

УДК 621.373

С.В. КОЛОСОВ, А.А. КУРАЕВ, А.В. СЕНЬКО

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИРОТОНА НА ГОФРИРОВАННОМ РЕЗОНАТОРЕ

A new type of electronic device – gyroton on the corrugated resonator is described. In this device the spatial bunching of the electron beam does not occur; however, highly efficient conversion of electron beam power into the power of the rotating electromagnetic field is possible. The electron beam entering the device is linear; due to its initial deviation from the axis by the slowing TM_{11} wave, it then returns its longitudinal energy to the same wave with the efficiency of more than 80 %.

Принцип работы гиротонов изложен в [1–10]. В гиротоне отсутствует пространственная группировка электронов, так как в нем происходит круговая развертка предварительно прямолинейного электронного потока и фазовые траектории электронов тонкого пучка во вращающемся электромагнитном поле конгруэнтны, т. е. электронные траектории повторяют друг друга, но с учетом начального фазового сдвига по времени.

Это фундаментальное отличие гиротона от гиротрона, в котором наблюдается пространственная фазовая поперечная группировка спирализованного электронного потока в обычно симметричных полях гладкого волновода.

Первоначальная идея создания такого типа приборов изложена в [1]. Позже эта идея была развита в работах [2, 4], и приборы там назывались «Гирокон» и «Магникон». Мы же предлагаем называть

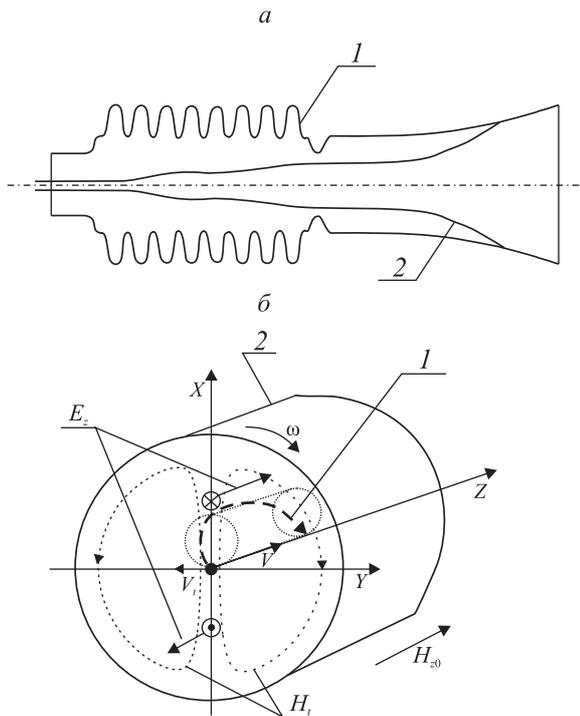


Рис. 1. Конструкция гиротрона:
 а – продольное сечение: 1 – профиль резонатора, 2 – электронный поток;
 б – поперечное сечение: 1 – электронная траектория, 2 – волновод

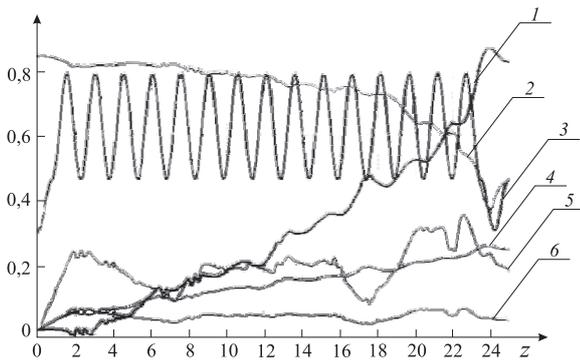


Рис. 2. Интегральные характеристики гиротрона:
 1 – КПД, 2 – продольная скорость электронов $\beta_z = v_z / c$,
 3 – профиль резонатора $g = b / \lambda_0$, 4 – радиус ведущего центра электронов, 5 – поперечная скорость электронов $\beta_t = v_t / c$, 6 – радиус вращения электронов r_e / λ_0

где $\beta_z = V_z / c$ – продольная скорость электронного потока, Ω – циклотронная частота, β_w – продольная скорость замедленной волны TM_{11} .

Математическая модель. Уравнения возбуждения продольно-нерегулярного волновода были построены на основе метода преобразования координат [6] и в нормированном виде могут быть записаны как:

$$\frac{d\dot{A}_{mnp}^e}{dz} = \dot{V}_{mnp} + v_{np} \dot{C}_{mnp};$$

$$v_{np} \dot{C}_{mnp} = -\frac{\dot{V}_{mnp} v_{np}^2}{m^2 g^2} - \frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \frac{v_{np}}{e_{npp} m^2 g^2} \sum_i \dot{A}_{mni}^e \gamma_{npi}^3 + \frac{v_{np}}{g e_{npp}} \frac{dg}{dz} \left[\sum_i \dot{A}_{mni}^e I_{2nnp} - \sum_i \dot{A}_{mni}^m \bar{\gamma}_{npi}^3 \right] -$$

$$- j \frac{\sigma v_{np}}{m e_{npp} \pi g^2} \frac{1}{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} J_n(v_{np} \rho_j) e^{-j(n\phi_j - mT_j)};$$

такие приборы «Гиротон», как предлагалось в [3]. Кроме того, конструкция предлагаемого прибора (рис. 1) существенно отличается от описанных в [2, 4].

Основную роль в механизме работы таких приборов имеет волна E_{11} , которая сильно связана с волной H_{11} в гофрированном волноводе. Наличие гофрировки волновода приводит к замедлению фазовой скорости распространения волны вдоль волновода, что позволяет существенно понизить значение магнитостатического поля для достижения синхронизма электронного потока с бегущей замедленной волной. В то время как в гиротронах из [3] существует режим ударного взаимодействия, в гофрированном резонаторе рабочая область достаточно длинная, около 4 длин волн, за счет чего существенно уменьшается значение напряженности поля в резонаторе.

В [5–8] рассмотрен режим только бегущих волн в двухмодовом приближении. В данной работе был исследован режим стоячих волн с учетом множества их закритических типов.

В гофрированном резонаторе присутствуют две бегущие навстречу замедленные волны TM_{11} , причем волна, движущаяся вместе с электронным потоком в одну сторону, играет доминирующую роль. В выходном волноводе присутствует только одна волна TE_{11} , а остальные являются закритическими волнами. Однако в резонаторе волна TM_{11} играет основную роль. На рис. 2 схематически показано движение электрона во вращающейся с частотой ω волне TM_{11} в присутствии продольного магнитостатического поля H_{z0} . Прямолинейный электронный поток, движущийся по оси волновода, под действием поперечной составляющей ВЧ магнитного поля волны $TM_{11} - H_t$ отклоняется от оси с поперечной скоростью $-V_t$. После этого он начинает вращаться по Ларморовской орбите и попадает под действие тормозящей фазы продольной компоненты электрического поля волны $TM_{11} - E_z$. Синхронизм взаимодействия электронов и поля достигается при условии

$$1 + \beta_z^2 - \frac{\Omega}{\omega} - \beta_w \beta_z = 0,$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d\dot{V}_{mnp}}{dz} = & -m^2 \dot{A}_{mnp}^e + \frac{1}{e_{npp}} \sum_i \left\{ \dot{A}_{mni}^m \left[-\frac{1}{g^2} \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 + \frac{1}{g} \frac{d^2g}{dz^2} \right] + \dot{P}_{mni} \frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \right\} \gamma_{npi}^4 - \\
 & -m^2 \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 \frac{1}{e_{npp}} \sum_i \dot{A}_{mni}^e I_{3npi} + m^2 \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 \frac{1}{e_{npp}} \sum_i \dot{A}_{mni}^m \gamma_{npi}^5 + m^2 g \frac{dg}{dz} \frac{1}{e_{npp}} \sum_i \dot{C}_{mni} I_{2npi} - \\
 & - \frac{j m \sigma}{e_{npp} g \pi N_e} \sum_{j=1}^{N_e} \left[\left(\beta_{r_j} - \rho_j \beta_{z_j} \frac{dg}{dz} \right) J'_n(\nu_{np} \rho_j) + j \frac{n}{\nu_{np} \rho_j} J_n(\nu_{np} \rho_j) \beta_{\phi_j} \right] \frac{e^{j(n\phi_j - mT_j)}}{\beta_{z_j}}; \\
 & \frac{d\dot{A}_{mnp}^m}{dz} = \dot{P}_{mnp}; \\
 \frac{d\dot{P}_{mnp}}{dz} = & -\dot{A}_{mnp}^m \left[m^2 \left(1 + \frac{n^2}{\mu_{np}^2} \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 \right) - \frac{\mu_{np}^2}{g^2} - \frac{\gamma_{snp}^5}{g^2} \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 + \frac{1}{g} \frac{d^2g}{dz^2} \gamma_{np}^6 \right] + \\
 & + \sum_{i \neq p} \dot{A}_{mni}^m \left(\left(\frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \right)^2 \gamma_{npi}^7 + \frac{1}{g} \frac{d^2g}{dz^2} \gamma_{npi}^8 \right) / h_{npp} + \frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \sum_{i \neq p} \dot{P}_{mni} \gamma_{npi}^9 / h_{npp} + \frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \sum_i \dot{V}_{mni} \gamma_{npi}^{10} / h_{npp} + \\
 & + m^2 \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 \sum_i \dot{A}_{mni}^e \gamma_{npi}^5 / h_{npp} - m^2 g \frac{dg}{dz} \sum_i \dot{C}_{mni} \gamma_{npi}^{12} / h_{npp} - \\
 & - j \frac{m \sigma}{h_{npp} \pi g N_e} \sum_{j=1}^{N_e} \left[- \left(\beta_{r_j} - \rho_j \frac{dg}{dz} \beta_{z_j} \right) \frac{n}{\mu_{np} \rho_j} J_n(\mu_{np} \rho_j) - j \beta_{\phi_j} J'_n(\mu_{np} \rho_j) \right] \frac{e^{j(n\phi_j - mT_j)}}{\beta_{z_j}}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$z = Z \cdot 2\pi/\lambda_0, \quad g = b \cdot 2\pi/\lambda_0, \quad \beta = V/c, \quad m = \omega/\omega_0, \quad \sigma = I_0 \frac{\eta_0 \mu_0}{c} = I_0 \cdot 0,73723 \cdot 10^{-3},$$

$$\dot{A}_{mnp}^e = \frac{\dot{E}_{\perp mnp}^e \eta_0}{c^2}, \quad \dot{C}_{mnp} = \frac{\dot{E}_{z mnp}^e \eta_0}{\omega_0 c}, \quad \dot{A}_{mnp}^m = \frac{\dot{E}_{\perp mnp}^m \eta_0}{c^2};$$

$$h_{npp} = \frac{1}{2} \cdot J_n^2(\mu_{np}) \cdot \left(1 - \left(\frac{n}{\mu_{np}} \right)^2 \right); \quad e_{npp} = \frac{1}{2} \cdot J_{n-1}^2(\nu_{np}); \quad \sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0;$$

$$\gamma_{npi}^3 = \frac{n \mu_{ni} \nu_{np}}{\nu_{np}^2 - \mu_{ni}^2} \cdot J_{n-1}(\nu_{np}) \cdot J_n(\mu_{ni}); \quad \bar{\gamma}_{npi}^3 = \frac{n \nu_{ni}}{\mu_{ni}^2 (\mu_{ni}^2 - \nu_{np}^2)} \cdot J_{n-1}(\nu_{np}) \cdot J_n(\mu_{ni});$$

$$\gamma_{npi}^4 = \frac{n \cdot \mu_{ni}}{\mu_{ni}^2 - \nu_{np}^2} \cdot J_n(\mu_{ni}) \cdot J_{n-1}(\nu_{np}); \quad \gamma_{npi}^5 = \frac{2 \cdot n \cdot \nu_{np}^2}{\mu_{ni} (\mu_{ni}^2 - \nu_{np}^2)^2} \cdot J_n(\mu_{ni}) \cdot J_{n-1}(\nu_{np});$$

$$\gamma_{npp}^5 = \left(\mu_{np}^2 + n^2 \left(1 - \frac{2n^2}{\mu_{np}^2} + \frac{5}{\mu_{np}^2} \right) \right) \cdot J_n^2(\mu_{np}) / 6;$$

$$\gamma_{npi}^6 = \frac{\mu_{ni} \mu_{np}}{\mu_{ni}^2 - \mu_{np}^2} \left(\frac{n^2}{\mu_{np}^2} - 1 \right) \cdot J_n(\mu_{ni}) \cdot J_n(\mu_{np}); \quad \gamma_{npp}^6 = \frac{n^2}{2\mu_{np}^2} \cdot J_n^2(\mu_{np});$$

$$\gamma_{npi}^7 = \frac{\nu_{ni} J_{n-1}(\nu_{ni}) \cdot J_{n-1}(\nu_{np})}{\nu_{ni}^2 - \nu_{np}^2}; \quad \gamma_{npp}^7 = \frac{e_{npp}}{\nu_{np}}; \quad \gamma_{npi}^8 = \frac{2\nu_{np}^2}{\mu_{ni}^2 - \nu_{np}^2} \cdot J_n(\mu_{ni}) \cdot J_{n-1}(\nu_{np}).$$

В системе (1) оказываются связанными E - и H - типы волн с одинаковым азимутальным индексом n , что обусловлено азимутальной симметрией волновода вдоль оси z .

Уравнения движения i -й заряженной частицы в электромагнитном поле нерегулярного волновода и в неоднородном магнитостатическом поле имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\beta_{xi}}{dz} &= -\frac{R_i}{\beta_{zi}} [\bar{E}_{xi} + \beta_{yi} F - \beta_{zi} (\bar{H}_{yi} + F_{yi}) - \beta_{xi} (\beta_{xi} \bar{E}_{xi} + \beta_{yi} \bar{E}_{yi} + \beta_{zi} \bar{E}_{zi})], \\ \frac{d\beta_{yi}}{dz} &= -\frac{R_i}{\beta_{zi}} [\bar{E}_{yi} - \beta_{xi} F + \beta_{zi} (\bar{H}_{xi} + F_{xi}) - \beta_{yi} (\beta_{xi} \bar{E}_{xi} + \beta_{yi} \bar{E}_{yi} + \beta_{zi} \bar{E}_{zi})], \\ \frac{d\beta_{zi}}{dz} &= -\frac{R_i}{\beta_{zi}} [\bar{E}_{zi} + \beta_{xi} (\bar{H}_{yi} + F_{yi}) - \beta_{yi} (\bar{H}_{xi} + F_{xi}) - \beta_{zi} (\beta_{xi} \bar{E}_{xi} + \beta_{yi} \bar{E}_{yi} + \beta_{zi} \bar{E}_{zi})], \\ \frac{dx_i}{dz} &= \beta_{xi} / \beta_{zi}, \quad \frac{dy_i}{dz} = \beta_{yi} / \beta_{zi}, \quad \frac{dT_i}{dz} = 1 / \beta_{zi}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$\begin{aligned} R_i &= \sqrt{1 - \beta_{xi}^2 - \beta_{yi}^2 - \beta_{zi}^2}, \quad F(z) = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0}, \\ F_{xi} &= -\frac{r_i}{2} \frac{dF}{dz} \cos \varphi_i, \quad F_{yi} = -\frac{r_i}{2} \frac{dF}{dz} \sin \varphi_i, \\ r_i &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2}, \quad \varphi_i = \arctg(y_i / x_i), \\ \bar{E}_{xi} + j\bar{E}_{yi} &= \frac{\eta_0}{\omega_0 c} (E_{xi} + jE_{yi}), \quad \bar{E}_{zi} = \frac{\eta_0}{\omega_0 c} E_{zi}, \\ \bar{H}_{xi} + j\bar{H}_{yi} &= \frac{\eta_0 \mu_0}{\omega_0} (H_{xi} + jH_{yi}), \quad \bar{H}_{zi} = \frac{\eta_0 \mu_0}{\omega_0} H_{zi}. \end{aligned}$$

Начальные условия к системе уравнений (2) при отсутствии начальной модуляции электронного потока могут быть заданы в виде

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i(0) &= \frac{2\pi}{N} (i-1), \quad \beta_{xi}(0) = -\beta_{\perp 0} \sin \varphi_i(0), \\ \beta_{yi}(0) &= \beta_{\perp 0} \cos \varphi_i(0), \quad \beta_{zi}(0) = \beta_{z0}, \\ \beta_{z0} &= \beta_0 / \sqrt{1+q^2}, \quad \beta_{\perp 0} = \beta_{z0} q; \\ x_i(0) &= r_{vc} + \beta_{\perp 0} / (F(0)R_0) \cos \varphi_i, \\ y_i(0) &= \beta_{\perp 0} / (F(0)R_0) \sin \varphi_i, \\ T_i &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Электронный КПД в использованных обозначениях определяется как

$$\eta_e(z) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{1 - R_0 / R_i(z)}{1 - R_0}.$$

Алгоритм вычислений

Прямое решение задачи Коши для системы уравнений движения электронов и возбуждения волн в нерегулярном волноводе обычными методами интегрирования (например, Рунге – Кутты) невозможно при учете закритических типов волн, так как система уравнений получается очень неустойчивой. Для решения краевой задачи был использован метод блочно-матричной прогонки. Система дифференциальных уравнений (1) была приведена к виду

$$\frac{d\mathbf{u}}{dz} = G(z) \cdot \mathbf{u} + \mathbf{f}(z).$$

Для решения краевой задачи выбиралась равномерная сетка и использовалась трехточечная конечно-разностная схема Адамса третьего порядка точности. В результате получалась следующая СЛАУ относительно вектора \mathbf{u} :

$$\frac{h}{12} G_{i-1} \mathbf{u}_{i-1} - \left(E + \frac{8h}{12} G_i \right) \mathbf{u}_i + \left(E - \frac{5h}{12} G_{i+1} \right) \mathbf{u}_{i+1} = \frac{h}{12} (5\mathbf{f}_{i+1} + 8\mathbf{f}_i - \mathbf{f}_{i-1}).$$

Эта система линейных алгебраических уравнений решалась специальным блочным методом Гаусса.

Граничные условия для системы уравнений (1) задавались исходя из полного отражения волн слева следующим образом:

$$\dot{A}_{mnp}^{e,m} = 0 \Big|_{z=0}.$$

На правой границе задавалось условие полного согласования всех волн, кроме одной рабочей волны, следующим образом:

$$\dot{V}_{mnp} \frac{\chi_{m,mnp}}{m^2} + j\dot{A}_{mnp}^e = 0 \Big|_{z=L} \quad - \text{ для распространяющихся } E\text{-волн,}$$

$$-\dot{V}_{mnp} \frac{|\chi_{e,mnp}|}{m^2} + \dot{A}_{mnp}^e = 0 \Big|_{z=L} \quad - \text{ для закритических } E\text{-волн,}$$

$$\dot{P}_{mnp} + j\chi_{m,mnp} \dot{A}_{mnp}^m = 0 \Big|_{z=L} \quad - \text{ для распространяющихся } H\text{-волн,}$$

$$\dot{P}_{mnp} + |\chi_{m,mnp}| \dot{A}_{mnp}^m = 0 \Big|_{z=L} \quad - \text{ для закритических } H\text{-волн.}$$

Здесь $\chi_{e,mnp}^2 = m^2 - v_{np}^2 / g^2$, $\chi_{m,mnp}^2 = m^2 - \mu_{np}^2 / g^2$.

Для рабочей E -волны на правом конце волновода граничные условия задаются так:

$$\dot{V}_{mnp} \frac{\chi_m}{m^2} + j\dot{A}_{mnp}^e = 2j \sqrt{\left| K_{in} \frac{(1-R_0)\sigma\chi_{e,mnp}}{R_0\pi e_{npp} m} \right|} \Big|_{z=L}.$$

Для рабочей H -волны будет следующее условие:

$$\dot{P}_{mnp} + j\chi_{m,mnp} \dot{A}_{mnp}^m = j2\chi_{m,mnp} \sqrt{\left| K_{in} \frac{(1-R_0)m\sigma}{R_0\pi h_{npp}\chi_{m,mnp}} \right|} \Big|_{z=L}.$$

Результаты расчетов гиротонов. Разработанная математическая модель была заложена в основу компьютерной программы расчета и оптимизации процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков с полями нерегулярных круглых волноводов GYRO-K из комплекса КЕДР [11]. Поиск оптимальной конструкции гиротона на гофрированном резонаторе по этой программе привел к следующему результату:

Вариант 1. Ускоряющее напряжение $V_0 = 445$ кВ, электронный ток $I_0 = 7$ А, длина резонатора $l = L2\pi/\lambda_0 = 25$, внутренний радиус гофра $g_1 = r_1 \cdot 2\pi/\lambda_0 = 2,916$, амплитуда гофра $\Delta g = \Delta r \cdot 2\pi/\lambda_0 = 2,047$, радиус выходного сужения $g_3 = 1,91$, число ребер гофра $n = 14$, значение магнитостатического поля $F = H/H_s = 1,185$.

В выходном волноводе данного прибора (профиль приведен на рис. 2) распространяется только одна H_{11} -волна. Полости гофра образуют пять связанных двугорбых резонансов в основном на волне E_{11} , хотя, как это видно из рис. 1, в создании общего поля участвуют и другие типы волн. Всего в расчетах учитывалось 16 типов волн: восемь $E_{11} - E_{18}$ и восемь $H_{11} - H_{18}$. Электронный КПД такого гиротона достигает 81 %. Профиль резонатора представляет собой гофр, который слева соединяется с закритической для всех типов волн (на рабочей частоте) трубкой дрейфа, через которую по центру проходит прямолинейный электронный поток, а справа заканчивается внутренним выступом, повышающим добротность такого резонатора. На амплитудно-частотных характеристиках прибора, не приведенных здесь, просматриваются несколько резонансов, как на более низких по отношению к основному резонансу частотах, так и на более высоких частотах. Все остальные резонансы, кроме основного, обладают более низкой дифракционной добротностью и не могут оказывать на электронный поток такого воздействия, как основной резонанс. Нагруженная добротность резонатора для основной волны равна 5250. Поэтому поле в данном варианте гиротона можно с большой степенью точности считать фиксированным.

На рис. 2 приведены интегральные характеристики гиротона, откуда видно, что электронный поток вначале отклоняется от оси поперечной составляющей высокой частоты магнитного поля вращающейся волны E_{11} , при этом радиус вращения электронов и радиус ведущего центра вращения растут одинаково (кривые 4 и б), это означает, что орбиты электронов только касаются оси резонатора. В дальнейшем с $z > 3$ электронный поток начинает отдавать свою поступательную энергию продольной электрической составляющей волны E_{11} (кривая 2), КПД при этом почти монотонно возрастает (кривая 1), а радиус центра вращения электронов постепенно отдалается от оси прибора (кривая 4). Такой высокий КПД достигается исключительно за счет отбора продольной энергии у электронов.

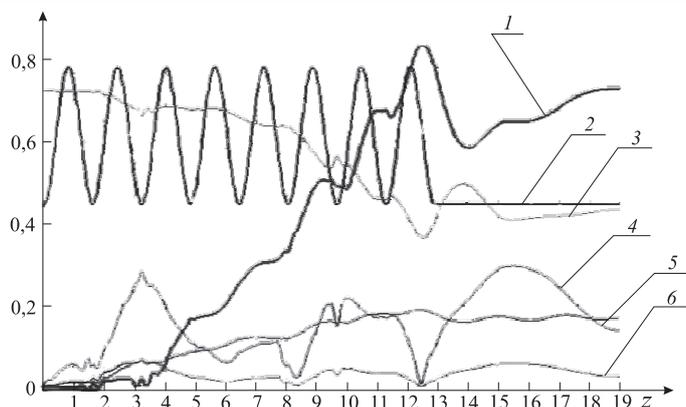


Рис. 3. Интегральные характеристики 2-го варианта гиротона: 1 – КПД, 2 – продольная скорость электронов $\beta_z = v_z/c$, 3 – профиль резонатора $g = b/\lambda_0$, 4 – поперечная скорость электронов $\beta_\perp = v_\perp/c$, 5 – радиус ведущего центра электрона, 6 – радиус вращения электронов r_e/λ_0

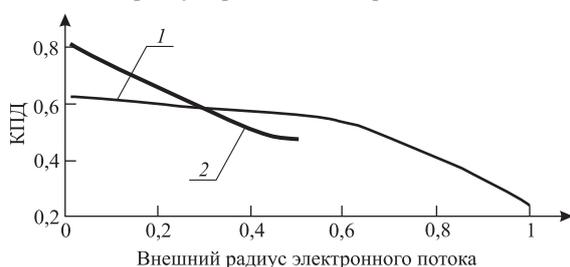


Рис. 4. Зависимость КПД прибора от радиуса электронного потока: 1 – вариант 1, 2 – вариант 2

Сравнение зависимостей КПД от ширины электронного потока (рис. 4) показало, что второй вариант гиротона значительно превосходит первый по возможной толщине электронного потока.

Разработанная методика расчета и оптимизации гиротонов может быть использована для расчета и оптимизации процессов в различных электронных приборах СВЧ, таких как гиротроны, ЛОВ и ЛБВ. Рассмотренный в статье гиротон-генератор с гофрированным резонатором может работать с КПД 81 % и выходной мощностью 4,8 МВт.

1. Колосов С.В., Кураев А.А. // Радиотехника и электроника. 1973. Т. 18. № 12. С. 2558.
2. Будкер Г.И. Электронный прибор СВЧ – гирокон: А. с. 340345 СССР, 05.08.76.
3. Kurayev A.A., Sinitsyn A.K., Slepyan A.Ya. // J. Electronics. 1996. Vol. 80. № 4. P. 603.
4. Nezhevenko O. A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. Vol. 22. P. 756.
5. Kolosov S.V., Kurayev A.A., Lavrenov A.A. // Traveling wave gyroton with double mode operations – IVEC-2002, April 23–25. Monterey, California, USA, 2002. P. 115.
6. Kolosov S.V., Kurayev A.A. // Electromagnetic waves and electronic systems. 1998. Vol. 3. № 1. P. 35.
7. Kolosov S.V., Kurayev A.A., Lavrenov A.A. Influence of the space charge fields in traveling wave gyrotons – CriMiCo-2004, 13–17 September. Sevastopol, Ukrain, 2004. P. 608.
8. Kolosov S.V., Lavrenov A.A. // J. of Communications Technology and Electronics. 2006. Vol. 51. № 6. P. 693.
9. Kolosov S.V., Kurayev A.A., Lavrenov A.A. Microwave Source with Goffered Cavity – IVEC-2006, April 25–27. Monterey, 2006. P. 279.
10. Kolosov S.V., Kurayev A.A., Lavrenov A.A. Microwave Generator on goffered Resonator – CriMiCo-2006, 8–12 September. Sevastopol, Ukrain, 2006. Vol. 1. P. 247.
11. Kolosov S.V., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K. et al. // The simulation codes «CEDR» – IVEC-2010, 18–20 May. Monterey, California, USA, 2010. P. 115.

Поступила в редакцию 11.03.12.

Станислав Васильевич Колосов – доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования БГУИР.

Александр Александрович Кураев – доктор физико-математических наук, профессор кафедры антенн и устройств СВЧ БГУИР.

Александр Васильевич Сенько – аспирант кафедры вычислительных методов и программирования БГУИР. Научный руководитель – С.В. Колосов.

Внутренний выступ в конце резонатора повышает добротность резонатора до 5250, что позволяет снизить рабочий ток прибора до 7 А. Но он же ограничивает толщину электронного потока до $D2\pi/\lambda < 1$. При большей толщине поток начинает осаждаться на этом выступе.

Вариант 2. Линейная оценка стартового тока равна 9,1 А, что несколько больше рабочего тока. Однако стартовый ток можно понизить до рабочего, немного уменьшив начальную продольную скорость электронов с $\beta_0 = 0,83$ до $\beta_0 = 0,8$, при этом КПД уменьшается только на 5 %.

Напряжение электронного потока $V_0 = 245$ кВ, ток $I_0 = 27$ А, длина рабочей области $l = L2\pi/\lambda_0 = 13$, внутренний радиус гофрированного волновода $g_1 = r_1 \cdot 2\pi/\lambda_0 = 2,811$, амплитуда гофра $g_2 = r_2 \cdot 2\pi/\lambda_0 = 2,094$, число ребер гофра $n = 8$, нормированное значение магнитостатического поля $F = H/H_s = 0,949$. КПД этого варианта гиротона приведены на рис. 3.

КПД этого гиротона достигает 73 %. В сравнении с первым вариантом прибора этот гиротон генерирует мощность в 2 раза больше. Выходная мощность достигает 4,8 МВт.