

11
Взаимная синхронизация связанных клистронных генераторов с задержкой

© В.В. Емельянов,¹ Ю.П. Емельянова,² Н.М. Рыскин¹

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

² Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 410054 Саратов, Россия
e-mail: emvaleriy@gmail.com

(Поступило в Редакцию 20 октября 2015 г.)

Представлены результаты численного исследования картины синхронизации двух связанных клистронных генераторов с внешней цепью обратной связи. Моделирование проводится на основе метода „частиц в ячейке“. Также приведены результаты численного исследования клистрона-усилителя и изолированного клистрона-генератора, которые позволяют произвести оптимальный выбор параметров связанных клистронов. Исследована структура областей синхронизации при различных параметрах. Обнаружена возможность увеличения суммарной выходной мощности при надлежащем подборе параметров связи между генераторами.

Введение

Клистроны хорошо известны как мощные электровакуумные усилители сверхвысокочастотного диапазона [1,2]. Они широко используются в ускорителях элементарных частиц, радиоастрономии, радиомаяках, телевидении, оконечных усилителях мощности радиолокационных станций дальнего действия и высокой разрешающей способности и др. [1,2]. Клистронный усилитель может быть трансформирован в генератор путем ответвления части выходной мощности с выходного резонатора во входной через направленный ответвитель и широкополосную бездисперсионную линию связи. Подобные генераторы представляют практический интерес из-за простоты конструкции, высокой выходной мощности и КПД. Клистронные генераторы с обратной связью (ОС) изучались как теоретически, так и экспериментально (см., например, [3–6]). Выявлено, что для подобных приборов типичным является сложное поведение, включая режимы динамического хаоса, при достаточно большом токе пучка и достаточно большой глубине ОС.

Задача о взаимной синхронизации подобных генераторов представляет интерес с точки зрения получения более высоких уровней мощности. Кроме того, процессы синхронизации в системах осцилляторов с запаздыванием имеют ряд принципиальных особенностей, так что их изучение представляет самостоятельный интерес для теории колебаний и нелинейной динамики. Системы с запаздыванием широко распространены в радиоэлектронике, нелинейной оптике, биофизике и др. (см., например, [7]). В отличие от конечномерных систем системы с запаздыванием имеют бесконечномерное фазовое пространство, что существенно сказывается на структуре картины синхронизации взаимодействующих осцилляторов. В частности, в работах [8,9] была рассмотрена синхронизация двух простых модельных систем, описываемых дифференциальными уравнениями с запаздыва-

нием. Была выявлена сложная структура областей синхронизации, обусловленная наличием резонансов между различными собственными модами в многомодовых распределенных системах с запаздыванием. Отметим, что клистронные автогенераторы также можно описать при помощи аналогичных уравнений [10,11]. Синхронизация двух связанных клистронов на основе подобных моделей изучалась в работе [12]. Однако известно, что дифференциальные уравнения с запаздыванием хорошо описывают лишь качественную картину поведения усилителей и генераторов клистронного типа, но не могут предсказать с достаточной точностью такие важные с практической точки зрения характеристики прибора, как выходная мощность, КПД, время переходного процесса и т.д. [11]. Поэтому в настоящей работе для изучения синхронизации двух связанных клистронных генераторов с внешней цепью ОС применена более реалистичная нестационарная численная модель, где для моделирования динамики электронного пучка используется метод „частиц в ячейке“ (подробнее см. [13]).

Схема двух связанных клистронных генераторов показана на рис. 1. Для простоты ограничимся анализом связанных двухрезонаторных генераторов. Синхронизация связанных подобным образом генераторов на основе многорезонаторных клистронов исследовалась экспериментально в [14]. Связь между генераторами устроена таким образом, что часть мощности из цепи ОС одного генератора поступает в цепь ОС другого, и наоборот. Для регулирования ослабления (глубины обратной связи) и фазы сигнала в цепь ОС каждого из генераторов включены регулируемый широкополосный аттенуатор и фазовращатель. Параметр k ($k = 0 - 1$) отвечает за связь между генераторами. Он характеризует долю мощности, поступающую из цепи ОС одного генератора в цепь ОС другого (подробнее см. [8,9]). При $k = 1$ имеем два несвязанных клистронных генера-

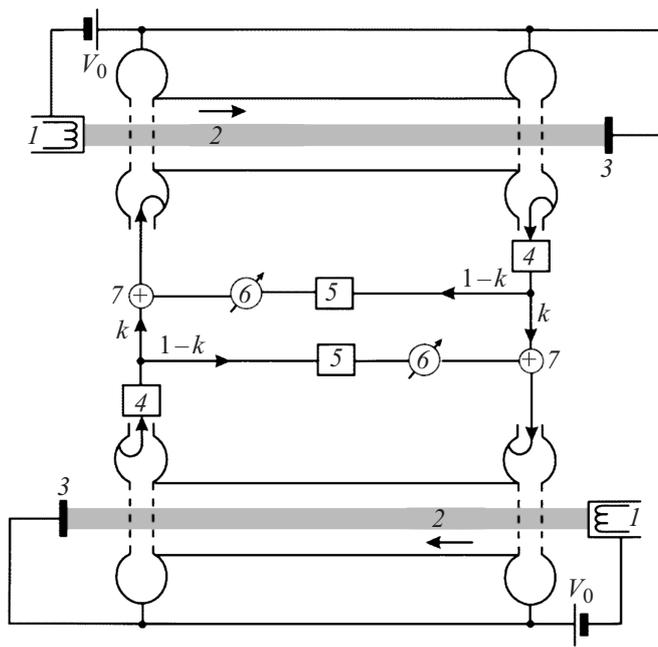


Рис. 1. Схема двух связанных клистронных генераторов. 1 — электронные пушки, 2 — электронные пучки, 3 — коллекторы, 4 — регулируемые аттенюаторы, 5 — линии задержки, 6 — фазовращатели, 7 — сумматоры, k — параметр распределения сигнала между генераторами.

тора. При $k = 0$ система превращается в двухкаскадный клистрон-генератор, рассмотренный в [15].

Для численного моделирования динамики связанных клистронных генераторов была разработана программа [16], алгоритм которой адаптирован под компьютеры с многоядерным процессором. Движение электронов полагается одномерным, уравнения движения интегрируются с помощью известного метода „частиц в ячейках“. Поля в резонаторах описываются на основе нестационарной теории возбуждения [17]. Для обеспечения достаточной степени точности осуществлялось моделирование более 5000 частиц.

Результаты численного моделирования

Клистрон-усилитель

Прежде всего необходимо определить основные характеристики двухрезонаторного клистрона-усилителя. Будем считать, что параметры входного и выходного резонаторов идентичны. Значения параметров приведены в таблице. Они приблизительно соответствуют параметрам клистрона-генератора S-диапазона, изученного экспериментально в [3–5].

На рис. 2 представлены зависимости выходной мощности (темные кружки, левая ось), выделяемой в нагрузку, и коэффициента усиления (светлые кружки, правая ось) от мощности входного сигнала, построенные в двойном логарифмическом масштабе при частоте входного сиг-

нала 2794 МГц. Ток электронного пучка выбран равным 50 мА. Полученные кривые имеют классический для клистронных усилителей вид: имеется участок линейного режима усиления, характеризующийся постоянством коэффициента усиления и его максимальным значением; участок режима насыщения, характеризующийся максимальным значением выходной мощности; участок режима падения выходной мощности, вызванный кинематической перегруппировкой электронного потока. Как показывает рис. 2, для данного клистрона максимальное значение коэффициента усиления $G_{\max} \sim 16.5$ dB, выходная мощность в режиме насыщения $P_{\max} \sim 43$ dBm или 22 W.

На рис. 3 представлена трансформация амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) прибора при изменении уровня мощности входного сигнала. Кривая 1 соответствует линейному режиму работы усилителя, кривая 2 — режиму насыщения. Дальнейшее увеличение входной мощности вызывает на резонансной частоте

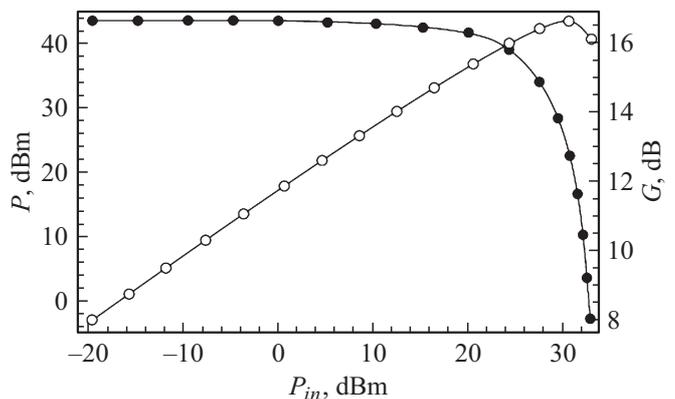


Рис. 2. Зависимости выходной мощности P (темные кружки, левая ось) и коэффициента усиления G (светлые кружки, правая ось) от входной мощности P_{in} при частоте входного сигнала 2794 МГц и токе электронного пучка 50 мА.

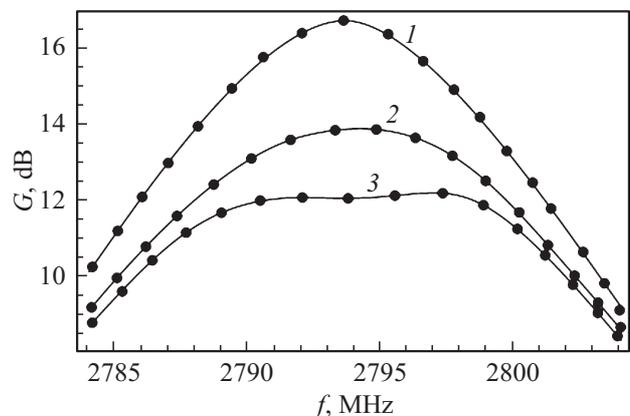


Рис. 3. Зависимости коэффициента усиления от частоты входного сигнала. Кривая 1 соответствует линейному режиму работы усилителя (входная мощность $P_{in} = 100 \mu\text{W}$), кривая 2 — режиму насыщения ($P_{in} = 900 \text{ mW}$), кривая 3 — режиму за насыщением ($P_{in} = 1.3 \text{ W}$).

Параметры клистрона-усилителя

Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
Ненагруженная добротность резонаторов	460
Нагруженная добротность входного резонатора	250
Нагруженная добротность выходного резонатора	125
Характеристическое сопротивление резонаторов, Ω	300
Расстояние между центрами резонаторов, mm	30
Ширина зазора резонаторов, mm	2
Радиус пучка, mm	2
Ускоряющее напряжение, V	1500
Собственная частота резонаторов, MHz	2795

перегруппирование электронов, приводящее к провалу на АЧХ вблизи резонанса (кривая 3). Подобное поведение АЧХ клистрона при изменении мощности входного сигнала согласуется с данными, представленными в литературе [1,2]. Полоса усиления клистрона на уровне -3 dB , как видно из рис. 3, составляет в режиме малого сигнала 12 MHz, в режиме насыщения — 15 MHz.

Изолированный клистрон-генератор

Перейдем к изучению основных режимов генерации и характеристик изолированного двухрезонаторного клистрона с внешней цепью ОС. Время распространения сигнала в цепи ОС выбрано равным 10 ns, что примерно соответствует параметрам генераторов, которые исследовались экспериментально [3–5]. На рис. 4 приведены границы самовозбуждения и срыва генерации исследуемого генератора на плоскости параметров, набег фазы в цепи ОС, φ — ток электронного пучка I при различных значениях ослабления сигнала. Поскольку границы самовозбуждения и срыва генерации периодичны по фазе, они построены лишь в интервале $\varphi = 0 - 2\pi$. Значение фазы, отвечающее центру зоны генерации (где стартовый ток минимален), не зависит от уровня ослабления в цепи ОС и примерно равно $\varphi \sim 0.942$. Обратим внимание, что при больших значениях тока пучка происходит срыв генерации, вызванный увеличением сил пространственного заряда, приводящих к разгруппировке электронов, что согласуется с результатами, полученными для более простых моделей в виде дифференциальных уравнений с запаздыванием [6].

При больших значениях ослабления на плоскости параметров наблюдаются изолированные зоны генерации и имеется интервал значений по фазе в цепи ОС, в котором генерация в системе отсутствует при любых значениях тока пучка (не выполняется амплитудное условие возбуждения колебаний). При значении ослабления -5 dB наблюдается перекрытие двух зон генерации. В областях перекрытия зон генерации наблюдается бистабильность, т.е. при одних и тех же значениях параметров в зависимости от начальных

условий устанавливаются колебания на одной из двух соседних собственных мод. При плавном изменении фазы φ в этой области происходят жесткие переходы с одной собственной моды на другую, сопровождающиеся гистерезисом [6]. Такая картина носит общий характер для автогенераторов с запаздыванием [3–6,10].

Выберем значение ослабления в цепи обратной связи равным -10 dB , когда перекрытие зон генерации не происходит. На рис. 5, а представлена зависимость выходной мощности генератора P от тока электронного пучка I , построенная при $\varphi = 0.942$, что отвечает центру зоны генерации. Данный рисунок наглядно демонстрирует возбуждение колебаний, нарастание мощности с ростом тока, затем насыщение и срыв генерации. Максимальное значение выходной мощности 26 W наблюдается при токе электронного пучка $I = 107\text{ mA}$. При дальнейшем увеличении тока начинает сказываться ухудшение группировки за счет сил пространственного заряда, что вызывает падение уровня выходной мощности.

Зависимость выходной мощности от тока электронного пучка при меньшем ослаблении -5 dB представлена на рис. 5, b. При малых значениях тока пучка $I = 8-40\text{ mA}$ в системе реализуется режим одночастотной генерации, при котором выходная мощность

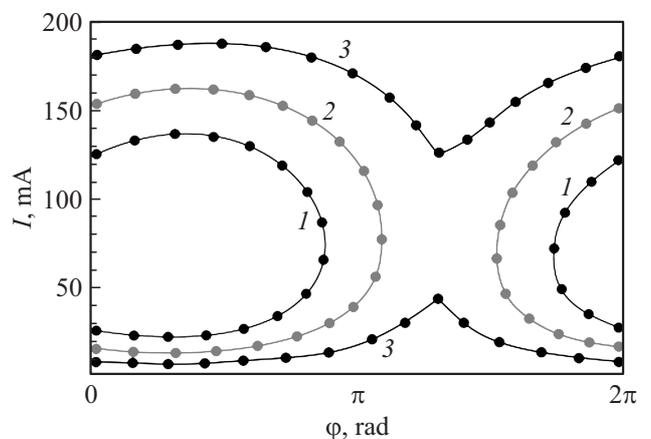


Рис. 4. Границы самовозбуждения и срыва генерации на плоскости параметров набег фазы в цепи ОС — ток электронного пучка при ослаблении в цепи ОС -13.3 dB (1), -10 dB (2) и -5 dB (3).

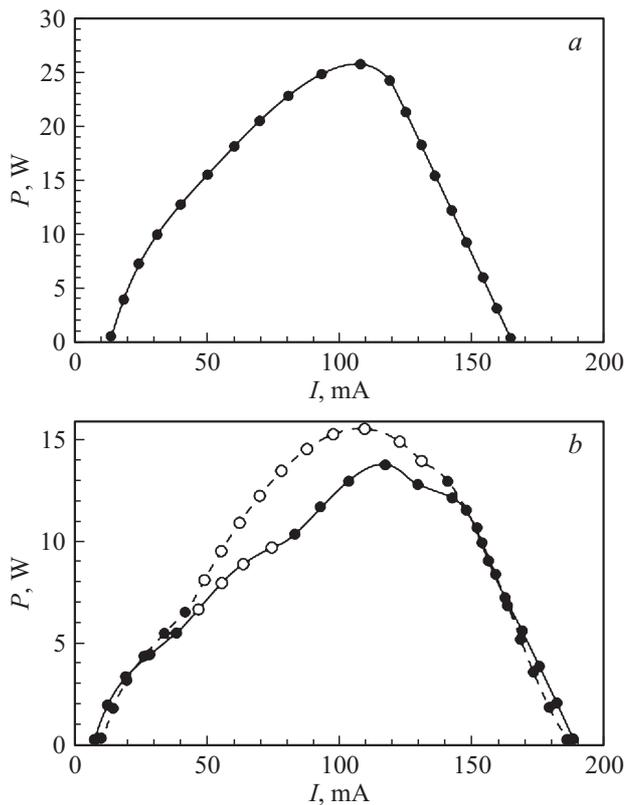


Рис. 5. Зависимости выходной мощности генерации от тока электронного пучка при ослаблении -10 dB (*a*) и -5 dB (*b*). Сплошная линия — $\varphi = 0.942$, штрих — $\varphi = 0$. Темные кружки — режим одночастотной генерации, светлые кружки — режим автомодуляции.

в установившемся режиме не меняется со временем. Увеличение тока приводит к перегруппировке электронного пучка, в результате чего в диапазоне $I = 40\text{--}77$ мА устанавливается режим автомодуляции, при котором выходная мощность осциллирует со временем. При этом в спектре сигнала появляются сателлиты — паразитные составляющие, симметрично отстоящие от несущей частоты. В области автомодуляции приведены усредненные по времени значения выходной мощности. Дальнейший рост тока электронного пучка приводит к увеличению сил пространственного заряда, в результате чего в диапазоне токов $I = 77\text{--}190$ мА вновь устанавливается режим одночастотной генерации. Максимальное значение выходной мощности падает почти в 2 раза по сравнению с рис. 5, *a*. На рис. 5, *b* также построена аналогичная зависимость при $\varphi = 0$. Видно, что в этом случае область автомодуляции расширяется, причем максимальная выходная мощность теперь наблюдается в режиме автомодуляции.

В целом описанная картина динамики клистрона-генератора хорошо согласуется с результатами работ [3,5,6], где исследовались более простые модели, описываемые системами дифференциальных уравнений с запаздыванием.

Взаимная синхронизация двух связанных генераторов

Рассмотрим далее взаимную синхронизацию двух генераторов при наличии расстройки собственных частот. Выберем фазу сигнала в цепи ОС $\varphi = 0.942$, что соответствует центру зоны генерации одиночного генератора, и ослабление -5 dB. На рис. 6 приведена карта динамических режимов на плоскости параметров расстройка частот Δf — параметр связи k . При численном моделировании собственные частоты резонаторов первого клистрона оставались фиксированными и равными $f_0 = 2975$ МГц, а для второго клистрона изменялись в пределах $f_0 \pm \Delta f$, где Δf доходила до 140 МГц. Это значительно превышает рабочую полосу клистрона-усилителя в режиме малого входного сигнала, которая приблизительно равна 12 МГц (рис. 3). Токи электронных пучков обоих клистронов были выбраны идентичными: $I = 116$ мА. На частоте f_0 такой ток соответствует одночастотному режиму колебаний изолированных генераторов (рис. 5, *b*). Однако при других значениях собственной частоты генератор может работать и в автомодуляционном режиме.

При малых значениях параметра связи доминирует квазипериодический режим биений. С увеличением связи происходит переход к синхронизации. Область синхронизации имеет вид язычков, отходящих от оси $k = 0$ в точках, в которых частоты генерации изолированных клистронов одинаковы. Как уже отмечалось, генератор с запаздывающей ОС является многомодовым. При изменении расстройки собственные частоты различных мод второго генератора изменяются. Когда какая-либо из этих собственных частот совпадает с собственной частотой первого генератора, наблюдается резонанс, и синхронизация наступает уже при очень малых значениях параметра связи.

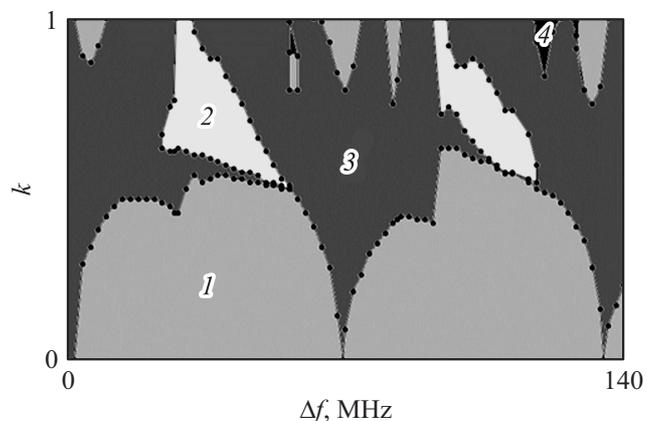


Рис. 6. Карта динамических режимов двух связанных клистронных генераторов. Токи электронных пучков $I = 116$ мА. 1 — режим биений, 2 — режим гибели колебаний, 3 — режим синхронизации, 4 — хаотические колебания.

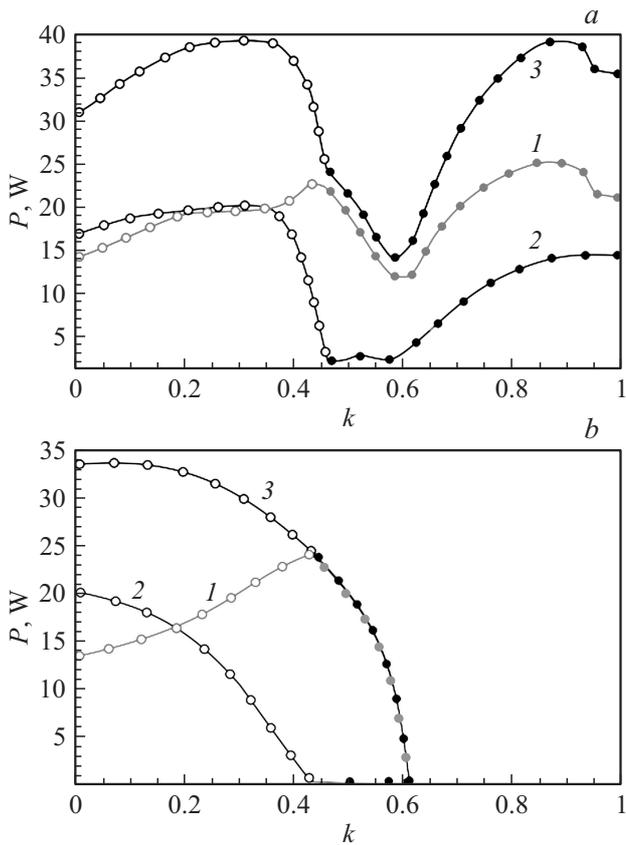


Рис. 7. Зависимости выходной мощности первого генератора (кривая 1), второго генератора (кривая 2) и суммарной выходной мощности (кривая 3) от параметра связи k , построенные при $\Delta f = 20$ МГц (а) и $\Delta f = 28$ МГц (б). Светлые кружки — биения, темные кружки — стационарная генерация.

На рис. 7,а представлены зависимости выходной мощности первого, второго генераторов и суммарной выходной мощности от параметра связи k , построенные при частотной расстройке $\Delta f = 20$ МГц внутри первого языка синхронизации на карте динамических режимов. При $k = 0$ первый генератор находится в режиме одночастотной генерации, второй — в режиме автомодуляции. Видно, что в областях $k \sim 0.35$ и $k \sim 0.9$ наблюдается значительное увеличение суммарной выходной мощности в режиме биений и синхронизации соответственно, если проводить сравнение с суммарной мощностью изолированных клистронов-генераторов (при $k = 0$).

Между языками синхронизации на карте динамических режимов имеются области синхронизации, напоминающие вид „рукавов“, простирающихся от одного языка к другому. Это похоже на картину „широкополосной синхронизации“, описанную ранее в работах [8,9,12], где рассматривалась синхронизация математических моделей в виде дифференциальных уравнений с запаздыванием. Внутри области широкополосной синхронизации один генератор является доминирующим и подавляет колебания во втором генераторе. Область широкопо-

лосной синхронизации отделяет на карте динамических режимов область биений от области гибели колебаний, где амплитуды колебаний обоих генераторов затухают, а выходные мощности падают до нуля.

На рис. 7, б представлены зависимости выходной мощности первого и второго генераторов, а также суммарной выходной мощности от параметра связи k при частотной расстройке $\Delta f = 28$ МГц, которая соответствует области на карте динамических режимов между двумя первыми языками синхронизации. В данном случае при $k = 0$ оба генератора находятся в режиме одночастотной генерации. При введении связи оба генератора переходят в режим биений. При этом с ростом значения параметра k происходит уменьшение суммарной выходной мощности генерации. В области режима одночастотной генерации $k = 0.43-0.63$, как видно на рисунке, первый генератор возбуждает колебания второго генератора, что наблюдалось и в случае математической модели в виде дифференциальных уравнений с запаздыванием [12] в режиме широкополосной синхронизации. При дальнейшем увеличении параметра связи k происходит падение выходных мощностей обоих генераторов до нуля, что соответствует режиму гибели колебаний.

Стоит отметить, что на карте динамических режимов на рис. 6 при сильной связи имеется также небольшая область, в которой режим биений является хаотическим.

Заключение

Проведенное исследование взаимной синхронизации двух связанных с задержкой клистронов-генераторов с внешней цепью ОС выявило на плоскости параметров расстройка частот клистронных генераторов — параметр связи периодическую структуру языков синхронизации, разделенных областями биений и гибели колебаний. Различные языки соответствуют резонансам между различными собственными модами генераторов. Между языками синхронизации обнаружены области одночастотных режимов генерации, напоминающие вид „рукавов“, простирающихся от одного языка синхронизации к другому. Внутри этих областей реализуется режим „широкополосной синхронизации“, когда один генератор подавляет собственные колебания второго. Ниже области широкополосной синхронизации реализуется режим биений, а выше — режим гибели колебаний.

Если двигаться в сторону увеличения параметра связи при фиксированном значении частотной расстройки клистронных генераторов в области между языками синхронизации, проходящей через область широкополосной синхронизации, то будет наблюдаться последовательное уменьшение суммарной мощности генераторов до нуля. Если же увеличивать параметр связи в области расстроек, при которых нет гибели колебаний, суммарная выходная мощность связанных генераторов может превышать суммарную мощность изолированных генераторов. Таким образом, при соответствующем выборе

параметров в системе связанных клистронных генераторов с задержкой явление синхронизации не только обеспечивает совпадение генерируемых частот, но и дает заметное увеличение выходной мощности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 14-02-31410-мол_а).

Список литературы

- [1] Гайдук В.И., Палатов К.И., Петров Д.М. Физические основы электроники сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1971. 600 с.
- [2] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003. 496 с.
- [3] Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Рыскин Н.М., Шигаев А.М. // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 5. С. 604–610.
- [4] Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Клокотов Д.В., Рыскин Н.М. // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 7. С. 105–110.
- [5] Shigaev A.M., Dmitriev B.S., Zharkov Y.D., Ryskin N.M. // IEEE Trans. Electron Devices. 2005. Vol. 52. N 5. P. 790–797.
- [6] Рыскин Н.М., Шигаев А.М. // ЖТФ. 2006. Т. 76. № 1. С. 72–81.
- [7] Erneux T. Applied delay differential equations. NY: Springer; 2009. 199 с.
- [8] Emelianova Yu.P., Emelyanov V.V., Ryskin N.M. // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat. 2014. Vol. 19. P. 3778–3791.
- [9] Емельянов В.В., Емельянова Ю.П. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2013. Т. 21. № 3. С. 52–61.
- [10] Дмитриева Т.В., Рыскин Н.М., Титов В.Н., Шигаев А.М. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7. № 6. С. 66–82.
- [11] Титов В.Н., Волков Д.В., Яковлев А.В., Рыскин Н.М. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2010. Т. 18. № 6. С. 138–158.
- [12] Emelianova Y.P., Emelyanov V.V., Ryskin N.M. // Proceedings, 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications. St.-Petersburg, June 30–July 4, 2014. P. 45–46.
- [13] Emelyanov V.V., Girevoy R.A., Yakovlev A.V., Ryskin N.M. // IEEE Trans. Electron Devices. 2014. Vol. 61. N 6. P. 1842–1847.
- [14] Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Геншафт А.М. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16, № 2. С. 131–141.
- [15] Емельянов В.В., Яковлев А.В., Рыскин Н.М. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 7. С. 129–134.
- [16] Емельянова Ю.П., Емельянов В.В. Программа численного моделирования нелинейных нестационарных процессов в связанных многорезонаторных пролетных клистронных генераторах. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661104. 28 ноября 2013 г.
- [17] Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973. 400 с.