

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЛБВ И ЛОВ НА НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДАХ С КАТОДНЫМ ФИЛЬТРОМ-МОДУЛЯТОРОМ

А.А. Кураев, И.В. Луцицкая, Т.Л. Попкова, А.О. Рак, А.К. Синицын

Приведены результаты развития нелинейной теории релятивистских ЛБВ и ЛОВ на нерегулярных полых волноводах с катодным фильтром-модулятором с учетом как распространяющихся, так и закрытых волн. Приведены результаты оптимизации по КПД вариантов релятивистских черенковских генераторов. На основе строгой теории возбуждения электродинамической системы решена задача определения профиля выходного рупора черенковских генераторов, обеспечивающего необходимый модовый состав в раскрыве и оптимальную характеристику направленности.

Введение

Электродинамические системы современных мощных и сверхмощных электронных приборов СВЧ (гиротронов, релятивистских ламп бегущей и обратной волны – ЛБВ и ЛОВ), включая вводы и выходы энергии, представляют собой отрезки нерегулярных волноводов [1–5]. Причем режим этих волноводов оказывается чаще всего многоволновым [6, 7]. Улучшение характеристик указанных сверхмощных приборов СВЧ связано прежде всего с оптимизацией профиля их электродинамических систем [8, 9]. Это, в свою очередь, требует развития адекватной теории и методов расчета произвольно-нерегулярных волноводов [10–13].

На рис. 1 изображен один из вариантов схемы черенковского генератора. На вход области взаимодействия в виде отрезка полого цилиндрического гофрированного волновода 5 подается электронный поток 3, сформированный электронной пушкой 1, 2. В области взаимодействия 5 реализуются условия синхронизма электронного потока с одной из пространственных гармоник возбуждаемого электромагнитного поля. Вывод СВЧ-мощности производится через выходной рупор 6. Отработавший электронный поток осаждается на стенку волновода сразу за областью взаимодействия. Резонансная канавка 4 играет роль как заграждающего катод фильтра для E_{0z} – волны, так и создает условия для начальной модуляции электронного пучка, образуя совместно с областью 5 и участком дрейфа двухкаскадный генератор с обратной связью по отраженной волне.

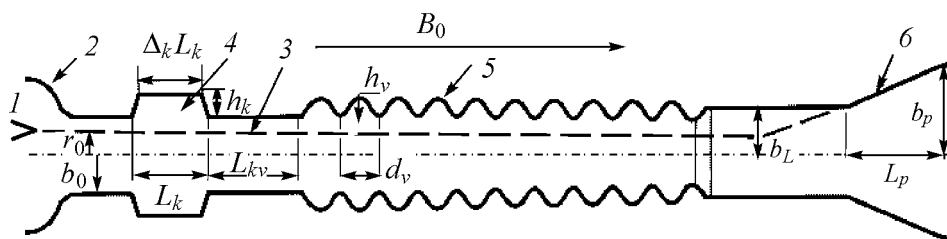


Рис. 1. Схема черенковского генератора: 1, 2 – катод и анод, формирующие трубочатый электронный поток 3; 4 – модулирующая канавка; 5 – периодическая замедляющая гребенка; 6 – выходной рупор

В черенковских генераторах, реализуется довольно сложный комбинированный ЛБВ–ЛОВ–О и гирорезонансный механизм, при котором несколько гармоник поля как синхронных, так и несинхронных участвуют во взаимодействии направляемого магнитоэлектронным полем B_0 релятивистского электронного потока с возбуждаемым ВЧ-электромагнитным полем. При этом обратная связь осуществляется как на обратной (минус первой) гармонике, так и за счет отражения части СВЧ-мощности от нерегулярных участков волновода и обратного излучения электронов пучка. Ввиду этого модель возбуждения должна учитывать полное возбуждаемое поле [8, 9].

Наиболее эффективной процедурой при расчете нерегулярных волноводов как с вычислительной стороны, так и в отношении физической интерпретации представляется метод, основанный на отображении произвольно-нерегулярной внутренней поверхности волновода на регулярный цилиндр, коаксиал и т.д. с круговым или прямоугольным сечением [10–13]. В преобразованной (косоугольной) системе координат решение представляется в виде связанных нормальных волн с использованием проекционной процедуры. При этом амплитуды связанных волн определяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, вид которых определяется профилем неоднородного волновода. Граничные условия к этой системе ставятся в начальном и конечном сечении отрезка нерегулярного волновода (двухточечная задача). Решение этой задачи традиционными методами не встречает затруднений, если рассматриваются только распространяющиеся волны. Как показано ниже, для точного расчета волновода необходим учет наряду с распространяющимися закритическими волн, существенно меняющих характеристики волновода. Однако для закритических волн численное решение граничной (двухточечной) задачи с использованием традиционных методов (пошаговых методов типа Рунге–Кутты или Хемминга) невозможно из-за быстрой расходимости (из-за малых ошибок появляются резко возрастающие решения). Для решения такой задачи использован устойчивый метод блочной матричной прогонки [8, 9].

1. Двумерные самосогласованные уравнения нелинейной модели релятивистских ЛОВ и ЛБВ–О с замедляющей системой в виде гофрированного волновода

Теория релятивистских ЛБВ и ЛОВ с электродинамической системой в виде нерегулярного гофрированного волновода на основе метода преобразования координат развита в [10–24]. Для ЛБВ и ЛОВ с рабочей волной E_{0i} полого нерегулярного

волновода в двумерном приближении она приводит к следующей системе самосогласованных нелинейных уравнений [8, 9, 24].

Уравнения для расчетных амплитуд возбуждаемых волн

$$\frac{d\dot{A}_{mi}}{dz} = \left(mW\dot{V}_{mi} + v_{0i}\dot{C}_{mi} \right) + (1-j)2S_\sigma \frac{\sqrt{1+(db/dz)^2}}{b} \sum_k \dot{V}_{mk} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})}, \quad (1)$$

$$\dot{C}_{mi} = -\frac{v_{0i}\dot{V}_{si}}{mWb^2} + \frac{\partial b}{b\partial z} \left(-\frac{\dot{A}_{mi}}{v_{0i}} + \sum_{k \neq i} \frac{2v_{0i}}{v_{0k}^2 - v_{0i}^2} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} A_{mk} \right) -$$

$$-\frac{jG_0}{mW \cdot e_{0i}b^2} \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N J_0 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) e^{-jmW\theta_l},$$

$$\frac{dV_{mi}}{dz} = -mW \left\{ \dot{A}_{mi} + \left(\frac{\partial b}{\partial z} \right)^2 \left[\dot{A}_{mi} \frac{1}{3} \left(1 + \frac{4}{v_{0i}^2} \right) + \sum_{k \neq i} \frac{4(v_{0i}^2 + v_{0k}^2)}{(v_{0i}^2 - v_{0k}^2)^2} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} \dot{A}_{mk} \right] - \right.$$

$$\left. -b \frac{\partial b}{\partial z} \left(-\frac{\dot{C}_{mi}}{v_{0i}} + \sum_{k \neq i} \frac{2v_{0k}}{v_{0i}^2 - v_{0k}^2} \frac{J_1(v_{0k})}{J_1(v_{0i})} \dot{C}_{mk} \right) \right\} +$$

$$+\frac{G_0}{e_{0i}b} \left(\frac{1}{N} \sum_{l=1}^N J_1 \left(v_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \left(\frac{\beta_{rl}}{\beta_{zl}} - \frac{r_l}{b} \frac{\partial b}{\partial z} \right) \right) j e^{-jmW\theta_l},$$

где v_{0i} – i -й корень $J_0(x)$, $b(T) = k_0 b'(T)$, $k_0 = 2\pi/\lambda_0 = \omega_0/c$, $b'(T)$ – внутренний радиус волновода (штрихом помечены размерные величины имеющие одинаковое обозначение с безразмерными); $W = \omega/\omega_0$, ω – рабочая частота; ω_0 – базовая частота; i – радиальный индекс волны; m – номер гармоники ω ; β_{rl} ; β_{zl} – радиальная и продольная нормированные скорости; $G_0 = 2eI_0/\varepsilon_0 m_0 c^3$, I_0 – ток пучка; $\dot{A}_{mi} = (b' \dot{E}'_{rmi} e)/(m_0 c^2)$; $\dot{C}_{mi} = (\dot{E}_{zmi} e)/(\omega_0 m_0 c)$; $\dot{V}_{mi} = (b' \dot{B}_{\varphi mi} e)/(m_0 c)$; \dot{E}_{rmi} , \dot{E}_{zmi} , $\dot{B}_{\varphi mi}$ – амплитуды компонент волны; e , m_0 – заряд и масса покоя электрона; c – скорость света в пустоте; r_l – радиус движения l -го электрона; $r_l = k_0 r'_l$; $\theta_i = \omega t_i$; $z = z' k_0$; $S_\sigma = \sqrt{\pi W}/\sigma \lambda_0 \mu_a c$; σ – удельная проводимость стенки; μ_a – ее магнитная проницаемость; $e_{0i} = 0.5 J_1^2(v_{0i})$.

Уравнения движения крупных частиц

$$\begin{cases} \frac{dP_{rl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}} \left(\frac{\gamma_l \beta_{\varphi l}^2}{r_l} - E_r - \beta_{\varphi l} F_z + \beta_{zl} B_\varphi \right), \\ \frac{dP_{\varphi l}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}} \left(\frac{\gamma_l \beta_{rl} \beta_{\varphi l}}{r_l} - \beta_{zl} F_r + \beta_{rl} F_z \right), \\ \frac{dP_{zl}}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}} (-E_z - \beta_{rl} B_\varphi + \beta_{\varphi l} F_r), \\ \frac{dr_l}{dz} = \frac{\beta_{rl}}{\beta_{zl}}, \quad \frac{d\theta_l}{dz} = \frac{1}{\beta_{zl}}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\vec{P}_l = \gamma_l \vec{\beta}_l, \quad \gamma_l = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_l^2}} = \sqrt{1 + P_{rl}^2 + P_{\varphi l}^2 + P_{zl}^2}.$$

Выражение физических ВЧ-полей через расчетные амплитуды с учетом полей пространственного заряда

$$\left\{ \begin{array}{l} E_r = -\frac{1}{b} \sum_m \sum_{i=1}^M J_1 \left(\nu_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \operatorname{Re} \left(\dot{A}_{mi} e^{jmW\theta_l} \right) - \frac{G_0}{2r_l} \left(\frac{1}{\beta_{z0}} - \beta_{z0} \right), \\ E_z = \operatorname{Re} \left[\sum_m \sum_{i=1}^M J_0 \left(\nu_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \dot{C}_{mi} e^{mjsW\theta_l} + \frac{r_l \partial b}{b^2 \partial z} \sum_m \sum_{i=1}^M J_1 \left(\nu_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \dot{A}_{mi} e^{jmW\theta_l} \right], \\ B_\varphi = \frac{1}{b} \sum_m \sum_{i=1}^M J_1 \left(\nu_{0i} \frac{r_l}{b} \right) \operatorname{Re} \left(-j \dot{V}_{mi} e^{jmW\theta_l} \right). \end{array} \right.$$

Магнитоэстатическое фокусирующее поле

$$\left\{ \begin{array}{l} F_r = -\frac{1}{2} r_l \frac{\partial F_0(z)}{\partial z} + \frac{1}{16} r_l^3 \frac{\partial^3 F_0(z)}{\partial z^3}, \\ F_z = F_0(z) - \frac{1}{4} r_l^2 \frac{\partial^2 F_0(z)}{\partial z^2}, \quad F_0 = \frac{B_0(z)e}{m_0 \omega_0}, \quad B_0(z) - \text{поле вдоль оси.} \end{array} \right.$$

Заметим, что уравнения возбуждения (1) включают как вихревую, так и потенциальную («поле пространственного заряда») составляющие полного поля на частоте $m\omega_0 W$.

Граничные условия к системе (1), (2) могут быть сформулированы таким образом. На границах сопряжения нерегулярной области взаимодействия с регулярным волноводом выполняется условие $db(0)/dz = db(L)/dz = 0$ и имеют место следующие соотношения:

для распространяющихся E_{0i} -волн

$$\begin{aligned} W \dot{A}_{mi}(0) + j k_{mi}^e \dot{V}_{mi}(0) &= j k_{mi}^e W 2b(0) \dot{e}_{mi}^+, \\ -W \dot{A}_{mi}(L) + j k_{mi}^e \dot{V}_{mi}(L) &= j k_{mi}^e W 2b(L) \dot{e}_{mi}^-; \end{aligned} \quad (3)$$

для закритических E_{0m} -волн

$$\begin{aligned} W \dot{A}_{mi}(0) + k_{mi}^e \dot{V}_{mi}(0) &= k_{mi}^e W 2b(0) \dot{e}_{mi}^+, \\ -W \dot{A}_{mi}(L) + k_{mi}^e \dot{V}_{mi}(L) &= k_{mi}^e W 2b(L) \dot{e}_{mi}^-; \end{aligned} \quad (4)$$

для немодулированного на входе области взаимодействия электронного потока

$$W\theta_l(0) = \frac{2\pi}{N}(l - 0.5), \quad l = 1 \dots N, \quad \beta_l(0) = \beta_0, \quad r_l(0) = r_0. \quad (5)$$

Таким образом, для системы уравнений для амплитуд (1) поставлена краевая задача, а для уравнений движения крупных частиц (2) сформулирована задача Коши. Совместное решение получается в результате итерационной процедуры.

Эффективность взаимодействия определяется следующими соотношениями:
1) через мощность возбужденных потоком волн («волновой» КПД)

$$\eta_{mi}^v(z) = e_{0i} \frac{\text{Im} \left[\dot{A}_{mi}(z) \dot{V}_{mi}^*(z) - \dot{A}_{mi}(0) \dot{V}_{mi}^*(0) \right]}{(\gamma_0 - 1) G_0}, \quad \eta^v = \sum_i \sum_m \eta_{mi}^v; \quad (6)$$

2) через потерю кинетической энергии электронным потоком («электронный» КПД)

$$\eta^e(z) = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N \frac{\gamma_0 - \gamma_l(z)}{\gamma_0 - 1}. \quad (7)$$

Фазовую группировку электронов на частоте mW определяет функция группировки G_r

$$G_{rm}(z) = \frac{1}{N} \left[\left(\sum_{i=1}^N \cos mW\theta_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \sin mW\theta_i \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (8)$$

При малом энергообмене группировка $G_{rm}(z)$ близка к относительной первой гармонике тока в пучке в сечении z .

Задача (1) – (5) с указанной целевой функцией $\max F_c(\vec{g}(z))$ (обычно $F_c = \eta^e$) представляет собой задачу оптимального управления, в которой в качестве искомого управления $\vec{g}(z)$ выступают нормированный профиль волновода $b(z)$ и профиль фокусирующего магнитного поля $F(z)$. При аппроксимации управлений использовались сплайны третьей и пятой степени.

Профиль нерегулярного гофрированного волновода задавался как

$$b(T) = b_0 + h_v(T) \sin^2[n_v \pi(T + D_v(T))]. \quad (9)$$

Здесь $T = (z - z_0)/L_v$, где z_0 и L_v – начало и длина нерегулярного участка; n_v – количество периодов; $h_v(T)$ – глубина гофра; $D_v(T)$ – функция ($D_v(0) = D_v(1) = D_v'(0) = D_v'(1) = D_v''(0) = D_v''(1) = 0$), задающая изменение периода; если $D_v(T) = 0$, период постоянный и равен в принятых единицах $d = k_0 L_v / n_v$.

Функции $h_v(T)$ и $D_v(T)$ аппроксимировались в виде разложений по сдвигам стандартной финитной функции $\varphi_3(x)$, представляющей В-сплайн третьей степени,

$$h_v(T) = \sum_{k=1}^K h_k^y \varphi_3[T(K-3) - k + 2], \quad D_v(T) = \sum_{k=1}^K d_k^y \varphi_3[T(K+3) - k - 1], \quad (10)$$

$$\varphi_3(x) = \begin{cases} 0, & |x| \geq 2 \text{ и } (2-x)^3/6, \quad 1 \leq x \leq 2, \\ [1 + 3(1-x) + 3(1-x)^2 - 3(1-x)^3]/6, & 0 \leq x \leq 1, \\ \varphi_3(-x), & x \leq 0. \end{cases}$$

В расчетах использовалась аппроксимация с $K = 5 \dots 8$.

Сопряжение регулярных участков волновода с разными радиусами b_1, b_2 задавалось как $b = b_1 + (b_2 - b_1)P_5(T)$, $T = (z - z_0)/L_c$, где z_0, L_c – начало и длина

участка сопряжения. Полином пятой степени

$$\begin{aligned}
 P_5(T) &= T^3(10 - 15T + 6T^2), \\
 \frac{\partial P_5}{\partial T} &= 30T^2(1 - T)^2, \\
 \frac{\partial^2 P_5}{\partial T^2} &= 60T(1 - 3T + 2T^2)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

обеспечивает непрерывность первой и второй производной в точках сопряжения.

С использованием таких сопряжений на профиле волновода моделировались резонансные канавки и выступы определенной конфигурации, моделировались замедляющие квазипериодические меандровидные структуры, преобразователи мод и рупорные выводы.

2. Расчет и оптимизация релятивистских ЛБВ-, ЛОВ-генераторов на гофрированном волноводе

Используя самосогласованную систему (1), (2), (11) и граничные условия к ней (3), (4), (5), на основе метода блочной матричной прогонки были получены следующие варианты генераторов.

1. Вариант 4-миллиметрового одноволнового генератора. Рабочая частота $f = 73.17$ ГГц, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 4.084$ мм. Напряжение пучка $V_0 = 205$ кВ, ток $I_0 = 900$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 7.5$ Тл. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 12$ периодов, $d_v = 5.385$, $h_v = 2.308$, $b_0 = 4.615$ (3.5 мм, 1.5 мм, 3 мм). Ширина, высота модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = 11.17$, $h_1 = 3.14$, $L_{1v} = 2.2$ (7.26 мм, 2.04 мм, 1.43 мм), $\Delta_1 = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 4.04$ (2.62 мм). Достигнутый КПД составил 10%. Анализ показал, что реализован синхронизм на минус второй гармонике вблизи границы прозрачности 2π -вида. Характеристики этого варианта представлены на рис. 2.

2. Вариант 8-миллиметрового одноволнового генератора. Рабочая частота $f = 37.96$ ГГц, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 7.99$ мм. Напряжение пучка $V_0 = 212$ кВ, ток $I_0 = 600$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 5$ Тл. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 12$ периодов, $d_v = 2.756$, $h_v = 1.18$, $b_0 = 2.3615$ (3.5 мм, 1.5 мм, 3 мм). Радиус волновода на конце $b_L = 2.952$ (3.75 мм). Ширина, высота модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = 4.72$, $h_1 = 1.46$, $L_{1v} = 5.51$ (6 мм, 1.86 мм, 7 мм), $\Delta_1 = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 2.06$ (2.62 мм). Достигнутый КПД составил 36%. Анализ показал, что реализован синхронизм на минус первой гармонике вдали от границы полосы прозрачности. При внутреннем радиусе $b_0 = 2.36$ волновод является закритическим, поэтому для вывода СВЧ-мощности сразу за гофрированным участком радиус волновода увеличен. Характеристики этого варианта представлены на рис. 3.

3. Вариант 3-сантиметрового двухволнового генератора. Рабочая частота $f = 9.97$ ГГц, выбранная опорная частота ω_0 соответствует $\lambda_0 = 3.2$ см. Напря-

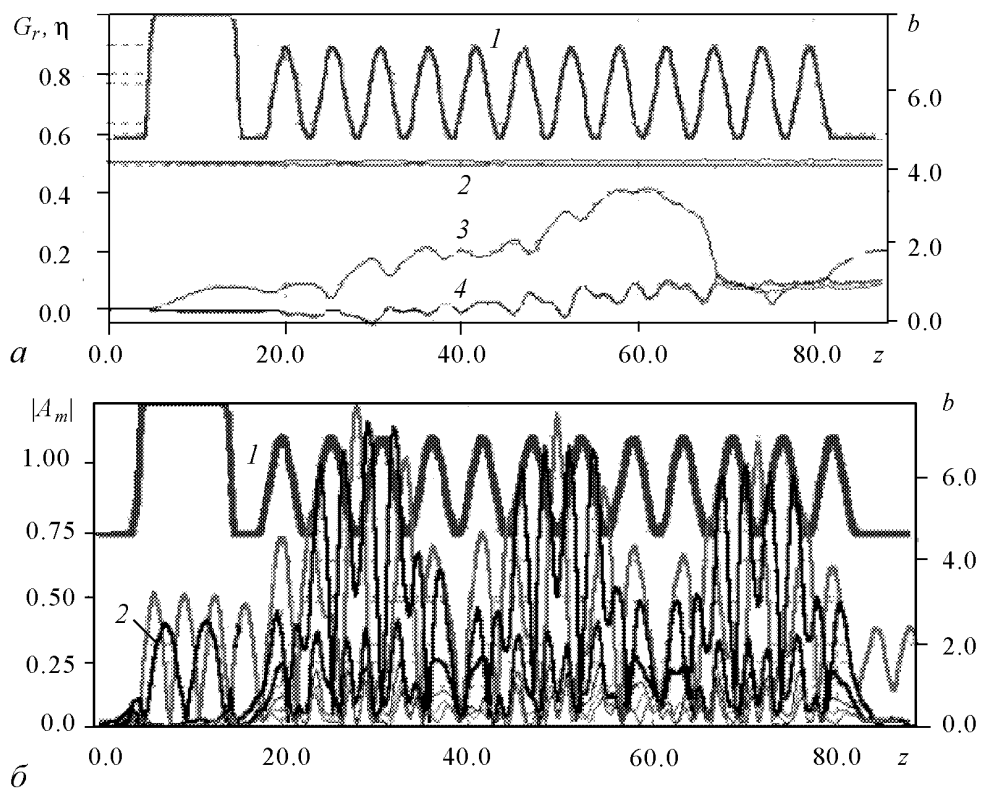


Рис. 2. Характеристики варианта 4-миллиметрового генератора: a – кривые 1 – $b(z)$, 2 – r_{max} , r_{min} , 3 – G_{r1} , 4 – η^e , $-\eta^v$; δ – кривые 1 – $b(z)$, 2 – A_m

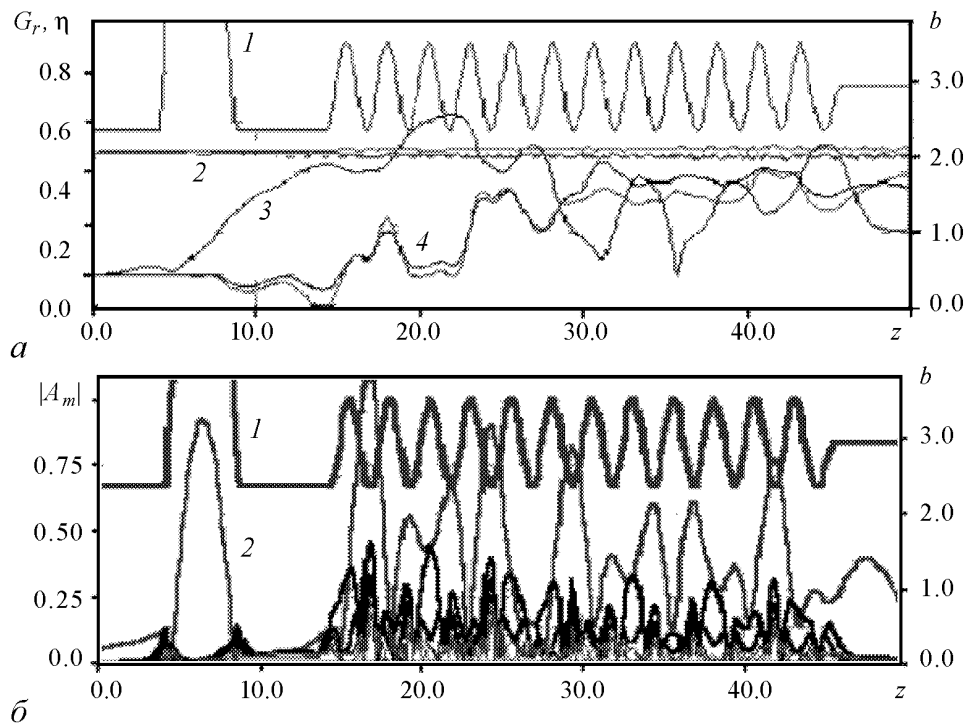


Рис. 3. Характеристики варианта 8-миллиметрового генератора: a – кривые 1 – $b(z)$, 2 – r_{max} , r_{min} , 3 – G_{r1} , 4 – η^e , η^v ; δ – кривые 1 – $b(z)$, 2 – A_m

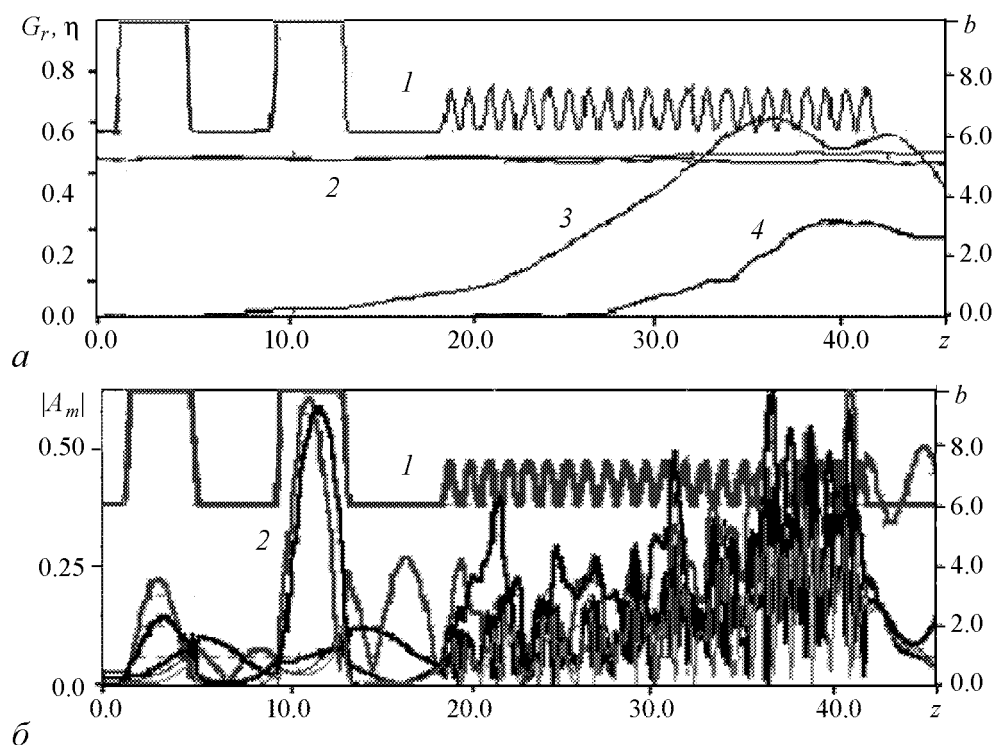


Рис. 4. Характеристики варианта 3-сантиметрового генератора: *a* – кривые 1 – $b(z)$, 2 – r_{max} , r_{min} , 3 – G_{r1} , 4 – η^e , η^v ; *b* – кривые 1 – $b(z)$, 2 – A_m

жение пучка $V_0 = 265$ кВ ($\beta_0 = 0.753$), ток $I_0 = 800$ А, величина фокусирующего магнитного поля $B_0 = 0.35$ Тл. Регулярный гофрированный участок имеет $n_v = 20$ периодов, $d_v = 1$, $h_v = 1.42$, $b_0 = 6$ (0.5 см, 0.71 см, 3 см). Ширина, высота двойной модулирующей канавки и ее расстояние от начала гребенки $L_1 = L_{12} = L_2 = 3.89$, $h_{1,2} = 3.8$, $L_{2v} = 4.716$ (1.945 см, 1.9 см, 2.36 см), $\Delta_{1,2} = 0.8$. Радиус пучка $r_0 = 5$ (2.5 см). Достигнутый КПД составил 30%. Анализ показал, что реализован синхронизм на основной гармонике вдали от границы полосы прозрачности. Характеристики этого варианта представлены на рис. 4.

3. Оптимизация профиля рупора на симметричных E -волнах по характеристике направленности

Основное назначение рупора состоит в том, чтобы согласовать волновод с открытым пространством, что достигается за счет плавного увеличения радиуса волновода до значения, при котором фазовая скорость основной волны приближается к скорости света в свободном пространстве. При этом условии отражение от открытого конца волновода практически отсутствует и реализуется идеальная для данного типа волны диаграмма направленности излучения.

Однако проблема реализации такого рупора заключается в том, что при необходимом для идеального сопряжения выходном радиусе в рупоре возбуждаются выс-

шие типы волн, которые имеют фазовую скорость, большую скорости света в открытом пространстве, что приводит как к рассогласованию и, следовательно, к увеличению коэффициента отражения, так и к ухудшению диаграммы направленности.

Как показывают расчеты, за счет увеличения длины рупора с плавным увеличением радиуса эти негативные факторы хотя и возможно уменьшить, однако, лишь до определенного и не всегда приемлемого уровня. Наиболее радикальный путь улучшения характеристик рупора – подбор закона изменения профиля, при котором высшие типы волн на его выходном сечении отсутствуют и при этом коэффициент отражения из-за их возбуждения минимален.

В работах [9, 25] такая оптимизационная задача решается для рупора, представляющего преобразователь сопротивления для симметричной E_{01} -волны. Найдены и исследованы оптимальные варианты профилей рупора, в котором возможно возбуждение двух или трех распространяющихся волн. Следует отметить, что в таком рупоре кроме распространяющихся возбуждается также ряд ближайших закрытых для текущего сечения волн. Чтобы обеспечить их отсутствие на выходном сечении (после которого они становятся распространяющимися), рупор имеет достаточно протяженный регулярный выходной участок. В [9, 25] задача оптимизации решается для одночастотного режима; она весьма актуальна в настоящее время для расчета и оптимизации профиля выходного рупора излучателя релятивистской ЛБВ-О с рабочим типом волны E_{01} .

При оптимизации нерегулярный участок профиля рупора $b_v(T)$ задавался следующей многопараметрической функцией:

$$b_v = b_L + (b_p - b_L)P_5(T) + D_v(T). \quad (12)$$

Полином пятой степени $P_5(T)$ (11) задает плавный монотонный переход с радиуса b_L на b_p и обеспечивает непрерывность первой и второй производной в точках сопряжения с регулярными участками. Функция $D_v(T)$ определяет отклонение профиля от монотонного и задается в виде (10). Параметры d_k^v ($k = 1 \dots 6$) функции $D_v(T)$ подбирались из условия минимума амплитуд высших мод. Для сравнения рассчитывались характеристики рупора с монотонным изменением профиля ($D_v(T) = 0$).

На рис. 5 приведены характеристики рупора с плавным изменением профиля при $b_L = 3$ (входное сечение нерегулярной части), $b_p = 8$ (выходное сечение нерегулярной части), $L_p = 10$ (длина нерегулярной части). На рис. 5, а представлены: 1 – профиль $b_v(T)$, 2, 3, 4, ... – нормированные амплитуды волн соответственно $E_{01}, E_{02}, E_{03}, E_{04}, \dots$, которые учитывались в расчетах. Как видно из рис. 5, а, на выходе рупора велика амплитуда волны E_{02} : она равна амплитуде E_{01} -волны. В результате функция $G(\vartheta)$ оказывается многогорбой (рис. 5, б).

На рис. 6 приведены аналогичные результаты для тех же заданных параметров b_L, b_p, L_p при минимизации $\sum_{m=2}^8 |A_m(z_p)|$, z_p – координата выходного сечения рупора (рис. 6, а). Характеристика направленности $G(\vartheta)$ существенно улучшается (рис. 6, б).

Увеличение выходного сечения и длины нерегулярной части рупора должно приводить к улучшению (сжатию) функции $G(\vartheta)$. Для подтверждения этого был рассчитан и оптимизирован вариант рупора с $b_L = 3$, $b_p = 10$, $L_p = 14.07$. На

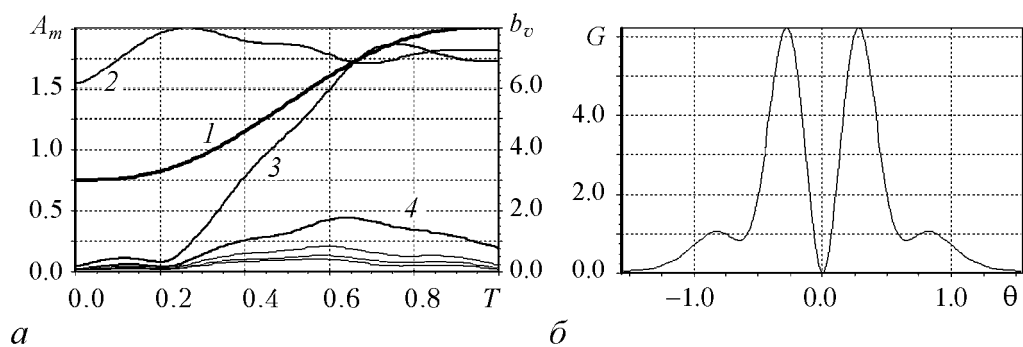


Рис. 5. Характеристики рупора с плавным изменением профиля

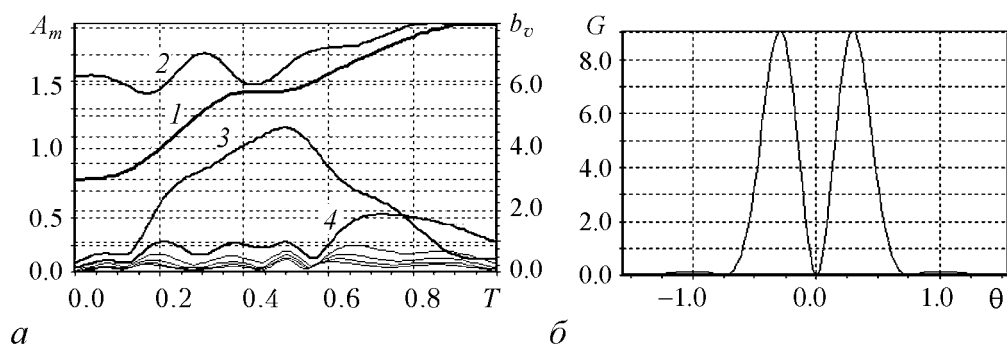


Рис. 6. Характеристика рупора с профилем, оптимизированным по минимуму амплитуды высших мод

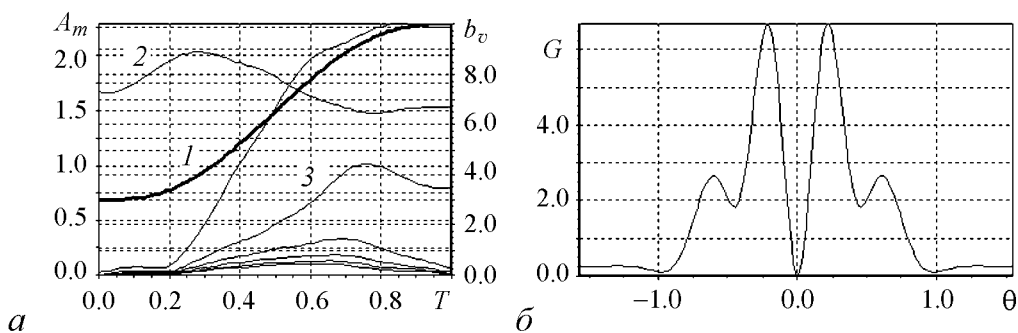


Рис. 7. Характеристика рупора с монотонным профилем и увеличенным раскрытием

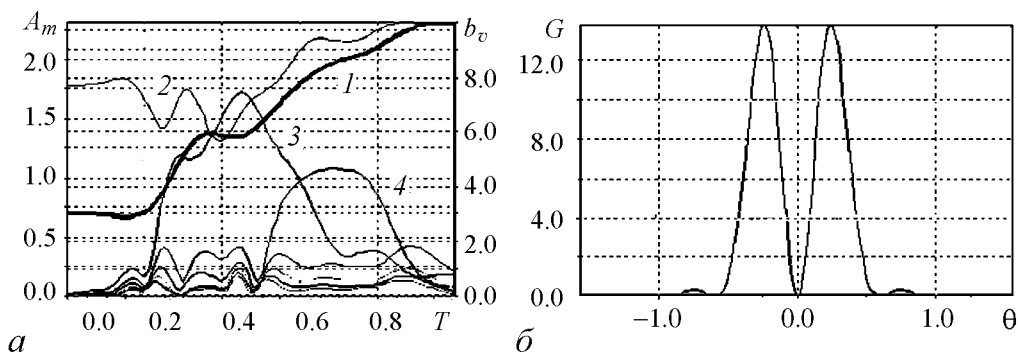


Рис. 8. Характеристика рупора с оптимизированным профилем

рис. 7 представлены характеристики этого варианта с плавным изменением профиля; на рис. 8 – с профилем, оптимизированным по минимуму модового состава на выходе. Очевидны улучшения $G(\vartheta)$ в том и другом случаях. В оптимальном варианте $G_{\max} = 13.5$. Во всех вариантах отраженная мощность (P_{01}^-) не превосходит 0.2% от P_{01}^+ .

Приведенные результаты указывают на эффективность предложенного метода оптимизации профиля нерегулярного рупора на E_{0m} -волнах круглого волновода. Одновременно следует отметить существенную роль высших мод в формировании диаграммы направленности рупора. Управление модовым составом на выходе рупора позволяет существенно улучшить характеристику направленности $G(\vartheta)$ рупора.

В заключение обратим внимание на следующее обстоятельство. В обзоре приведены данные расчетов и оптимизации релятивистских черенковских приборов с учетом только первой гармоники поля. Основанием для этого служат результаты исследования влияния высших гармонических составляющих сигнала в релятивистских ЛБВ-О на гофрированном волноводе в работе [16]. В этой работе показано, что из-за сильной дисперсии в гофрированном волноводе влияние высших гармонических составляющих, возбуждаемых негармоническим электронным потоком в электродинамической системе ЛБВ, на процесс взаимодействия в ней ничтожно мало.

Библиографический список

1. *Зайцев Н.И., Ковалев Н.Ф., Кораблев Г.С., Кулагин И.С.* Релятивистский карсинотрон с длиной волны 3 см и длительностью импульса 0.4 мкс // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7, № 14. С. 879.
2. *Братман В.Л., Денисов Г.Г., Коровин С.Д., Офицеров М.М., Полевин С.Д., Ростов В.В.* Релятивистские генераторы диапазона миллиметровых волн // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1984. Вып. 4. С. 119.
3. *Иванов В.С., Ковалев Н.Ф., Кремнецов С.И., Райзер М.Д.* Релятивистский карсинотрон миллиметрового диапазона // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4, № 14.
4. *Климов А.И., Коровин С.Д., Ростов В.В., Тотменинов Е.М.* Релятивистский черенковский СВЧ-генератор без внешнего магнитного поля // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, вып. 3.
5. *Коровин С.Д., Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М.* Релятивистская ЛОВ с сосредоточенным резонансным рефлектором // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. XLII, № 12.
6. *Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А.* Релятивистский многоволновой черенковский генератор // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9, № 22. С. 1385.
7. *Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А.* Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1984. Вып. 4. С. 79.

8. *Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К.* Моделирование и оптимизация мощных электронных приборов СВЧ. Мн.: БГУИР, 2006.
9. *Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К.* Основы теории, расчета и оптимизации современных приборов СВЧ. Мн.: БГУИР, 2007.
10. *Кураев А.А.* Возбуждение продольно-нерегулярных волноводов с круглым сечением // Известия АН БССР. Сер. ФТН. 1979. № 1. С. 121.
11. *Кураев А.А.* Уравнения возбуждения продольно-нерегулярного коаксиального волновода // Весці НАН Беларусі. Сер. ФТН. 1999. № 4. С. 60.
12. *Колосов С.В., Кураев А.А.* Волны в периодических продольно-нерегулярных волноводах // Электромагнитные волны и электронные системы. 1999. Т. 4, № 3. С. 44.
13. *Кураев А.А., Сеницын А.К.* Нерегулярные волноводы с прямоугольным сечением. Теория и приложения // Электромагнитные волны и электронные системы. 2002. Т. 7, № 3. С. 12.
14. *Закалюкин А.Б., Кураев А.А., Попкова Т.Л.* Высокоэффективные релятивистские черенковские генераторы на гофрированном волноводе // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1992. № 2. С. 66.
15. *Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К.* Моделирование и оптимизация релятивистской ЛБВ-О с замедляющей системой в виде нерегулярного волновода // Радиотехника. 1997. № 9. С. 13.
16. *Гуринович А.Б., Кураев А.А., Сеницын А.К.* Электродинамическая теория ЛБВ-О на гофрированном волноводе с учётом высших гармонических составляющих сигнала // Электромагнитные волны и электронные системы. 2000. Т. 5, № 6. С. 11.
17. *Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К.* Оптимизация по КПД релятивистской ЛБВ-О с использованием атомарных функций // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 10. С. 58.
18. *Закалюкин А.Б., Кураев А.А.* Оптимальные по КПД релятивистские ЛБВ-О с замедляющимся периодом и глубиной канавки // Радиотехника и электроника. 2000. Т.45, № 4. С. 499.
19. *Кураев А.А., Попкова Т.Л.* Электродинамическая нелинейная теория релятивистской ЛБВ-О с замедляющей системой в виде нерегулярного волновода // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 10. С. 1256.
20. *Кураев А.А., Попкова Г.Л.* Электродинамическая нелинейная теория релятивистской ЛБВ-О с замедляющей системой в виде нерегулярного гофрированного волновода // Электромагнитные волны и электронные системы. 1997. Т. 2, № 4. С. 67.
21. *Закалюкин А.Б., Кравченко В.Ф., Кураев А.А.* Оптимизация по КПД профиля нерегулярной замедляющей системы релятивистской ЛБВ-О с использованием атомарных функций // Электромагнитные волны и электронные системы. 1998. Т. 3, № 3. С. 93.
22. *Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Пустовойт В.И., Сеницын А.К.* Нерегулярные

- волноводы в электронике СВЧ // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. Т. 10, № 8. С. 51.
23. *Попкова Т.Л.* Трехгигаватная релятивистская ЛОВ с комбинированным профилем электродинамической системы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2002. Т. 7, № 3. С. 37.
24. *Батура М.П., Кураев А.А., Луцицкая И.В., Синицын А.К.* Оптимизация релятивистских черенковских генераторов на нерегулярных гофрированных волноводах с учётом закритических мод // Доклады БГУИР. 2004. № 4. С. 26.
25. *Кураев А.А., Синицын А.К.* Нелинейная теория релятивистских черенковских генераторов на нерегулярных гофрированных волноводах с учетом закритических мод // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. Т. 10, № 3. С. 43.
26. *Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Пустовойт В.И., Синицын А.К.* Нелинейная теория релятивистских черенковских генераторов на нерегулярных волноводах с учетом конечной проводимости стенок // Доклады РАН. 2007. Т. 412, № 6. С. 759.
27. *Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Синицын А.К.* Нелинейная теория релятивистских черенковских генераторов на нерегулярных волноводах с учетом конечной проводимости стенок // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. № 10. С. 6.
28. *Кураев А.А., Синицын А.К.* Оптимизация профиля рупора на симметричных E -волнах по характеристике направленности // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 4. С. 397.

*Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники*

Поступила в редакцию 3.03.2008

RELATIVISTIC TWT AND BWO ON IRREGULAR WAVEGUIDES WITH CATHODE FILTER-MODULATOR

A.A. Kurayev, I.V. Lushchitskaya, T.L. Popkova, A.O. Rak, A.K. Sinitsyn

Results of development of the nonlinear theory of relativistic TWT and BWO on irregular hollow waveguides with cathode filter-modulator with the account as propagating, and beyond cut-off waves are given. The results of optimization on efficiency of variants relativistic Cherenkov oscillators are given. The rigorous theory of excitation of an irregular electrodynamic system is used to solve the problem of determining the profile of output horn of Cherenkov oscillators that provides a required mode structure at the output and an optimum directivity pattern.



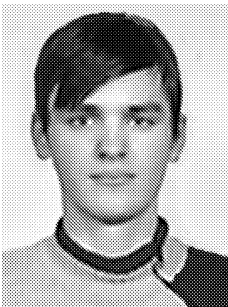
Кураев Александр Александрович (1937) – доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Беларуси, заведующий кафедрой «Антенны и устройства СВЧ» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов: физическая электроника, радиофизика, вычислительные методы.



Луцицкая Ирина Владимировна (1980) – ассистент кафедры «Вычислительные методы и программирование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов: радиофизика.



Попкова Татьяна Леонидовна (1961) – кандидат физико-математических наук, доцент, начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов: радиофизика.



Рак Алексей Олегович (1984) – инженер-электроник кафедры «Антенны и устройства СВЧ» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов: радиофизика, телекоммуникации.



Синицын Анатолий Константинович (1948) – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Вычислительные методы и программирование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Область научных интересов: компьютерное моделирование электровакуумных приборов СВЧ.