

## Исследование процессов взаимодействия релятивистских электронных пучков в многолучевом виркаторе с использованием CST Particle Studio

А. А. Бадарин<sup>1,2,\*</sup>, С. А. Куркин<sup>1,2,†</sup>, Н. С. Фролов<sup>1,2,‡</sup>, А. Е. Храмов<sup>1,2,§</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национально - исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, факультет нелинейных процессов, кафедра физики открытых систем  
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.  
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

Проведено численное исследование влияния различных факторов на характеристики генерации многолучевого виркатора (расстояние между пучками, расстройка токов пучков). Построены карты режимов на плоскостях основных управляющих параметров многолучевого виркатора. Обнаружен эффект синхронизации виртуальных катодов в модели многолучевого релятивистского виркатора.

PACS: 52.35.-g УДК: 533.95

Ключевые слова: релятивистский электронный поток, виртуальный катод, виркатор, нелинейная динамика, электронные структуры, синхронизация.

Важной задачей в настоящее время является повышение мощности электромагнитного излучения при одновременном повышении частоты электромагнитного излучения в пучково-плазменных устройствах СВЧ [1]. Учитывая неизбежное падение достижимой мощности излучения с ростом частоты вновь возникает интерес к анализу связанных мощных систем, в которых возможно достичь увеличения мощности за счет сложения сигналов от нескольких источников. Традиционный подход здесь — разработка фазированных антенных решеток и нелинейных антенн [2–4]. С учетом особенностей таких источников сверхмощного СВЧ излучения как приборы с виртуальным катодом (виркаторы, виртоды, редитроны и т.п.) [5–7], предложена схема, в которой сложение мощностей каждого из колеблющихся виртуальных катодов происходит в общем резонаторе (камере дрейфа) — многолучевая схема виркатора. В этой схеме несколько пучков со сверхкритическими токами нагружены на общий резонатор. Такая схема может рассматриваться как перспективная для дальнейшего повышения мощности и частоты генераторов на виртуальном катоде. Схема многолучевого виркатора ранее не рассматривалась, поэтому в рамках численного моделирования была проанализирована возможность эффективного взаимодействия нескольких виртуальных катодов в едином пространстве взаимодействия и определены условия, при которых реализуется эффективное сложение мощности каждого из пучков на выходной нагрузке.

Впервые обнаружен эффект синхронизации виртуальных катодов в модели многолучевого релятивистского виркатора. Данный эффект является важным не только с фундаментальной, но и с прикладной точки

зрения, т.к. в перспективе может позволить продвигать релятивистские виркаторы в более высокочастотный диапазон без существенного увеличения общего тока в системе. Такого результата возможно достигнуть, используя один РЭП с наибольшим током в качестве задающего частоту, а остальные ( $N - 1$ ) с меньшими токами — в качестве поддерживающих, «накачивающих» необходимую энергию в систему. Таким образом, для повышения частоты генерации виркатора (которая определяется плазменной частотой [7]) и мощности на данной частоте нет необходимости увеличивать общий ток, инжектируемый в систему, как в случае с одним РЭП, а достаточно увеличить лишь ток одного из  $N$  пучков (ведущего). В результате, за счет синхронизации ВК во всех электронных потоках начнут осциллировать на одной частоте, задаваемой частотой колебаний ВК в ведущем пучке, что приведет к увеличению мощности выходного сигнала на данной частоте. Образующиеся синхронно осциллирующие виртуальные катоды можно рассматривать как единую пространственно-распределенную неоднородную электронную структуру.

Исследуемая модель — пространство дрейфа в виде отрезка цилиндрического волновода, в который инжектируется  $N$  сплошных релятивистских электронных потоков с током  $I_n$  (где  $n$  — номер потока) и энергией  $W_e$  каждый. Количество пучков варьируется от  $N = 1$  до  $N = 5$ . Позиции областей инжекции электронных потоков (эммиттеров) выбираются симметрично относительно оси симметрии системы. Вывод электромагнитной энергии из системы осуществляется через коаксиальный волновод, подключенный к выходной части модели, который моделируется при помощи волноводного порта. Геометрические параметры модели: длина волновода  $L = 45$  мм, радиус волновода  $R = 10$  мм, радиус одного электронного потока  $R_b = 2$  мм. Система находится во внешнем фокусирующем продольном однородном магнитном поле с индукцией  $B$ .

Проведено исследование влияния различных факторов на характеристики генерации многолучевого вир-

\*E-mail: Badarin.a.a@mail.ru

†E-mail: Kurkinsa@gmail.com

‡E-mail: Phrolovns@gmail.com

§E-mail: Hramovae@gmail.com

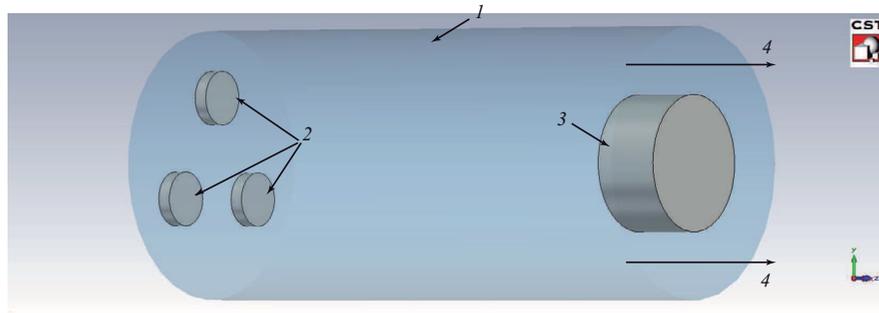


Рис. 1: Схема исследуемой в CSTPS модели, 1 — пространство дрейфа в виде отрезка цилиндрического волновода длиной и радиусом; 2 —  $N$  эмиттеров, формирующих  $N$  сплошных релятивистских электронных потоков с радиусом, током  $I_n$  и энергией каждый, где  $n$  — номер потока; 3 — коллектор; 4 — коаксиальный вывод мощности (волноводный порт)

катора (расстояние между пучками, расстройка токов пучков). Построены карты режимов на плоскостях основных управляющих параметров многолучевого виркатора. Для этого использовалась разработанная в лицензионной среде трехмерного электромагнитного моделирования CST Particle Studio модель многолучевого релятивистского виркатора. Рассматривались ситуации с 3 и 4 пучками; позиции областей инжекции электронных потоков (эмиттеров) выбирались симметрично относительно оси симметрии системы на расстоянии  $R_p$  от неё. Один из пучков выбирался в качестве «базового», относительно которого отсчитывались расстройки токов других —  $dI_1, dI_2, \dots, dI_{N-1}$ , которые определяются следующим образом:  $dI_n = I_n/I_0 - 1$ , где  $I_n$  — ток  $n$ -ого потока,  $I_0$  — ток «базового» потока. Система находится во внешнем фокусирующем продольном однородном магнитном поле с индукцией  $B = 0.5$  Тл.

Было обнаружено сильное влияние расстройки на выходные характеристики генерации многолучевого виркатора. Так, на рис. 2а представлена зависимость выходной мощности, снимаемой с выходного коаксиального волноводного порта системы, от расстройки токов в случае инжекции в виркатор 4-х пучков, когда расстройки для 3-х пучков относительно «базового» совпадают, т.е.  $dI_1 = dI_2 = dI_3 = \Delta$ , при этом ток «базового» пучка равен 5 кА. Эмиттеры располагались так, что «базовый» пучок инжектировался по оси симметрии, а 3 других — симметрично по азимуту относительно первого на расстоянии  $R_p = 5$  мм от него. Таким образом, существуют области оптимальных значений расстроек ( $\Delta = (-0.5; -0.7)$ ,  $\Delta = (0.2; 0.5)$ ), при которых выходная мощность достигает максимальных значений, при этом мощность в оптимумах возрастает приблизительно в 10 раз, по сравнению со случаем инжекции в систему только одного «базового» электронного потока (см. спектры на рис. 2а и б).

В исследуемой системе наблюдается эффект синхронизации колебаний виртуальных катодов, который проявляется в «навязывании» спектральных характеристик генерации пучком с наибольшим током всей системе. Это демонстрируют спектры на рис.2а. Так, при

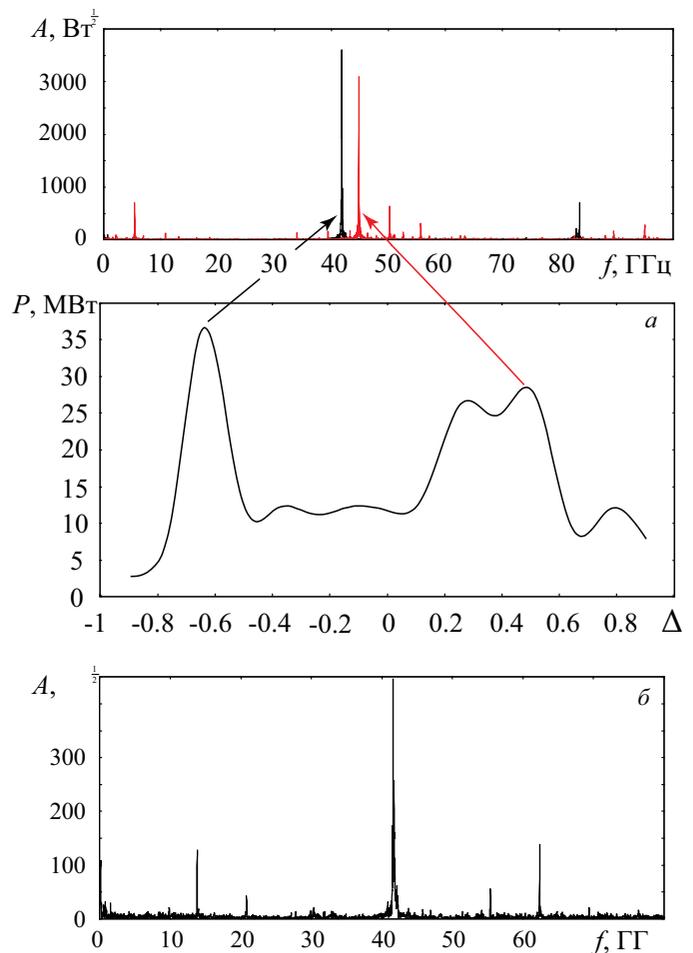


Рис. 2: а — Зависимость выходной мощности, снимаемой с выходного коаксиального волноводного порта релятивистского многолучевого виркатора, от расстройки токов  $\Delta$  в случае инжекции в виркатор 4-х пучков, когда расстройки для 3-х пучков относительно «базового» совпадают, т.е.  $dI_1 = dI_2 = dI_3 = \Delta$ , при этом ток «базового» пучка — 5 кА, а также характерные спектры выходного сигнала для 2-х значений расстройки. б — Спектр выходного сигнала для релятивистского виркатора с одним электронным потоком с током 5 кА

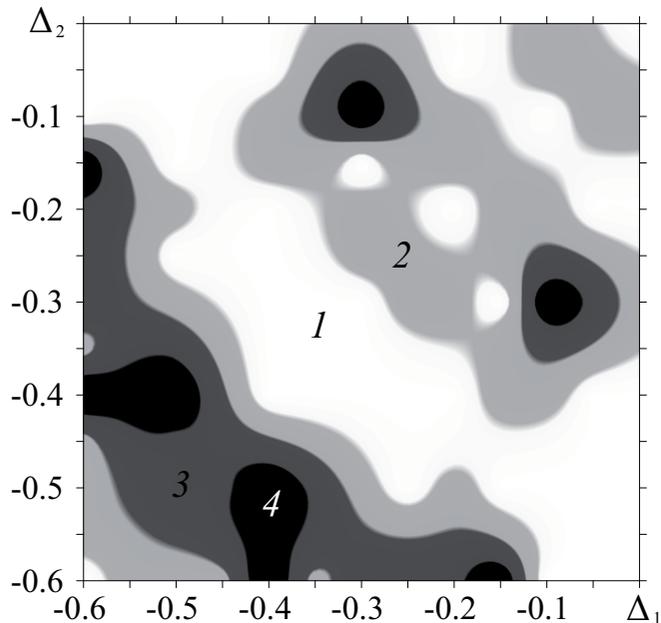


Рис. 3: Карта характерных режимов динамики системы с тремя электронными потоками на плоскости управляющих параметров  $(\Delta_1, \Delta_2)$ , где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  — расстройки токов первого и второго пучков относительно «базового», соответственно; областям цвета 1, 2 и 3 соответствуют режимы с одно-, двух- и трехчастотным выходным сигналом, соответственно, области чёрного цвета 4 обозначают режимы, характеризующиеся более, чем тремя интенсивными компонентами в спектре выходного сигнала

отрицательной расстройке, когда токи дополнительных пучков меньше тока «базового» потока, частота в спектре выходного сигнала определяется плазменной частотой «базового» пучка. Напротив, когда расстройка становится положительной, частота в спектре сдвигается в большую сторону, что обусловлено «навязыванием» системе частоты, пропорциональной плазменной частоте дополнительных пучков с токами  $I_0(1 + \Delta)$  (напомним, что плазменная частота пропорциональна току электронного потока), которые в данном случае становятся больше  $I_0$ .

Проведен многопараметрический анализ релятивистского многолучевого виркатора с  $N$  электронными потоками. Обнаружено сильное влияние расстроек токов пучков, а также их взаимного расположения на динамику исследуемой системы, при этом оказывается возможным сделать следующие общие выводы:

1. чем ближе друг к другу располагаются потоки, тем более сильное влияние они оказывают друг на друга, и тем быстрее устанавливается синхронный режим динамики в системе;
2. чем выше разброс по токам пучков, тем сложнее становится установившаяся динамика системы.

В частности, на рис. 3 приведена карта характерных режимов динамики системы с тремя электронными потоками на плоскости управляющих параметров  $(\Delta_1, \Delta_2)$ , где  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  — расстройки токов первого и второго пучков относительно «базового», соответственно. Видно, что наиболее сложные режимы динамики (черные области на рис. 2, характеризующиеся более, чем тремя интенсивными компонентами в спектре) система демонстрирует, когда расстройки токов пучков заметно отличаются друг от друга (например,  $\Delta_1 \sim -0.1$ , а  $\Delta_2 \sim -0.3$ ) или, когда расстройки относительно велики (например,  $\Delta_1 \sim -0.4$ , а  $\Delta_2 \sim -0.5$ ). Общая тенденция такова, что режим динамики системы усложняется с увеличением разности между расстройками. Также карта содержит расположенные вдоль диагоналей «окна» с одночастотной генерацией (белые области на рис. 3), обусловленные подавлением одной частотой других.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 14-02-00329) и гранта Президента РФ для молодых российских ученых-кандидатов наук (МК-5426.2015.2).

Н. С. Фролов выражает благодарность РФФИ (грант № 16-32-60107) за индивидуальную поддержку научных исследований.

[1] *Booske J. H.* Physics of Plasmas. **15**(5) P. 055502 (2008).  
 [2] *Meadows B. K.* et al. Proceedings of the IEEE. **90**. P. 882. (2002).  
 [3] *Мишагин К. Г., Шалфеев В. Д., Пономаренко В. П.* Нелинейная динамика систем фазирования в антенных решетках. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2007.  
 [4] *Дубинов А. Е., Селемир В. Д., Царев А. В.* Изв. вузов. Радиофизика, **XLIII**. P. 70. (2000).

[5] *Hoerberling R. F., Fazio M. V.* IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. **34**. P. 252. (1992).  
 [6] *Дубинов А. Е., Селемир В. Д.* Радиотехника и электроника. **47**. P. 575. (2000).  
 [7] *Benford J., Swegle J. A., Schamiloglu E.* High power microwaves. III ed., Series in Plasma Physics. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2016.

## Investigation of the relativistic electron beams interaction in the multibeam Vircator using CST Particle Studio

A. A. Badarin<sup>1,2,a</sup>, S. A. Kurkin<sup>1,2,b</sup>, N. S. Frolov<sup>1,2,c</sup>, A. E. Hramov<sup>1,2,d</sup>

<sup>1</sup>*Department of Open System Physics, Faculty of Nonlinear Process, Saratov State University  
Saratov 410012, Russia*

<sup>2</sup>*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Saratov 410054, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>Badarin.a.a@mail.ru, <sup>b</sup>Kurkinsa@gmail.com, <sup>c</sup>Phrolovns@gmail.com, <sup>d</sup>Hramovae@gmail.com*

The influence of various factors on the characteristics of generation of multibeam vircator (the distance between the beams, beams mismatch currents) is investigated numerically. Maps of regimes on the main planes of the control parameters of multipath vircator are created. The effect of synchronization of the virtual cathodes in the model of a relativistic multibeam vircator is revealed.

PACS: 52.35.-g

Keywords: relativistic electron beam; virtual cathode; vircator; nonlinear dynamics; electron structures; synchronization.

### Сведения об авторах

1. Бадарин Артём Александрович — лаборант-исследователь; тел.: (845) 251-21-11 e-mail: Badarin.a.a@mail.ru.
2. Куркин Семён Андреевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (845) 251-21-11, e-mail: Kurkinsa@gmail.com.
3. Фролов Никита Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (845) 251-21-11, e-mail: Phrolovns@gmail.com.
4. Храмов Александр Евгеньевич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (845) 251-21-11, e-mail: Hramovae@gmail.com.