

Рекуперация в сверхмощных черенковских генераторах с неоднородным магнитным полем

© А.А. Кураев,¹ А.О. Рак,¹ С.А. Куркин,^{2,3,¶} А.А. Короновский,^{2,3} А.А. Бадарин,^{2,3} А.Е. Храмов^{2,3}

¹ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 220013 Минск, Беларусь

² Саратовский госуниверситет им. Н.Г. Чернышевского, 410012 Саратов, Россия

³ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, 410058 Саратов, Россия

¶ e-mail: KurkinSA@gmail.com

(Поступило в Редакцию 30 сентября 2015 г. В окончательной редакции 22 марта 2016 г.)

Рассмотрен эффективный способ повышения полного коэффициента полезного действия (КПД) релятивистских черенковских генераторов — рекуперация. Установлено, что для генератора с КПД менее 15% использование рекуперации позволило получить прирост КПД более 50% (с 12% до 68%). В генераторах с изначально высоким КПД (более 50%) применение рекуперации может оказаться неэффективным.

Введение

В последние годы в различных областях науки и техники большое распространение получили мощные генераторы и усилители СВЧ-излучения [1–5]. Мощное СВЧ-излучение используется для радиолокации, радиопротиводействия, ускорения ионов, передачи и обработки информации в системах дальней связи, при изучении взаимодействия излучения с веществом, в биологических исследованиях и т.д. [1–7]. К одному из наиболее обширных классов мощных приборов микроволновой электроники относятся источники излучения, принцип действия которых основан на продольном взаимодействии электронного потока с электромагнитным полем в периодических электродинамических структурах, имеющих положительную или отрицательную дисперсию основной волны. Наибольшее усиление и устойчивая генерация в устройствах данного класса наблюдаются при реализации синхронизма потока и поля на частотах вблизи границ полосы прозрачности волноведущих систем. В этих частотных диапазонах все периодические системы проявляют резонансные свойства, в них одновременно могут возбуждаться прямые и обратные волны. В сверхмощной электронике, где обычно применяются релятивистские сильноточные электронные пучки, перспективными оказались черенковские и дифракционные генераторы, использующие резонансные периодические структуры с положительной дисперсией основной волны и поперечными размерами, значительно превышающими длину волны излучения. Создание сильноточных ускорителей электронов с токами 1–35 кА при напряжении 0.3–2 МВ позволяет реализовать черенковские генераторы СВЧ диапазона с электродинамической системой в виде отрезка периодического гофрированного полого волновода, имеющие выходную мощность 1–30 ГВт в сантиметровом и миллиметровом диапазонах при КПД 10–50%. Такие результаты до-

стигнуты с использованием простейших математических моделей, справедливых для неглубокой периодической гофрировки волновода. Повышение КПД и улучшение выходных характеристик генераторов возможно на основе оптимизации всех параметров. Например, использование оптимального нерегулярного профиля в релятивистских черенковских генераторах (РЧГ) позволяет получать КПД порядка 40–50% [5–8], а дальнейшее повышение эффективности прибора возможно за счет использования рекуперации.

Описание модели

В настоящей работе рассматривались РЧГ, схема которых представлена на рис. 1. Эти РЧГ и электростатическое поле в них обладают аксиальной симметрией, задача решалась в цилиндрических координатах, а поле рассчитывалось в двумерном приближении. Электростатическое поле в системе рассчитывалось методом конечных элементов. Уравнение Лапласа в цилиндрических координатах имеет следующий вид:

$$\nabla^2 \varphi = \operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0,$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi,$$

где r, z — поперечная и продольная координаты, φ — потенциал электрического поля, \mathbf{E} — вектор напряженности электрического поля.

Для осаждения электронов на коллектор использовалось неоднородное магнитное поле: B_0 — магнитное поле вдоль оси, которое задается следующим выражением:

$$B_0(z) = B_{0\max} + (B_{0\min} - B_{0\max}) \sin^2 \left(\frac{\pi z}{2L_m} \right).$$

Здесь L_m — область изменения магнитного поля.

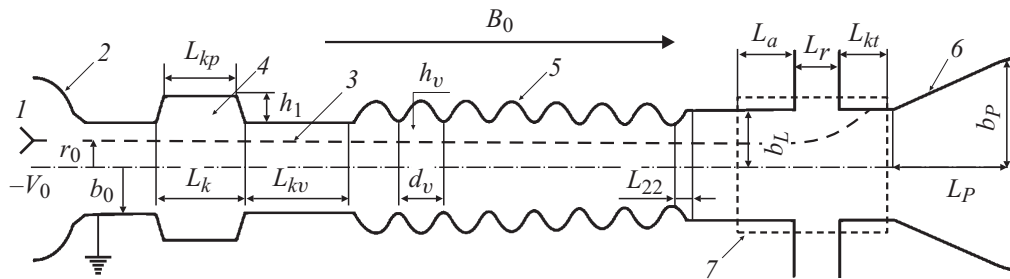


Рис. 1. Схема черенковского генератора. 1, 2 — катод и анод, формирующие трубчатый электронный поток, 3, 4 — модулирующая канавка, 5 — периодическая замедляющая гребенка, 6 — выходной рупор, 7 — область рекуперации.

Выражение составляющих вектора \mathbf{B} через $B_0(z)$:

$$\begin{cases} B_r = -\frac{1}{2} r_l \frac{\partial B_0(z)}{\partial z} + \frac{1}{16} r_l^3 \frac{\partial^3 B_0(z)}{\partial z^3} \\ B_z = B_0(z) - \frac{1}{4} r_l^2 \frac{\partial^2 B_0(z)}{\partial z^2}. \end{cases}$$

Уравнение движения релятивистского электрона [9]

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{e}{m_0} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \left(\mathbf{E} + [\mathbf{v}, \mathbf{B}] - \frac{\mathbf{v}}{c^2} (\mathbf{v}, \mathbf{E}) \right),$$

где e , m_0 — заряд и масса покоя электрона, c — скорость света в вакууме.

Для численного интегрирования уравнений движения использовался специальный алгоритм интегрирования дифференциальных уравнений второго порядка [10]:

Предсказание

$$\begin{aligned} x_{t+\Delta t} &= x_t + v_t \Delta t + \frac{1}{8} (5a_t - a_{t-\Delta t}) \Delta t^2 + O(\Delta t^3), \\ v_{t+\Delta t} &= v_t + \frac{1}{2} (3a_t - a_{t-\Delta t}) \Delta t + O(\Delta t^3). \end{aligned}$$

Коррекция

$$\begin{aligned} x_{t+\Delta t} &= x_t + v_t \Delta t + \frac{1}{8} (a_{t+\Delta t} + 3a_t) \Delta t^2 + O(\Delta t^3), \\ v_{t+\Delta t} &= v_t + \frac{1}{8} (3a_{t+\Delta t} + 6a_t - a_{t-\Delta t}) \Delta t + O(\Delta t^3), \end{aligned}$$

где $x(t)$ — координата частицы, $v(t)$, $a(t)$ — соответственно ее скорость и ускорение, Δt — шаг интегрирования по времени.

В качестве начальных условий для электронов использовались значения положения и скоростей частиц, полученные при моделировании черенковских генераторов [5–8].

Полный КПД определялся через потерю энергии электронным потоком

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \frac{\gamma_0 - \gamma_l}{\gamma_0 - 1},$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}},$$

где N — количество частиц, l — номер частицы, γ_0 , γ — релятивистский фактор частиц на входе и выходе прибора соответственно.

Результаты моделирования

С использованием математической теории, развитой в [5–8], были найдены оптимальные варианты РЧГ с различными параметрами и значениями КПД. Полученные варианты использовались для оценки эффективности рекуперации в приборах данного типа.

Параметры рассматриваемых вариантов.

Вариант 1. 3-сантиметровый одноволновой генератор. Рабочая частота $f = 10$ GHz, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 3$ см. Напряжение пучка $V_0 = 520$ kV ($\beta_0 = 0.869$), ток $I_0 = 2500$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 0.357$ Т. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 10$ периодов, $d_v = 2.62$, $h_v = 1.45$, $b_0 = 3.75$ (1.26 см, 0.69 см, 1.79 см). Ширина, высота модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = 2.22$, $h_1 = 1.092$, $L_{1v} = 5.79$ (1.06 см, 0.52 см, 2.76 см), $\Delta_{pc} = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 3.1$ (1.48 см). Количество слоев электронов — 2, электронов на слой — 8. Достигнутый КПД составил 23.5%.

Вариант 2. 3-сантиметровый одноволновой генератор. Рабочая частота $f = 10$ GHz, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 3$ см. Напряжение пучка $V_0 = 228$ kV ($\beta_0 = 0.723$), ток $I_0 = 1600$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 1.79$ Т. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 10$ периодов, $d_v = 3$, $h_v = 1.58$, $b_0 = 5$ (1.43, 0.754, 2.39 см). Ширина, высота модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = 6$, $h_1 = 1.59$, $L_{1v} = 7.15$ (2.86, 0.759, 3.41 см), $\Delta_p = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 4.2$ (2 см). Количество слоев электронов — 2, электронов на слой — 8. Достигнутый КПД составил 39.6%.

Вариант 3. 6-сантиметровый одноволновой генератор. Рабочая частота $f = 5$ GHz, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 6$ см. Напряжение пучка $V_0 = 291$ kV ($\beta_0 = 0.772$), ток $I_0 = 823$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 0.179$ Т. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 7$ периодов, $d_v = 2.35$, $h_v = 1.31$, $b_0 = 2.8$ (2.24 см, 1.31 см, 2.67 см). Ширина, высота модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = 1.5$, $h_1 = 1.38$, $L_{1v} = 4.63$ (1.43, 1.32, 4.42 см), $\Delta_p = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 2$ (1.9 см). Ко-

Таблица 1. Параметры рассматриваемых РЧГ с одиночной модулирующей канавкой

№	f , GHz	V_0 , kV	β_0	I_0 , A	B_0 , T	n_v	d_v , cm	h_v , cm	b_0 , cm	L_1 , cm	h_1 , cm	L_{1v} , cm	Δ_p	ξ_{eff}	Количество слоев электронов / электронов на слой	КПД, %
1	10	520	0.869	2500	0.357	10	1.26	0.69	1.79	1.06	0.52	2.76	0.8	1.48	2/8	23.5
2	10	228	0.723	1600	1.79	10	1.43	0.754	2.39	2.86	0.759	3.41	0.8	2	2/8	39.6
3	5	291	0.772	823	0.179	7	2.24	1.31	2.67	1.43	1.32	4.42	0.8	1.9	2/8	52.3

Таблица 2. Параметры рассматриваемых РЧГ с двойной модулирующей канавкой

№	f , GHz	V_0 , kV	β_0	I_0 , A	B_0 , T	n_v	d_v , cm	h_v , cm	b_0 , cm	$L_1 = L_{12} = L_2$, cm	h_1 , cm	L_{2v} , cm	Δ_p	r_0 , cm	Количество слоев электронов / электронов на слой	КПД, %
4	10	323	0.84	3000	0.35	20	0.61	0.68	3.77	2.2	0.96	0.53	0.8	3.3	3/8	42
5	10	323	0.84	3000	0.35	20	0.605	0.7	3.77	2.23	0.96	0.38	0.8	3.3	2/8	46
6	10	323	0.84	2000	0.35	20	0.6	0.7	3.77	2.3	0.96	0.38	0.8	3.3	2/8	12
7	10	323	0.84	2000	0.35	20	0.612	0.69	3.77	2.23	0.96	0.38	0.8	3.3	2/32	42.8
8	10	323	0.84	1750	0.35	20	0.612	0.69	3.77	2.23	0.96	0.38	0.8	3.3	2/32	13.14

личество слоев электронов — 2, электронов на слой — 8. Выбор относительно сильного фокусирующего поля позволил повысить электронный КПД до 52.3% за счет компенсации динамического расслоения.

Вариант 4. 3-сантиметровый двухволновой генератор. Рабочая частота $f = 10$ GHz, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 3$ см. Напряжение пучка $V_0 = 323$ kV ($\beta_0 = 0.84$), ток $I_0 = 3000$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 0.35$ Т. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 20$ периодов, $d_v = 1.28$, $h_v = 1.43$, $b_0 = 7.9$ (0.61, 0.68, 3.77 см). Ширина, высота двойной модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = L_{12} = L_2 = 4.6$, $h_{1,2} = 2$, $L_{2v} = 1.12$ (2.2, 0.96, 0.53 см), $\Delta_p = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 6.9$ (3.3 см). Количество слоев электронов — 3, электронов на слой — 8. Достигнутый КПД составил 42%.

Вариант 5. 3-сантиметровый двухволновой генератор. Рабочая частота $f = 10$ GHz, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 3$ см. Напряжение пучка $V_0 = 323$ kV ($\beta_0 = 0.84$), ток $I_0 = 3000$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 0.35$ Т. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 20$ периодов, $d_v = 1.268$, $h_v = 1.46$, $b_0 = 7.9$ (0.605, 0.7, 3.77 см). Ширина, высота двойной модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = L_{12} = L_2 = 4.67$, $h_{1,2} = 2$, $L_{2v} = 0.79$ (2.23, 0.96, 0.38 см), $\Delta_p = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 6.9$ (3.3 см). Количество слоев электронов — 2, электронов на слой — 8. Достигнутый КПД составил 46%.

Вариант 6. 3-сантиметровый двухволновой генератор. Рабочая частота $f = 10$ GHz, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 3$ см. Напряжение пучка $V_0 = 323$ kV ($\beta_0 = 0.84$), ток $I_0 = 2000$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 0.35$ Т. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 20$ периодов,

$d_v = 1.25$, $h_v = 1.46$, $b_0 = 7.9$ (0.6, 0.7, 3.77 см). Ширина, высота двойной модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = L_{12} = L_2 = 4.67$, $h_{1,2} = 2$, $L_{2v} = 0.79$ (2.23, 0.96, 0.38 см), $\Delta_p = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 6.9$ (3.3 см). Количество слоев электронов — 2, электронов на слой — 8. Достигнутый КПД составил 12 %.

Вариант 7. 3-сантиметровый двухволновой генератор. Рабочая частота $f = 10$ GHz, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 3$ см. Напряжение пучка $V_0 = 323$ kV ($\beta_0 = 0.84$), ток $I_0 = 2000$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 0.35$ Т. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 20$ периодов, $d_v = 1.282$, $h_v = 1.45$, $b_0 = 7.9$ (0.612, 0.69, 3.77 см). Ширина, высота двойной модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = L_{12} = L_2 = 4.67$, $h_{1,2} = 2$, $L_{2v} = 0.79$ (2.23, 0.96, 0.38 см), $\Delta_p = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 6.9$ (3.3 см). Количество слоев электронов — 2, электронов на слой — 32. Достигнутый КПД составил 42.8%.

Вариант 8. 3-сантиметровый двухволновой генератор. Рабочая частота $f = 10$ GHz, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 3$ см. Напряжение пучка $V_0 = 323$ kV ($\beta_0 = 0.84$), ток $I_0 = 1750$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 0.35$ Т. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 20$ периодов, $d_v = 1.282$, $h_v = 1.45$, $b_0 = 7.9$ (0.612, 0.69, 3.77 см). Ширина, высота двойной модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = L_{12} = L_2 = 4.67$, $h_{1,2} = 2$, $L_{2v} = 0.79$ (2.23, 0.96, 0.38 см), $\Delta_p = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 6.9$ (3.3 см). Количество слоев электронов — 2, электронов на слой — 32. Достигнутый КПД составил 13.14%.

Параметры рассматриваемых вариантов генераторов и их характеристики приведены в табл. 1 и табл.2.

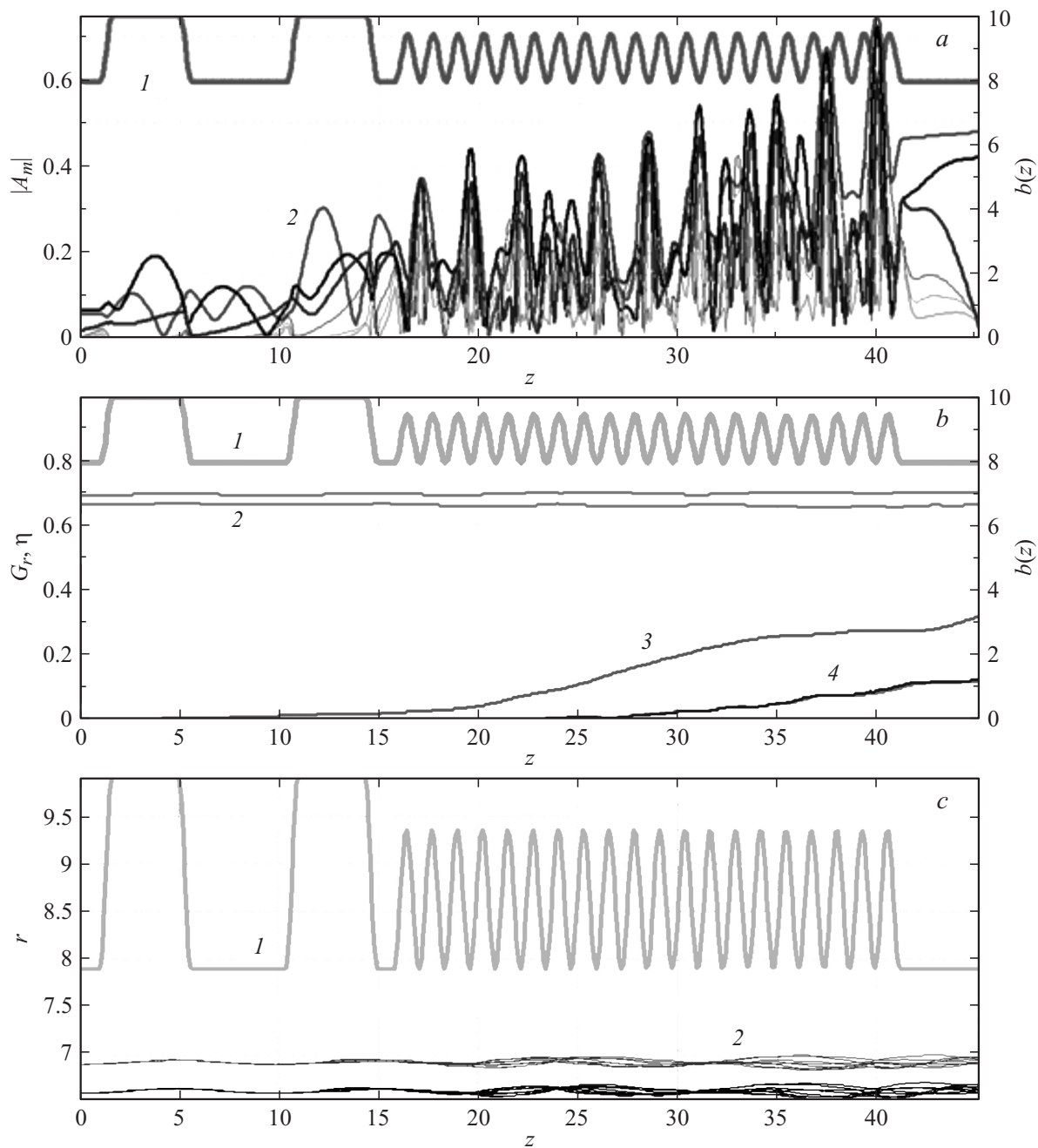


Рис. 2. Характеристики одного из оптимальных вариантов РЧГ (вариант 6): a — профиль (1) и распределение амплитуд (2), b — границы электронного потока (2), функция группировки (3), электронный и волновой КПД (4), c — траектории электронов (2).

Приведем основные характеристики варианта 6 на рис. 2. Основную роль при моделировании рекуперации играет распределение электронов по скоростям. Данная характеристика для рассматриваемых генераторов представлена на рис. 3.

На рис. 4 представлены траектории электронов двух радиальных слоев РЭП, движущихся в неоднородном магнитном поле при нулевом относительно анода потенциале коллектора.

Из рис. 4 (а также рис. 2, c) видно, что траектории электронов на выходе РЧГ (в данных условиях) носят

сложный характер и могут быть определены только в результате численного моделирования. В связи с этим конфигурация рекуперационной системы должна оптимизироваться для каждого моделируемого прибора индивидуально.

Для поиска эффективных конфигураций оптимизировались следующие параметры: профиль неоднородного магнитного поля, геометрические размеры системы (L_a , L_r , L_k), напряжение на коллекторе. При оптимизации выдерживалось условие осаждения всех электронов на коллектор (отсутствие отраженных и вышедших за об-

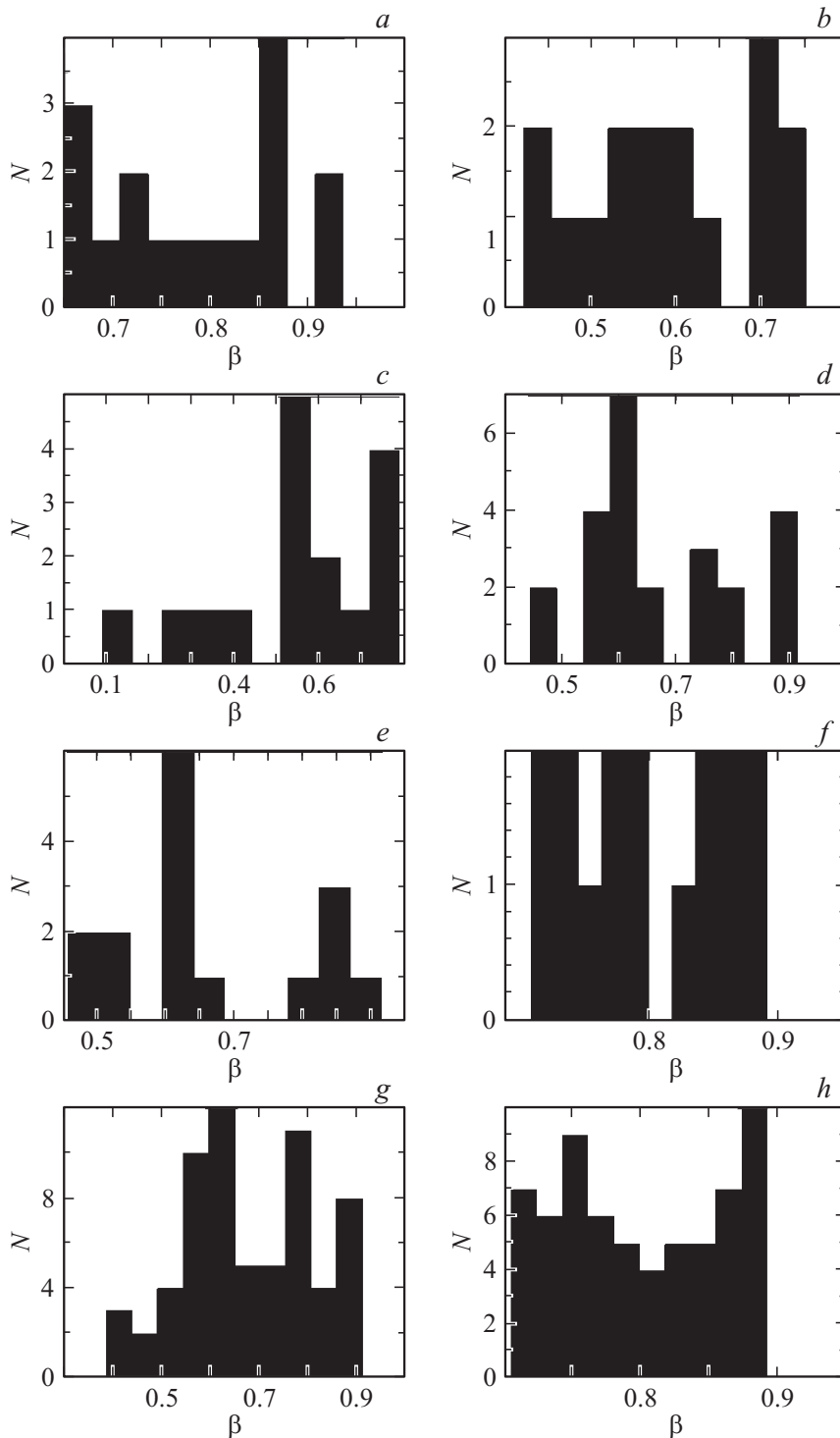


Рис. 3. Распределение электронов по скоростям для вариантов генераторов 1–8.

ласть взаимодействия электронов). Полученные результаты приведены в табл. 3.

Параметры найденных оптимальных рекуперационных систем для рассматриваемых генераторов представлены в табл. 4.

Вариант 3 обладает весьма высоким КПД (52.3%), в результате этого в приборе имеются электроны с низки-

ми скоростями (0.1с — рис. 3,с), для предотвращения возврата таких электронов в область взаимодействия при введении рекуперации приходится менять режим работы генератора, ухудшая его электронный КПД. Для рассматриваемого варианта использование рекуперации не только не позволило повысить КПД, но даже привело к небольшому его снижению.

Таблица 3. Результаты оптимизации РЧГ

№	Электронный КПД генератора	Полный КПД	Прирост КПД
1	23.5	35.84	12.34
2	39.6	64.14	24.54
3	52.3	51.95	-0.35
4	42	55.74	13.74
5	46	63.13	17.13
6	12	68.9	56.9
7	42.8	54.37	11.57
8	13.14	68	54.86

Таблица 4. Параметры оптимальных рекуперационных систем для рассматриваемых генераторов

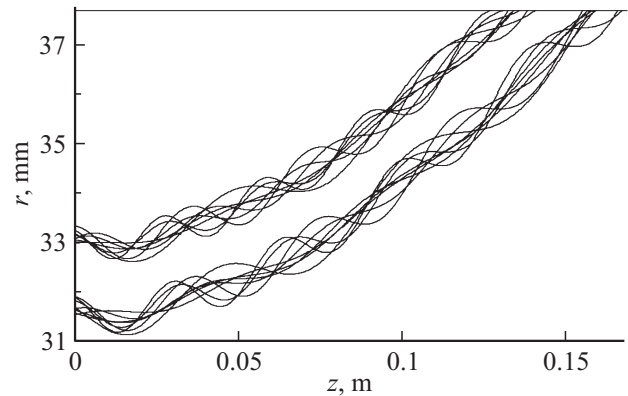
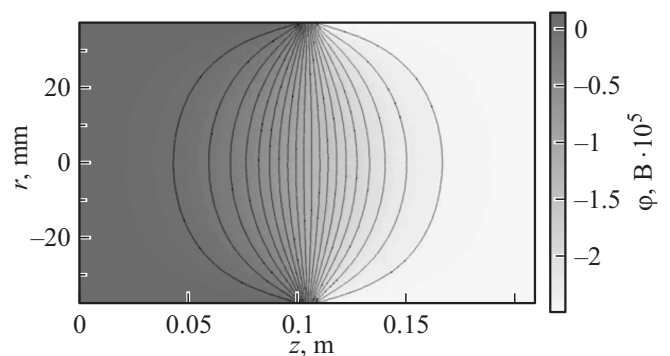
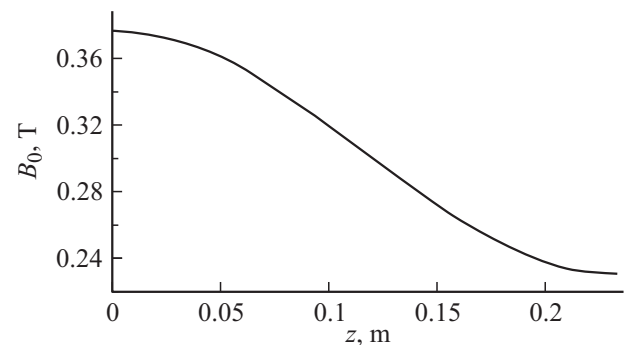
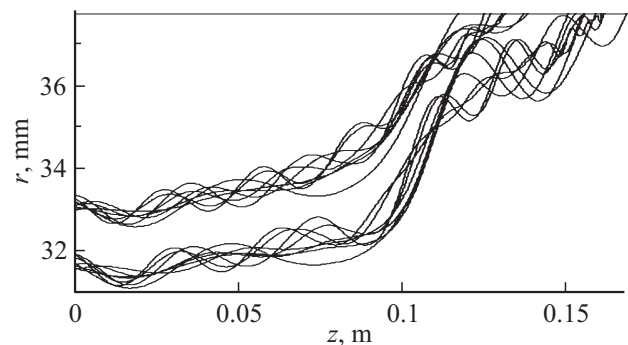
№	L_a , см	L_r , см	L_{kt} , см	U_k , кВ	L_m , см	$B_{0\max}$, Т	$B_{0\min}$, Т
1	7.3	7.6	17.4	-90	55	0.375	0
2	2.9	1.1	3	-55	6.7	1.7	1.1
3	2	2	9.9	-1.9	15	0.375	0
4	5	8	10	-60	55	0.375	0
5	10	2.3	9.8	-76.97	28.8	0.375	0.195
6	10	1	10	-246	23.4	0.375	0.231
7	9.4	1	10	-38	26	0.375	0.2175
8	10	1	10	-236	23.4	0.375	0.231

Для исследования рекуперации в генераторах с низким КПД был изменен вариант 5 следующим образом: понижен ток с 3000 до 2000 А и выполнена оптимизация периода гофра. В результате КПД был понижен с 46 до 12% (вариант 6). В полученном генераторе электроны обладают высокими скоростями и относительно равномерным распределением, что позволило эффективно использовать рекуперацию и получить прирост КПД 56.9%.

При моделировании РЧГ с использованием теории, развитой в [5–8] для получения достоверных результатов достаточно использовать небольшое количество крупных частиц (в рассмотренных вариантах в основном — 16), однако при моделировании рекуперации этого может оказаться недостаточно для учета сильно замедленных частиц. В вариантах 7, 8 увеличено число электронов до 64. Увеличение количества электронов отразилось на непрерывности распределения частиц по скоростям, однако, на эффективность использования рекуперации практически не повлияло.

Потенциал электростатического поля, профиль нерегулярного магнитного поля и траектории электронов для варианта 6 представлены на рис. 5, 6 и 7 соответственно.

Как видно из рис. 5 электростатическое поле в области взаимодействия представляет собой электронную линзу [11].

**Рис. 4.** Осаждение электронов при нулевом относительно анода потенциале коллектора.**Рис. 5.** Распределение потенциала электростатического поля для варианта 6.**Рис. 6.** Профиль неоднородного магнитного поля для варианта 6.**Рис. 7.** Траектории электронов для варианта 6.

Заключение

Анализ траекторий электронов и распределения их скоростей на выходе РЧГ показал, что для каждого отдельного генератора требуется индивидуальный расчет рекуперационной системы.

Для генератора с меньшим КПД и в результате этого менее замедленными и равномерно распределенными по скоростям на выходе прибора электронами использование рекуперации позволило получить больший прирост КПД — более 50%. В генераторах с изначально высоким КПД (более 50%) применение рекуперации может оказать неэффективным.

В результате оптимизации были получены конфигурации РЧГ с полным КПД, близким к 70%.

Заметим, что эмиссия вторичных электронов с коллектора в настоящей работе не учитывалась, так как она оказывает меньшее влияние в схеме с рекуперацией, поскольку форма коллектора остается прежней (как без рекуперации), а энергия первичных электронов снижена.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 15-52-04018, 15-32-20299), гранта президента РФ для молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-5426.2015.2) и Минобрнауки РФ (№ 3.59.2014/К).

Список литературы

- [1] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Физматлит, 2003. 496 с.
- [2] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 648 с.
- [3] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. Taylor and Francis, CRC Press. 2016.
- [4] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // РЭ. 1992. Т. 37. № 3. С. 385
- [5] Кураев А.А., Трубецков Д.И. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Т. 1. Стационарные процессы. М.: Физматлит, 2009. С. 167–274.
- [6] Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Попкова Т.Л., Рак А.О. // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1. № 2. С. 41–64.
- [7] Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Попкова Т.Л., Рак А.О. // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2. № 1. С. 78–99.
- [8] Кураев А.А., Луцицкая И.В., Попкова Т.Л., Рак А.О., Синицын А.К. // Изв. вузов ПНД. 2008. Т. 16. № 3. С. 142–155.
- [9] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля М.: Наука, 1988.
- [10] Рак А.О. // Докл. БГУИР. 2012. Т. 67. № 5. С. 86.
- [11] Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. 2-е изд. М.: Наука, 1972.