



ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИРТОДА С ТОРОИДАЛЬНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ*

*С. А. Куркин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, Е. Н. Егоров,
А. Е. Филатова, И. И. Магда, О. Г. Мележик*

В работе рассмотрены результаты предварительного трехмерного полностью электромагнитного моделирования СВЧ-генератора на виртуальном катоде с цепью внешней обратной связи – виртода. Обратная связь реализована за счет скоростной модуляции электронного потока электромагнитным сигналом в ускоряющем промежутке электронной пушки, снимаемым с помощью выходного резонатора, размещенного в области виртуального катода. Показано, что существует возможность повышения мощности и регулярности колебаний за счет настройки резонаторов цепи обратной связи, а также возможность генерации на высших гармониках осциллирующий виртуального катода в рассматриваемой системе, что в перспективе может быть использовано для увеличения частоты генерации виркатора путем создания виртода-умножителя частоты с резонаторами, настроенными на высшие гармоники частоты колебаний виртуального катода.

Ключевые слова: Виртод, СВЧ-генератор, обратная связь, виртуальный катод, нелинейная динамика, СВЧ-электроника, виркатор, широкополосная генерация, численное моделирование.

Введение

Одними из перспективных современных источников мощного СВЧ-излучения являются генераторы на виртуальном катоде или виркаторы [1–3], которые были предложены в конце 1970-х годов [4–6]. Принцип работы виркаторов основан на формировании в электронном потоке с током, превышающим предельный вакуумный (критический) ток виртуального катода (ВК), отражающего часть электронов обратно к плоскости инъекции. В электронном потоке ВК демонстрирует нестационарную динамику [3], которая в зависимости от параметров системы может быть как близкой к периодической, так и хаотической [7, 8]. Нестационарное поведение ВК

*Статья написана по материалам доклада на XV Зимней школе по электронике сверхвысоких частот и радиофизике, Саратов, Россия, 6–11 февраля 2012.

позволяет использовать его для генерации СВЧ-сигналов различного уровня мощности и спектрального состава, в частности, для генерации импульсов сверхмощного микроволнового излучения [9] и для получения широкополосных шумоподобных сигналов [10]. Среди достоинств генераторов на ВК можно выделить высокий уровень мощности генерации СВЧ-излучения, простоту конструкции, возможность работы без внешних фокусирующих магнитных полей, высокую чувствительность виркаторной системы к изменениям её различных параметров. Последнее позволяет разрабатывать эффективные и технически несложные методы перестройки частоты, мощности и режима генерации (это отражается на спектральном составе выходного излучения) виркаторов [9–15].

Важными задачами в рамках дальнейших исследований генераторов на ВК является изучение эффективных методов управления выходными характеристиками виркаторов, а также улучшение параметров генерации подобных систем, в частности, увеличение выходной мощности и КПД. Решение таких задач имеет большее практическое значение для создания компактных источников мощного СВЧ-излучения с управляемыми характеристиками. Это позволит использовать подобные устройства в системах радиолокации и радиопротиводействия, нелинейных антеннах, в системах промышленного применения, при решении задач, посвященных исследованию электромагнитной совместимости, и в других областях науки и техники.

Один из способов управления виркаторной системой, активно исследуемый в последнее время, основывается на изменении величины внешнего однородного магнитного поля в системе или введении неоднородности магнитного поля в области ВК. Это позволяет, в определенной степени, управлять как спектральными характеристиками, так и мощностью выходного излучения виркатора [16–20]. Однако такой способ управления является достаточно сложным, так как требует использование в виркаторах внешних перестраиваемых магнитных систем.

Другим подходом к оптимизации характеристик излучения генератора на ВК является использование резонансных электродинамических систем, размещаемых как в области формирования ВК [21], так и в области формирования пучка [12]. Такой подход позволяет обеспечить генерацию близкого к одночастотному излучения с высоким КПД, но не позволяет перестраивать режимы и изменять характеристики генерации виркатора.

Наиболее перспективным методом управления виркаторной системой является использование различных типов внешней или внутренней обратной связи (ОС). Управляемый генератор на ВК с петлей запаздывающей обратной связи, получивший название «виртод», был подробно экспериментально исследован в работе [11] отдельно для случаев использования внешней и внутренней обратной связи. Позже был выполнен как аналитический [22], так и численный анализ простой одномерной модели виртода с цепью внешней запаздывающей обратной связи [8]. В работе [11] было показано, что введение внешней обратной связи в виркаторную систему может быть использовано для эффективного управления характеристиками её генерации, в частности, оптимальная настройка цепи внешней обратной связи позволяет существенно увеличить выходную мощность. Схемы с внутренней обратной связью (например, схема «виртод–ЛОВ» [11], где внутренняя обратная связь реализуется за счет воздействия на ВК поля обратной электромагнитной волны) представляются более сложными и менее эффективными схемами для управления излучением виркаторной системы за счет менее гибкой настройки цепи обратной связи.

В данной работе проводится трехмерное полностью электромагнитное численное моделирование модификации предложенного в работе [11] генератора с обратной связью (виртода). Рассматривается схема виртода с тороидальными входным (располагаемым в области формирования пучка) и выходным (в области формирования ВК) резонаторами и с петлей внешней электромагнитной ОС, которая соединяет резонаторы. Исследование такой схемы виртода позволяет провести численный анализ возможности оптимизации характеристик генерации прибора с помощью введения и настройки дополнительных резонансных систем тороидального типа, использование которых способствует более высокому уровню возбуждаемых и излучаемых полей [23] по сравнению со случаем прямоугольных резонаторов.

1. Исследуемая модель

На рис. 1 показана исследуемая схема виртода с внешними резонансными системами. Генератор состоит из катода электронной пушки 1, эмиттирующего электроны, которые ускоряются в промежутке, ограниченном с одной стороны катодом 1, а с другой – анодной сеткой 2, на которую подается ускоряющий потенциал $V_0 = 2$ кВ. Электроны в таком поле разгоняются до скорости v_0 , при которой $\beta = v_0/c \approx 0.088$. После ускоряющего промежутка сплошной цилиндрический электронный пучок попадает в камеру дрейфа 3. Вдоль оси системы соленоидом 4 создается продольное однородное магнитное поле с индукцией $B_0 = 0.5$ Тл, ограничивающее динамику пучка в радиальном направлении. Катод электронной пушки неэкранирован от внешнего магнитного поля, то есть магнитное поле в области катода совпадает с магнитным полем в пространстве взаимодействия, за счет чего электронный поток (ЭП) не приобретает дополнительных азимутальных компонент скорости, определяемых теоремой Буша [24]. Ток пучка $I_0 = 12$ А фиксирован и задается из

условия формирования в пучке ВК, то есть ток превышает предельный вакуумный ток для выбранной цилиндрической геометрии пространства взаимодействия 3. К системе подключены два тороидальных резонатора 6 и 7, которые настроены на частоту свободных колебаний ВК в системе без внешних резонаторов и связаны между собой петлей внешней обратной связи 8. Геометрические параметры исследуемой схемы виртода с обратной связью следующие: расстояние между катодом и анодной сеткой 1.5 мм, между анодной сеткой и коллектором 12.5 мм, радиус камеры дрейфа 10.0 мм.

Принцип работы цепи ОС следующий. Выходной резонатор 7 располагается в области ВК и эффективно возбуждается формирующимся в системе

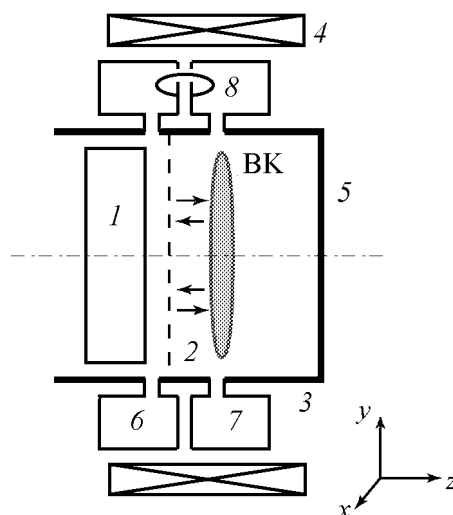


Рис. 1. Обобщенная схема исследуемого виртода. Здесь 1 – катод электронной пушки, 2 – анодная сетка, 3 – цилиндрическая камера дрейфа, 4 – широкополосный вывод мощности, 5 – коллектор, 6 и 7 – входной (R_1) и выходной (R_2) резонатор, соответственно, 8 – петля внешней ОС

нестационарным ВК. Сигнал из выходного резонатора через петлю внешней ОС возбуждает входной резонатор b , расположение которого в области ускорения позволяет осуществить эффективную модуляцию инжектируемого потока на частоте колебаний ВК. Таким образом, в исследуемой схеме виртода реализуется дополнительная внешняя ОС: ВК, возбуждая резонансные системы, воздействует с некоторой временной задержкой, определяемой частотами и добротностями резонаторов, а также линией связи между резонаторами, на инжектируемый ЭП, который, в свою очередь, участвует в формировании ВК.

В работе используется нестационарная трехмерная полностью электромагнитная модель динамики электронного потока в пространстве взаимодействия, которая основана на решении самосогласованной системы уравнений Максвелла для нахождения электромагнитного поля в системе и уравнений движения крупных заряженных частиц, описывающих электронный пучок [25–27]. Отметим, что в настоящее время подобные модели становятся стандартными для анализа физических процессов в различных электронных приборах вакуумной и плазменной электроники больших мощностей [28]. Уравнения математической модели записываются в следующем виде:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad \operatorname{div} \mathbf{H} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{p}_i}{dt} = \mathbf{E}_i + [\mathbf{p}_i, \mathbf{B}_i], \quad \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} = \mathbf{p}_i, \quad i = 1 \dots N \quad (3)$$

с соответствующими заданными начальными и граничными условиями. Здесь \mathbf{E} и \mathbf{H} – напряженности электрического и магнитного полей; ρ и \mathbf{j} – плотности заряда и тока; \mathbf{r} , \mathbf{p} – радиус-вектор и импульс крупных частиц; индекс i относится к i -й крупной частице; N – число частиц, используемых в численном моделировании.

Схема численного моделирования базируется на трехмерной модификации разработанной ранее в наших работах 2.5-мерной схемы [29] и основана на интегрировании уравнений (1)–(3) с граничными условиями, соответствующими идеально проводящим стенкам пространства взаимодействия. Решение уравнений Максвелла в цилиндрической системе координат осуществляется стандартным образом на сдвинутых относительно друг друга пространственно-временных сетках с постоянными шагами по времени Δt и, соответственно, по продольной, радиальной и угловой координатам Δz , Δr , $\Delta\theta$, на каждой из которых определяется одна из полевых компонент (подробнее см. [25, 26, 28, 30]).

Для решения уравнений движения крупных частиц (3) применяется алгоритм Бóриса в цилиндрической системе координат [31]. При этом рассчитываются три компоненты скорости \mathbf{v} заряженной частицы – продольная v_z , радиальная v_r и азимутальная v_θ составляющие. Плотность пространственного заряда $\rho(\mathbf{r}, t)$ и плотность тока $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$ электронного потока восстанавливаются с помощью стандартной процедуры линейного взвешивания частиц на сетке (СIC-метод) в цилиндрической системе координат в трех пространственных измерениях [26].

2. СВЧ-генерация в исследуемом виркаторе в отсутствие резонаторов

Рассмотрим вначале динамику электронного потока с ВК в рассматриваемой схеме виркатора без подключения резонансных систем, реализующих вместе с петлей обратной связи цепь внешней ОС. С ростом тока пучка при превышении критического значения в пространстве взаимодействия формируется нестационарный ВК, в области которого пучок тормозится, что приводит к образованию плотного электронного сгустка электронов в области ВК. ВК совершает колебания как во времени, так и пространстве, отражая часть электронного потока обратно к плоскости инжекции, что приводит к формированию двухпоточкового состояния пучка в промежутке «катод–ВК». Колебания ВК приводят к генерации мощного электромагнитного излучения в подобной системе.

На рис. 2, *a* приведена типичная временная реализация колебаний продольной компоненты электрического поля в области ВК в исследуемом генераторе широкополосных СВЧ-сигналов с отключенной цепью внешней ОС. Типичным является наличие на временной реализации сбоев фазы (отмечены на рис. 2, *a*). Интервал времени между соседними сбоями фазы составляет приблизительно 1.3 нс, что соответствует двойному времени пролета электронов в области «катод–ВК». Это позволяет связывать сбои фазы с отражениями электронных сгустков от ВК за счет изменения положения ВК при разных плотностях тока инжекции.

Действительно, это предположение подтверждается при анализе рис. 2, *б*, на котором изображена временная реализация отраженного от ВК тока $I_{\text{кат}}$, регистрируемого на катоде. Пикам на данном рисунке соответствуют моменты времени, когда отраженные из области ВК заряженные частицы (плотный электронный сгусток) возвращаются в область формирования пучка и частично осаждаются на катод. Из сравнения рис. 2, *a* и рис. 2, *б* следует, что сбои фазы колебаний электрического поля в исследуемом виркаторе наступают с небольшой задержкой (порядка 0.2...0.3 нс) после момента возвращения к плоскости катода отраженных от ВК плотных электронных сгустков, которым на рис. 2, *б* соответствуют пики с наибольшей амплитудой (характерные моменты сбоев фазы обозначены на рис. 2, *б* стрелками). Таким

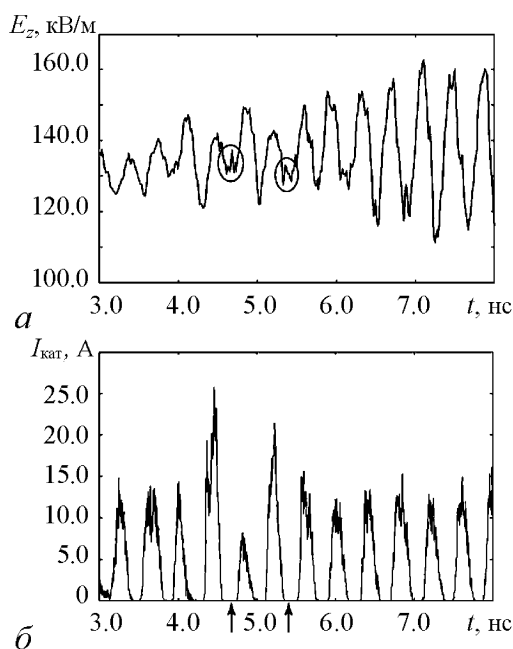


Рис. 2. *a* – характерная временная реализация колебаний продольной компоненты электрического поля в области ВК в исследуемом компактном виркаторе без внешней ОС. Отмечены моменты времени сбоя фазы колебаний электрического поля виркатора. *б* – временная реализация отраженного от ВК тока $I_{\text{кат}}$, регистрируемого на катоде. Стрелками обозначены моменты времени, соответствующие характерным сбоям фазы колебаний электрического поля виркатора без ОС, которые отмечены на рис. *a*

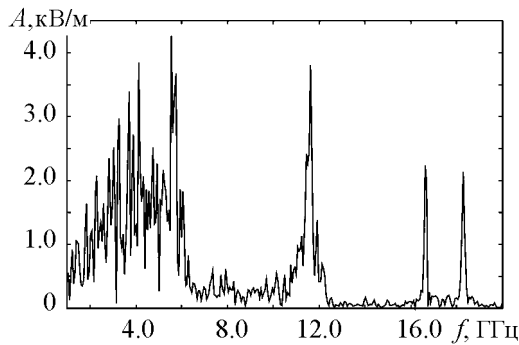


Рис. 3. Характерный спектр колебаний продольной компоненты электрического поля в области ВК в исследуемом компактном виркаторе без внешней ОС. Спектр построен по временному ряду длительностью 80 нс

Обнаруженные сбои фазы колебаний поля приводят к снижению мощности и КПД генератора на ВК и одновременно являются признаками развития хаотической генерации в системе. Это иллюстрирует рис. 3, на котором показан спектр колебаний продольной компоненты электрического поля в области ВК. Богатый набор спектральных компонент и развитый шумовой пьедестал в характерном частотном диапазоне 2...6 ГГц обусловлен нерегулярными осцилляциями сгустка электронов в области ВК. Характерный частотный диапазон спектра колебаний ВК определяется, в первую очередь, удвоенной редуцированной плазменной частотой инжектируемого электронного потока [32, 33]; последняя при заданных параметрах генератора $f_p^r \approx 3.0$ ГГц (коэффициент редукиции в рассматриваемом случае $k_r \approx 2$ [34]). В связи с хаотическим характером динамики ВК в системе, в сплошном спектре колебаний системы появляются спектральные компоненты как выше, так и (в основном) ниже удвоенной редуцированной плазменной частоты, составляющие развитый шумовой пьедестал.

Одновременно, как видно из рис. 3, в амплитудном спектре колебаний поля прослеживаются хорошо выраженные гармоники на частотах порядка 11.5 ГГц, 16.5 ГГц и 18.5 ГГц. Как показал детальный анализ электродинамики пространства взаимодействия, причиной появления этих частот в спектре колебаний является возбуждение виртуальным катодом собственных мод резонатора, образованного стенками камеры дрейфа 3. Частоты возбуждаемых резонансных мод хорошо соответствуют данным ВЧ-гармоникам. Необходимо отметить, что для решения задачи увеличения рабочей частоты генератора на ВК геометрия камеры дрейфа была выбрана таким образом, чтобы в ней возбуждались моды с частотами, приблизительно равными удвоенной и утроенной частоте колебаний ВК; данным модам соответствуют спектральные гармоники на частотах 11.5 ГГц и 18.5 ГГц (частота колебаний ВК составляет $2f_p^r = 6$ ГГц).

Таким образом, из анализа рис. 3 следует, что спектр генерации данной конструкции виркатора в режиме без включения резонаторов и внешней ОС содержит два характерных диапазона. Первый, соответствующий диапазону частот 2...6 ГГц, определяется удвоенной редуцированной плазменной частотой пучка и обусловлен сложными нерегулярными колебаниями ВК. Благодаря наличию данной особенности предложенная модификация генератора на ВК может быть использована в качестве

образом, становится очевидным, что отраженные от ВК сгустки, двигаясь обратно к катоду, воздействуют на вновь инжектируемые в систему электроны в области формирования пучка, приводя к возмущению их динамики. Следствием этого является то, что через некоторое время колебания ВК, в область которого войдут данные «возмущенные» электроны, демонстрируют сбой фазы, связанные с возмущением плотности пространственного заряда ВК, а также его положения в пространстве.

источника широкополосного хаотического СВЧ-сигнала с широкой полосой и высокой мощностью излучения в диапазоне 2...6 ГГц. Заметим, что среднюю частоту диапазона, в котором наблюдается генерация широкополосного СВЧ-сигнала возможно повысить путем увеличения плазменной частоты электронного потока за счет увеличения плотности заряда пучка. Вторым характерный диапазон, соответствующий частотам $f > 11$ ГГц, определяется эффективным возбуждением мод резонатора, образуемого камерой дрейфа пучка, на частотах, близких к удвоенной и утроенной частоте собственных осцилляций ВК.

Остановимся на физических процессах формирования ВК в исследуемом виркаторе.

Картину формирования ВК в системе, а также его расположение в пространстве взаимодействия хорошо иллюстрирует рис. 4, на котором представлено распределение продольной компоненты напряженности электрического поля в генераторе на плоскости (z, y) при $x = 0$. Область минимальных значений величины E_z -компоненты напряженности электрического поля в системе (отмечена символом G на рис. 4) соответствует области электронной пушки виркатора, в которой создается ускоряющее электроны распределение потенциала и, следовательно, E_z принимает минимальное отрицательное значение. Максимальные значения величина E_z принимает в области системы, отмеченной символом V на рис. 4, которая располага-

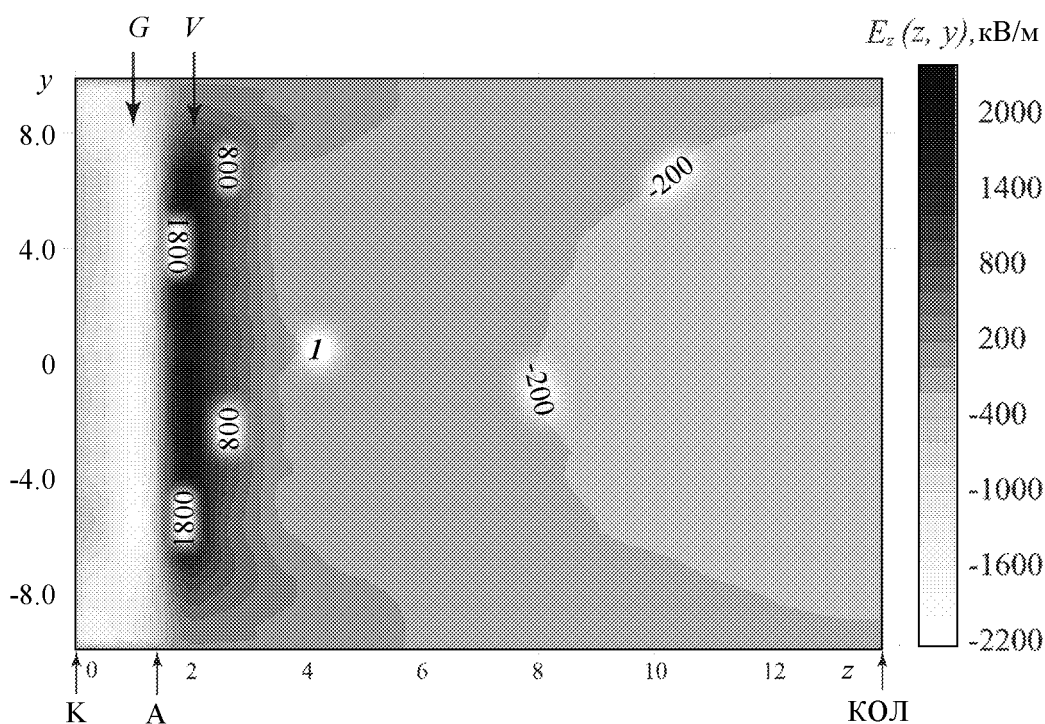


Рис. 4. Распределение продольной компоненты напряженности электрического поля в системе на плоскости (z, y) при $x = 0$ в режиме формирования ВК. Буквами К, А и КОЛ обозначены плоскости катода, анода и коллектора соответственно; цифрой I отмечена линия уровня на карте, соответствующая плоскости виртуального катода. Интенсивность серого цвета на рисунке пропорциональна величине E_z -компоненты напряженности электрического поля. Буквой G обозначена светлая область минимума распределения напряженности электрического поля в пространстве электронной пушки, а V – темная область максимума распределения, расположенная перед виртуальным катодом

ется перед виртуальным катодом рядом с анодной сеткой системы. В данной области электроны испытывают воздействие тормозящего поля ВК и накапливаются, теряя свою энергию, поэтому продольная компонента напряженности электрического поля в ней положительна и принимает максимальное для системы значение (см. рис. 4). Рядом с областью V располагается формальная плоскость ВК, в которой потенциал достигает минимального значения, а, следовательно, продольная компонента напряженности электрического поля – нулевого значения (линия уровня, соответствующая ВК, отмечена на рис. 4 цифрой 1). Однако заметим, что часто в литературе за область ВК принимается не отдельная плоскость, а целая пространственно распределенная

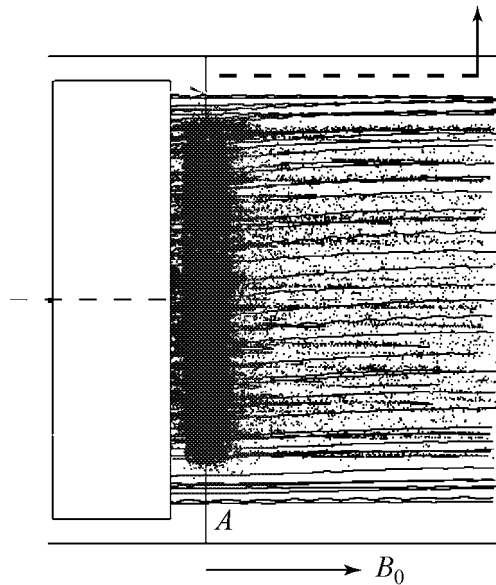


Рис. 5. Конфигурационный портрет пучка в генераторе в режиме формирования ВК на плоскости (z, y) . Буквой A обозначена анодная сетка электронной пушки

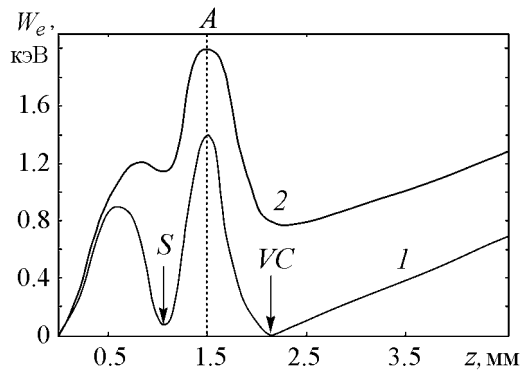


Рис. 6. Качественные зависимости энергии электронов от продольной координаты z для электронов из внутреннего (кривая 1) и внешнего (кривая 2) слоев потока. Рассматривается область около анодной сетки: $z \in (0, 4)$ мм; длина системы $L = 14$ мм. Пунктирной линией A обозначена плоскость анодной сетки, буквами VC и S – области ВК и вторичного электронного сгустка

область, располагающаяся между максимумом напряженности E_z (символ V на рис. 4) и линией уровня, соответствующей ВК (см. рис. 4). Именно в этой области формируется плотный сгусток электронов, затормозившихся в минимуме потенциала – ВК, который совершает колебания, возбуждая электродинамическую систему.

Для исследования физических механизмов, ответственных за генерацию широкополосного хаотического СВЧ-сигнала в рассматриваемой виркаторной системе, проанализируем также характерный конфигурационный портрет пучка, который представлен на рис. 5. Каждая точка на рисунке соответствует положению в пространстве одной заряженной частицы. Из конфигурационного портрета видно, что в системе в области анодной сетки образуется плотный сгусток электронов. Для анализа структуры и механизмов формирования данного сгустка удобно рассмотреть зависимости энергии электронов, находящихся в некотором слое потока, от продольной координаты z .

Данные зависимости представлены на рис. 6 для внутреннего и внешнего слоев пучка (кривые 1 и 2, соответственно). Сгусткам низкоэнергетичных электронов на рис. 6 соответствуют локальные минимумы на зависимостях $W_e(z)$. В данных пространственных областях электроны скапливаются и теряют свою энергию из-за воздействия воз-

растающего тормозящего поля пространственного заряда. Таким образом, из рис. 6 следует, что во внутренних слоях электронного потока (см. кривую I) формируется 2 сгустка электронов: первый (отмечен символом VC) – справа от анодной сетки (он соответствует распределенной области ВК), а второй (отмечен символом S) – слева от анода.

Проанализируем механизмы формирования второго сгустка подробнее. Вылетая из ускоряющего промежутка, электроны начинают испытывать воздействие самосогласованного тормозящего электрического поля и поэтому накапливаются в данной области, формируя первую электронную структуру – ВК (VC). В зависимости от фазы, в которой находится ВК, часть из вновь влетающих в область «анодная сетка–ВК» электронов отражается от ВК. Данные электроны начинают двигаться обратно к катоду, минуя анодную сетку. В области «катод–анодная сетка» отразившиеся электроны продолжают по инерции движение по направлению к катоду, испытывая при этом воздействие тормозящего для них статического электрического поля ускоряющего промежутка. Из-за данного торможения электроны теряют скорость своего направленного движения к катоду и в некоторой области промежутка «катод–анодная сетка» вновь меняют направление движения на обратное. Таким образом, в данной области происходит накопление электронов, и формируется вторичная электронная структура, состоящая из низкоэнергетичных электронов.

Заметим, что описанная электронная структура является нестационарной, так как в её области постоянно появляются отразившиеся от ВК новые электроны, а также происходит отток низкоэнергетичных электронов из данного сгустка, которые в статическом электрическом поле ускоряющего промежутка вновь начинают движение по направлению к анодной сетке системы. В плоскости анодной сетки данные электроны имеют энергию, меньшую eV_0 (2 кэВ для рассматриваемого случая), так как они начинают движение с точки с ненулевым потенциалом: из области вторичного сгустка, а не с катода. Данный факт отражает положение максимума кривой I на рис. 6 (максимум расположен на уровне приблизительно 1.4 кэВ). Описанный эффект приводит к дополнительному разбросу электронов в области ВК по энергиям, что вызывает «размывание» сгустка ВК вдоль продольного направления. Достигнув области ВК, электроны из вторичного сгустка, в зависимости от фазы ВК, либо вновь отражаются от него и повторяют описанный маршрут, либо преодолевают потенциальный барьер ВК и продолжают движение к коллекторной части системы.

Таким образом, электронный сгусток на рис. 5 состоит из двух различных электронных структур, которые из-за близости их расположения на конфигурационном портрете «сливаются» и выглядят как единый сгусток. Данные электронные структуры находятся в постоянном взаимодействии, которое осуществляется посредством «общих» электронов, перемещающихся от одного сгустка к другому, а также через общее поле пространственного заряда. Такое взаимодействие, фактически, означает, что в системе появляется дополнительная петля внутренней ОС, которая при определенных параметрах вызывает хаотизацию [7, 35–38] СВЧ-колебаний в виркаторной системе. Одним из признаков взаимодействия описанных электронных структур, приводящего к усложнению динамики ВК, является наличие сбоев фазы на временной реализации колебаний продольной компоненты электрического поля в области ВК (см. рис. 2). Действительно, электроны из области вторичной электронной структуры (неправильнофазные электроны) прибывают в область ВК со

скоростью, отличной от скорости электронов, вылетающих с катода, что приводит к сбоям фазы колебаний ВК.

Таким образом, причиной развития хаотической динамики в рассматриваемой модели виркатора и соответствующей генерации слабоизрезанного широкополосного (порядка одной октавы) хаотического СВЧ-сигнала (см. рис. 3) является образование в системе дополнительной петли внутренней ОС через взаимодействие электронных структур. Характерные частоты хаотических колебаний определяются собственной частотой пучка (то есть редуцированной плазменной частотой), поэтому спектр колебаний лежит в области удвоенной редуцированной плазменной частоты потока [32, 33].

Заметим также, что электроны из внешних слоев практически не участвуют в формировании ВК и вторичного электронного сгустка вследствие значительно более слабого воздействия полей пространственного заряда на электроны из внешних слоев сплошного потока. Действительно, из рис. 6 следует (см. кривую 2), что локальный минимум энергий электронов из внешних слоев, имеющий пространственную координату, соответствующую положению ВК в системе, демонстрирует значение, значительно превышающее нулевое. Это свидетельствует о том, что ВК в данных слоях не формируется; то же самое видно из рис. 5. Вторичная электронная структура, таким образом, во внешних слоях также не образуется, поэтому кривая 2 на рис. 6 практически не имеет провисания в области слева от анодной сетки. Вследствие отсутствия во внешних слоях потока ВК и вторичного электронного сгустка все электроны из внешних слоев, достигающие анодной сетки, приобретают максимальную энергию, определяемую ускоряющим потенциалом: $W_e = eV_0 = 2 \text{ кэВ}$.

3. Исследование влияния тороидальных резонаторов и петли обратной связи на выходные характеристики виртода

Рассмотрим теперь результаты численного исследования влияния дополнительных резонансных систем и внешней обратной связи (входного и выходного тороидальных резонаторов, соединенных петлей ОС) на характеристики выходного СВЧ-сигнала предложенной модификации виртода.

На рис. 7 приведен спектр колебаний продольной компоненты электрического поля в области ВК в исследуемом виртоде с внешними резонаторами и петлей ОС. Внешние резонаторы были настроены на частоту $f_r \approx 6 \text{ ГГц}$, приблизительно равную частоте свободных осцилляций ВК в системе f_{vc} , которая определяется удвоенной редуцированной плазменной частотой электронного потока $f_{vc} \approx 2f_p^r$ (напомним, что $f_p^r \approx 3 \text{ ГГц}$ для заданных параметров генератора) [32]. Как показало исследование, такая настройка внешних резонаторов обеспечивает наилучшую эффективность взаимодействия резонансных систем с пучком. Из анализа рисунка следует, что спектр в рассматриваемом

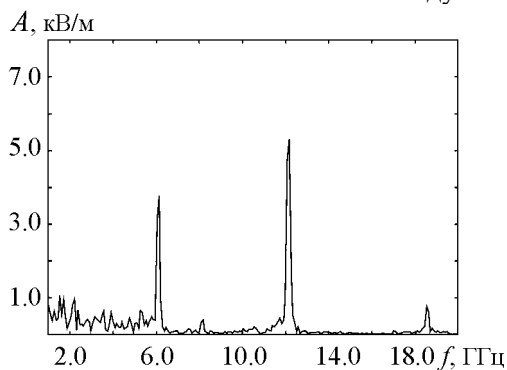


Рис. 7. Спектр колебаний продольной компоненты электрического поля в области ВК в модификации виртода с внешними тороидальными резонаторами и петлей ОС

случае соответствует близкому к регулярному характеру генерации и содержит узкополосную составляющую, соответствующую частоте колебаний ВК (порядка 6 ГГц), а также вторую и третью гармоники данной частоты, которые совпадают с собственными модами резонатора камеры дрейфа. Здесь следует особо отметить, что максимальной оказывается вторая гармоника на частоте около 12 ГГц и превосходит по амплитуде первую гармонику приблизительно в 1.4 раза; амплитуда третьей гармоники (приблизительно 18 ГГц) существенно меньше и составляет 20% амплитуды первой гармоники. Шумовой пьедестал в частотном диапазоне от 1 до 6 ГГц оказывается слабым, и его амплитуда не превышает 25% амплитуды первой гармоники.

Таким образом, введение в систему внешних резонаторов с петлей ОС привело к значительному упрощению выходного СВЧ-сигнала рассматриваемого генератора на ВК и увеличению выходной мощности (ср. рис. 3 и рис. 7). В системе практически исчез шумовой пьедестал, а его энергия перераспределилась между гармониками осцилляций ВК; особенно выросла мощность второй гармоники. Спектральная составляющая на частоте 16.5 ГГц, соответствующая одной из собственных мод резонатора камеры дрейфа, оказалась подавленной при введении внешних резонаторов с петлей ОС. Однако собственные моды камеры дрейфа с частотами, кратными частоте осцилляций ВК, эффективно возбуждаются при введении петли ОС.

С физической точки зрения, добавление в конструкцию генератора тороидальных резонаторов, соединенных петлей ОС, приводит к предмодуляции электронного потока при инжекции его в систему на частоте собственных осцилляций ВК (см. также раздел 1). Это, в свою очередь, способствует формированию более интенсивного и компактного сгустка в области ВК, характеризующегося регулярной динамикой, и, следовательно, упрощению спектра выходных СВЧ-колебаний в системе. Исследование характерного вида осциллограмм электрического поля в области ВК для системы с резонаторами и ОС показывает, что по сравнению со случаем без ОС отсутствуют характерные сбои фаз. Это приводит к увеличению степени регулярности колебаний в системе и повышению мощности выходного СВЧ-сигнала виртода за счет подключения внешней обратной связи.

Следует ожидать, что изменение параметров внешних резонаторов (например, частоты рабочей моды, их добротности) или петли внешней ОС приведет к изменению характеристик выходного сигнала представленного генератора или даже к смене режима его динамики, однако, данный вопрос требует дальнейших детальных исследований.

Заключение

Полученные результаты показывают, что предложенная модификация виртода позволяет за счет формирования двух плотных электронных структур в промежутке «катод–виртуальный катод» создать источник мощного широкополосного излучения со слабоизрезанным спектром. Характерные частоты генерации такой системы определяются удвоенной редуцированной плазменной частотой пучка и могут быть повышены путем увеличения плотности пространственного заряда потока. Хаотизация колебаний определяется влиянием дополнительной петли внутренней ОС, возникающей при взаимодействии электронных структур, что приводит к сбоям фазы колебаний электрического поля в области ВК.

Подключение к данной системе тороидальных резонаторов с петлей внешней ОС оказывает сильное влияние на характеристики функционирования генератора,

что хорошо согласуется на качественном уровне с результатами, полученными в работе [11] при экспериментальном исследовании виртода. Новыми результатами, которые были получены в данном предварительном исследовании в рамках трехмерной полностью электромагнитной численной модели, стали следующие важные моменты. *Во-первых*, было показано, что существует возможность повышения мощности и регулярности колебаний за счет настройки резонаторов (как дополнительных тороидальных, так и резонатора, образованного камерой дрейфа) и подключения цепи ОС. *Во-вторых*, из полученных результатов следует, что существует возможность эффективной генерации на высших гармониках осцилляций ВК в рассматриваемой системе, что в перспективе может быть использовано для увеличения частоты генерации виркатора путем создания виртода-умножителя частоты с резонаторами, настроенными на высшие гармоники частоты колебаний ВК.

Работа поддержана Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы и РФФИ (проекты 12-02-00345, 12-02-90022, 12-02-31102).

Библиографический список

1. *Granatstein V.L., Alexeeff I.* High Power Microwave Sources. Artech House Microwave Library, 1987.
2. *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47, № 6. С. 575.
3. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков: В 2-х томах. М.: Физматлит, 2003.
4. *Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перельгин С.Ф., Фоменко Г.П.* Генерация мощного СВЧ-излучения релятивистским электронным пучком в триодной системе // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5, № 6. С. 321.
5. *Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Сулакишин А.С. и др.* Генерация мощного СВЧ-излучения в триодной системе сильноточным пучком микросекундной длительности // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9, № 24. С. 48.
6. *Mahaffey R.A., Sprangle P.A., Golden J., Kapetanacos C.A.* High-power microwaves from a non-isochronous reflecting electron system // Phys. Rev. Lett. 1977. Vol. 39, № 13. P. 843.
7. *Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е.* К вопросу о механизме возникновения хаотической динамики в вакуумном СВЧ-генераторе на виртуальном катоде // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Vol. XLI, № 9. P. 1137.
8. *Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е.* Сложное поведение электронного потока с виртуальным катодом и генерация хаотических сигналов в виртодных системах // Изв. РАН. Сер. физич. 1997. Т. 61, № 12. С. 2391.
9. *Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E.* High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
10. *Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Методы нелинейной динамики и хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 2: Нестационарные и хаотические процессы. М.: Физматлит, 2009.
11. *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.
12. *Jiang W., Masugata K., Yatsui K.* New configuration of a virtual cathode oscillator for microwave generation // *Phys. Plasmas*. 1995. Vol. 2, № 12. P. 4635.
 13. *Калинин Ю.А., Кузнецов Н.Н., Украинская Т.Н.* Исследование широкополосных шумоподобных колебаний в интенсивных пучках заряженных частиц в режиме образования виртуального катода // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2002. Т. 10, № 5. С. 32.
 14. *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Вакуумные генераторы широкополосных хаотических колебаний на основе нерелятивистских электронных пучков с виртуальным катодом // *Изв. РАН. Сер. физич.* 2005. Т. 69, № 12. С. 1724.
 15. *Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А.* Экспериментальное и теоретическое исследование хаотических колебательных явлений в нерелятивистском электронном потоке с виртуальным катодом // *Физика плазмы*. 2005. Т. 31, № 11. С. 1009.
 16. *Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А.* Генерация хаотических сигналов в низковольтном генераторе на виртуальном катоде с экранированным от внешнего магнитного поля источником электронов // *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37, № 3. С. 102.
 17. *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Мощность выходного СВЧ-излучения низковольтного генератора на виртуальном катоде с внешним неоднородным магнитным полем // *Письма в ЖТФ*. 2011. Т. 37, № 8. С. 26.
 18. *Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Формирование и динамика виртуального катода в трубчатом электронном пучке во внешнем магнитном поле // *ЖТФ*. 2009. Т. 79, № 10. С. 119.
 19. *Hramov A.E., Koronovsky A.A., Kurkin S.A., Rempen I.S.* Chaotic oscillations in electron beam with virtual cathode in external magnetic field // *Int. J. Electronics*. 2011. Vol. 98, № 11. P. 1549.
 20. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A.* Numerical study of chaotic oscillations in the electron beam with virtual cathode in the external non-uniform magnetic fields // *Phys. Lett. A*. 2010. Vol. 374. P. 3057.
 21. *Benford J., Price D., Sze H., Bromley D.* Interaction of a vircator microwave generator with an enclosing resonant cavity // *Journal of Applied Physics*. 1987. Vol. 61, № 5. P. 2098.
 22. *Храмов А.Е.* О влиянии обратной связи на характеристики генерации прибора с виртуальным катодом // *Радиотехника и электроника*. 1999. Т. 44, № 1. С. 116.
 23. *Friedman M., Krall J., Lau Y.Y., Serlin V.* Efficient generation of multi-gigawatt rf power by a klystron-like amplifier // *Rev. Sci. Instrum*. 1990. Vol. 61. P. 171.
 24. *Tsimring S.E.* *Electron beams and microwave vacuum electronics*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007.
 25. *Рошаль А.С.* Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.
 26. *Birdsall C.K., Langdon A.B.* *Plasma physics, via computer simulation*. NY.: McGraw-Hill, 1985.
 27. *Свешников А.Г., Якунин С.А.* Численные модели бесстолкновительной плазмодинамики // *Математическое моделирование*. 1989. Т. 1, № 4. С. 1.

28. *Anderson T.M., Mondelli A.A., Levush B., Verboncoeur J.P., Birdsall C.K.* Advances in modelling and simulation of vacuum electron devices // Proceedings IEEE. 1999. Vol. 87, № 5. P. 804.
29. *Егоров Е.Н., Храмов А.Е.* Исследование хаотической динамики в электронном пучке с виртуальным катодом во внешнем магнитном поле // Физика плазмы. 2006. Т. 32, № 8. С. 742.
30. *Григорьев А.Д.* Современные методы моделирования нестационарных электромагнитных полей // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7, № 4. С. 48.
31. *Boris J.P., Lee R.* Optimization of particle calculations in 2 and 3 dimensions // Commun. Math. Phys. 1969. Vol. 12. P. 131.
32. *Диденко А.Н.* Механизм генерации мощных СВЧ-колебаний в виркаторе // ДАН. 1991. Т. 321, № 4. С. 727.
33. *Диденко А.Н., Ращиков В.И.* Генерация мощных СВЧ-колебаний в системах с виртуальным катодом // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 1182.
34. *Алимовский И.В.* Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
35. *Храмов А.Е.* Хаос и образование структур в электронном потоке с виртуальным катодом в ограниченном пространстве дрейфа // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 5. С. 551.
36. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Исследование когерентных структур в электронном пучке со сверхкритическим током с помощью вейвлетной бикогерентности // Физика плазмы. 2002. Т. 28, № 8. С. 722.
37. *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. Vol. 91, № 1. P. 1.
38. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Rempen I.S.* Controlling chaos in spatially extended beam-plasma system by the continuous delayed feedback // Chaos. 2006. Vol. 16, № 1. P. 013123.

*Саратовский госуниверситет,
 НИЦ «Харьковский физико-
 технический институт»*

*Поступила в редакцию 10.05.2012
 После доработки 23.07.2012*

THREE-DIMENSIONAL SIMULATION OF VIRTODE WITH TOROIDAL CAVITIES

*S. A. Kurkin, A. A. Koronovskii, A. E. Hramov, E. N. Egorov,
 A. E. Filatova, I. I. Magda, O. G. Melegik*

The results of preliminary 3D fully electromagnetic simulation of microwave generator with virtual cathode and external feedback loop (virtode) are discussed in this paper. The feedback is realized by the velocity modulation of electron beam in the accelerating gap of electron gun with the electromagnetic signal taken with output cavity placed in the virtual cathode area. It has been shown that there is a possibility of increase of power and regularity of oscillations by adjusting the feedback resonators and possibility of generation at higher harmonics of virtual cathode oscillations in the system. In the future, it can be

used to increase the frequency of vircator generation by creating the virtode frequency multiplier with cavities tuned to the higher harmonics of virtual cathode oscillations.

Keywords: Virtode, microwave generator, virtual cathode, nonlinear dynamics, microwave electronics, vircator, wideband generation, numerical simulation.



Куркин Семён Андреевич – родился в Саратове (1986). Окончил с отличием факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского по специальности радиофизика и электроника (2008). В 2011 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Радиофизика». В настоящий момент – ассистент кафедры физики открытых систем СГУ. Имеет порядка 25 публикаций в центральных реферируемых журналах, участник Всероссийских и Международных конференций. Область научных интересов – исследование электронно-волновых систем с интенсивными пучками заряженных частиц, изучение нелинейной динамики виртуального катода, а также генераторов, основанных на колебаниях виртуального катода (виркаторов).

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: KurkinSA@gmail.com



Короновский Алексей Александрович – родился в Саратове (1972). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995), доктор физико-математических наук (2007), профессор кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой деятельности, в том числе нелинейная динамика социально-экономических процессов. Автор ряда статей в центральной печати, а также монографий (в соавторстве) «Нелинейная динамика в действии» и «Непрерывный вейвлетный анализ» (Саратов, Изд-во ГосУНЦ «Колледж»), двухтомной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009, под редакцией А.А. Короновского, А.А. Кураева, Д.И. Трубецкова и А.Е. Храмова), монографии «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010, под редакцией С.И. Ильина и Д.И. Трубецкова) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: alkor@nonlin.sgu.ru



Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1996). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физ.-мат. наук. Профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – радиофизика в той ее части, которая связана с взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями; нелинейная динамика распределенных активных сред; методы анализа и моделирования динамических систем. Опубликовал (в соавторстве) книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004), монографию «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003), двухтомную коллективную монографию «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009), коллективную монографию «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru



Егоров Евгений Николаевич – родился в Саратове (1980), окончил факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2002), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2007, СГУ). Доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ (с 2008). Область научных интересов – нелинейная динамика СВЧ-устройств. Опубликовал около 20 статей в отечественных и зарубежных журналах по данной тематике.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: evgeniy.n.egorov@gmail.ru



Филатова Анастасия Евгеньевна – родилась в Саратове (1983). Окончила факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета (2005). Кандидат физико-математических наук (2008). Старший научный сотрудник лаборатории физики нелинейных явлений Отделения физики нелинейных систем Саратовского государственного университета. Область научных интересов – нелинейная динамика систем различной природы, методы анализа динамических систем, вейвлетный анализ. Автор ряда статей в рецензируемых отечественных и зарубежных журналах.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: anefila@gmail.com



Магда Игорь Иванович окончил радиофизический факультет (1966) и поступил на работу в ХФТИ АН УССР (в настоящее время ННЦ ХФТИ) на должность стажера-исследователя. С 1978 года начальник лаборатории релятивисткой СВЧ-электроники. Доктор физико-математических наук (1990, Киевский госуниверситет), профессор (1993). Специалист в области сильноточной электроники и физики плазмы, соавтор более 100 научных работ, 5 изобретений. Участвовал в международных программах, выезжал в заграничные командировки (несколько раз в Пражский институт физики плазмы, ЧССР), был докладчиком на международных конференциях, руководил секцией «Интенсивные электромагнитные поля и эффекты» международной конференции EUROEM (2004, Магдебург), является членом Программного комитета международной Крымской микроволновой конференции «КрыМиКо».

61108 Украина, Харьков, ул. Академическая, 1
ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

Мележик Ольга Георгиевна – родилась в Ростове-на-Дону (1952). Окончила Ростовский государственный университет по специальности «математика» (1974). После окончания РГУ работала в Военно-инженерной Академии им. Говорова в должностях инженера, старшего инженера, младшего научного сотрудника (1974–2004). С 2004 года работает в ХФТИ НАНУ в должности ведущего инженера-исследователя лаборатории релятивисткой СВЧ-электроники. Является соавтором 7 научных статей по тематике лаборатории.

61108 Украина, Харьков, ул. Академическая, 1
ННЦ «Харьковский физико-технический институт»