

13
Формирование высших гармоник в спектре выходного сигнала генератора с турбулентным электронным пучком

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов,[¶] А.С. Фокин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

[¶] e-mail: StarodubovAV@gmail.com, alexander1989fokin@mail.ru

(Поступило в Редакцию 8 августа 2016 г.)

Представлены результаты численного моделирования и экспериментального исследования формирования электронных сгустков в турбулентных электронных пучках, предложена и исследована конструкция лабораторного макета генератора, определены управляющие параметры, такие как разброс электронов по продольным скоростям и величина дополнительного торможения электронного пучка электростатическим полем коллектора, влияющие на характеристики электронных сгустков и обеспечивающие рост числа и амплитуды высших гармонических составляющих в спектре выходного излучения.

DOI: 10.21883/JTF.2017.08.44734.2020

Введение

Актуальными задачами современной вакуумной СВЧ электроники являются повышение уровня выходной мощности и переход в более коротковолновую область излучения [1–3]. Одним из способов повышения рабочей частоты является работа на i -й гармонике. Подобный подход достаточно хорошо известен и используется, в частности, в гиротронах [4–6]. Также известны работы, посвященные исследованию эффектов, приводящих к генерации высших гармоник в релятивистских системах с виртуальным катодом [7] и в турботроне [8], использующем осцилляции турбулентного пучка между катодом и виртуальным катодом. В связи с этим определенный интерес представляет исследование применения данного способа повышения рабочей частоты в генераторах с турбулентным электронным пучком. Такие приборы используют собственную сложную динамику электронного пучка и являются перспективным классом современных СВЧ приборов, поскольку характеризуются простотой конструкции, имеют широкие возможности перестройки режимов работы и могут рассматриваться, в частности, как компактные нерелятивистские источники микроволнового излучения малого и среднего уровней мощности [9].

В основе большинства нелинейных явлений, приводящих электронные потоки к турбулентным, на наш взгляд, лежит разброс электронов по скоростям как в прикатодной области (начальный разброс электронов по скоростям), так и в области пространства дрейфа за счет воздействия электрических и магнитных полей различной конфигурации [10,11]. Такие многоскоростные электронные пучки быстро становятся неустойчивыми. В многоскоростном пучке распределения продольных $V_z(r, z, \varphi, t)$, поперечных $V_r(r, z, \varphi, t)$ и угловых $V_\varphi(r, z, \varphi, t)$ скоростей электронов приобретает сильно неоднородный характер, и, как следствие, в сечении пучка формируются электронные структуры с неодно-

родной плотностью $n(r, z, \varphi, t)$. Как было показано ранее в экспериментальных работах, между такими электронными структурами (сгустками) происходит перекачка энергии [10], а электронные потоки, в которых формируются такие самоподдерживающиеся взаимодействующие электронные структуры, были названы турбулентными. Строгое математическое описание явления турбулентности представляет собой сложную задачу и в каждом конкретном случае требует особого подхода. Один из подходов к описанию предполагает построение феноменологической модели, в которой электронные сгустки рассмотрены как „взаимодействующие электронные вихри“. Указанная попытка описания динамики турбулентного электронного пучка была проведена в работе [12].

Отметим, что в связи с созданием вакуумных генераторов шумовых и хаотических колебаний СВЧ появилась проблема в понимании возникновения таких колебаний и их связи с турбулентностью электронных потоков. Работ, в которых рассматривается собственно турбулентность электронных потоков, крайне мало. Один из возможных вариантов проведения структуризации подходов к описанию турбулентных явлений в электронных потоках предпринят в работе [13], следуя которой, работы, посвященные указанному явлению, можно условно разбить на три группы. К первой группе относят результаты работ по неламинарным электронным потокам, в которых турбулентность обусловлена пересечением траекторий электронов, например, из-за тепловых скоростей. В работах второй группы возникновение турбулентности объясняется неустойчивостью малых возмущений в электронных потоках, которые нарастают экспоненциально, а при достижении больших амплитуд приводят к турбулентности. В третью группу выделяют работы, в которых рассматривается вихревая турбулентность или, более обще, турбулентность, связанная с образованием когерентных структур в потоке электронов и их взаимодействием. Более подробно каж-

дый из подходов к описанию турбулентности в электронных потоках рассмотрен в уже упомянутой работе [13].

Отметим, что разброс продольных $V_z(r, z, \varphi, t)$, поперечных $V_r(r, z, \varphi, t)$ и угловых $V_\varphi(r, z, \varphi, t)$ скоростей электронов может быть обеспечен следующими факторами: работой катода в режиме температурного ограничения (значительный разброс тепловых скоростей электронов); одиночной сеткой, работающей в режиме превышения естественного потенциала ($U > U_{\text{nat}}$); двойной сеточной структурой [11]; потенциалом управляющего электрода, создающего трансляционный слой [14]; разбросом электронов по скоростям из-за провисания потенциала по сечению пучка $\Phi(r, z)$. Изменение этих параметров приводит к изменению таких характеристик электронных сгустков, как их форма, протяженность и мгновенное значение плотности тока по сравнению со значением плотности тока на входе в пространство взаимодействия. В частности, в рамках феноменологической модели электронных вихрей происходит изменение пространственно-временных масштабов вихрей. Отметим, что электронный сгусток представляет собой импульс тока, содержащий набор гармонических составляющих, амплитуды которых определяются формой этого импульса [15]. Таким образом, при наличии эффективного широкополосного съемника энергии спектральный состав выходного излучения будет определяться параметрами формирующихся в пространстве дрейфа электронных сгустков.

Целью настоящей работы является рассмотрение факторов, позволяющих сформировать такие электронные сгустки, которые, в свою очередь, способствовали бы возрастанию амплитуды высших гармоник в спектре выходного сигнала генератора с турбулентным электронным пучком.

Исследуемая система

Исследуемая система представляет собой макет генератора с турбулентным электронным пучком, принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Питание

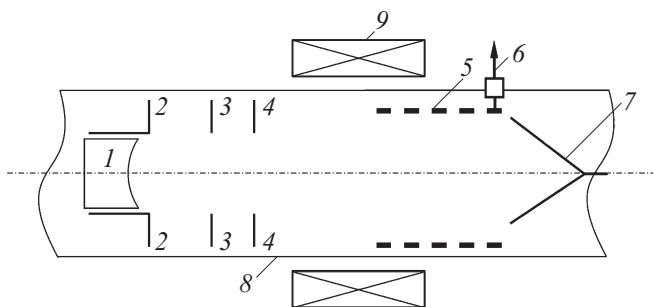


Рис. 1. Принципиальная схема исследуемого макета генератора: 1 — катод, 2 — управляющий электрод, 3 — первый анод, 4 — второй анод, 5 — съемник энергии в виде спирали, 6 — коаксиальный вывод энергии, 7 — коллектор, 8 — труба дрейфа, 9 — магнитная система.

лабораторного макета осуществляется в непрерывном режиме. Основными параметрами, управляющими динамикой исследуемой системы, выступают потенциал на управляющем электроде U_{ctrl} , определяющий величину скоростного разброса электронов в пучке, ускоряющее напряжение на первом аноде (U_1), напряжение на втором (U_2) аноде и напряжение на коллекторе U_{col} , которое создает тормозящее электростатическое поле, воздействующее на электронный пучок, эмитируемый с катода. Управляющий электрод действует на периферийные электроны и за счет потенциала (ниже ускоряющего) создает трансляционный слой, в котором увеличивается разброс продольных скоростей электронов за счет увеличения поперечных скоростей. Величина разброса продольных скоростей достигает значений $\Delta v_{\parallel}/v = 0.2-0.3$ [16]. Регистрация мощности колебаний электронного пучка обеспечивается отрезком спирали. Выбор такого съемника энергии обусловлен необходимостью обеспечить максимально широкополосную регистрацию генерируемой СВЧ мощности. За счет подбора напряжения на коллекторе обеспечивается торможение электронного потока. При торможении многоскоростного пучка электростатическим полем коллектора имеет место формирование отраженного потока электронов от области коллектора. В точках разворота электронных пучков скорость электронов минимальна, соответственно в данных областях образуются области с максимальным разбросом электронов по скоростям и максимальным значением плотности тока, но так как в рассматриваемых электронных пучках изначально присутствует разброс электронов по скоростям, области разворота формируются не в одной плоскости, а эти области пространственно распределены, таким образом существенно усиливаются эффекты турбулизации электронного потока. Отметим, что исследуемая система помещалась в статическое магнитное поле, величина которого также является одним из управляющих параметров. Для измерения амплитуды гармоник выходного сигнала был использован цифровой анализатор спектра Agilent Technologies E44008B ESA-L, рассчитанный на работу в диапазоне 9 kHz–26.5 GHz.

Результаты численного моделирования

Численное моделирование движения турбулентных электронных пучков проводилось по методике, описанной в [17]. Рассчитывались траектории электронов $R(Z)$ и распределение плотности тока вдоль трубы дрейфа $P(Z)$, где R — радиальная координата, нормированная на радиус трубы дрейфа, Z — продольная координата, нормированная также на радиус трубы дрейфа, значение плотности тока P нормировалось на начальное значение плотности тока на входе в трубу дрейфа $P_0 = I/\pi R_0^2$. Моделирование показало, что в трубе дрейфа формируется пульсирующий электронный поток, значение плотности тока в котором периодически

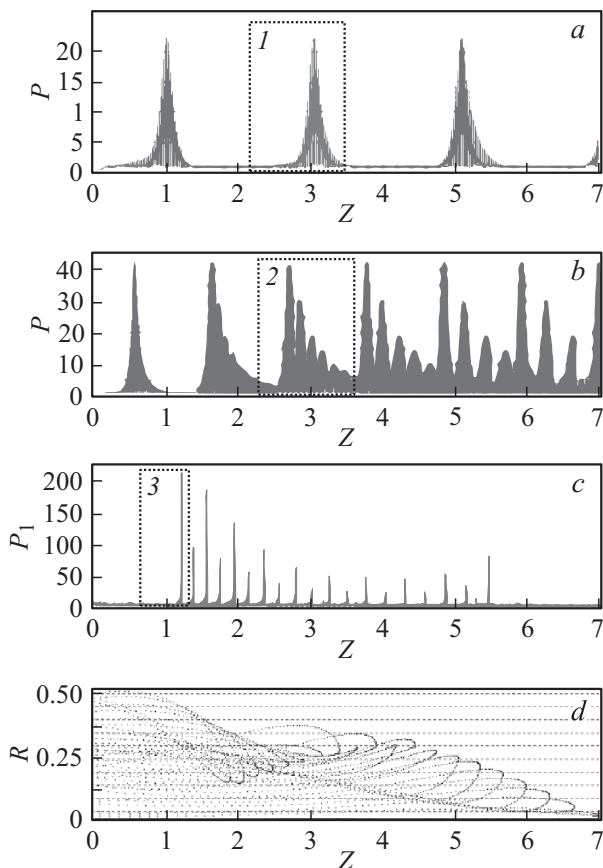


Рис. 2. Результаты численного моделирования. Вид распределения плотности тока в пучке без скоростного разброса электронов (*a*), с наличием скоростного разброса (*b*), со скоростным разбросом и торможением (*c*). Траектории электронов в пучке с разбросом и торможением (*d*).

изменяется вдоль трубы дрейфа за счет приложенного внешнего магнитного поля (рис. 2, *a*). При наличии дополнительного скоростного разброса электронов из-за различия условий, воздействующих на приосевые и периферийные электроны, период пульсаций для этих электронов оказывается разным, в результате чего траектории перемешиваются, а вместо одиночных протяженных сгустков типа 1, показанных на рис. 2, *a*, формируются сгустки типа 2, показанные на рис. 2, *b*, что соответствует распаду одиночного сгустка на структуры более высокого порядка. Таким образом, пульсирующий характер движения переходит в турбулентный. В случае введения дополнительного торможения пучка электростатическим полем коллектора пучок окончательно утрачивает пульсирующий характер и в нем формируются более плотные и компактные сгустки типа 3, показанные на рис. 2, *c*. Структура электронного потока при этом показана на рис. 2, *d*.

Фурье-анализ функций, описывающих распределение плотности тока (форму сгустка), позволяет сделать качественные выводы относительно спектрального состава генерируемых при этом СВЧ колебаний. Полученные

результаты фурье-анализа импульсов различной формы приведены на рис. 3, где показаны спектры и соответствующие им формы сгустков. Результаты фурье-анализа для распределений плотности тока различной формы, соответствующих случаям без разброса электронов по скоростям, с наличием разброса электронов по скоростям, а также с наличием разброса электронов по скоростям и дополнительным торможением электронного пучка, позволили установить, что возрастание амплитуды высших гармоник происходит в результате перехода от сгустка типа 1, к сгустку типа 2 и далее, с введением торможения электронного пучка, к сгустку типа 3. Определяющими факторами для формы спектра, таким образом, являются расстояния между отдельными сгустками ΔL и протяженности самих сгустков ΔZ , а также их количество N . Первый параметр ΔL влияет только на форму спектра, т.е. на распределение локальных максимумов на определенных гармониках, причем он начинает играть роль только в случае, когда расстояние между сгустками становится меньше, чем протяженность самих сгустков $\Delta L \leq \Delta Z$. Параметр ΔZ оказывает определяющее влияние на амплитуду прежде всего высших гармоник. Увеличение числа сгустков N влияет на амплитуду всех гармоник в целом, не меняя при этом форму спектра, если $\Delta L \geq \Delta Z$.

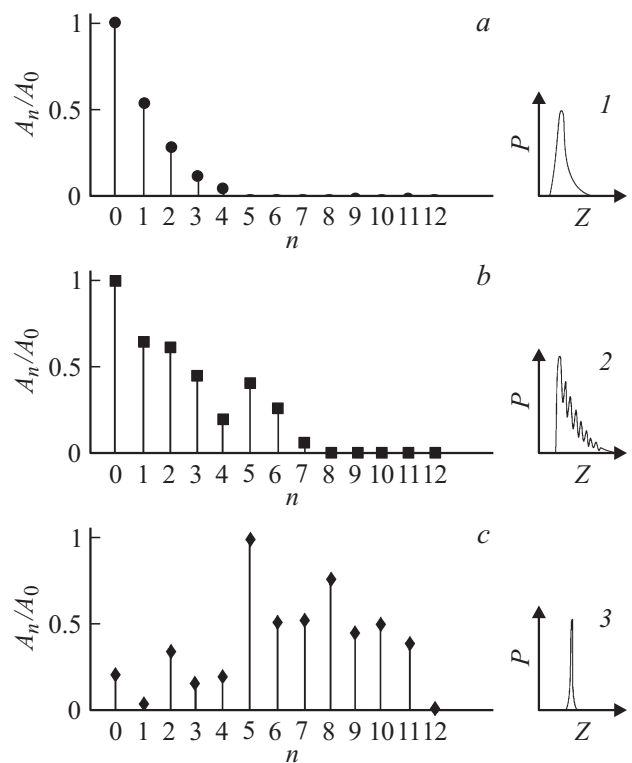


Рис. 3. Спектр, соответствующий случаю без разброса электронов по скоростям и торможения (тип 1 сгустка) (*a*); с разбросом без торможения (тип 2 сгустка) (*b*); с торможением и разбросом (сгусток типа 3) (*c*). Справа от спектров приведены формы сгустков, которым эти спектры соответствуют.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что для повышения амплитуды высших гармоник в спектре выходного сигнала необходимо формировать в первую очередь компактные сгустки (величина ΔZ должна быть как можно меньше).

Результаты экспериментального исследования

В экспериментальном лабораторном макете управление величиной скоростного разброса электронов и динамикой турбулентного пучка осуществляется за счет формирования трансляминарного слоя [14] посредством изменения потенциала на управляющем электроде. Диапазон изменения составляет $U_{ctrl} = -190 \text{--} -40 \text{ V}$. Было установлено, что оптимальным для формирования в спектре наибольшего числа гармоник является значение $U_{ctrl} = -40 \text{ V}$, при этом пучок также испытывал дополнительное торможение в трубе дрейфа, обеспечиваемое за счет потенциала коллектора. Ускоряющее напряжение было выбрано фиксированным $U_0 = 830 \text{ V}$. Ток пучка I изменялся в диапазоне от 15 до 38 мА. Потенциал спирального съемника энергии равен ускоряющему потенциалу U_0 . Система помещалась в статическое магнитное поле амплитудой $B = 0.05 \text{ T}$. В спектре выходного сигнала при этом наблюдалась генерация 13 гармоник. При частоте первой гармоники $f_0 = 424 \text{ MHz}$ максимальная рабочая частота, таким образом, составила $f = 5.52 \text{ GHz}$. Большие отрицательные напряжения на управляющем электроде ($U_{ctrl} \ll -190 \text{ V}$) ограничивают ток пучка и уменьшают значение плотности тока в нем. Напротив, при $U_{ctrl} \gg -40 \text{ V}$ трансляминарный слой в пучке не образуется, в результате чего величина разброса электронов по скоростям в пучке оказывается не достаточной для формирования плотных сгустков.

Результаты исследования влияния разности потенциалов на управляющем электроде на спектр выходного сигнала и формирование высших гармоник приведены на рис. 4. На рисунке квадратами обозначен вид гармоник в спектре выходного излучения генератора в случае оптимальных величин разброса электронов по скоростям и торможения электронного пучка, при

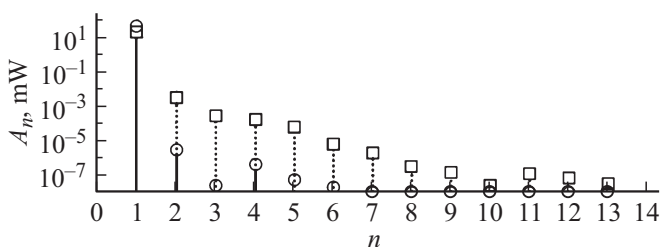


Рис. 4. Амплитуды гармоник: квадратный маркер — оптимальная величина скоростного разброса электронов в пучке и торможения ($U_{ctrl} = -40 \text{ V}$); круглый маркер — неоптимальная величина скоростного разброса электронов в пучке ($U_{ctrl} < -40 \text{ V}$) без торможения.

которых обеспечивается генерация максимального числа гармоник в спектре выходного сигнала (тринадцать) и их амплитуда максимальна, а кружками обозначен вид гармоник в спектре выходного излучения генератора в случае неоптимальной величины скоростного разброса электронов ($U_{ctrl} < -40 \text{ V}$) и при отсутствии торможения. Значение КПД лабораторного макета генератора, вычисленное по интегральной мощности в режиме генерации высших гармоник, составило $\eta = 0.7\%$. Очевидно, что при работе на старших гармониках эффективность генератора будет резко, экспоненциально падать на несколько порядков. Это вызвано прежде всего отсутствием подходящего съемника энергии. К первоочередному направлению оптимизации конструкции генератора, настроенного на работу на одной из высших гармоник, можно отнести подбор соответствующего съемника энергии. Например, использование резонатора, настроенного на соответствующие частоты, позволит увеличить генерируемую мощность до уровня, пригодного для последующего усиления и использования. Кроме того, вместо управляющего электрода также можно ввести конструкцию с двойной сеткой, предложенную в [11], которая позволяет управлять спектром скоростей электронов, распространяющихся через данную структуру.

Выводы

Таким образом, в ходе проведенных исследований предложен способ формирования электронных сгустков в турбулентных пучках, обладающих характеристиками, способствующими росту амплитуды высших гармоник в спектре выходного излучения. Кроме того, предложена конструкция генератора, обеспечивающая формирование указанных выше сгустков электронов. В конструкции генератора используется создание в электронном пучке дополнительного скоростного разброса за счет введения управляющего электрода, а также подбора необходимой величины напряжения, способствующей формированию трансляминарного слоя электронов, при одновременном наличии торможения пучка электростатическим полем коллектора. Результаты численного моделирования показывают качественное соответствие экспериментально полученным результатам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-02-00238-а), а также Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части государственного задания (проект № 3.859.2017/4.6).

Список литературы

- [1] Abrams R.H. et al. // IEEE Microwave Magazine. Sept. 2001. P. 61–72.
- [2] Booske J.H. // Phys. Plasm. 2008. Vol. 15. P. 055502.
- [3] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.

- [4] *Saito T., Yamada N., Ikeuti S.* // Phys. Plasm. 2012. Vol. 19. P. 063106.
- [5] *Tsimring S.E.* Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. A John Wiley and Sons, 2007.
- [6] *Notake T., Saito T., Tatematsu Y., Fujii A., Osagawara S., La Agusu, Ogawa I., Idehara T., Manuilov V.N.* // PRL. 2009. Vol. 103. P. 225002.
- [7] *Куркин С.А., Бадарин А.А., Короновский А.А., Рак А.О., Храмов А.Е.* // Изв. вузов ПНД. 2015. Т. 23. № 1. С. 41–52.
- [8] *Brandt H.E.* // IEEE Trans. Plasm. Sci. 1985. Vol. 13. P. 513.
- [9] *Kalinin Yu.A., Starodubov A.V.* // Phys. Wave Phenomena. 2011. Vol. 19. N 1. P. 18–23.
- [10] *Калинин Ю.А., Стародубов А.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 12. С. 80–85.
- [11] *Kalinin Yu.A., Starodubov A.V., Fokin A.S.* // Phys. Wave Phenomen. 2012. V. 20. N 3. P. 193–198.
- [12] *Kalinin Yu.A., Kildyakova O.A., Starodubov A.V., Trubetskoy D.I.* // Doklad. Phys. 2016. Vol. 61. N 3. P. 112–115.
- [13] *Трубецков Д.И., Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Фокин А.С.* // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24. № 5. С. 4–36.
- [14] *Алямовский И.В.* Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
- [15] *Дулин В.Н.* Электронные и квантовые приборы СВЧ. Учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 2-е, перераб. М.: Энергия, 1972. 224 с.
- [16] *Kalinin Yu.A., Starodubov A.V., Fokin A.S.* Study of the spread of electron velocities in the multi-velocities electron beams. 23rd Int. Crimean Conf. „Microwave & Telecommunication Technology“ (CriMiCo’2013), Sevastopol, Crimea, Ukraine.
- [17] *Калинин Ю.А., Волкова Л.Н.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 14. С. 65–72.