

09;10;12

Широкополосные генераторы хаотических колебаний на турбулентных электронных потоках с внутренней электронной обратной связью

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: StarodubovAV@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 2 февраля 2010 г.)

Исследованы генераторы широкополосных хаотических колебаний, работа которых основана на новых физических принципах, а именно на использовании интенсивных турбулентных электронных потоков. Рассмотрены различные принципиальные схемы создания турбулентных электронных потоков. Проведено экспериментальное исследование структуры турбулентного электронного потока. Проиллюстрированы результаты экспериментального исследования колебаний, генерируемых разработанными широкополосными микроволновыми источниками. С использованием обобщения полученных аналитических, численных и экспериментальных результатов разработана методика создания широкополосных генераторов хаоса на основе промышленно выпускаемых ламп бегущей волны.

Введение

Известно, что в электронной оптике [1,2] существует понятие „ламинарных“ электронных потоков. При ламинарном движении электронов в одной и той же точке пространства все частицы движутся с одинаковой скоростью. Существует также такое понятие, как „квазиламинарность“ электронного потока. Это означает, что электронный поток получен в результате наложения конечного числа ламинарных потоков. Кроме того, есть „регулярные“ потоки, т.е. такие, в которых все частицы обладают одинаковой полной энергией.

Очевидно, что понятия о ламинарных, квазиламинарных и регулярных электронных потоках являются определенным приближением. Реальные электронные потоки в большей или меньшей степени неламинарны (турбулентны). Для таких потоков характерно пересечение электронных траекторий, причем в точке пересечения в таком потоке скорости электронов неодинаковые. Другими словами, имеет место распределение электронов по скоростям.

Турбулентные электронные потоки

При турбулентном движении [3] электроны совершают неустановившиеся беспорядочные движения по сложным траекториям, при этом скорость и плотность в каждой точке интенсивного пучка хаотически изменяются (рис. 1). В отличие от ламинарного движения при турбулентном происходит интенсивное перемешивание слоев электронного потока. Турбулентное движение возникает в результате потери устойчивости ламинарного движения, при этом в таких потоках образуются многочисленные вихри различных размеров, вследствие чего характеристики (плотность и

скорость) испытывают хаотические флуктуации, изменяющиеся во времени и в пространстве. В пучках заряженных частиц турбулентность осложняется специфическим характером взаимодействия частиц, связанного с дальнедействующими кулоновскими связями. Турбулентность в этом случае представляет сложное движение заряженных частиц и электромагнитного по-

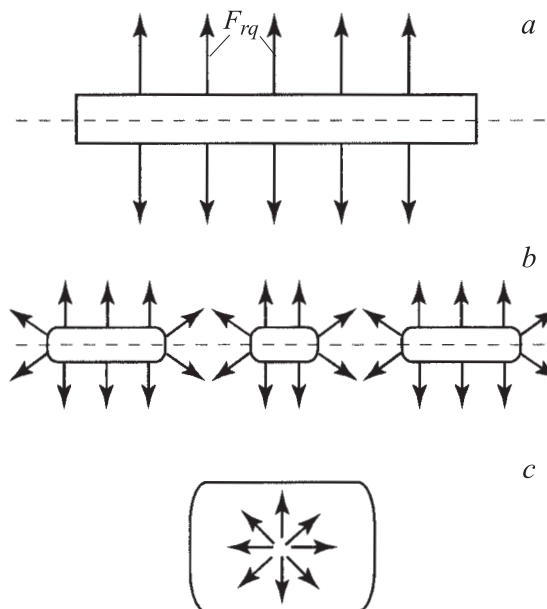


Рис. 1. Ламинарный и турбулентный интенсивный электронный пучок. *a* — ламинарный пучок (F_{rq} — радиальная сила пространственного заряда); *b* — турбулентный (сгруппированный) электронный пучок, имеются и радиальная и продольная силы пространственного заряда F_q , расширяющие сгусток во всех направлениях; *c* — направления скоростей электронов внутри сгустка.

ля и, таким образом, служит проявлением коллективной природы взаимодействия заряженных частиц между собой.

Электронный поток, состоящий по длине из отдельных сгустков (групп электронов), можно рассматривать как ток, содержащий высшие гармонические составляющие. Такой поток называется сгруппированным или промодулированным. Сгруппированный электронный поток при определенных условиях может излучать электромагнитные колебания с частотами, равными частотам гармоник тока.

В электронном сгустке как в части пространства, где имеется электрический заряд, создается собственное потенциальное поле — кулоновское поле пространственного заряда. Это поле может быть разложено на продольную компоненту и поперечную компоненту. Силы продольной компоненты влияют на группировку электронов, увеличивая протяженность электронного сгустка. Силы поперечной компоненты поля стремятся расширить пучок в поперечном направлении. В процессе торможения мощность таких интенсивных неламинарных электронных потоков может быть превращена в радиоизлучение.

Формирование неламинарных электронных потоков может быть проведено с использованием

— электрических полей и полей пространственного заряда,

— магнитных полей и полей пространственного заряда,

— комбинированных электростатических, магнитных полей и полей пространственного заряда.

Заметим, что внутренняя электронная обратная связь осуществляется путем выхода электронов из сгустков пространственного заряда, что приводит к пространственно-временным колебаниям сгустков.

Схемы генераторов на основе использования турбулентных электронных пучков

На рис. 2, 3 представлены эскизы устройств — генераторов хаотических колебаний, основанных на использовании турбулентных потоков. Формирование турбулентного электронного потока неоднородным электростатическим полем происходит в схеме, представленной на рис. 2, путем изменения потенциала диафрагм.

На рис. 3 представлена схема формирования турбулентного электромагнитного потока неоднородным магнитным полем. При этом увеличивается либо амплитуда, либо период магнитного поля. Это приводит к увеличению параметра магнитной фокусировки α , который

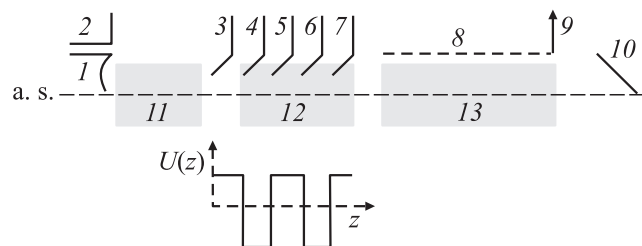


Рис. 2. Принципиальная схема сверхширокополосного генератора хаоса с формированием турбулентных электронных потоков за счет электростатических полей и полей пространственного заряда: а. с. — ось симметрии, 1 — катод, 2 — фокусирующий электрод, 3 — анод, 4–7 — электроды электростатической фокусировки, 8 — съемник СВЧ-энергии, 9 — вывод СВЧ-энергии, 10 — коллектор-отражатель, 11 — область формирования ламинарного электронного потока, 12 — область модуляции электронного потока (формирование сгустков пространственного заряда), 13 — область усиления хаотических ВЧ- и СВЧ-колебаний.

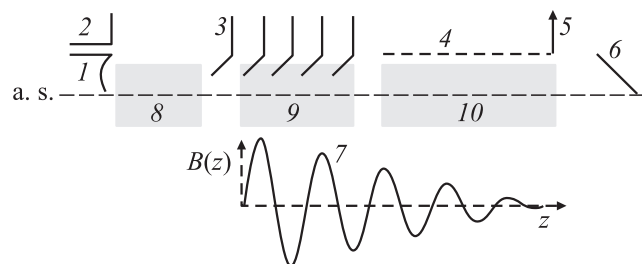


Рис. 3. Принципиальная схема сверхширокополосного генератора хаоса с формированием турбулентных электронных потоков за счет магнитных полей и полей пространственного заряда: 1 — катод, 2 — фокусирующий электрод, 3 — анод, 4 — съемник СВЧ-энергии, 5 — вывод СВЧ-энергии, 6 — коллектор-отражатель, 7 — возможные типы переменного магнитного поля, 8 — область формирования ламинарного электронного потока, 9 — область модуляции электронного потока (формирование сгустков пространственного заряда), 10 — область усиления хаотических ВЧ- и СВЧ-колебаний.

имеет следующий вид:

$$\alpha = 2 \cdot 10^8 \frac{B_0^2 L^2}{U},$$

где B_0 — амплитуда магнитного поля, L — период магнитного поля, U — ускоряющее напряжение. Параметр магнитной фокусировки увеличивается до значений 3–5, что приводит к неустойчивости такого потока [4–6]. Отметим, что потенциал съемника энергии при этом может уменьшаться по сравнению с величиной ускоряющего напряжения.

На рис. 4 показаны результаты расчета электронных траекторий и распределение плотности пространственного заряда в турбулентном электронном потоке. Из рисунка видно, что в интенсивных турбулентных электронных потоках возникают уплотнения (сгустки)

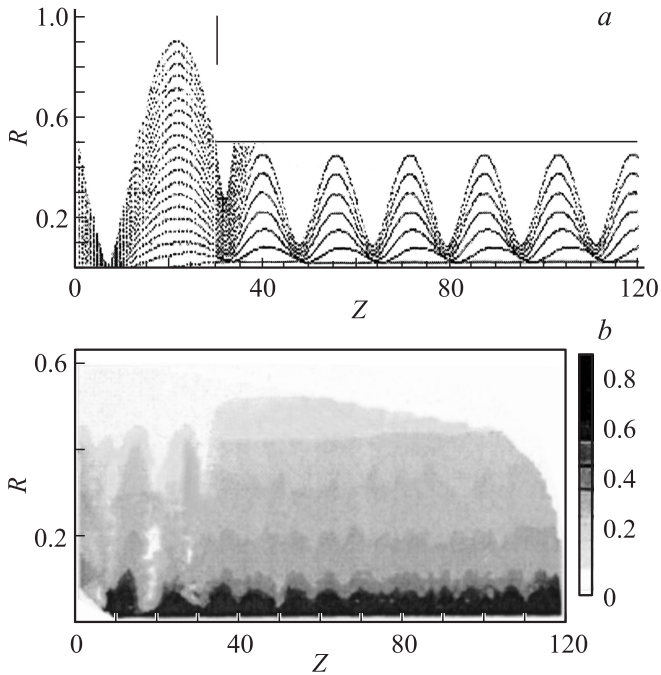


Рис. 4. Результаты расчета электронных траекторий (*a*) и распределения плотности пространственного заряда в турбулентном электронном потоке (*b*).

пространственного заряда. Возникновение сгустков пространственного заряда может быть обусловлено как увеличением плотности тока, так и увеличением продольной скорости электронов. Последнее связано либо с торможением электронов, либо с увеличением поперечной или азимутальной составляющих скоростей электронов.

Экспериментальное исследование структуры интенсивного неламинарного электронного потока

Для исследования огибающей электронного пучка вдоль оси Z , распределения плотности тока по поперечному сечению, а также распределения электронов по продольным скоростям в канал пространства дрейфа помещался подвижный зонд с диафрагмой с диаметром отверстия $50 \mu\text{m}$ [7].

Зондовое устройство имело коллектор, выполненный в виде цилиндра Фарадея, на который подавался задерживающий потенциал [7]. Ламинарный электронный поток, сформированный пушкой, попадал в нарастающее магнитное поле в плоскости Z_0 . Магнитное поле сжимает электронный поток в плоскости Z_1 . Изменение поперечного момента количества движения электронов в неоднородном магнитном поле может привести к разбросу электронов по скоростям. Согласно теореме Буша, угловой момент количества движения электронов в нарастающем магнитном поле пропорционален разности

магнитных потоков магнитной индукции через рассматриваемые поперечные сечения. В результате азимутальная и поперечная скорость электронов увеличивается, а продольная уменьшается. При этом приосевые электроны изменяют свою продольную скорость незначительно, а периферийные электроны, имеющие уже в начале меньшую продольную скорость, еще больше замедляются, что и приводит к увеличению разброса скоростей электронов в поперечном сечении (рис. 5–7).

Происходит смещение пульсаций в различных слоях, и огибающая пучка утрачивает пульсирующий характер

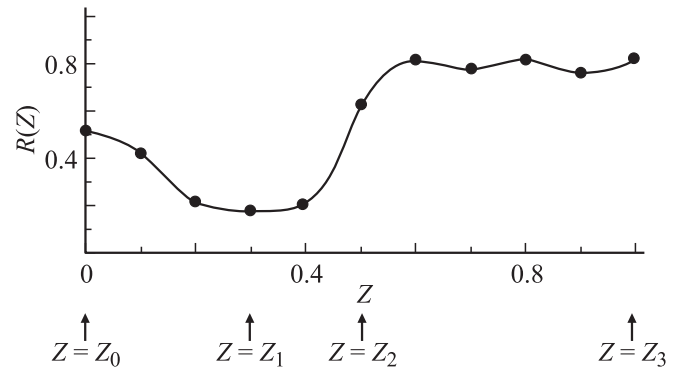


Рис. 5. Структура неламинарных электронных пучков. *a* — профиль электронного потока в безразмерных координатах (z, R) , *b* — вид пространственного распределения магнитного поля в безразмерных переменных (z, B) .

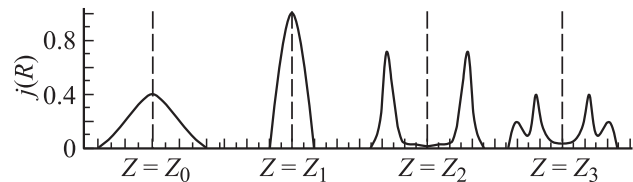


Рис. 6. Распределение плотности тока в различных сечениях пучка.

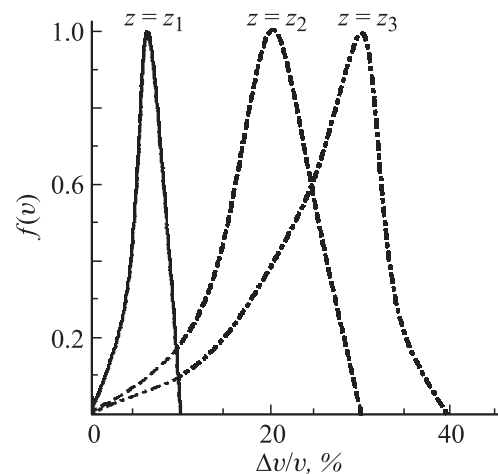


Рис. 7. Спектры скоростей в области сгустков пространственного заряда.

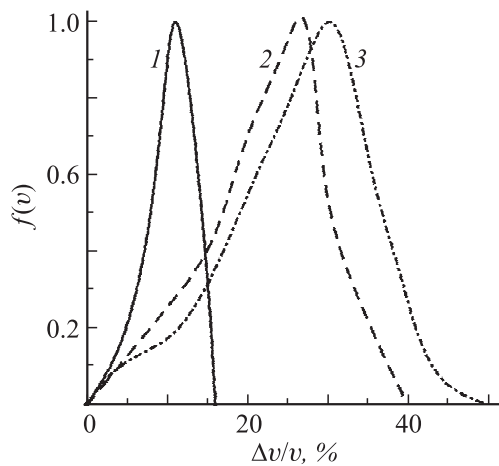


Рис. 8. Спектры скоростей: 1 — в плоскости z_0 , 2 — в плоскости z_1 , 3 — в плоскости z_3 .

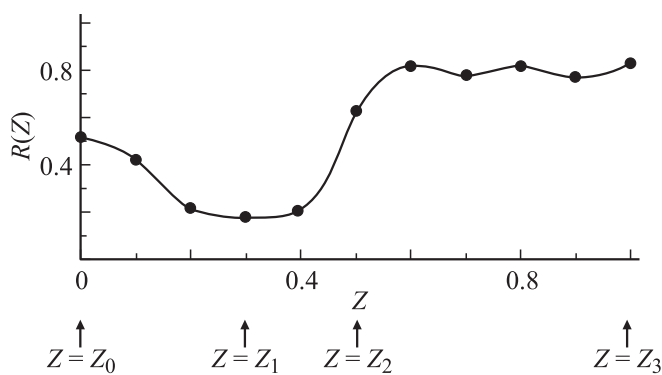


Рис. 9. Огибающая конура электронного пучка при начальном (плоскость $z = z_0$) разделении электронов по скоростям.

с четко выраженными максимумами. Таким образом, наблюдается перемешивание слоев с переходом в неламинарность.

Картина еще более усложняется (см. рис. 8, 9) в случае, когда на входе Z_0 поступает пучок с большим разбросом электронов по продольным скоростям ($\frac{\Delta v}{v} = 0.1-0.15$). Начальный разброс электронов по скоростям обусловлен нагревом катода (режим температурного ограничения тока), а также вызван действием неоднородного поля в ячейках управляющей сетки. При этом магнитное поле не так сильно сжимает пучок, и он становится раньше неламинарным со слабо пульсирующей границей.

Результаты экспериментального исследования хаотических СВЧ-колебаний

На рис. 10 приведены зависимости выходной интегральной мощности и полосы частот генерации от параметра фокусировки α , на рис. 11 приведены спектры хао-

тических колебаний для двух параметров α . Параметр α изменялся путем изменения амплитуды магнитного поля. Видно, что при увеличении параметра α возрастает мощность и увеличивается полоса генерируемых частот (это зависит от количества самостоятельных сгустков, которые колеблются с разными частотами и фазами).

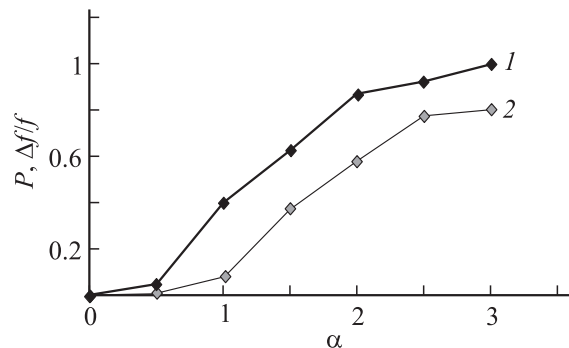


Рис. 10. Изменение выходной мощности (1) и полосы генерации (2) виратора от параметра магнитного поля α .

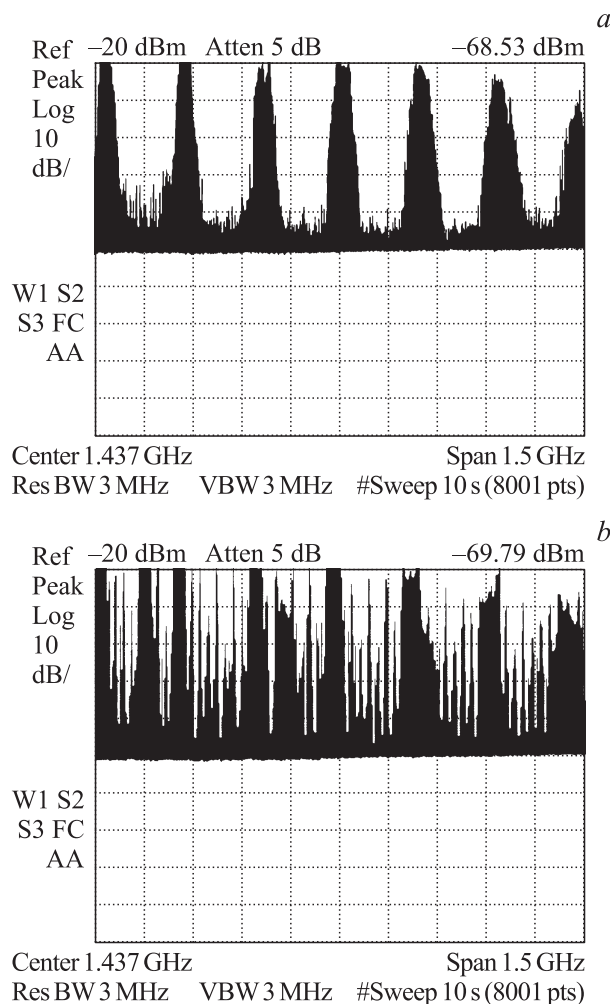


Рис. 11. Спектры хаотических СВЧ-колебаний при различных значениях параметра α : a — $\alpha = 1$, b — 3.

Технические характеристики широкополосного генератора хаоса на основе промышленной ЛБВ и ЛБВ — усилителя моно сигнала

Тип прибора	Напряжение U, V	Ток пучка I, mA	Выходная мощность P, W	Частота средняя f, GHz	Полоса частот $\Delta f/f$	Токопрохождение $k, \%$	КПД, электронное $\eta_e, \%$	КПД, техническое $\eta_t, \%$
ЛБВ как усилитель моно сигнала	4.3	240	270	1.5	0	96	26.1	34
ЛБВ как генератор хаоса	4.3	240	112*	1.5	1.3	78	10.8	13.2

Пространственно-временные колебания сгустков пространственного заряда в переходной области магнитного поля являются источниками высокочастотных и сверхвысокочастотных колебаний, которые могут быть усилены секцией усиления, как показано на рис. 12.

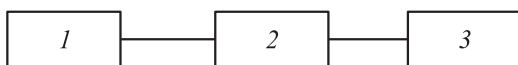


Рис. 12. Принципиальная схема усиления колебаний сгустков пространственного заряда: 1 — электронная пушка, 2 — переходная область магнитного поля (модулятор электронного потока), 3 — секция усиления.

Отличительной особенностью этого метода является то, что возможно превращение промышленно выпускаемых приборов (например, ламп бегущей волны, ЛБВ) путем изменения переходной области периодического магнитного поля в генератор хаотических колебаний.

В таблице приведены параметры ЛБВ, работающей в режиме усиления моно сигнала и генерирования широкополосного хаотического сигнала.

Видно, что в этих устройствах достигаются существенно большие интегральные мощности генерируемых микроволновых сигналов и КПД, чем в низковольтных виркаторах с тормозящим полем [8]. Это связано с дополнительным усилением сгустков пространственного заряда электродинамической системой ЛБВ.

Выводы

Таким образом, в данной работе проведено исследование генераторов широкополосных хаотических колебаний, работа которых основана на новых физических принципах — использовании интенсивных турбулентных электронных потоков. Проведенные предварительные численные расчеты и детальные экспериментальные исследования подтверждают наличие сгустков пространственного заряда в электронном пучке, фокусируемом периодическим магнитным полем. Поскольку области уплотнения пространственного заряда непостоянным как в пространстве, так и во времени, то в данной системе возникают СВЧ-колебания шумоподобного характера. Необходимо заметить, что однозначного ответа,

эффективно ли управлять поведением пучка за счет изменения амплитуды для периода поля, дать нельзя. В данном случае необходимо учитывать оба параметра и подбирать их оптимальную комбинацию.

Проведенные исследования позволили разработать методику создания генераторов шумоподобных СВЧ-колебаний на базе промышленных ЛБВ. С этой целью производится трансформация начала МПФС (магнитной периодической фокусирующей системы) в плане увеличения амплитуды и периода магнитного поля. Отметим, что практически такой генератор реализуется на обычных промышленных ЛБВ за счет изменения МПФС. Этот факт является существенным преимуществом данной конструкции. Однако такая конструкция имеет и недостаток, связанный с тем, что увеличивать амплитуду период магнитного поля можно лишь до определенных значений.

В качестве областей применения вышеописанного генератора сверхширокополосных хаотических сигналов на основе промышленной ЛБВ могут быть информационно-телекоммуникационные системы (методы передачи информации, основанные на использовании свойств динамического хаоса [9]), системы радиопротиводействия и радиоподавления, системы шумовой радиолокации [10]. Также подобные сигналы могут быть использованы в промышленности, в различных технологических процессах [11], в частности, в технологических процессах по обработке нефти и нефтепродуктов [12] (обезвоживание, уменьшение вязкости). Решение задачи по уменьшению вязкости высоковязких сортов нефти будет способствовать значительному энергосбережению при ее транспортировке до нефтеперерабатывающих заводов.

Работа выполнена при поддержке Аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы“ (проект РНП 2.1.1/235), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-02-00256-а), а также Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы.

Список литературы

- [1] Алямовский И.В. Интенсивные электронные потоки, М., 1991.
- [2] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.

- [3] Ланда П.С., Трубецков Д.И., Гусев В.А. // УФН. 2009. Т. 179. № 3. С. 255–277.
- [4] Афанасьев В.И., Лукин К.А., Ракитянский В.А. // Радиофизика и электроника. 1997. Т. 2. № 1. С.115–118.
- [5] Калинин Ю.А., Лазерсон А.Г., Чемичев Г.В. // Изв. вузов. ПНД. 1994. Т. 3. № 4. С. 32–39.
- [6] Пащенко А.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 24. С. 83–89.
- [7] Калинин Ю.А., Есин А.Д. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ-электронике. Саратов: Изд-во СГУ, 1991.
- [8] Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. М.: Физматлит, 2009.
- [9] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [10] Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
- [11] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, 2003.
- [12] Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Березин С.В. / Наука и технологии в промышленности. 2009. № 3. С. 45–48.