И.* // Нелинейные волны. Стохастичность и турбулентность. Горький: ИПФ АН СССР, 1980. С. 46.
7. *Кальянов Э.В.* Взаимоиндуцированные переходы в связанных автколебательных системах // РЭ. 1996. Т. 41, № 4. С. 497.
8. *Кальянов Э.В.* Самоорганизация в системе двух связанных автстохастических генераторов // Письма в ЖТФ. 1994. Т.20, № 2. С.44.
9. *Астахов В.В. и др.* Управление и синхронизация хаоса в системе связанных генераторов// РЭ. 1996. Т.41, № 11. С. 1323.
10. *Astakhov V., Shabunin A., Anischenko V.* Synchronisation by chaos control in symmetrically coupled Chua's circuits // Proc. 5-th Intern. Specialist Workshop. Non-linear Dynamics of Electronic Systems, June 26-27 1997, Moscow, Russia. P. 172.
11. *Kuznetsov A.S., Shalfeev V.D.* Structure formation and regularisation in an array of globally coupled oscillators // Proc. 5-th Intern. Specialist Workshop. Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, June 26-27 1997, Moscow, Russia. P. 347.
12. *Кальянов Э.В.* Воздействие одиночного импульса на автогенератор при детерминированном и хаотическом режимах колебаний // РЭ. 1993. Т.38, № 2. С. 287.
13. *Дмитриев А.С., Кислов В.Я.* Стохастические колебания в радиофизике и электронике. М.: Наука, 1989. 280 с.
14. *Александров М.Г., Беляшин А.Н., Брюкнер В. и др.* Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1983. 344 с.

*Институт радиотехники и  
электроники РАН*

*Поступила в редакцию 6.10.98  
после переработки 6.04.99*

## AUTOSTOCHASTIC SYSTEM OF COUPLED MICROWAVE OSCILLATORS

*R.V. Belyaev, E.V. Kal'yanov, V.Ya. Kislov, B.E. Kyarginiskii, M.N. Lebedev*

The equations of coupled oscillation system taking into account each partial oscillator inertia and delay in backward are given. Delay in connecting elements between oscillators is also considered. The results of numerical analysis of one and two oscillators with capacity coupling are given. It is demonstrated that chaotisation of oscillations is appearing more easy in a system of two coupled oscillators than in a system of only one oscillator. These results are supported by experiments with microwave transistor oscillators. The experiments fulfilled on autostochastic systems consisting of two oscillators has shown that system of two coupled transistor oscillators permits to obtain chaotic noise-like oscillations in S-frequency band.



*Беляев Ростислав Владимирович* – окончил Московский физико-технический институт (1958). Работает в Институте радиотехники и электроники РАН в должности старшего научного сотрудника, кандидат физико-математических наук. Автор около 40 печатных трудов. Область научных интересов: динамический хаос в электронных системах.  
E-mail: belyaev@mail.cplire.ru



*Кальянов Эраст Васильевич* – родился в 1930 году в Саратове, окончил физический факультет Ленинградского государственного университета (1953) и аспирантуру ЛГУ (1957), защитив диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Работает в Институте радиотехники и электроники РАН в должности ведущего научного сотрудника. Соавтор монографии «Многочастотные режимы в приборах СВЧ». Автор более 150 научных публикаций. Лауреат Премии Совета Министров СССР за 1984 г.



*Кислов Владимир Яковлевич* – окончил физический факультет Московского государственного университета. Зав. отделом Института радиотехники и электроники РАН, профессор, доктор физико-математических наук. Автор более 120 печатных трудов. Область научных интересов: динамический хаос в радиоэлектронных системах, электронные и плазменные системы, биомедицина. Лауреат Государственной Премии и Премий Совета Министров СССР.



*Кяргинский Борис Егорович* – родился в 1937 году. Окончил Ленинградский электротехнический институт (1967). Работает в Институте радиотехники и электроники РАН в должности ведущего инженера. Имеет 14 печатных работ. Область научных интересов: динамический хаос в электронных СВЧ-приборах.



*Лебедев Михаил Николаевич* – родился в 1950 году. Окончил Всесоюзный заочный политехнический институт. С 1978 года работает в Институте радиотехники и электроники РАН в должности научного сотрудника. Автор более 50 научных работ в области стохастических колебаний в радиотехнике и электронике. Лауреат Премии Совета Министров СССР за 1989 г.