

УДК 533.9

ОПТИМИЗАЦИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПОЧКЕ ОДНОНАПРАВЛЕННО СВЯЗАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ВИРТУАЛЬНОМ КАТОДЕ

© Н.С. Фролов, В.В. Грубов, А.Н. Павлов,
А.Е. Храмов, С.А. Куркин, М.В. Храмова

Ключевые слова: обобщенная синхронизация; пространственно-распределенные системы; пучково-плазменные системы; виртуальный катод; виркатор.

Представлены результаты исследования и оптимизации физических процессов в системе двух однонаправленно связанных генераторов на виртуальном катоде. Рассмотрены оптимальные условия установления режима обобщенной хаотической синхронизации с использованием метода вспомогательной системы. Выявлены характерные особенности поведения границы обобщенной синхронизации для различных режимов внешнего сигнала. Показана возможность эффективной перестройки режима динамики низковольтного виркатора под воздействием внешнего сигнала.

Изучение и оптимизация физических процессов в интенсивных электронных пучках с образованием нестационарно колеблющегося минимума потенциала (виртуального катода (ВК)) в пространстве дрейфа электронного потока [1–3] является важной задачей современной радиофизики и электроники больших мощностей. Интерес к изучению генераторов на виртуальном катоде (виркаторов) [4] объясняется рядом преимуществ, которыми обладает данный класс приборов, таких как простота конструкции, высокий уровень выходной мощности, а также легкость в управлении режимами колебаний выходного сигнала [5–9].

В последнее время, с развитием теории нелинейных антенн [10] и разработкой фазированных антенных решеток на основе мощных источников электромагнитного излучения [4, 11], все больший интерес вызывает изучение и оптимизация физических процессов в цепочках (и даже сетях) связанных виркаторов. Ранее были проведены теоретические [12, 13] и экспериментальные [9, 14] работы по исследованию влияния внешнего сигнала на динамику низковольтного виркатора и возможности увеличения выходной мощности за счет внешнего воздействия. Однако открытым остается вопрос о возможности установления различных типов синхронной динамики в цепочке низковольтных генераторов на виртуальном катоде.

Настоящая работа направлена на исследование явления синхронизации в цепочке однонаправленно связанных низковольтных виркаторов с целью оптимизации параметров системы для наиболее эффективного управления колебаниями выходного сигнала.

В качестве модели цепочки однонаправленно связанных низковольтных виркаторов рассматривается система, аналогичная описанной в работе [12]. Исследуемая система представляет собой два однонаправленно связанных генератора (ведущий и ведомый

генераторы по терминологии теории синхронизации [15]). При этом выходной сигнал с ведущего генератора подается через канал связи на вход ведомого генератора – так осуществляется связь в системе. Параметр связи определяется как отношение мощности, поступающей на вход ведомого генератора, и выходной мощности ведущего генератора $\varepsilon = P_{in2} / P_{out1}$. На практике регулирование мощности осуществляется с помощью встроенного в канал связи аттенюатора. Каждый из генераторов математически описывается в рамках одномерной модели – электронного потока, пронизывающего диодный промежуток с тормозящим полем, состоящим из двух сеточных электродов. Главными управляющими параметрами в такой системе являются тормозящая разность потенциалов между сеточными электродами $\Delta\varphi$ и ток пучка a . Динамика электронного пучка описывается с помощью численной модели, основанной на методе частиц в ячейке, – электронный поток представляется как совокупность последовательно инжектируемых в пролетный промежуток крупных частиц (заряженных листов). Для каждой крупной частицы решается уравнение движения:

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = -E(x_i), \quad (1)$$

где x_i – координата i -й крупной частицы; E – поле пространственного заряда, действующее на i -ю частицу.

Диодный промежуток покрывается пространственной сеткой, в узлах которой рассчитываются распределение поля и плотность пространственного заряда:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \alpha^2 \rho(x), \quad (2)$$

$$\rho(x_j) = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^N \Theta(x_i - x_j); \tag{3}$$

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 - |x|/\Delta x, & |x| < \Delta x, \\ 0, & |x| > \Delta x. \end{cases}$$

где Θ – потенциал поля пространственного заряда; $\rho(x_i)$ – плотность пространственного заряда. Уравнения (1)–(3) записаны в безразмерных координатах (см., например, [16]).

Ведомая система отличается от ведущей наличием элемента связи, осуществляющего ввод внешнего сигнала в систему, – отрезок спиральной электродинамической системы (ОСЭС) модулирует электронный поток по скорости на входе в пространство взаимодействия на частоте внешнего воздействия (в данном случае скоростная модуляция является сильно нелинейной). Вывод мощности также осуществляется с помощью ОСЭС. Моделирование процессов в ОСЭС осуществляется с использованием метода эквивалентных схем [17].

В системе однонаправленно связанных колебательных систем установление обобщенной синхронизации подразумевает установление функционального соотношения между состояниями ведущей и ведомой систем [18], что соответствует подавлению собственной динамики ведомой системы внешним сигналом при превышении некоторого критического коэффициента связи [19]. Диагностика данного типа синхронизации осуществляется с помощью метода вспомогательной системы [20] – вводится вспомогательная система, эквивалентная ведомой системе (идентичный ведомому элементу цепочки виркатор) и так же испытывающая воздействие ведущего генератора на виртуальном катоде. В этом случае идентичность векторов состояний ведомой и вспомогательной системы после завершения переходного процесса означает установление синхронизации.

Рассмотрим результаты анализа обобщенной синхронизации в рамках численной модели системы связанных низковольтных виркаторов. Исследования проводились для случаев хаотической ($\Delta\varphi_r = 0,54$) и периодической ($\Delta\varphi_r = 0,6$) динамики ведомой системы. На рис. 1 показаны две типичные ситуации – случай асинхронной динамики (рис. 1а), когда состояния ведомой и вспомогательной системы различны, и случай обобщенной синхронизации (рис. 1б), когда после длительного переходного процесса сигналы ведомой и вспомогательной системы становятся идентичными.

На рис. 2 представлены результаты оптимизации процессов в системе двух связанных виркаторов. На нем представлена граница обобщенной синхронизации в цепочке виркаторов при изменении тормозящего потенциала $\Delta\varphi_d$ ведущего генератора. Было определено, что значение коэффициента связи, при котором устанавливается режим обобщенной синхронизации, минимально при идентичной настройке генераторов и растет при расстройке параметров электронных генераторов. Также можно заметить, что во многом граница режима синхронизации зависит от мощности выходного сигнала ведущего генератора, которая меняется при изменении управляющего параметра системы (кривая 3

на рис. 2) – резкие скачки и падения мощности сопровождаются резким изменением критического параметра связи, при котором в системе реализуется режим синхронной динамики. Однако рост граничного коэффициента связи в области $\Delta\varphi_d > 0,58$ в большей степени определяется сильной расстройкой внешнего воздействия и собственной динамикой ведомого генератора.

Проиллюстрировать перестройку режимов генерации при установлении обобщенной синхронизации можно также с помощью построения спектров выходных микроволновых сигналов взаимодействующих виркаторов. На рис. 3 представлены спектры мощности ведомого генератора в хаотическом (рис. 3, б–г) и периодическом (рис. 3, д–ж) режимах, при изменении мощности внешнего воздействия ведущего (рис. 3а) низковольтного виркатора, настроенного на работу в режиме хаотической генерации. Видно, что как в случае периодического, так и в случае хаотического сигнала ведомой системы, с ростом мощности внешнего

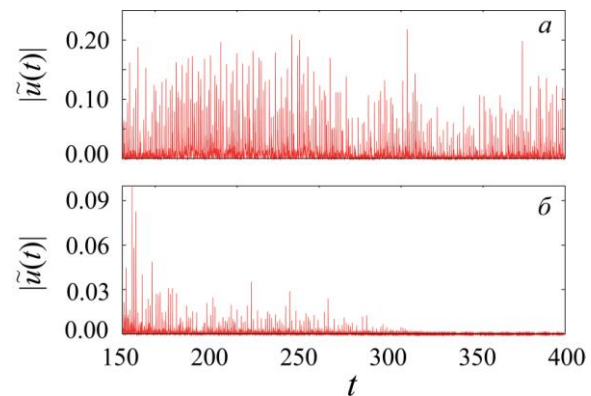


Рис. 1. Разность состояний между ведомой и вспомогательной системами в асинхронном режиме (а, $\varepsilon=0,001$) и режиме синхронизации (б, $\varepsilon=0,01$). Параметры генераторов: $\Delta\varphi_d = 0,54$; $\Delta\varphi_{r,a} = 0,53$; $\alpha_{d,r,a} = 0,9$

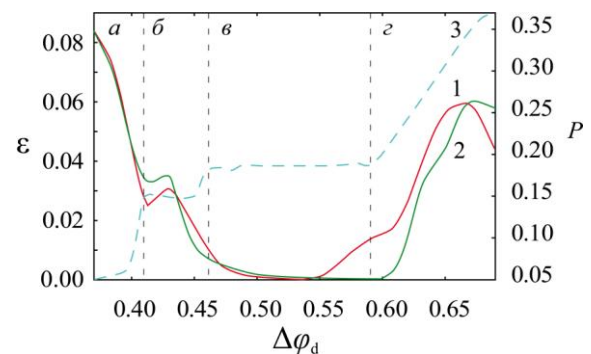


Рис. 2. Границы обобщенной синхронизации в системе двух однонаправленно связанных низковольтных виркаторов для случая хаотического ($\Delta\varphi_r = 0,54$, кривая 1) и периодического ($\Delta\varphi_r = 0,60$, кривая 2) режима ведомого генератора. Кривая 3 описывает выходную мощность ведущего генератора P_v зависимости от управляющего параметра $\Delta\varphi_d$

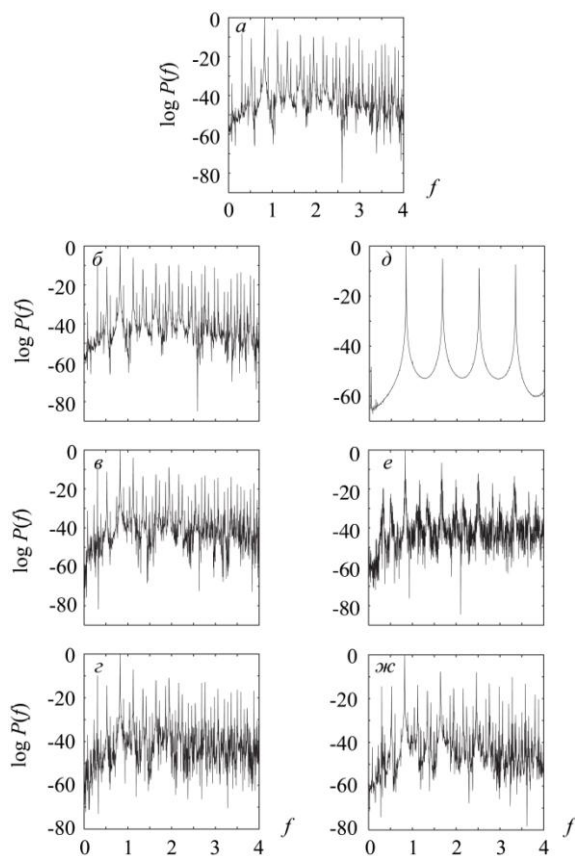


Рис. 3. Спектры мощности колебаний выходных сигналов ведущего ($\Delta\varphi_d = 0,54$, а) и ведомого низковольтного виркатора в хаотическом ($\Delta\varphi_r = 0,54$, б–г) и периодическом, д–ж) режимах генерации при изменении параметра связи ε ($\varepsilon = 0,0$ – б, д; $\varepsilon = 0,004$ – в, е; $\varepsilon = 0,025$ – г, ж)

воздействия динамика ведущего генератора доминирует над собственной динамикой ведомого виркатора – в частотном спектре появляются гармоники внешнего сигнала в случае воздействия периодическим сигналом, и увеличивается уровень шума в случае воздействия гармоническим сигналом.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в системе однонаправленно связанных низковольтных виркаторов возможно установление режима обобщенной синхронизации. Выявленные особенности динамики связанных генераторов на виртуальном катоде позволяют эффективно управлять выходными колебаниями системы, используя внешний сигнал с низким уровнем мощности, что важно для создания систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press; Taylor and Francis, 2007.
2. Granatstein V.L., Alexeff I. High Power Microwave Sources. Artech House Microwave Library, 1987.
3. Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, 2004. Т. 2.
4. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.

5. Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И., Прокопенко Ю.В., Чумаков В.И. Генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью-виртод // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 4. С. 530.
6. Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. Численное исследование характеристик генерации виркатора-клистрона с внешней запаздывающей обратной связью // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 5. С. 588-592.
7. Hramov A.E., Rempen I.S. Investigation of the complex dynamics and regime control in Pierce diode with the delay feedback // Int. J. Electronics. 2004. V. 91. № 1. P. 1-12.
8. Woo W., Benford J., Fittinghoff D. [et al.] // J. Appl. Phys. 1989. V. 65. № 2. P. 861.
9. Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е. Влияние внешнего сигнала на колебания в электронном потоке с виртуальным катодом (эксперимент и численное исследование) // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2005. Т. 69. № 12. С. 1736-1740.
10. Meadows B.K., Heath T.H., Neff J.D. [et al.] Nonlinear antenna technology // Proceedings IEEE. 2002. V. 90 (5). P. 882-897.
11. Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Царев А.В. Фазированные антенные решетки на основе виркаторов: численные эксперименты // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 8. P. 709.
12. Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е. Исследование характеристик генерации в цепочке однонаправленно связанных низковольтных виркаторов // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2011. Т. 75. № 12. С. 1694-1697.
13. Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А., Стародубов А.А. Теоретический и экспериментальный анализ мощности СВЧ-излучения генератора на виртуальном катоде под внешним гармоническим воздействием // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2012. Т. 76. № 12. С. 1485-1488.
14. Калинин Ю.А., Храмов А.Е. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния распределения электронов по скорости на хаотические колебания в электронном потоке в режиме образования виртуального катода // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 13. С. 88-94.
15. Пиковский А.С., Розенблюм М.Г., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003.
16. Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Левин Ю.И., Храмов А.Е. Исследование образования структур и хаотической динамики в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом в тормозящем электронном поле // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 1. С. 51-64.
17. Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н., Короновский А.А., Филатов Р.А. Программный пакет для исследования и оптимизации нелинейных нестационарных процессов в микроволновых генераторах с электронной обратной связью // Математическое моделирование. 2011. Т. 23. № 1. С. 3-18.
18. Rulkov N.F., Sushchik M.M., Tsimring L.S., Abarbanel H.D.I. Generalized synchronization of chaos in directionally coupled chaotic systems // Phys. Rev. E. 1995. V. 51 (2). P. 980-994.
19. Hramov A.E., Koronovskii A.A. Generalized synchronization: a modified system approach // Phys. Rev. E. 2005. V. 71 (6).
20. Abarbanel H.D.I., Rulkov N.F., Sushchik M.M. Generalized synchronization of chaos: The auxiliary system approach // Phys. Rev. E. 1996. V. 53. № 5. P. 4528-4535.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.B37.21.0903 и Фонда некоммерческих программ «Династия».

Поступила в редакцию 31 января 2013 г.

Frolov N.S., Grubov V.V., Pavlov A.N., Khrarov A.E., Kurkin S.A., Khrarova M.V. OPTIMIZATION OF PHYSICAL PROCESSES IN UNIDIRECTIONAL COUPLED GENERATORS OF CHAOTIC OSCILLATIONS ON VIRTUAL CATHODE

The optimization of physical processes in two unidirectional coupled generator systems is described. The optimum conditions for generalized synchronization (GS) regime initialization are considered. Characteristic features of GS bound behavior are revealed.

Keywords: generalized synchronization; plasma-beam systems; virtual cathode.