

Оптимизация параметров генератора на виртуальном катоде с неоднородным магнитным полем

© С.А. Куркин,^{1,2} А.А. Короновский,^{1,2} А.Е. Храмов,^{1,2} А.А. Кураев,³ С.В. Колосов³

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

² Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 410054 Саратов, Россия

³ Белорусский государственный университет информатики и электроники, 220013 Минск, Белоруссия
e-mail: KurkinSA@gmail.com

(Поступило в Редакцию 22 июня 2012 г. В окончательной редакции 22 января 2013 г.)

В рамках двумерной численной модели проведено исследование генерации мощного СВЧ-излучения в виркаторе с неоднородным внешним фокусирующим пучком магнитным полем. Обнаружено сильное влияние характеристик внешнего неоднородного магнитного поля на характеристики генерации виркатора. С использованием методов математической оптимизации проведен поиск оптимальных параметров магнитной периодической фокусирующей системы генератора для достижения максимальной мощности выходного СВЧ-излучения. Исследованы зависимости выходной мощности виркатора от характеристик внешнего неоднородного магнитного поля вблизи оптимальных значений управляющих параметров. Изучены физические процессы, происходящие в оптимизированных генераторах с виртуальным катодом.

Введение

Исследование нелинейных нестационарных процессов в распределенных активных средах, содержащих электронные потоки, взаимодействующие с электромагнитными полями, является одной из важных задач современной СВЧ-электроники больших мощностей [1–5]. Данные исследования имеют несомненное фундаментальное значение, связанное с выявлением общих закономерностей нелинейных нестационарных процессов в пучковых активных системах, с анализом физических процессов в распределенных автоколебательных средах, содержащих потоки заряженных частиц, взаимодействующие с электромагнитными полями электродинамических систем. Весьма важным представляется и прикладное значение подобных теоретических работ, так как они позволяют провести физическую и математическую оптимизацию характеристик существующих устройств и предложить новые модификации мощных приборов СВЧ-диапазона, которые будут иметь новые функциональные возможности.

Особое внимание в данном направлении уделяется генераторам на основе интенсивных электронных потоков с виртуальным катодом, которые могут рассматриваться как перспективные источники широкополосного излучения с шириной полосы порядка октавы и слабоизрезанным частотным спектром [5–11]. Такие генераторы хаотического излучения в СВЧ-диапазоне (получившие также название генераторов с электронной обратной связью [1,12–14] представляют собой перспективные и важные устройства современной СВЧ-электроники для целей телекоммуникации с использованием хаотических сигналов [15–17], шумовой радиолокации [18], модулей

нелинейных антенн [19], могут быть использованы в различных технологических процессах, например, для очистки нефти [20] и т.д. В настоящее время достигнуты определенные успехи в понимании принципов работы подобных устройств с электронной обратной связью, проведены как теоретические, так и экспериментальные исследования нового класса генераторов [11,13,21–26].

К нерешенным задачам тут следует отнести анализ различных режимов работы генераторов на виртуальном катоде и оптимизацию их параметров для получения необходимых характеристик одночастотного, узкополосного или широкополосного хаотического выходного СВЧ-излучения. Одной из центральных здесь является задача увеличения выходной мощности генерации, а также КПД генератора на виртуальном катоде, который для стандартной схемы виркатора достаточно мал [6,27–29]. Одним из решений данной задачи является оптимизация параметров внешней магнитной системы, фокусирующей пучок, так как известно, что величина и конфигурация внешнего магнитного поля оказывают сильное влияние на динамику пучка с виртуальным катодом [27,30–42]. Для решения задачи оптимального управления процессом взаимодействия электронного потока с виртуальным катодом с электромагнитными полями полезно привлечь методы оптимизации физических процессов, протекающих в электронных потоках, хорошо разработанные в электронике СВЧ [43–46]. Можно выделить 2 качественно различных подхода к оптимизации СВЧ приборов и протекающих в них процессов: 1) физическую оптимизацию, 2) математическую оптимизацию.

Первый подход базируется на изучении физических процессов, происходящих в устройстве, и на управлении

данными процессами на основе полученных знаний об особенностях механизмов генерации электромагнитного излучения в приборе. Данный подход является весьма эффективным, однако его реализация является сложной частной задачей, не имеющей общих способов решения. При проведении математической оптимизации, напротив, используются стандартные, хорошо разработанные математические методы оптимизации (вариационные методы, градиентные методы, статистические методы и др.). Однако они могут быть использованы только для поиска параметров прибора, при которых достигается определенная цель (например, максимальная мощность выходного излучения или КПД), но не для качественной оптимизации устройства, как это происходит при проведении физической оптимизации. Таким образом, наилучшим комплексным подходом к оптимизации прибора является одновременное использование двух выше-названных подходов.

В настоящей работе приведены результаты численного исследования влияния внешнего неоднородного магнитного поля на динамику виртуального катода в генераторе и результаты оптимизации параметров магнитной периодической фокусирующей системы виркатора для достижения максимальной мощности выходного СВЧ-излучения. Исследованы физические процессы, протекающие в оптимизированных модификациях генератора. Также рассматриваются особенности динамики электронного потока с виртуальным катодом при изменении параметров внешнего магнитного поля.

1. Исследуемая модель

Генератор на виртуальном катоде с неоднородным внешним магнитным полем состоит из следующих основных частей: источника электронов (электронной пушки), пространства дрейфа, изображенного на рис. 1 в виде отрезка I цилиндрического волновода длиной L и радиусом R ; коллектора электронов отработанного пучка, магнитной системы 2 (в данном случае рассматривается периодическая магнитная система, состоящая из кольцевых магнитов), а также электродинамического элемента 3 , предназначенного для вывода СВЧ-мощности (генерируемого сигнала) из пространства взаимодействия [1].

В качестве источника электронного потока выступает электронная пушка с изолированным от магнитного поля термокатодом, формирующая аксиально-симметричный электронный поток на входе в пространство взаимодействия [47]. Сформированный сплошной моноскоростной электронный пучок 4 с током I и скоростью v_0 инжектируется в пространство взаимодействия через левую (входную) сетку 5 и выводится через правую (выходную) сетку 6 на коллектор, электроны также могут оседать на боковой стенке пространства взаимодействия. Обозначим внешний радиуса пучка

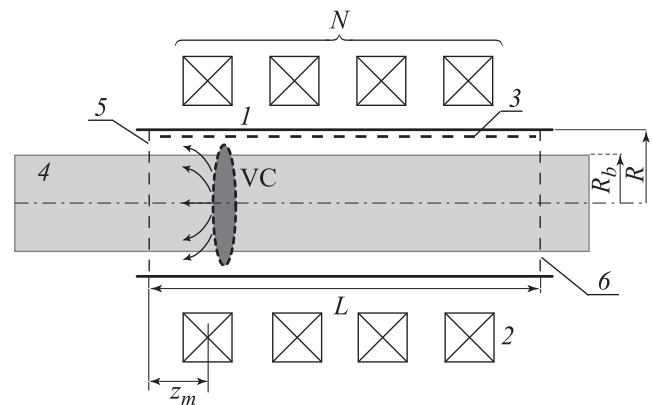


Рис. 1. Схема исследуемого генератора на виртуальном катоде. Здесь I — цилиндрическое пространство дрейфа, 2 — магнитная периодическая фокусирующая система, 3 — широкополосная спиральная электродинамическая система, используемая для вывода выходного сигнала, 4 — сплошной электронный пучок, 5 и 6 — входная и выходная сетки.

как R_b и введем геометрический параметр электронного пучка $\sigma = R_b/R$.

Для вывода мощности в исследуемой модели используется отрезок широкополосной электродинамической системы 3 (обычно отрезок спирали, обладающей широкой полосой частот и большим сопротивлением связи).

Вдоль оси пространства дрейфа, в котором формируется виртуальный катод (VK), прикладывается внешнее фокусирующее неоднородное в пространстве магнитное поле, создаваемое магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС) 2 , состоящей из N магнитных колец. На оси системы распределение в пространстве дрейфа продольной компоненты магнитного поля можно записать в следующем виде: $B_z(z, 0) = B_0 b(z)$, где B_0 — параметр МПФС, определяемый как максимальная величина магнитного поля на оси симметрии системы. При этом внешнее магнитное поле характеризуется как продольной, так и поперечной составляющими, в то время как азимутальная составляющая в силу аксиальной симметрии системы равна нулю. Расположение МПФС в пространстве характеризуется координатой первого магнита фокусирующей системы z_m . В настоящей работе число магнитных колец МПФС менялось в диапазоне $N = 0-4$, так как исследования показали, что дальнейшее увеличение числа магнитных колец не оказывает значительного влияния на динамику виркатора.

Для описания процессов в генераторе с электронной обратной связью будем использовать нестационарную двумерную модель динамики электронного потока в пространстве взаимодействия и программный комплекс на ее основе, подробно описанные в работе [12]. Модель основана на решении самосогласованной системы уравнений движения заряженных частиц для моделирования динамики электронного пучка и уравнения Пуассона для нахождения самосогласованного поля пространственно-

го заряда [48,49]. Следует заметить, что в рамках используемой в работе математической модели исследуются только слаборелятивистские электронные потоки, т.е. потоки, для которых $\gamma_0 = 1/(1 - (v_0/c)^2) < 3$.

В уравнениях, описывающих динамику электронного пучка, используются следующие безразмерные величины потенциала φ , напряженности E поля пространственного заряда, индукции B внешнего магнитного поля, плотности ρ , скорости v и импульса P электронов, а также пространственных координат z и r , времени t :

$$\varphi' = \frac{v_0^2}{\eta_0} \varphi, \quad E' = \frac{v_0^2}{L\eta_0} E, \quad B' = \frac{v_0}{L\eta_0} B, \quad \rho' = \rho_0 \rho,$$

$$v' = v_0 v, \quad P' = m_e v_0 P, \quad z' = Lz, \quad r' = Lr, \quad t' = \frac{L}{v_0} t, \quad (1)$$

где штрихом обозначены соответствующие размерные величины, $\eta_0 = e/m_e$ — удельный заряд покоящегося электрона, v_0 и ρ_0 — независимые от радиуса статические (невозмущенные) скорость и плотность электронного потока на входе в систему, L — длина пространства взаимодействия.

Численное моделирование нестационарных процессов в электронном пучке при инжекции его в пространство дрейфа проводится методом крупных частиц. Для каждой заряженной крупной частицы решаются уравнения движения, записанные через компоненты ее импульса, которые в цилиндрических координатах в безразмерных величинах (1) принимают следующий вид:

$$\frac{dP_{ri}}{dt} - \gamma(z_i, \theta_i, r_i) r_i \left(\frac{d\theta_i}{dt} \right)^2 = -E_r - r_i B_z \frac{d\theta_i}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{dP_{\theta i}}{dt} + \gamma(z_i, \theta_i, r_i) \frac{dr_i}{dt} \frac{d\theta_i}{dt} = B_z \frac{dr_i}{dt} - B_r \frac{dz_i}{dt}, \quad (3)$$

$$\frac{dP_{zi}}{dt} = -E_z + r_i B_r \frac{d\theta_i}{dt}, \quad i = 1, \dots, N_0, \quad (4)$$

где

$$\gamma(z_i, \theta_i, r_i) = \left(1 - \beta_0^2 \left[\left(\frac{dr_i}{dt} \right)^2 + \left(r_i \frac{d\theta_i}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz_i}{dt} \right)^2 \right] \right)^{-1/2}. \quad (5)$$

Здесь z_i , r_i и θ_i — продольная, радиальная и азимутальная координаты заряженных частиц, $P_{zi} = \gamma z_i$, $P_{ri} = \gamma r_i$ и $P_{\theta i} = \gamma r_i \theta_i$ — продольная, радиальная и азимутальная компоненты импульсов заряженных частиц соответственно, E_z и E_r — продольная и радиальная компоненты электрического поля, $B_z(z, r)$ и $B_r(z, r)$ — продольная и радиальная компоненты индукции магнитного поля (предполагается, что азимутальная составляющая внешнего магнитного поля равна нулю: $B_\theta = 0$), $\beta_0 = v_0/c$, где v_0 — статическая (невозмущенная) скорость электронного потока на входе в систему, c — скорость света. Индексом i обозначены номера частиц,

N_0 — полное число заряженных частиц, моделирующих электронный поток.

Распределение потенциала в пространстве взаимодействия находится самосогласованным образом с помощью уравнения Пуассона, которое в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{d\varphi}{dr} + \frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{d^2\varphi}{dz^2} = \alpha^2 \rho, \quad (6)$$

$$\alpha = L \left(\frac{|\rho_0|}{V_0 \epsilon_0} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где V_0 — ускоряющее напряжение пучка, α — безразмерный управляющий параметр (критерий подобия задачи [50]), пропорциональный току пучка как $\alpha \sim \sqrt{I}$ и длине пространства взаимодействия как $\alpha \sim L$. Уравнение Пуассона решается при следующих граничных условиях:

$$\varphi(z=0, r) = 0, \quad \varphi(z=1, r) = 0, \quad \varphi(z, r=R) = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad (9)$$

где условие (8) задается тем, что пучок инжектируется в пространство, ограниченное идеально проводящей поверхностью под нулевым потенциалом; условие (9) на оси симметрии $r=0$ определяется аксиальной симметрией пространства взаимодействия.

Численное моделирование вывода мощности в виде отрезка спиральной замедляющей системы проводилось с помощью метода эквивалентных схем (см. подробнее [51,52]).

2. Однопараметрическая оптимизация параметров генератора СВЧ-сигналов с электронной обратной связью для достижения максимальной выходной мощности в режимах широкополосной и одночастотной генераций

Рассмотрим основные результаты математической оптимизации параметров генератора СВЧ-излучения с электронной обратной связью (и в первую очередь параметров внешней магнитной системы) с целью достижения максимальной выходной мощности в режимах широкополосной и одночастотной генераций, которые были проведены с помощью описанной в разд. 1 численной модели.

Для рассматриваемой задачи оптимизации в качестве целевой функции рассматривалась интегральная мощность выходного излучения, которая определяется путем усреднения выходного сигнала в течение определенного

интервала времени (времени расчета T , за исключением времени переходного процесса в начале импульса тока)

$$P = \frac{1}{TK} \int_t^{t+T} U^2(t) dt, \quad (10)$$

где $U(t)$ — ВЧ-напряжение на выходе линии передачи, моделирующей выходной элемент связи, K — сопротивление связи электродинамической системы. Выбор именно интегральной мощности излучения (10) в качестве целевой функции обусловлен возможным широкополосным характером выходного поля.

Основными оптимизируемыми параметрами рассматриваемого генератора являлись: параметр внешнего магнитного поля B_0 , положение первого магнитного кольца z_m , число магнитных колец N и параметр тока пучка α . Удобно рассмотреть результаты оптимизации в виде зависимостей интегральной выходной мощности P от параметров генератора в областях около полученных экстремумов (максимумов) целевой функции (P). Рассмотрим зависимости P от параметра магнитного поля B_0 , координаты z_m первого магнита магнитной системы и числа N периодов МПФС при различных значениях параметра тока пучка α . Заметим, что при рассмотрении результатов оптимизации по одному из перечисленных выше параметров (однопараметрической оптимизации) все остальные параметры предполагались фиксированными. Многопараметрическая оптимизация генератора и соответствующие результаты, полученные в ходе ее выполнения, будут рассмотрены в следующем разделе. Результаты однопараметрической оптимизации виркатера по выходной мощности показаны на следующих иллюстрациях.

На рис. 2 показана зависимость нормированной выходной мощности излучения от параметра B_0 магнитного поля в области экстремальной точки для генератора с

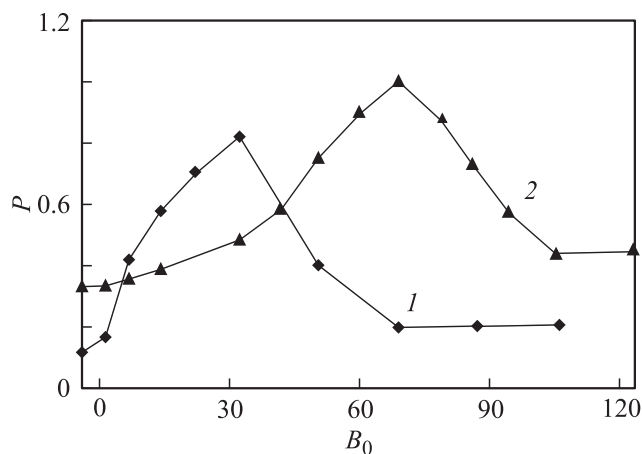


Рис. 2. Результаты расчета по оптимизации виркатера: зависимости нормированной выходной мощности P от параметра B_0 магнитного поля для генератора с магнитной системой с одним кольцевым магнитом для параметров тока пучка $\alpha = 10$ (1) и 20 (2).

магнитной системой с одним кольцевым магнитом для двух значений тока пучка $\alpha = 10$ и 20. Видно, что зависимости демонстрируют сходное поведение. Во-первых, для обоих токов существует оптимальная амплитуда внешнего магнитного поля B_{opt} , при которой мощность выходного излучения максимальна. При $B_0 < B_{opt}$ с ростом амплитуды внешнего магнитного поля выходная мощность монотонно увеличивается. Напротив, при $B > B_{opt}$ наблюдается монотонное уменьшение выходной мощности. Во-вторых, при больших параметрах магнитного поля B_0 наблюдается насыщение мощности выходного излучения на сравнительно низком уровне.

Такое обнаруженное в ходе проведенной математической оптимизации генератора на ВК поведение зависимостей мощности P выходного излучения от параметра B_0 внешнего магнитного поля является следствием физических процессов, происходящих в системе при изменении неоднородного магнитного поля. При $B_0 < B_{opt}$ вследствие значительных сил кулоновского расталкивания в области виртуального катода в пучке преобладает поперечная динамика заряженных частиц к боковой стенке пространства дрейфа, поэтому главная электронная структура (виртуальный катод) в данном случае оказывается сильно растянутой вдоль радиального направления и характеризуется малой плотностью пространственного заряда. Мощность выходного излучения пропорциональна плотности пространственного заряда электронного сгустка, возбуждающего систему, и в рассматриваемом случае она также будет невелика. Заметим также, что динамика выходного излучения в системе в рассматриваемом случае (при $B_0 < B_{opt}$) близка к периодической. С ростом величины внешнего магнитного поля поперечная динамика заряженных частиц в системе ограничивается, и плотность пространственного заряда в области виртуального катода возрастает. Как следствие, увеличивается величина мощности выходного излучения (рис. 2). При $B_0 \approx B_{opt}$ поперечная динамика в системе оказывается практически подавленной фокусирующим магнитным полем, и выходная мощность достигает максимального значения. С дальнейшим ростом величины внешнего магнитного поля ($B_0 > B_{opt}$) часть заряженных частиц (в основном из внешних слоев) оказываются захваченными магнитной ловушкой. Магнитная ловушка в первую очередь возникает во внешних слоях электронного потока, которые находятся в более сильном магнитном поле, по сравнению с внутренними слоями вследствие неоднородности внешнего магнитного поля, создаваемого кольцом, вдоль радиального направления. Действительно, магнитное поле в области пространства дрейфа, расположенной ближе к магнитному кольцу, значительно превосходит магнитное поле около оси симметрии системы. Таким образом, частицы из внешних слоев, попадающие в магнитную ловушку, формируют вторичный электронный сгусток и перестают участвовать в осцилляциях виртуального катода, не возбуждая выходную электродинамическую систему.

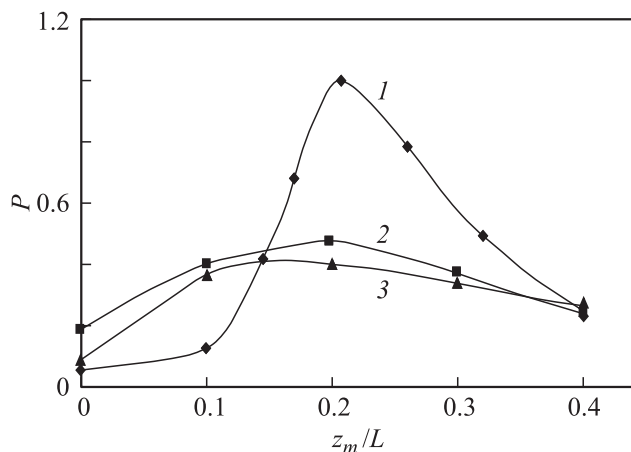


Рис. 3. Результаты расчета по оптимизации виркатора: зависимости нормированной выходной мощности P от нормированной координаты магнитного кольца z_m/L для генератора с одним кольцевым магнитом для следующих параметров: $B_0 = 40$, $\alpha = 10$ (1), 20 (2), 30 (3).

Это приводит к уменьшению мощности выходного излучения в системе, а также к переходу генератора в режим хаотической генерации. Количество таких частиц увеличивается с ростом амплитуды внешнего магнитного поля, и следовательно, выходная мощность уменьшается (рис. 2). Таким образом, при $B_0 \approx B_{\text{opt}}$, когда генератор с электронной обратной связью характеризуется максимальной выходной мощностью, он демонстрирует либо близкий к периодическому, либо слабохаотический (переходный режим между периодической и развитой хаотической динамикой выходного излучения) режимы генераций.

Как можно видеть из рис. 2, величина оптимального магнитного поля B_{opt} увеличивается с ростом безразмерного параметра тока пучка α (ср. кривые 1 и 2 на рис. 2). Очевидно, что расталкивающие силы пространственного заряда увеличиваются с ростом тока электронного пучка, который пропорционален α^2 , поэтому оптимальное магнитное поле B_{opt} , требующееся для ограничения поперечной (радиальной) динамики заряженных частиц потока и формирования плотного электронного сгустка в области виртуального катода, растет тоже.

Рассмотрим теперь зависимость мощности выходного излучения от координаты z_m кольца, создающего фокусирующее магнитное поле, в области, обнаруженной в результате проведенной оптимизации экстремальной точки. На рис. 3 показаны соответствующие зависимости для различных токов пучка $\alpha = 10, 20$ и 30 . Все зависимости демонстрируют схожее поведение. Существует оптимальная позиция магнитного кольца, при которой выходная мощность максимальна. Физический механизм поведения данной зависимости подобен физическому механизму существования оптимального магнитного поля B_{opt} и связан с существенной неоднородностью внешнего магнитного поля вдоль продольной оси системы.

Действительно, имеется такое расположение кольца, создающего фокусирующее магнитное поле, при котором поперечная динамика электронного потока существенно ограничена сильным магнитным полем, и в то же время заряженные частицы еще не оказываются захваченными в магнитную ловушку, связанную с неоднородностью магнитного поля в поперечном направлении. Такое положение магнитного кольца соответствует оптимальной координате z_{opt} , при которой интегральная выходная мощность максимальна. Следует отметить, что магнитное поле на оси системы в области виртуального катода при координате магнитного кольца $z = z_{\text{opt}}$ близко к величине оптимального магнитного поля B_{opt} . Соответственно генератор при $z = z_{\text{opt}}$ также демонстрирует периодический либо слабохаотический режим динамики.

Наконец, рассмотрим характерные зависимости выходной мощности излучения генератора на ВК от числа N периодов МПФС в области экстремальных точек, которые показаны на рис. 4 для различных значений параметра внешнего магнитного поля B_0 и тока пучка α . Из представленных на рисунке данных хорошо видно, что выходная мощность монотонно уменьшается с ростом числа периодов МПФС и стремится

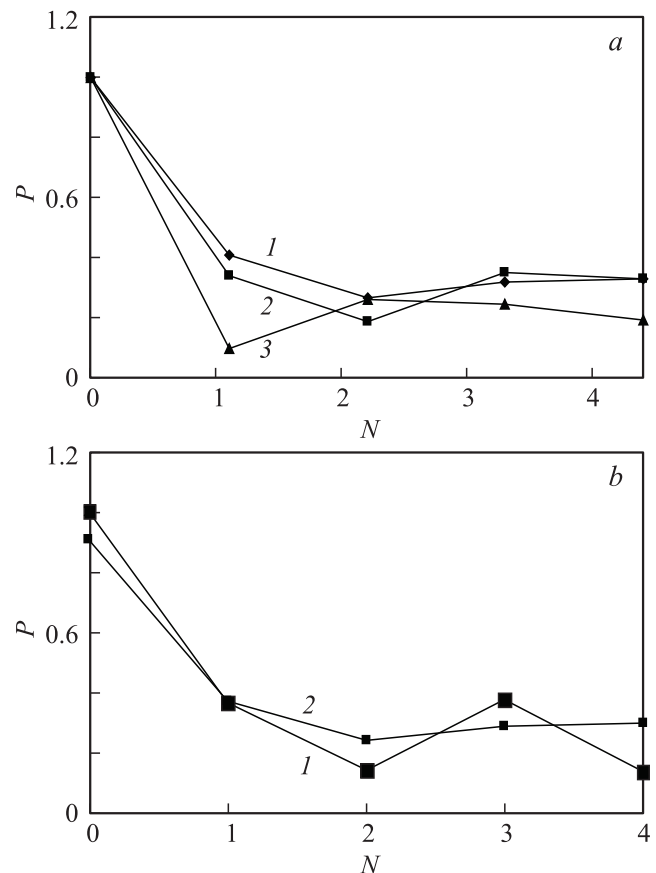


Рис. 4. Результаты расчета по оптимизации виркатора: зависимости нормированной выходной мощности P от числа периодов N МПФС для следующих параметров: (а) $\alpha = 20$, $B_0 = 20$ (1), 40 (2) и 60 (3); (б) $B_0 = 20$, $\alpha = 10$ (1) и 20 (2).

с ростом N к постоянной величине. Также с ростом числа N магнитных колец характер выходного излучения усложняется. Таким образом, усложнение спектрального состава выходного электромагнитного излучения, которое определяется расширением спектра генерируемых частот, сопровождается уменьшением мощности выходного излучения (а следовательно, КПД генератора). Как видно из рис. 4, выходная мощность уменьшается с ростом числа магнитных колец МПФС в 2–3 раза по сравнению со случаем отсутствия внешнего фокусирующего магнитного поля. Следует отметить, что данные результаты находятся в хорошем соответствии с известными экспериментальными и теоретическими результатами исследования влияния внешнего однородного магнитного поля на КПД и выходную мощность виркатора. В частности, в работах [21,27,52,53] было показано, что увеличение внешнего продольного магнитного поля приводит к уменьшению эффективности и выходной мощности генерации в системе с виртуальным катодом.

3. Многопараметрическая оптимизация параметров генератора виркатора для достижения максимальной выходной мощности в режимах широкополосной и одночастотной генераций

Рассмотрим результаты многопараметрической математической оптимизации генератора с электронной связью с одним кольцевым магнитом для достижения максимальной выходной мощности излучения. В качестве иллюстрации такой оптимизации на рис. 5 приведена зависимость нормированной выходной мощности излучения P генератора от нормированной координаты магнитного кольца z_m/L и от безразмерного параметра тока пучка α в области обнаруженной экстремальной точки — максимума выходной мощности при $z_m \sim 0.2$ и $\alpha \sim 10$. Выходная мощность в данной точке превышает среднюю мощность при других значениях z_m и α приблизительно в 4.5 раза.

Исследуем физические процессы, которые ответственны за существование обнаруженного экстремума. В первую очередь необходимо заметить, что в области параметров, отвечающих максимальной выходной мощности, режим генерации прибора оказывается близким к периодическому (см. рис. 6, *b*, на котором приведен спектр мощности выходного поля при данных параметрах); основные составляющие в выходном спектре имеют частоты 1.875 и 3.75 GHz. При $z_m \sim 0.2$ и неоптимальных токах $\alpha < 10$, когда выходная мощность уменьшается, режим генерации становится нерегулярным (хаотическим) (рис. 6, *a*), причем спектральные

составляющие оказываются сосредоточенными в диапазоне от 1 до 15 GHz. Таким образом, уменьшение выходной мощности генератора при отстройке тока пучка от оптимального значения в сторону меньших значений связано с хаотизацией выходного излучения, а также с уменьшением энергии инжектируемого потока и с приближением к стартовому току прибора. При

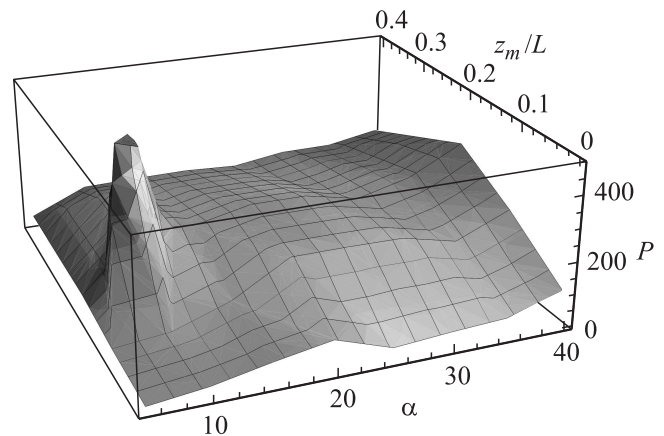


Рис. 5. Результаты расчета по оптимизации виркатора: двухпараметрическая зависимость выходной мощности излучения P виркатора с одним кольцевым магнитом от нормированной координаты магнитного кольца z_m/L и от безразмерного параметра тока пучка α при $B_0 = 40$.

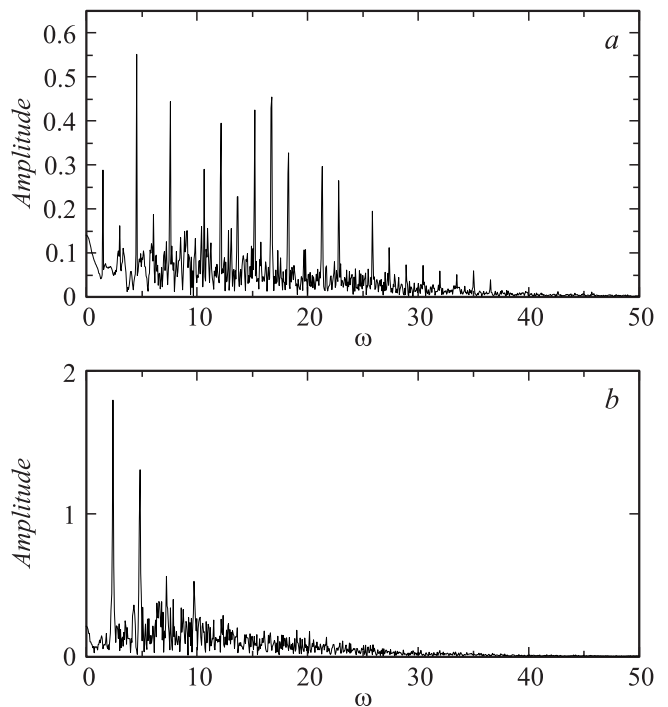


Рис. 6. Безразмерные спектры мощности выходного поля, регистрируемого отрезком спиральной электродинамической системы при $\alpha = 7$ (*a*), $\alpha = 9$ (*b*). Параметры системы: $N = 1$, $z_m = 0.2$, и $B_0 = 40$; безразмерной единице частоты соответствует частота 0.75 GHz.

отстройке положения магнитного кольца от оптимального значения z_{opt} , также наблюдается достаточно резкое уменьшение выходной мощности (рис. 5). Физические причины существования оптимального положения магнитного кольца z_{opt} , при котором выходная мощность излучения прибора максимальна, рассмотрены в разд. 2 и связаны с сильной неоднородностью магнитного поля в пространстве. Причем при отстройке положения магнитного кольца от оптимального значения, обеспечивающей превышение магнитным полем в области ВК оптимальной величины B_{opt} , также наблюдается хаотизация выходного излучения, которая вызвана образованием вторичных электронных сгустков в магнитной ловушке кольца (см. разд. 2). При $z_m \sim 0.2$ генератор демонстрирует периодический режим динамики при любых значениях B_0 и характеризуется максимальной выходной мощностью.

С ростом тока пучка при $\alpha > 10$ также наблюдается резкое уменьшение выходной мощности генератора (рис. 5). Данный эффект связан с разрушающим действием возрастающих вместе с током пучка сил кулоновского расталкивания на главную структуру электронного потока — виртуальный катод. С другой стороны, с увеличением тока инжектируемого пучка растет энергия электронного потока и, следовательно, энергия колебаний виртуального катода, поэтому при $\alpha > 30$ вновь начинается рост выходной мощности генерации прибора (рис. 5). При $z_m \sim 0.2$ и $\alpha \sim 25$ на рис. 5 наблюдается локальный максимум выходной мощности, обусловленный компенсирующим действием двух описанных выше эффектов при изменении тока пучка.

В табл. 1 и 2 представлены результаты, полученные при проведении математической оптимизации генератора с электронной обратной связью для получения максимальной мощности генерации в различных режимах его работы. Данные, представленные в таблицах, различаются формой представления значений параметров: в табл. 1 приведены оптимизированные *безразмерные* величины, в то время как в табл. 2 — *размерные* значения

Таблица 1. Результаты оптимизации генератора на ВК в целях получения максимальной интегральной выходной мощности СВЧ-излучения (значения оптимизируемых параметров в безразмерном виде) для различных режимов генерации

Режим	N	B_0	z_m/L	α	P
Широкополосная хаотическая генерация с сильной изрезанностью спектра	1	80	0	20.6	27.6
Широкополосная хаотическая генерация со слабой изрезанностью спектра	3	20	0	20.4	84
Узкополосная хаотическая генерация	1	70	0	19.8	120
Регулярная генерация (спектр богат высокими гармониками)	1	40	0.2	18.5	240
Регулярная генерация	1	40	0.2	10.0	490

Таблица 2. Результаты оптимизации генератора в целях получения максимальной интегральной выходной мощности СВЧ-излучения (значения оптимизируемых параметров в размерном виде) для различных режимов генерации

Режим	N	B_0 , kG	z_m , mm	I , A	P , kW	КПД, %
Широкополосная хаотическая генерация с сильной изрезанностью спектра	1	3.41	0	53.6	1.14	0.53
Широкополосная хаотическая генерация со слабой изрезанностью спектра	3	0.85	0	53.1	3.48	1.67
Узкополосная хаотическая генерация	1	2.98	0	51.5	5.2	2.50
Регулярная генерация (спектр богат высокими гармониками)	1	1.7	10	48.1	10.4	5.0
Регулярная генерация	1	1.7	10	13.0	5.1	9.8

соответствующих величин для типичных параметров генератора:

- ускоряющее напряжение $V_0 = 4$ kV,
- длина пространства дрейфа $L = 5$ cm,
- радиус дрейфовой камеры $r_0 = 1.25$ cm,
- радиус инжектируемого сплошного пучка $r_b = 0.625$ cm,
- длина отрезка электродинамической системы для вывода выходной мощности $L_{sp} = 1$ cm, начало расположения электродинамической системы совпадает с началом пространства взаимодействия генератора,
- шаг магнитной периодической фокусирующей системы $d_m = 1$ cm.

Из анализа данных, представленных в таблицах, можно сделать важный вывод, что условие, накладываемое на оптимизацию генератора с электронной обратной связью, связанное с максимальной выходной мощностью, является несовместимым с широкой полосой выходного излучения. Максимальная выходная мощность в системе реализуется при сравнительно узкой полосе генерируемых частот. Оптимальные значения параметров магнитной системы при $N = 1$ и безразмерном параметре тока $\alpha = 20$, при которых наблюдается максимальная выходная мощность, соответствуют $B_0 \approx 70$ и $z_m = 0$. При меньшем токе пучка $\alpha = 10$ оптимальные значения параметров: $B_0 \approx 40$ и $z_m = 0.2$. Увеличение магнитного поля или увеличение числа периодов МПФС приводит к усложнению характера выходного СВЧ-излучения генератора на ВК: спектр выходного излучения расширяется и становится менее изрезанным.

Приведем полученные количественные результаты по влиянию параметра внешнего магнитного поля B_0 , а также числа магнитных колец N на важную характеристику спектра выходного излучения генератора — на величину изрезанности спектра мощности выходного СВЧ-сигнала.

Определим изрезанность спектра ΔA хаотического сигнала как отношение максимальной P_{\max} к минимальной P_{\min} мощности компонент спектральной функции сигнала в рабочей полосе частот Δf_w , определяемое в dB:

$$\Delta A[\text{dB}] = 10 \lg \frac{P_{\max}}{P_{\min}}. \quad (11)$$

На рис. 7 и 8 приведены зависимости изрезанности спектра выходного излучения от величины параметра внешнего магнитного поля кольца и от числа магнитных колец соответственно. Из рисунков следует, что с увеличением внешнего магнитного поля B_0 и с увеличением числа магнитных колец N величина изрезанности спектра выходного излучения ΔA монотонно уменьшается, асимптотически стремясь к постоянной величине. В случае магнитной системы, состоящей из одного кольцевого магнита, ΔA изменяется от 33 до 7 dB при увеличении B_0 от 0 до 120 (рис. 7), причем насыщение величины ΔA начинается при $B_0 = 80$. При использовании магнитной системы из N кольцевых магнитов с фиксированным параметром магнитного поля кольца $B_0 = 20$ величина изрезанности выходного спектра ΔA изменяется от 33 до 15 dB при увеличении числа магнитных колец N от 0 до 4 (рис. 8); насыщение ΔA наступает уже при $N = 2-3$.

При этом наблюдаемое усложнение характера выходного излучения генератора на ВК сопровождается резким уменьшением интегральной мощности СВЧ-излучения, которая уменьшается в 5–10 раз по сравнению со случаем периодической генерации (при $B_0 = 0$ или $N = 0$) (табл. 1 и 2). В режиме широкополосной генерации выходная мощность излучения слабо зависит от параметров магнитной фокусирующей системы генератора с электронной обратной связью, однако все же имеется возможность несколько увеличить ее величину путем более тщательного подбора параметров генератора (см., например, локальный максимум на рис. 5 при $z_m \sim 0.2$ и $\alpha \sim 25$).

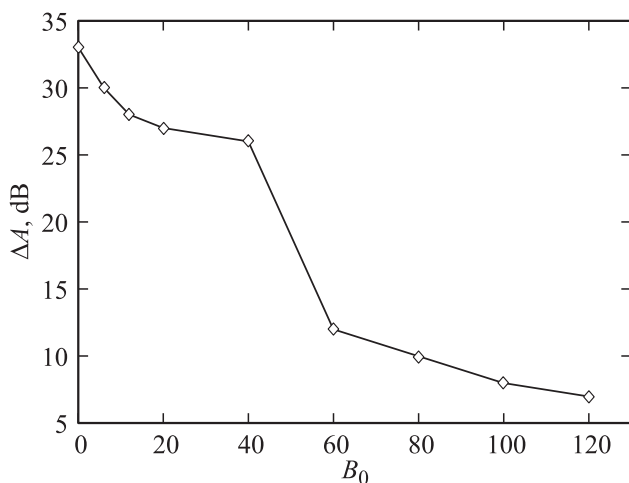


Рис. 7. Зависимость изрезанности спектра выходного излучения ΔA от величины B_0 параметра внешнего магнитного поля, создаваемого одним кольцевым магнитом; $z_m = 0$, $\alpha = 20$.

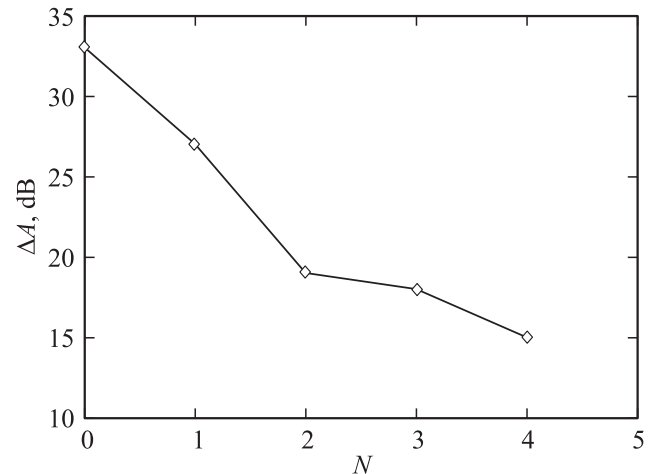


Рис. 8. Зависимость изрезанности спектра выходного излучения ΔA от числа магнитных колец N ; $B_0 = 20$, $z_m = 0$, $\alpha = 20$.

Следует также отметить, что в режимах развитой хаотической генерации электронный КПД взаимодействия, определяемый как отношение выходной мощности к мощности электронного потока ($\eta = (P/P_0) \cdot 100\%$, где $P_0 = I_0 V_0$), в оптимальном режиме не превышает 1.67%, в то время как переход к режимам узкополосной, а тем более регулярной генерации приводит к значительному росту КПД, который в оптимальном по мощности режиму достигает почти 10%.

В заключение отметим, что главной задачей в режимах широкополосной генерации является задача подбора параметров магнитной системы из соображений оптимальных спектральных характеристик выходного излучения. Поэтому в данных случаях предполагается выбирать параметры генератора из соображений максимальной ширины и минимальной изрезанности спектра мощности выходного излучения, а далее в окрестностях данного режима более точно оптимизировать остальные параметры генератора для достижения локального максимума величиной интегральной выходной мощности.

Заключение

В работе в рамках двумерного численного моделирования проведена оптимизация параметров генератора на виртуальном катоде с внешней периодической магнитной системой. Обнаружено сильное влияние параметров внешнего неоднородного магнитного поля на нелинейную динамику электронного потока с виртуальным катодом в низковольтном виркаторе, а также на характеристики его выходного излучения. Исследованы зависимости выходной мощности генерации в системе с виртуальным катодом от характеристик внешнего неоднородного магнитного поля. Изучены физические процессы, ответственные за обнаруженную зависимость поведения электронного потока с виртуальным като-

дом от параметров внешнего неоднородного магнитного поля.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0903, РФФИ (проекты № 12-02-00345, 12-02-31102, 12-02-90022, 11-02-00047) и Президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-1430.2012.2).

Список литературы

- [1] 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. 384 с.
- [2] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, 2007. 552 p.
- [3] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 648 с.
- [4] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РЭ. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
- [5] Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю., Сайков С.К., Селемир В.Д., Тараканов В.П. // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35. № 2. С. 462.
- [6] Sullivan D.J., Walsh J.E., Coutsias E.A. In of High Power Microwave Sources. Norwood: Artech House, 1987. Ed. by V. Granatstein and I. Alexeff. P. 441.
- [7] Lin T.L., Chen W.T., Liu W.C., Hu Y. // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 68. N 5. P. 2038–2044.
- [8] Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 1997. Т. 61. № 12. С. 2391–2401.
- [9] Короновский А.А., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 722–738.
- [10] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 12. С. 1724.
- [11] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 11. С. 1009–1025.
- [12] Храмов А.Е., Куркин С.А., Егоров Е.Н., Короновский А.А., Филатов Р.А. // Математическое моделирование. 2011. Т. 23. № 1. С. 3–18.
- [13] Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Волкова Л.Н. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 3. С. 39–44.
- [14] Калинин Ю.А., Стародубов А.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 12. С. 80–85.
- [15] Dmitriev B.S., Hramov A.E., Koronovskii A.A., Starodubov A.V., Trubetskov D.I., Zharkov Y.D. // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. N 7. P. 074 101.
- [16] Короновский А.А., Москаленко О.И., Храмов А.Е. // УФН. 2009. Т. 179. № 12. С. 1281–1310.
- [17] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002. 252 с.
- [18] Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006. 208 с.
- [19] Meadows B.K., Heath T.H., Neff J.D. et al. // Proc. IEEE. 2002. Vol. 90. N 5. P. 882–897.
- [20] Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Березин С.В. // Наука и технологии в промышленности. 2009. Т. 3. С. 28–31.
- [21] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 10. С. 139–142.
- [22] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2008. Т. 78. Вып. 5. С. 83–88.
- [23] Filatov R.A., Hramov A.E., Bliokh Y.P., Koronovskii A.A., Felsteiner J. // Phys. Plasmas. 2009. Vol. 16. N 3. P. 033 106.
- [24] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Левин Ю.И., Храмов А.Е. // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 1. С. 51–64.
- [25] Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 25–34.
- [26] Gursharn S., Shashank C. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36. N 3. P. 694–700.
- [27] Jiang W., Kitano H., Huang L., Masugata K., Yatsui K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. Vol. 24. P. 187.
- [28] Liu L., Li L.M., Zhang X.P., Wen J.C., Wan H., Zhang Y.Z. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. Vol. 35. N 2. P. 361–368.
- [29] Biswas D., Kumar R. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. Vol. 35. N 2. P. 369–378.
- [30] Nikolov N.A., Kostov K.G., Spassovsky I.P., Spassov V.A. // Electron. Lett. 1988. Vol. 24. N 23. P. 1445–1446.
- [31] Kostov K.G., Nikolov N.A., Spassovsky I.P., Spassov V.A. // Appl. Phys. Lett. 1992. Vol. 60. N 21. P. 2598–2600.
- [32] Kostov K.G., Nikolov N.A., Spassov V.A. // Electron. Lett. 1993. Vol. 29. N 12. P. 1069–1070.
- [33] Kostov K.G., Nikolov N.A. // Phys. Plasmas. 1994. Vol. 1. N 4. P. 1034–1039.
- [34] Гадецкий Н.Н., Магда И.И., Найстетер С.И., Прокопенко Ю.В., Чумаков В.И. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 4. С. 530.
- [35] Kostov K.G., Yovchev I.G., Nikolov N.A. // Electron. Lett. 1999. Vol. 35. N 19. P. 1647–1648.
- [36] Егоров Е.Н., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 8. С. 742–754.
- [37] Храмов А.Е., Короновский А.А., Морозов М., Мухоморов А.В. // Phys. Lett. A. 2008. Vol. 372. P. 876–883.
- [38] Морозов М.Ю., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 7. С. 610–619.
- [39] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 13. С. 64–69.
- [40] Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 12. С. 1736–1738.
- [41] Куркин С.А., Храмов А.Е., Короновский А.А. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 3. С. 102–109.
- [42] Hramov A.E., Koronovskii A.A., Kurkin S.A., Rempen I.S. // Int. J. Electron. 2011. Vol. 98. N 11. P. 1549–1564.
- [43] Кураев А.А., Трубецков Д.И. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 1. Стационарные процессы. М.: Физматлит, 2009. 288 с.
- [44] Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров. М.: Радио и связь, 1986. 208 с.
- [45] Батура М.П., Кураев А.А., Симицын А.К. Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. Минск: БГУИР, 2007. 245 с.
- [46] Кураев А.А., Байбурин В.Б., Ильин Е.М. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ-приборов. Минск: Навука і тэхніка, 1990. 392 с.
- [47] Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966. 546 с.

- [48] *Рошаль А.С.* Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979. 224 с.
- [49] *Birdsall C.K., Langdon A.B.* Plasma physics via computer simulation. NY: McGraw-Hill, 1985. 504 p.
- [50] *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысоко-частотной электронике для физиков. В 2-х томах. М.: Физматлит, 2003. 647 с.
- [51] *Morey I.J., Birdsall C.K.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. Vol. 18. N 3. P. 482.
- [52] *Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 43. Вып. 9. С. 71–78.
- [53] *Davis H.A., Bartsch R.R., Kwan T.J., Sherwood E.G., Stringfield R.M.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. Vol. 16. N 2. P. 192.