

09

Исследование обобщенной синхронизации в системе двух связанных клистронных автогенераторов хаоса

© А.В. Стародубов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов,
Ю.Д. Жарков, Б.С. Дмитриев

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
E-mail: StarodubovAV@nonlin.sgu.ru, alkor@nonlin.sgu.ru, aeh@nonlin.sgu.ru

Поступило в Редакцию 21 сентября 2006 г.

Изложены результаты теоретического исследования явления обобщенной хаотической синхронизации в системе двух однонаправленно связанных моделей двухрезонаторных клистронных автогенераторов хаоса. Приводится объяснение возникновения исследуемого режима поведения.

PACS: 05.45.Pq, 05.45.Xt, 84.40.Fe.

Синхронизация хаотических автоколебаний представляет собой фундаментальное нелинейное явление, активно исследуемое в настоящее время в системах различной природы [1,2]. Известно несколько типов хаотической синхронизации, введенных при анализе связанных хаотических динамических систем с малым числом степеней свободы [2–7]. Большое внимание привлекает обобщенная синхронизация хаотических систем [3,8], которая подробно изучалась для модельных систем, однако для реальных физических систем подобных исследований проводилось мало. Особый интерес среди таких реальных физических систем вызывают системы электронной природы, которые характеризуются сложными нестационарными режимами работы и широко используются в качестве источников мощного СВЧ-излучения [9,10]. Заметим, что устройства и системы СВЧ-электроники и радиофизики являются базовыми элементами практически любых информационно-телекоммуникационных систем и находят широкое применение при передаче и обработке информации, а также в технологических процессах и научных исследованиях. Понимание основных механизмов, позволяющих осуществить синхронизацию колебаний и управление хаосом в подобных системах, оказывается чрезвычайно важным как с фундаментальной, так и с

практической точки зрения (передача информации (в том числе скрытой) с помощью хаотических сигналов [11,12], радиолокация на основе хаотических сигналов, задачи радиопротиводействия и т. д. [13]). В свете сформулированной задачи представляют интерес экспериментальные результаты, полученные на клистронных автогенераторах с запаздывающей обратной связью [14].

Настоящая работа посвящена теоретическому исследованию явления обобщенной синхронизации в двухрезонаторных клистронных генераторах хаоса СВЧ-диапазона с запаздывающей обратной связью.

Опишем используемую в работе модель системы однонаправленно связанных двухрезонаторных клистронов с запаздывающей обратной связью. Следуя [15,16], поведение ведущего и ведомого автогенераторов описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{F}_1^d(\tau) + \gamma F_1^d(\tau) &= \gamma F_2^d(\tau - \Delta\tau), \\ \dot{F}_2^d(\tau) + \gamma F_2^d(\tau) &= -2i\alpha e^{-i\psi} J_1(|F_1^d(\tau)|) \frac{F_1^d(\tau)}{|F_1^d(\tau)|}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_1^r(\tau) + \gamma F_1^r(\tau) &= \gamma(F_2^r(\tau - \Delta\tau) + \varepsilon F_2^d(\tau)), \\ \dot{F}_2^r(\tau) + \gamma F_2^r(\tau) &= -2i\alpha e^{-i\psi} J_1(|F_1^r(\tau)|) \frac{F_1^r(\tau)}{|F_1^r(\tau)|}, \end{aligned} \quad (2)$$

где величины с индексом „*d*“ относятся к ведущей, а с индексом „*r*“ — ведомой системам; $F_1(\tau)$ и $F_2(\tau)$ — нормированные медленно меняющиеся комплексные амплитуды колебаний напряжения на зазорах соответственно входного и выходного резонаторов; $J_1(\cdot)$ — функция Бесселя первого рода первого порядка; τ — безразмерное время; $\Delta\tau = 1$ — безразмерное время задержки в цепи обратной связи; α — параметр возбуждения резонатора, имеющий смысл произведения коэффициента усиления на глубину обратной связи; ψ — полный набег фазы за время распространения сигнала по петле обратной связи; γ — параметр затухания, ε — параметр связи, характеризующий затухание в цепи связи между ведущим и ведомым автогенераторами. Значения управляющих параметров были выбраны следующими: $\alpha = 10.9$, $\gamma = 1.0$, $\psi = 0.4875\pi$ [16]. При данных значениях управляющих параметров используемые модели клистронных автогенераторов в автономном режиме ($\varepsilon = 0$) демонстрировали хаотическое поведение. Поскольку

уравнения в системе (1)–(2) содержат запаздывание, то численное решение данной системы проводилось с помощью одношагового метода Эйлера: шаг по времени выбирался равным $t = 0.001$.

Будем характеризовать состояние клистронного автогенератора величиной безразмерной комплексной амплитуды колебаний напряжения на зазоре выходного резонатора, другими словами — амплитудой выходного сигнала $F_2(\tau)$. Режим обобщенной синхронизации означает, что величины амплитуд выходного сигнала с ведущего $F_2^d(\tau)$ и ведомого $F_2^r(\tau)$ автогенераторов находятся в функциональной зависимости $G[\cdot]$, такой, что после завершения переходного процесса имеет место установление функционального соотношения $F_2^r(\tau) = G[F_2^d(\tau)]$. Метод вспомогательной системы заключается в следующем [17]: наряду с ведомым автогенератором рассматривается идентичная ему вспомогательная система — вспомогательный автогенератор, начальные условия для которого задаются отличным от начального состояния ведомого автогенератора. Обозначим $F_2^a(\tau)$ величину амплитуды колебаний выходного сигнала со вспомогательного автогенератора. В случае отсутствия режима обобщенной синхронизации между взаимодействующими автогенераторами системы $F_2^r(\tau)$ и $F_2^a(\tau)$ являются различными. В режиме обобщенной синхронизации, в силу выполнения соотношений $F_2^r(\tau) = G[F_2^d(\tau)]$ и $F_2^a(\tau) = G[F_2^d(\tau)]$, после завершения переходного процесса данные величины должны стать идентичными $F_2^r(\tau) \equiv F_2^a(\tau)$. Таким образом, эквивалентность состояний, а именно амплитуд колебаний напряжения на зазорах выходных резонаторов ведомого и вспомогательного автогенераторов после переходного процесса (который может быть достаточно длительным [18]) является критерием наличия обобщенной синхронизации. Наглядней всего это можно проиллюстрировать на плоскости $(|F_2^r(\tau)|, |F_2^a(\tau)|)$, на которой при наличии явления обобщенной синхронизации будет наблюдаться прямая линия, соответствующая диагонали этой плоскости.

Для диагностики обобщенной синхронизации хаотический сигнал с ведущего автогенератора подавался одновременно на ведомый автогенератор, который в автономном режиме также демонстрировал хаотическое поведение, и на вспомогательную систему. В ходе эксперимента изменялось значение параметра связи ε между автогенераторами и отслеживалось соотношение между состояниями ведомого и вспомогательного автогенераторов. Было установлено, что при параметре связи $\varepsilon \approx 0.92$ в исследуемой системе наблюдается эквивалентность состояний во времени ведомой и вспомогательной систем. Последнее,

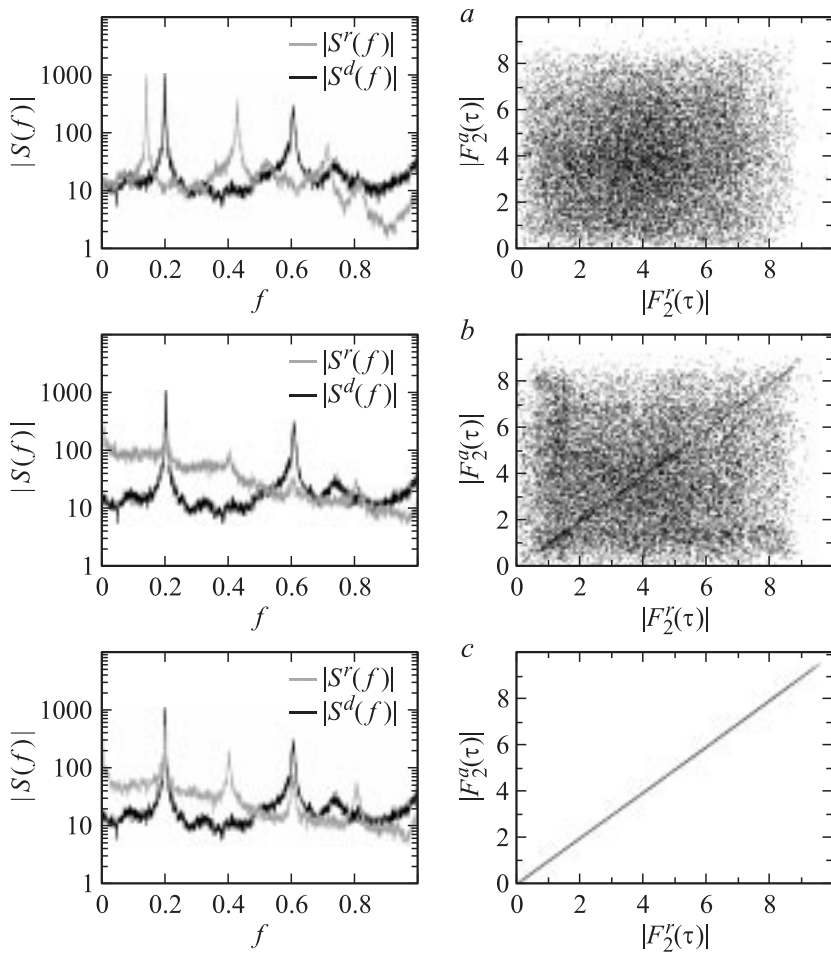


Рис. 1. Спектры, построенные по временным реализациям ведущего $F_2^d(\tau)$ и ведомого $F_2^r(\tau)$ автогенераторов, и вид плоскости $(|F_2^r(\tau)|, |F_2^a(\tau)|)$ при различных значениях параметра связи: a — $\varepsilon = 0.0$, b — $\varepsilon = 0.89$, c — 0.93 .

как было отмечено выше, служит критерием наступления режима обобщенной синхронизации в исследуемой системе [17]. На рис. 1 слева приведены спектры, построенные по временным реализациям

ведущего и ведомого автогенераторов, а справа — вид плоскости $(|F_2^r(\tau)|, |F_2^a(\tau)|)$ при различных значениях параметра связи ε . Рис. 1, *a* построен при $\varepsilon = 0.0$ — автономный режим работы ведомого и вспомогательного автогенераторов. На рис. 1, *b* приведены спектры и плоскость $(|F_2^r(\tau)|, |F_2^a(\tau)|)$ при $\varepsilon = 0.89$. Состояния ведомого и вспомогательного автогенераторов все еще различны. На спектре ведомого автогенератора стали проявляться частотные компоненты на частотах ведущего автогенератора. Другими словами, можно сказать, что наблюдается режим частотной синхронизации между ведомым и ведущим автогенераторами. При $\varepsilon \approx 0.93$ (рис. 1, *c*) состояния ведомого и вспомогательного автогенераторов являются эквивалентными друг другу, что, как было описано выше, соответствует режиму обобщенной синхронизации.

Рассмотрим вопрос о механизмах возникновения режима обобщенной хаотической синхронизации в связанных клистронных генераторах хаоса. Данное явление можно объяснить следующим образом. В [19] было установлено, что в основе механизма, приводящего к возникновению режима обобщенной хаотической синхронизации в однонаправленно связанных модельных системах, лежит подавление собственных хаотических колебаний в ведомой системе. Поэтому возникает вопрос: каким образом может быть подавлена собственная хаотическая динамика в клистронном автогенераторе хаоса? Известно, что характеристики клистронных усилителей определяются величиной первой гармоники сгруппированного тока [20,21]. Последнее обусловлено тем, что такие автоколебательные системы, как клистроны, используемые в СВЧ-электронике, характеризуются ярко выраженными резонансными свойствами — полоса пропускания их очень узка, поэтому выходные резонаторы, входящие в конструкцию клистронов, взаимодействуют лишь с одной из гармонических составляющих сгруппированного тока, а именно, первой, основной гармоникой. Пользуясь соотношениями из теории каскадной группировки электронов в пространстве дрейфа, можно выписать выражение для амплитуды первой гармоники сгруппированного тока в рамках используемой модели [15]:

$$I_1 = 2iI_0J_1 \left(\frac{|F_1(\tau)|}{2} \right) e^{-i(\theta_0 - \arg(F_1(\tau)))}, \quad (3)$$

где I_0 — постоянный ток электронного пучка, θ_0 — невозмущенный угол пролета в пространстве дрейфа между первым и вторым резонаторами, $\arg(F_1(\tau))$ — фазы колебаний в первом резонаторе.

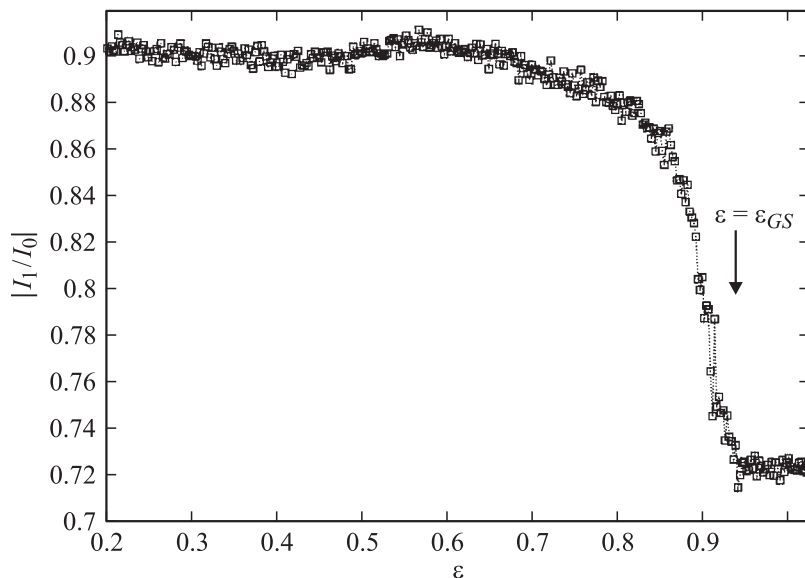


Рис. 2. Зависимость усредненной по времени величины первой гармоники сгруппированного тока $|I_1/I_0|$ в ведомом клистроном автогенераторе от величины параметра связи ε . Стрелкой указано значение параметра связи $\varepsilon = \varepsilon_{GS}$, при котором возникает режим обобщенной хаотической синхронизации.

На рис. 2 показана зависимость I_1/I_0 от величины ε : квадратиками указаны полученные численно значения I_1/I_0 при различных величинах параметра связи. Как видно из рисунка, при $\varepsilon \approx 0.9$ наблюдается резкое изменение величины амплитуды первой гармоники. Исходя из представленных результатов, можно утверждать, что вносимое воздействие при параметре связи $\varepsilon \approx 0.92$ со стороны ведущего автогенератора фактически приводит к срыву генерации собственных хаотических колебаний в ведомом автогенераторе, так как при данном уровне величины нормированной амплитуды первой гармоники сгруппированного тока ($I_1/I_0 \approx 0.72 \div 0.73$), как показали проведенные эксперименты, он может генерировать лишь одночастотный сигнал. Хаотическая же генерация наблюдается при значениях $I_1/I_0 \approx 0.87 \div 0.9$. Таким образом, механизм установления режима обобщенной синхронизации следующий. При

подаче хаотического сигнала с ведущего автогенератора на ведомый между данными системами сначала устанавливается режим частотной синхронизации, о чем свидетельствует рис. 1, *b*. Если бы автогенераторы работали в периодическом режиме, то наблюдалось бы и явление обобщенной синхронизации, т.е. совпадение колебаний амплитуд выходного сигнала в ведомом и вспомогательном автогенераторах. Однако собственная не подавленная хаотическая динамика ведомого автогенератора и, следовательно, вспомогательного не позволяет установить однозначное соотношение между амплитудами выходного сигнала с ведущего и ведомого автогенераторов [19,22]. Как только собственная хаотическая динамика в ведомом и соответственно во вспомогательном автогенераторе подавлена (рис. 2), наблюдается режим обобщенной синхронизации (рис. 1, *c*).

Таким образом, в работе теоретически выявлена возможность установления режима обобщенной синхронизации в системе однонаправленно связанных клистронных автогенераторов хаоса. В заключение хотелось бы отметить, что полученные теоретические результаты были экспериментально подтверждены результатами исследований обобщенной хаотической синхронизации в системе однонаправленно связанных пятирезонаторных клистронных генераторов с запаздывающей обратной связью. Обсуждение эксперимента и сравнение результатов с теоретическим исследованием будет проведено в расширенной версии данной статьи.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 06-02-81013-Бел-а, 06-02-16451-а), программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-4167.2006.2). А.А. Короновский и А.Е. Храмов также выражают благодарность за финансовую поддержку ФНП „Династия“ и МЦФФ (г. Москва).

Список литературы

- [1] *Блехман И.И.* Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981.
- [2] *Пиковский А., Розенблум М., Куртс Ю.* Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
- [3] *Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I.* // Phys. Rev. E. 1995. V. 51 (2). P. 980–994.
- [4] *Rosenblum M.G., Pikovsky A.S., Kurths J.* // Phys. Rev. Lett. 1997. V. 78 (22). P. 4193–4196.

- [5] Pecora L.M., Carroll T.L. // Phys. Rev. Lett. 1990. V. 64 (8). P. 821–824.
- [6] Hramov A.E., Koronovskii A.A. // Chaos. 2004. V. 14 (3). P. 603–610.
- [7] Hramov A.E., Koronovskii A.A. // Physica D. 2005. V. 206 (3–4). P. 252–264.
- [8] Kocarev L., Parlitz U. // Phys. Rev. Lett. 1996. V. 76 (11). P. 1816–1819.
- [9] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Наука. Физматлит, 2003.
- [10] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Наука. Физматлит, 2004.
- [11] Дмитриев А.С., Кузьмин Л.В., Панас А.И., Старков С.О. // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43. С. 1115–1128.
- [12] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [13] Hastler M., Mazzini G., Ogorzalek M., Rovatti R., Setti G. Proceedings of the IEEE. 2002. V. 90 (5). P. 640–934.
- [14] Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Рыскин Н.М., Шигаев А.М. // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46 (5). С. 604–610.
- [15] Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Кижяева К.К., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М., Шигаев А.М. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002. Т. 10 (5). С. 37–46.
- [16] Рыскин Н.М., Шигаев А.М. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 1. С. 72–81.
- [17] Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M. // Phys. Rev. E. 1996. V. 53 (5). P. 4528–4535.
- [18] Hramov A.E., Koronovskii A.A. // Europhysics Letters. 2005. V. 70 (2). P. 169–175.
- [19] Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 2. С. 1–9.
- [20] Шевчик В.Н. Основы электроники сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1959.
- [21] Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973.
- [22] Hramov A.E., Koronovskii A.A. // Phys. Rev. E. 2005. V. 71 (6). P. 067 201.