

09;10

## **Влияние внешнего сигнала на выходную мощность генератора с электронной обратной связью**

© Н.С. Фролов, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
Саратовский государственный технический университет  
им. Ю.А. Гагарина  
E-mail: phrolovns@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 июля 2012 г.

Аналитически и численно исследована выходная мощность излучения генератора с электронной обратной связью при воздействии на него внешним одночастотным сигналом. Аналитически и численно показано, что при увеличении мощности входного сигнала наблюдается резкий рост выходной мощности неавтономного генератора. Проведен анализ физических процессов в электронном пучке с виртуальным катодом при воздействии на него внешнего сигнала, который приводит к скоростной модуляции входящего в пространство дрейфа потока. Полученные результаты находятся в хорошем соответствии с результатами проведенного ранее экспериментального исследования усиления сигналов в низковольтном виркаторе.

В настоящее время проводятся экспериментальные и теоретические исследования источников мощного СВЧ-излучения на основе электронных потоков с виртуальным катодом (ВК)-виркаторм [1–4]. Особенностью данных приборов является наличие отраженного от ВК электронного потока обратно к плоскости инжекции, обеспечивающего распределенную обратную связь в пучке, что позволяет трактовать такие устройства как генераторы с электронной обратной связью [5,6]. Известно, что виркаторы характеризуются высоким уровнем мощности, простотой конструкции, возможностью работы без внешнего магнитного поля [3,4], а также легкостью управления режимами колебаний либо за счет различных типов обратной связи [7,8], либо за счет подачи внешних сигналов [9–12]. В последнем случае существует возможность разработать эффективные методы управления виркатормой системой

внешним сигналом для использования виркаторов в качестве модулей многоэлементных мощных фазированных антенных решеток [13,14].

Одной из активно исследуемых модификаций генератора с электронной обратной связью является система, получившая название низковольтного виркатора, рассматриваемая как перспективный источник узкополосного и широкополосного хаотического сигнала в СВЧ-диапазоне [5,6,15–18]. Низковольтный виркатор представляет собой диодный промежуток, пронизываемый электронным потоком; ВК формируется за счет сил пространственного заряда пучка и торможения электронов путем подачи отрицательного относительно входной сетки напряжения на выходную сетку диодного промежутка.

Ранее было проведено экспериментальное исследование [17], в котором изучался вопрос об управлении низковольтным виркатом внешним сигналом и была показана возможность усиления внешнего сигнала пучком с ВК, однако теоретического объяснения этого эффекта дано не было. В представленной работе построена простая аналитическая теория генератора с электронной обратной связью под внешним воздействием и показана возможность увеличения выходной мощности неавтономного виркатора. Также представлены численно рассчитанные характеристики выходной мощности низковольтного виркатора, которые находятся в согласии с известными экспериментальными данными [17].

В качестве базовой модели низковольтного виркатора использована одномерная система, представляющая собой электронный поток, пронизывающий диодный промежуток (пространство взаимодействия), в котором создается отрицательная разность потенциалов между сетками, в результате чего в пучке образуется электронное уплотнение (ВК), от которого отражаются электроны. Вывод СВЧ-колебаний ВК осуществляется с помощью отрезка спирали, размещенного в области ВК [15–17]. Для введения в пучок внешнего сигнала между электронной пушкой и диодным промежутком с тормозящим полем размещается еще один отрезок спирали, на вход которой подается внешний гармонический сигнал и который приводит к модуляции входного пучка по скорости на входе пространства взаимодействия генератора. Изменение мощности входного сигнала приводит к изменению глубины скоростной модуляции потока на входе в пространство взаимодействия.

Известно, что ВК частично отражает электронный поток обратно к плоскости инжекции, а также модулирует его по плотности, поэтому

динамику пучка в виркаторе можно описать как движение потока заряженных частиц в тормозящем поле, в котором присутствует переменная составляющая. Таким образом, в качестве простой модели низковольтного виркатора рассмотрим пространство взаимодействия, образованное двумя сетками, между которыми существует тормозящее электроны электрическое поле, определяемое подаваемым на вторую сетку тормозящим потенциалом  $U_r$ . Также в межсеточном пространстве действует переменное электрическое поле, определяемое переменной разностью потенциалов  $U_m \cos(\omega_{VC}t)$ , которое моделирует колебания тормозящего поля нестационарного ВК с частотой  $\omega_{VC}$ . Воздействие внешнего сигнала может быть описано как скоростная модуляция входящего в межсеточное пространство электронного потока с частотой внешнего сигнала  $\omega_0$ . В простейшем случае частота  $\omega_0 = \omega_{VC}$ . Именно такой случай и рассматривается в данной работе.

В рамках рассматриваемой модели уравнение движения электрона имеет вид

$$\ddot{x} = \eta(U_m \cos(\omega_{VC}t) - U_r)/L, \quad (1)$$

где  $L$  — длина пространства взаимодействия,  $\eta$  — удельный заряд электрона. Уравнение (1) интегрируется со следующими начальными условиями  $t_0 = t_1$ ,  $x_0 = 0$ ,  $v(0, t_0) = v_0(1 + X \sin(\omega_m t_1))$ , где  $X$  — глубина скоростной модуляции, определяемая мощностью внешнего сигнала.

Интегрируя уравнение (1), находим траектории движения заряженных частиц:

$$x = v_0(1 + X \sin(\omega_0 t_1))(t - t_1) - \frac{\eta U_m}{\omega_0^2 L} e^{j\omega_0 t} - e^{j\omega_0 t_1} - j\omega_0 e^{j\omega_0 t_1}(t - t_1) - \frac{\eta U_r}{2L}(t - t_1)^2, \quad (2)$$

где учтено, что  $\omega_{VC} = \omega_0$ . Рассматривая точку возврата заряженных частиц, отраженных от ВК, как плоскость инжекции  $x = 0$ , умножая (2) на  $\omega_0/v_0$ , находим угол пролета  $\varphi$  заряженных частиц в пространстве взаимодействия низковольтного виркатора

$$\varphi(1 + X \sin(\omega_0 t_1)) = \mu(e^{j\varphi} - j\varphi - 1)e^{j\omega_0 t_1} + \beta\varphi^2, \quad (3)$$

где  $\mu = \eta U_m / \omega_0 L v_0$  и  $\beta = \eta U_r / 2L v_0$ . С учетом (3) выражение для сгруппированного тока может быть найдено из закона сохранения

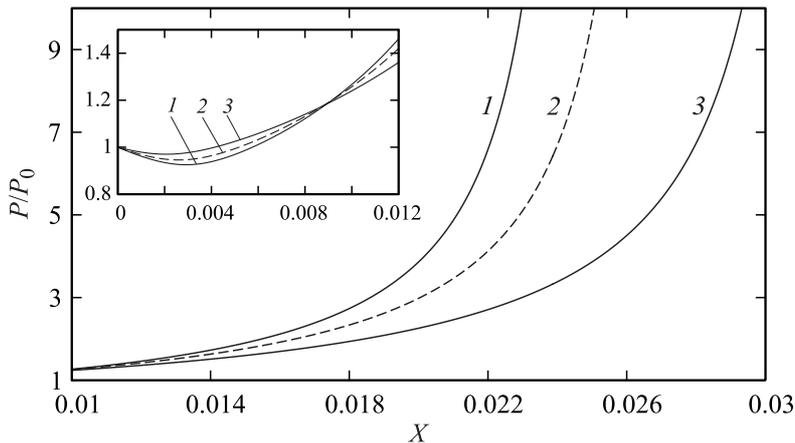
заряда:

$$I = I_0 \left( 1 + \frac{1}{\omega_0} \frac{d\varphi}{dt_1} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $I_0$  — невозмущенный ток пучка до пространства взаимодействия.

Таким образом, для нахождения сгруппированного тока необходимо решить уравнение (3) для угла пролета и использовать полученный результат в выражении (4). Выходная мощность генератора, снимаемая отрезком спирали и определяемая наведенным сгруппированным потоком полей, пропорциональна величине сгруппированного тока и ускоряющему напряжению  $P = kIU_0$ , где  $U_0$  — ускоряющее напряжение,  $k$  — коэффициент связи пучка с отрезком электродинамической системы.

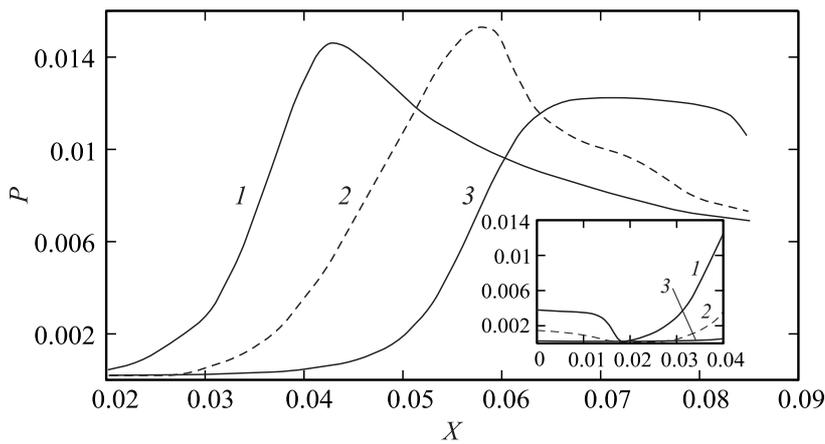
Анализ аналитической модели показывает, что выходная мощность генератора с электронной обратной связью растет с увеличением глубины модуляции потока на входе пространства взаимодействия (с увеличением мощности входного сигнала, модулирующего пучок по скорости во входной спирали виркатора). Это иллюстрирует рис. 1, на котором представлены зависимости аналитически рассчитанного усиления выходной мощности ( $P/P_0$ , где  $P_0$  — выходная мощность в автономном



**Рис. 1.** Аналитически рассчитанные зависимости усиления сгруппированного тока от параметра глубины модуляции для разных тормозящих потенциалов (1 —  $U_r = 0.45$ , 2 —  $U_r = 0.5$ , 3 —  $U_r = 0.6$ ). На врезке показано поведение коэффициента усиления при малой глубине модуляции.

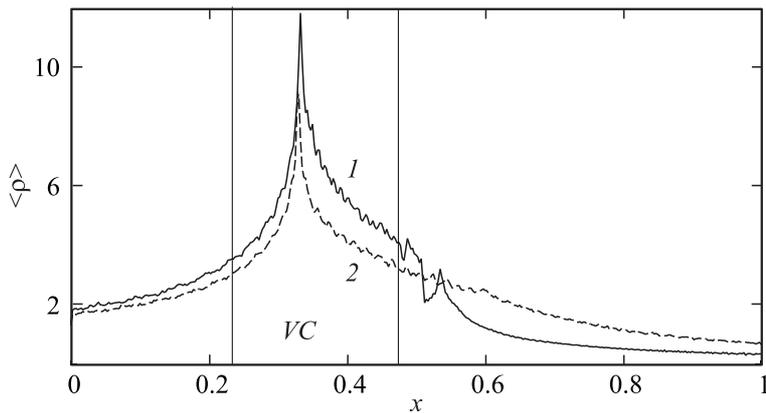
режиме) от глубины модуляции пучка на входе виркатора для разных тормозящих потенциалов. Значения управляющих параметров были выбраны соответствующими параметрам физической модели низковольтного виркатора [15]. Видно, что увеличение глубины модуляции  $X$ , пропорциональной амплитуде входного сигнала, влечет за собой возрастание мощности генерации за счет роста величины  $I$ , сгруппированного в области ВК тока. Аналитический расчет показывает, что усиление сигнала  $P/P_0$  в схеме низковольтного виркатора может достигать величин порядка 5–10 при экспериментально реализуемых амплитудах входного поля. Значительное увеличение мощности объясняется улучшением группировки потока в области ВК (а следовательно, и увеличением сгруппированного тока пучка) при скоростной модуляции потока, в то время как группировка потока только в поле колеблющегося ВК (при глубине модуляции  $X = 0$ ) мала. Следует отметить, что при  $X \ll 1$  наблюдается падение  $P/P_0$ , связанное с разгруппировкой потока (см. врезку на рис. 1). Далее с ростом  $X$  мощность начинает расти.

Полученные аналитические результаты были проверены в рамках численного анализа мощности генерации с помощью одномерной математической модели генератора с электронной обратной связью. Численная одномерная модель динамики электронного потока с ВК в тормозящем поле основывается на самосогласованном решении уравнения движения заряженных частиц и уравнения Пуассона [3]. Расчет плотности пространственного заряда осуществляется с помощью „частиц в ячейке“. Для моделирования ввода и вывода мощности в виде отрезков спирали используется метод эквивалентных схем [5]. На рис. 2 показана рассчитанная зависимость интегральной выходной мощности генератора от мощности входного сигнала для различных тормозящих потенциалов. Хорошо видно, что при малых амплитудах входного сигнала мощность выходного излучения ведет себя подобно зависимости выходной мощности, полученной в рамках простой аналитической теории. Анализ пространственно-временных диаграмм потока показывает, что в этом случае в системе с ростом глубины предварительной модуляции пучка имеет место улучшение группировки потока и формирование более плотного сгустка в области ВК. Следует отметить, что, как и предсказывает аналитическая теория, выходная мощность  $P$  растет медленнее для больших величин тормозящего потенциала.



**Рис. 2.** Численно рассчитанные зависимости интегральной выходной мощности генератора от параметра глубины модуляции для разных тормозящих потенциалов ( $1 - U_r = 0.45$ ,  $2 - U_r = 0.5$ ,  $3 - U_r = 0.6$ ). На врезке показано поведение коэффициента усиления при малой глубине модуляции.

Однако в отличие от результатов аналитической теории численное моделирование показывает, что при определенной величине входной мощности (глубине модуляции потока) выходная мощность испытывает насыщение и далее с ростом амплитуды внешнего поля начинает уменьшаться. С увеличением торможения выходная мощность достигает максимума при больших значениях входной мощности (больших коэффициентах модуляции). Возникновение падающего участка на зависимости выходной мощности от входной связано с сильной начальной модуляцией электронного потока по скорости при больших входных сигналах, что вызывает разрушение плотного электронного сгустка в области ВК, а также увеличение пролетного тока через ВК ко второй сетке за счет ускоренных в модуляторе частиц, которые преодолевают потенциальный барьер ВК. Последнее также приводит к уменьшению плотности пространственного заряда, а следовательно, и величины сгруппированного тока в области ВК. Это иллюстрирует рис. 3, на котором показана усредненная плотность пространственного заряда  $\langle \rho \rangle$  для мощностей входного сигнала, соответствующих максимуму выходной



**Рис. 3.** Распределение средней плотности пространственного заряда в пространстве взаимодействия для  $U_r = 0.45$  для различной степени внешнего воздействия (1 —  $X = 0.045$  (вблизи максимума мощности), 2 —  $X = 0.085$  (участок падения мощности)).

мощности (кривая 1) и области падения выходной мощности (кривая 2). Видно, что во втором случае плотность заряда в области ВК меньше, т. е. ВК не столь хорошо сформирован из-за вышеописанных эффектов динамики пространственного заряда.

Простая аналитическая теория не может описать эффекты, связанные с увеличением токопрохождения потока через область ВК за счет роста глубины предварительной модуляции, так как в ее рамках предполагается, что весь электронный поток отражается от ВК обратно к плоскости инжекции. Поэтому в рамках аналитической теории возможно описать рост выходной мощности с увеличением амплитуды внешнего сигнала, но дальнейшее сложное поведение амплитудной характеристики виркатора с помощью данной теории описать уже невозможно и требуется численное моделирование.

Заметим, что полученные результаты находятся в хорошем качественном и количественном согласии с результатами, полученными в эксперименте в работе [17]: при повышении мощности внешнего воздействия в эксперименте наблюдался быстрый рост выходной мощности генератора, который превышал мощность автономной генерации

примерно в 5 раз. Далее мощность генерации достигала максимального значения и спадала с дальнейшим ростом мощности внешнего гармонического сигнала аналогично тому, как это показано на рис. 2. В данной работе мы не останавливаемся на вопросах управления спектральными характеристиками генерации низковольтного виркатора. Отметим только, что целый ряд закономерностей, обнаруженных в работе [12], подтверждается в рамках нашего исследования. В частности, низковольтный виркатор практически сразу начинал генерировать излучение на частоте внешнего гармонического воздействия.

Таким образом, в работе предложена аналитическая модель, которая на качественном уровне описывает динамику электронного потока с ВК при воздействии на него внешнего гармонического сигнала и объясняет физические процессы, определяющие возрастание выходной мощности (коэффициента усиления) низковольтного виркатора при увеличении мощности внешнего воздействия. Проведенное численное моделирование и результаты аналитического рассмотрения находятся в хорошем соответствии друг с другом и результатами ранее проведенного экспериментального исследования усиления сигналов в генераторе с электронной обратной связью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 12-02-00345 и 12-02-90022), а также ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг.

## Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перельгин С.Ф., Фоменко Г.П. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5(6). С. 321.
- [2] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РиЭ. 2002. Т. 47(6). С. 575.
- [3] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
- [4] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
- [5] 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.
- [6] Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A. // Phys. Lett. A. 2010. V. 374. P. 3057.

- [7] Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И. и др. // Физика плазмы. 1993. V. 19(4). С. 530.
- [8] Храмов А.Е. // РИЭ. 1999. V. 44(1). С. 116.
- [9] Woo W., Benford J., Fittinghoff D. et al. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65(2). P. 861.
- [10] Sze H., Price D., Harteneck B. // J. Appl. Phys. 1990. V. 67(5). P. 2278.
- [11] Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69(12). С. 1736.
- [12] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 13. С. 17.
- [13] Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Степанов Н.В. и др. // Антенны. 2001. Т. 3(49). С. 6.
- [14] Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Царев А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. XLIII(8). С. 709.
- [15] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. и др. // Физика плазмы. 2005. Т. 31(11). С. 1009.
- [16] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69(12). С. 1724.
- [17] Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32(13). С. 88.
- [18] Lukin K.A. // Telecommunications and Radio Engineering. 2001. V. 55. P. 2440.