

УДК 533.9

## МОЩНОСТЬ СВЧ-ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В РЕЖИМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО КАТОДА ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2013 г. С. А. Куркин<sup>1</sup>, А. А. Короновский<sup>1,2</sup>, А. Е. Храмов<sup>1,2</sup>

*E-mail: kurkinsa@gmail.com; hramovae@gmail.com*

Проведено численное исследование поведения мощности выходного СВЧ-излучения релятивистского электронного потока с виртуальным катодом (ВК) в присутствии внешнего продольного магнитного поля. Получены типичные зависимости выходной мощности релятивистской виркаторной системы от величины внешнего магнитного поля, демонстрирующие наличие нескольких локальных максимумов. Обнаружено, что характерное поведение мощности излучения определяется условиями и механизмами формирования ВК во внешнем продольном и собственном магнитных полях.

DOI: 10.7868/S0367676513120144

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов развития нелинейных СВЧ-колебаний, образования структур и установления сложных режимов генерации в активных электронно-волновых системах с интенсивными релятивистскими электронными потоками (РЭП) в режимах формирования виртуального катода (ВК) привлекает в последнее время большое внимание научного сообщества [1–3]. С одной стороны, это обусловлено фундаментальной значимостью подобных исследований [4]. С другой стороны, интенсивные РЭП находят широкое применение в ряде практических приложений, например при решении задач нагрева плазмы, ядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы, создания систем ускорения ионов, генерации СВЧ-излучения высокой мощности и др. В частности, генераторы, использующие релятивистские электронные потоки с ВК (виркаторы), являются перспективными устройствами СВЧ-электроники больших мощностей благодаря своим уникальным свойствам: высокой выходной мощности излучения, простоте конструкции, возможности легкой перестройки частоты и режима генерации [1, 2].

В ряде работ показано [5–11], что зависимость выходной мощности виркаторов от различных

параметров системы, в частности от величины внешнего магнитного поля (МП), демонстрирует сложное поведение. Так, в работе [6] проведено экспериментальное исследование зависимости выходной мощности СВЧ-излучения виркатора от величины внешнего МП и показано, что данная зависимость демонстрирует осциллирующий характер поведения с 2–3 пиками, амплитуда которых уменьшается с ростом МП. Также было показано, что при больших величинах внешнего МП выходная мощность релятивистского виркатора асимптотически стремится к постоянной относительно невысокой величине. Аналогичные результаты были получены и в ряде других работ [5–8, 10]. Однако физические причины такого поведения выходной мощности виркатора остаются неизученными, поэтому важной задачей в области исследования систем с ВК является анализ поведения выходной мощности генерации релятивистских виркаторов при изменении величины внешнего МП, а также исследование физических процессов, ответственных за такое поведение.

Заметим, что при исследовании систем с РЭП необходимо учитывать ряд эффектов, которые несущественны для слаборелятивистских потоков. В частности, для РЭП нельзя пренебрегать собственными магнитными полями пучка, которые начинают оказывать существенное влияние на процессы, происходящие в системе. Учет собственных МП приводит к необходимости использования принципиально трехмерных самосогласованных электромагнитных моделей динамики РЭП со сверхкритическим током. В данной рабо-

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского.

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

те представлены результаты численного трехмерного полностью электромагнитного изучения поведения мощности выходного СВЧ-излучения релятивистской системы с трубчатым РЭП, находящимся во внешнем однородном продольном МП конечной величины, а также проанализированы физические причины обнаруженного поведения.

### ИССЛЕДУЕМАЯ СИСТЕМА И ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

В качестве исследуемой системы была рассмотрена классическая модель для изучения динамики ВК [3]. Пространство дрейфа электронного потока представляет собой замкнутый отрезок цилиндрического волновода длиной  $L$  и радиусом  $R$ , закрытый с торцов сеточными электродами. Аксиально-симметричный релятивистский моноскоростной трубчатый электронный пучок с радиусом  $R_b$  и толщиной  $d$  с энергией  $W_e$  и током  $I$  на входе инжектируется в пространство взаимодействия через левую (входную) сетку и выводится через правую (выходную), а также может оседать на боковой стенке пространства взаимодействия. Конкретные геометрические параметры, используемые в данной работе, таковы:  $L = 40$  мм,  $R = 10$  мм,  $R_b = 5$  мм,  $d = 2$  мм. Вдоль оси системы прикладывается внешнее однородное фокусирующее МП с индукцией  $B_0$ . Вывод энергии выполнен в виде коаксиальной линии передачи, в которую переходит пространство взаимодействия РЭП с ВК. Численное моделирование нестационарных процессов в релятивистском пучке заряженных частиц проводилось с помощью трехмерной модели, основанной на численном решении самосогласованной системы уравнений Максвелла и уравнений движения заряженных частиц [3, 12].

### ДИНАМИКА СИСТЕМЫ

На рис. 1 показаны зависимости нормированной выходной мощности излучения РЭП с ВК от индукции внешнего МП  $P_{out}(B_0)$ , полученные с помощью численного моделирования для двух значений начальной энергии потока  $W_e$ . Видно, что кривые на рисунке демонстрируют аналогичные характерные особенности: наличие трех локальных максимумов (обозначены символами  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  на рис. 1) на фоне монотонного уменьшения выходной мощности с ростом МП.

Для анализа физических процессов, ответственных за подобное поведение зависимостей выходной мощности, были рассмотрены результаты исследований условий формирования ВК — величин критических токов пучка — в зависимости

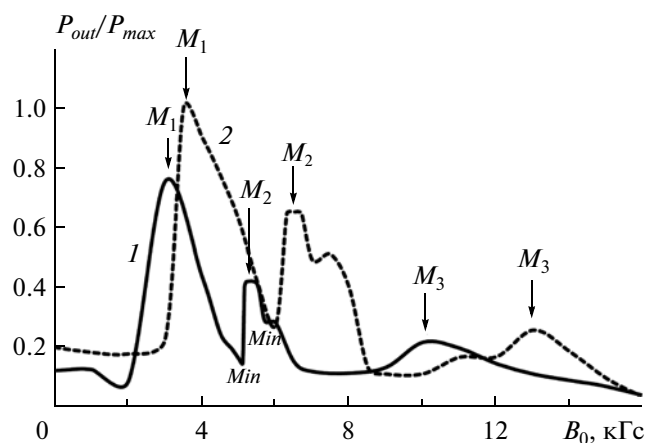


Рис. 1. Зависимости нормированной выходной мощности излучения РЭП с ВК от индукции внешнего магнитного поля  $B_0$  при следующих значениях начальной энергии потока  $W_e$ : 600 кэВ (1) и 850 кэВ (2). Ток пучка  $I = 20$  кА; символами  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$  обозначены локальные максимумы зависимостей.

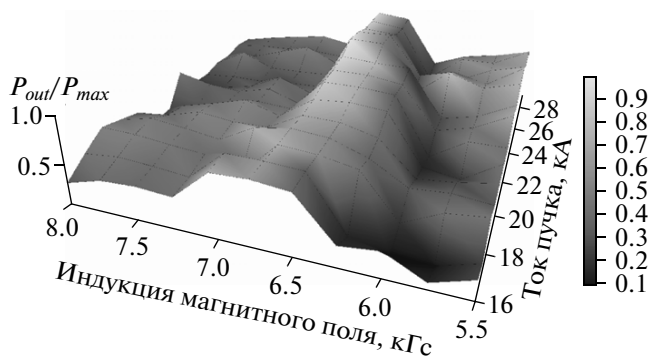
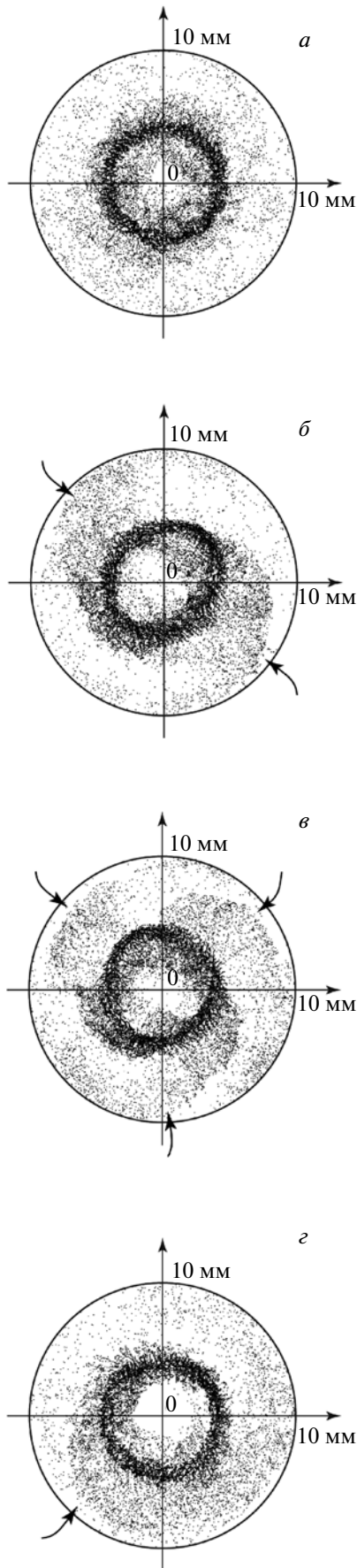


Рис. 2. Зависимость нормированной выходной мощности излучения РЭП с ВК от индукции внешнего магнитного поля и тока пучка;  $W_e = 850$  кэВ.

от величины внешнего МП, которые были проведены в [3]. Напомним, что нестационарный ВК образуется в пучке, когда его ток превышает критическое значение [1–4]. В работе [3] было установлено, что зависимость критического тока РЭП от величины индукции внешнего продольного МП  $I_{cr}(B_0)$  имеет характерный вид с максимумом и несколькими локальными минимумами (см. рис. 2 в [3]), который определяется формированием вихревых электронных структур в РЭП вследствие развития так называемой азимутальной неустойчивости потока под влиянием внешнего и собственного



**Рис. 3.** Проекция мгновенных положений крупных частиц электронного потока на секущую плоскость  $(r, \theta)$  при  $B_0 = 3.5$  кГс (а),  $B_0 = 6$  кГс (б),  $B_0 = 6.5$  кГс (в),  $B_0 = 9$  кГс (г);  $I = 20$  кА;  $W_e = 850$  кэВ; продольная координата секущей плоскости  $z_s = 7$  мм. Показаны только частицы, находящиеся за секущей плоскостью (с координатами  $z < z_s$ ); стрелки обозначают окончания вихревых электронных, формирующихся в РЭП.

магнитных полей [3]. Сравнение зависимостей  $I_{cr}(B_0)$  и  $P_{out}(B_0)$  показало, что характерное поведение выходной мощности излучения РЭП определяется сложным поведением критических токов пучка при изменении внешнего МП, а также особенностями механизмов формирования ВК в системе при различных величинах внешнего МП.

Видно, что первый ярко выраженный локальный минимум зависимости  $P_{out}(B_0)$  (минимумы обозначены символами “Min” на рис. 1) наблюдается при такой величине индукции внешнего МП, когда соответствующая зависимость  $I_{cr}(B_0)$  демонстрирует максимум. Действительно, когда критический ток пучка достигает своего максимального значения, надкритичность рассматриваемой системы по току  $(I - I_{cr}(B_0))$  при фиксированном токе РЭП  $I = 20$  кА оказывается минимальной и, следовательно, выходная мощность, которая пропорциональна надкритичности, также демонстрирует минимальное значение. Аналогично максимумам зависимости  $P_{out}(B_0)$  соответствуют минимумы  $I_{cr}(B_0)$ . Так, индукция внешнего МП, при которой зависимость  $I_{cr}(B_0)$  достигает первого локального минимума, соответствует координате первого максимума  $M_1$  зависимости  $P_{out}(B_0)$  (рис. 1). Структура ВК оказывается максимально развитой при такой величине индукции МП. Величина внешнего МП, при которой зависимость критического тока переходит в область насыщения, определяет положение третьего максимума  $M_3$  зависимости выходной мощности от индукции МП (рис. 1). Тенденция выходной мощности к уменьшению с ростом величины внешнего МП, ведущая, в частности, к образованию третьего максимума  $M_3$ , определяется эффектом ограничения поперечной динамики электронного потока возрастающим внешним МП, который приводит к уменьшению эффективности взаимодействия ВК с электромагнитными полями [13].

Для анализа причин появления второго максимума  $M_2$  на зависимости  $P_{out}(B_0)$  (рис. 1) рассмотрим типичную зависимость мощности выходного излучения РЭП от величины индукции внешнего МП и тока пучка  $P_{out}(B_0, I)$  (рис. 2) для энергии потока  $W_e = 850$  кэВ. Видно, что поверхность на рис. 2 демонстрирует наличие растянутой вдоль оси тока пиковой области (светло-серая об-

ласть на рис. 2), в которой выходная мощность достигает максимальных значений. Координата данной области по оси индукции МП ( $B_0 \sim 6-7$  кГс) практически не зависит от тока пучка и соответствует оптимальной величине внешнего МП, при которой РЭП с ВК излучает СВЧ-сигнал с локально максимальной мощностью. Координата второго максимума  $M_2$  на зависимости  $P_{out}(B_0)$  при энергии  $W_e = 850$  кэВ (рис. 2, кривая 2) соответствует данной оптимальной величине внешнего МП, поэтому выходная мощность демонстрирует локальный максимум при таком МП.

Исследуем эволюцию динамики РЭП в режиме формирования ВК при изменении внешнего МП и установим ее связь с закономерностями поведения выходной мощности. На рис. 3а–3г изображены характерные фазовые портреты электронного потока в виде проекций мгновенных положений крупных частиц пучка (черные точки на рисунках) на секущую поперечную плоскость ( $r, \theta$ ) для тока пучка  $I = 20$  кА и различных характерных величин внешнего МП  $B_0$ . Рисунок 3а, соответствующий слабому внешнему МП, демонстрирует практически равномерное распределение потока в азимутальном направлении. С ростом величины индукции МП в РЭП начинают формироваться вихревые электронные структуры вследствие развития азимутальной неустойчивости пучка [3]. Так, двойная (рис. 3б), тройная (рис. 3в) или одинарная (рис. 3г) вихревые электронные структуры образуются в РЭП при величине внешнего МП, меньшего некоторого порогового значения (9 кГс для случая, изображенного на рис. 3). Азимутальная неустойчивость и поперечная динамика РЭП подавляются сильным внешним МП  $B_0 > 9$  кГс, поэтому при таком МП вихревые электронные структуры не образуются в системе.

Таким образом, из анализа рис. 3 следует, что внешнее МП, лежащее в диапазоне от 0 до 9 кГс, определяет структуру формирующегося в системе электронного вихря (ср. рис. 3а–3г). Полученный результат может объяснить существование оптимальной величины внешнего МП, при которой выходная мощность принимает локально максимальное значение (максимум  $M_2$  на рис. 1). Было обнаружено, что эффективность взаимодействия ВК в РЭП с электромагнитными полями и, следовательно, выходная мощность выше в случае, когда электронный поток не имеет неоднородностей в азимутальном направлении. Действительно, случай, изображенный на рис. 3а, когда РЭП демонстрирует наиболее однородную структуру в азимутальном направлении, соответствует максимальной выходной мощности (максимум  $M_1$  на

рис. 1, кривая 2). Максимум  $M_2$  наблюдается при такой величине внешнего МП, при которой в системе формируется тройная вихревая электронная структура (рис. 3в). Последняя менее однородна в азимутальном направлении по сравнению со случаем, изображенным на рис. 3а, поэтому величина максимума  $M_2$  меньше  $M_1$ . Наиболее неоднородную динамику в азимутальном направлении РЭП демонстрирует при внешних МП, соответствующих рис. 3б и г, на которых представлены двойной и одинарный электронные вихри соответственно. Как следствие, выходная мощность принимает в данных случаях минимальные значения, которые соответствуют локальным минимумам зависимости  $P_{out}(B_0)$  слева и справа от максимума  $M_2$ . Дальнейший рост величины внешнего МП  $B_0 > 13$  кГс не ведет к увеличению выходной мощности, несмотря на подавление неоднородных азимутальных структур, – это следствие снижения эффективности взаимодействия ВК в электронном потоке с электромагнитными полями, обусловленного эффектом ограничения поперечной динамики РЭП возросшими внешними МП, которое было обнаружено в работе [13].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что зависимость выходной мощности релятивистского виркатора демонстрирует несколько локальных максимумов при изменении индукции внешнего однородного продольного магнитного поля. Характерные особенности поведения выходной мощности определяются условиями формирования виртуального катода под влиянием внешнего и собственного магнитных полей. Полученные результаты объясняют аналогичные ранее экспериментально полученные в [6] зависимости выходной мощности генерации релятивистского виркатора от величины внешнего магнитного поля.

Работа поддержана РФФИ (проекты № 12-02-33071, 12-02-00345, 12-02-31102 и 13-02-90406), Президентской программой поддержки молодых российских ученых – кандидатов и докторов наук (проекты МД-345.2013.2 и МК-818.2013.2), а также Министерством образования и науки Российской Федерации (Соглашения 14.В37.21.0764 и 14.В37.21.0903).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dubinov A.E., Selemir V.D. // J. Commun. Technol. Electron. 2002. V. 47. № 6. P. 575.
2. Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. Taylor and Francis: CRC Press, 2007.
3. Hramov A.E., Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Filatova A.E. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. № 11. P. 112101.

4. *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.
5. *Kostov K.G., Nikolov N.A.* // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. № 4. P. 1034.
6. *Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И. и др.* // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 4. С. 530.
7. *Jiang W., Kitano H., Huang L. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24. P. 187.
8. *Davis H.A., Fulton R.D., Sherwood E.G. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. V. 18. № 3. P. 611.
9. *Фролов Н.С., Короновский А.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А., Стародубов А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2012. Т. 76. № 12. С. 1485; *Frolov N.S., Koronovskii A.A., Hramov A.E., Kalinin Yu.A., Starodubov A.V.* // Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics. 2012. V. 76. № 12. P. 1329.
10. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A.* // Phys. Lett. A. 2010. V. 374. P. 3057.
11. *Куркин С.А.* // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 4. С. 1.
12. *Birdsall C.K., Langdon A.B.* Plasma physics, via computer simulation. N.Y.: McGraw-Hill, 1985.
13. *Egorov E.N., Hramov A.E.* // Phys. Rep. 2006. V. 32. № 8. P. 683.