

УДК 621.385.6

РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ О-ТИПА С ЛЕНТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

А.В. АКСЕНЧИК, И.Ф. КИРИНОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 22 августа 2018

Аннотация. Для генерации мощных СВЧ колебаний предлагается использовать лампу обратной волны (ЛОВ) О-типа с электродинамической системой на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах. В математической модели применяются ленточные электронные пучки. Учитывается пространственный заряд. Проведены оптимизационные расчеты и получены оптимальные коэффициенты полезного действия (КПД) генераторов для разных размеров электронных потоков, ускоряющих напряжений 400–500 кВ, токов 200–900 А. Проведен анализ процессов взаимодействия. Для увеличения мощности генераторов предложена двухсекционная схема. Расчеты показали, что электронный КПД нерегулярных релятивистских ЛОВ достигает 30–42 %, выходная мощность – 50–170 МВт.

Ключевые слова: генератор О-типа, прямоугольный волновод, оптимизация, ленточный пучок, электронный поток.

Abstract. To generate high-power microwave oscillations it is proposed to use an O-type backward-wave oscillator (BWO) with an electrodynamic system on folded rectangular waveguides. The mathematical model uses sheet electron beams. The space charge is taken into account. Optimization calculations have been carried out and optimal generator efficiencies have been obtained for different sizes of electron beams, accelerating voltages 400–500 kV, currents 200–900 A. The analysis of interaction processes has been carried out. To increase the power of the generators proposed two-section scheme. Calculations showed, that the electronic efficiency of irregular relativistic BWO reaches 30–42 %, the output power is 50–170 MW.

Keywords: O-type generator, rectangular waveguide, optimization, sheet beam, electronic stream.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 119, No. 1, pp. 38-44

Relativistic backward-wave oscillators of O-type with sheet electronic beams

A.V. Aksenchyk, I.F. Kirinovich

Введение

Генераторы и усилители мощных СВЧ колебаний используются во многих областях: наземная и космическая связь, радиолокационные системы, системы противозушной обороны, термоядерный синтез и др. Одними из основных приборов, позволяющих решить большую часть стоящих в данных областях задач, являются лампы бегущей волны (ЛБВ) – усилители и лампы обратной волны (ЛОВ) – генераторы с замедляющими системами (ЗС), использующими различные электродинамические структуры. Рассмотрим приборы О-типа с продольным взаимодействием. Перспективной структурой в качестве ЗС является волнообразно изогнутый прямоугольный волновод [1–5]. Как показано в работах [1, 4], генераторы ЛОВ могут иметь выходную мощность 0,1...3 ГВт. В этих работах проводились расчеты релятивистских ЛОВ с электронными пучками цилиндрической формы. В данной работе проводится исследование релятивистских ЛОВ с использованием ленточных электронных пучков [2, 3], которые позволяют увеличить ток пучка электронов, уменьшить плотность пространственного заряда, увеличить эффективность приборов.

На рис. 1 показана схема электродинамической системы генератора [1, 4, 5], в которой электронный поток (ЭП) дискретно взаимодействует с поперечным полем волны волнообразно изогнутого прямоугольного волновода. Поток электронов прямоугольной формы проходит через отверстия в широкой стенке волновода (в максимуме поперечного электрического поля). На рис. 2 изображен ленточный поток электронов прямоугольной формы в канале дрейфа сечением $a1 \times b1$. В скобках приведены составляющие системы координат волновода, изображенного на рис. 1.

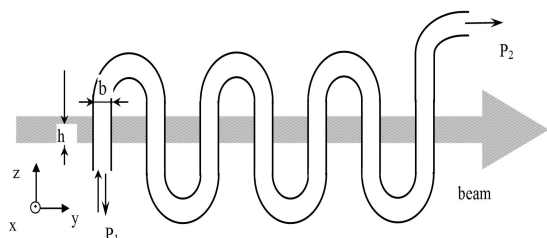


Рис. 1. Схема генератора

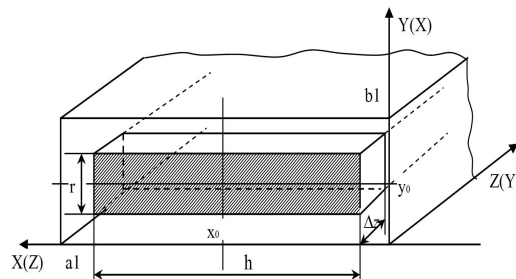


Рис. 2. Канал дрейфа с потоком электронов

Взаимодействие электромагнитной (ЭМ) волны в волноводе и потока электронов происходит в зазорах волновода. Синхронизм движения электронов и волны осуществляется подбором длины изогнутых отрезков волновода и длины пролетных каналов дрейфа, чтобы электрон при движении вдоль оси Y (рис. 1) попадал бы в одну и ту же фазу поперечного поля TE волны волновода.

В [4, 5] описана работа прибора в режиме усиления сигнала (режим ЛБВ). На рис. 3 показана схема цепочки эквивалентных четырехполюсников. Z_n – согласованная нагрузка для прямой волны при работе прибора в режиме ЛБВ. Прибор может работать и в режиме генерации колебаний – режим ЛОВ. При работе прибора в режиме ЛОВ Z_0 будет являться сопротивлением нагрузки для обратной волны.

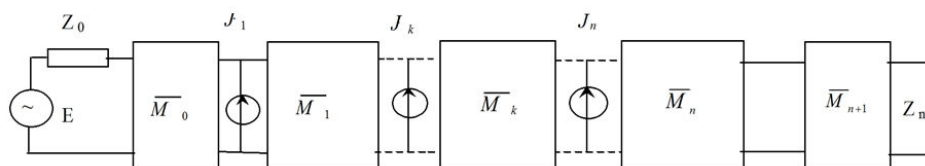


Рис. 3. Цепочка эквивалентных четырехполюсников

В [1, 4] показано, что при оптимальных длинах труб дрейфа и фазах поля в зазорах в электродинамической системе возбуждается обратная ЭМ волна, что приводит к возникновению положительной обратной связи и самовозбуждению генератора. Возбужденная обратная ЭМ волна, с увеличивающейся амплитудой от конца к началу прибора, переносит энергию промодулированного по скорости и плотности ЭП в начало области взаимодействия – на входной конец волновода (выход генератора – левый конец волновода, рис. 1). С выхода генератора в согласованную нагрузку Z_0 поступает мощность возбужденной обратной волны P_1 (рис. 1).

Следует отметить, что процессы взаимодействия ЭМ волны и ЭП в ЛОВ-О сложнее, чем в ЛБВ-О. ЗС рассматривают как периодическую структуру, в которой поле описывается множеством пространственных гармоник. Процесс генерации колебаний в ЛОВ-О возникает при превышении тока I_0 электронного луча некоторого порогового значения $I_{пуск}$. Условие синхронизма между ЭП и ЭМ волной выполняется на минус первой пространственной гармонике. В связи с тем, что процессы взаимодействия в мощных ЛОВ-О являются нелинейными, определять пусковой ток будем численно с использованием разработанной математической модели, задавая ряд фиксированных значений тока I_0 . Для начала возбуждения ЛОВ при расчетах в итерационном процессе будем задавать малое значение амплитуды входного сигнала E .

Приведенная в работе математическая модель является общей для генераторов ЛОВ и усилителей ЛБВ. По математической модели составлены программы и проведены оптимизационные расчеты генераторов ЛОВ в сантиметровом диапазоне длин волн.

Математическая модель процессов взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем

Описанная ЛОВ-0 (рис. 1) моделируется цепочкой эквивалентных четырехполюсников (рис. 3). Один изгиб волнообразно изогнутого прямоугольного волновода моделирует один четырехполюсник. В [4, 5] приведено описание цепочки эквивалентных четырехполюсников. На входе цепочки, слева, рис. 3, подключен генератор входного сигнала \dot{E} с внутренним сопротивлением Z_0 , равным эквивалентному сопротивлению волновода Z_w . Затем следует согласующий четырехполюсник M_0 , описывающий отрезок волновода до первого зазора. После последнего зазора, справа, подключен согласующий M_{n+1} четырехполюсник для согласования волновода с нагрузкой Z_n . Четырехполюсники являются согласованными [4] при изменении частоты. Сопротивление нагрузки Z_n равно эквивалентному сопротивлению волновода Z_w .

Матрица передачи \dot{A} четырехполюсника моделирует изогнутый отрезок волновода длиной ℓ [4, 5]:

$$\dot{A} = \begin{vmatrix} ch(j\dot{\Gamma}\ell) & Z_w \cdot sh(j\dot{\Gamma}\ell) \\ \frac{1}{Z_w} sh(j\dot{\Gamma}\ell) & ch(j\dot{\Gamma}\ell) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $\dot{\Gamma} = \Gamma' - j\Gamma''$; $\Gamma' = K\sqrt{1 - \chi_{mn}^2/K^2}$; $K = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$; $\chi^2 = \chi_{mn}^2 = (m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2$;

$\Gamma'' = \frac{R_s \left[1 + \frac{2b}{a} (\lambda/\lambda_{cr})^2 \right]}{Z_0 \cdot b \sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{cr})^2}}$; λ_{cr} – для волны TE_{10} $\lambda_{cr} = 2a$; $\lambda = c/f$ – длина волны входного

сигнала, f – его частота, $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$; $Z_w = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b}{a} \cdot \frac{\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}}{\sqrt{1 - (\lambda/\lambda_{cr})^2}}$; ε_0, μ_0 – соответственно

диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума; $R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{g}}$, $g = 5,7 \cdot 10^6$ сим/м – проводимость меди; $Z_0 = 120\pi$; a – размер широкой стенки волновода; b – размер узкой стенки волновода.

Для решения задачи возбуждения генератора ЛОВ используем метод наложения. Для этого последовательно определяем амплитуды напряжений на зазорах, вызванные входным сигналом \dot{E} и наведенными (конвекционными) токами. Для определения конвекционных токов промодулированного по скорости и плотности ЭП необходимо решить совместно уравнения движения и уравнения возбуждения волновода [4, 5].

После определения наведенных в зазорах волновода токов J_k , используется алгоритм возбуждения цепочки четырехполюсников с учетом прямой и обратной волн [4, 5], описанный ниже.

Возбуждение цепочки четырехполюсников. Для решения задачи возбуждения цепочки четырехполюсников используем метод наложения. Согласно методу последовательно для каждого зазора находим напряжения на зазорах, вызванные входным сигналом \dot{E} и наведенными токами j_k [4].

Уравнения связи (с использованием коэффициентов матрицы передачи $\|\dot{A}\|$) между напряжениями и токами \dot{U}_k, \dot{I}_k на входе и $\dot{U}_{k+1}, \dot{I}_{k+1}$ – выходе пассивного четырехполюсника при передаче энергии слева направо и справа налево имеют вид [4]:

$$\begin{cases} \dot{U}_{k+1} = \dot{U}_k (\dot{A}_{22}^k - \dot{A}_{12}^k / \dot{Z}_{ax1}^k) \\ \dot{I}_{k+1} = \dot{I}_k (-\dot{A}_{21}^k \cdot \dot{Z}_{ax1}^k + \dot{A}_{11}^k) \end{cases}, \begin{cases} \dot{U}_k = \dot{U}_{k+1} (\dot{A}_{11}^k - \dot{A}_{12}^k / \dot{Z}_{ax2}^k) \\ \dot{I}_k = \dot{I}_{k+1} (-\dot{A}_{21}^k \cdot \dot{Z}_{ax2}^k + \dot{A}_{22}^k). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь входные слева и справа сопротивления k -го четырехполюсника $\dot{Z}_{\text{вх}1}^k$ и $\dot{Z}_{\text{вх}2}^k$ рассчитываются по рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{\text{вх}1}^k &= (\dot{A}_{11}^k \dot{Z}_{\text{вх}1}^{k+1} + \dot{A}_{12}^k) / (\dot{A}_{21}^k \dot{Z}_{\text{вх}1}^{k+1} + \dot{A}_{22}^k), k = n+1, n, n-1, \dots, 0 \\ \dot{Z}_{\text{вх}2}^k &= (\dot{A}_{11}^k \dot{Z}_{\text{вх}2}^{k-1} + \dot{A}_{12}^k) / (\dot{A}_{21}^k \dot{Z}_{\text{вх}2}^{k-1} + \dot{A}_{22}^k), k = 0, 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

Задаем сопротивление нагрузки \dot{Z}_n , тогда $\dot{Z}_{\text{вх}1}^{n+2} = \dot{Z}_n$ и сопротивление генератора \dot{Z}_0 , тогда $\dot{Z}_{\text{вх}2}^{-1} = \dot{Z}_0$. Условие согласования $\dot{Z}_{\text{вх}1}^k = \dot{Z}_{\text{вх}2}^{k-1} = \dot{Z}_k$, \dot{Z}_k – характеристическое сопротивление k -го четырехполюсника. На заданной частоте ω рассчитываем коэффициенты матрицы передачи $\|\dot{A}\|$ (1). Ниже приводится алгоритм последовательности выполнения расчета.

1. Рассчитываем ток I_0^{0+} на входном четырехполюснике, задавая напряжение сигнала генератора $\dot{E} = E_0 \cdot e^{j(\omega t + \varphi_0)}$:

$$\dot{I}_0^{0+} = \dot{E} / (Z_0 + \dot{Z}_{\text{вх}1}^0). \quad (4)$$

По формулам передачи энергии слева направо (2) определяем значения \dot{U}_k^{0+} , \dot{I}_k^{0+} на зазорах, возбужденных входным сигналом, $k = 1 \dots N$.

2. Рассчитываем возбуждение попутной волны наведенными токами. Для полученного напряжения в m -м зазоре ($m = 1, 2, \dots, N$), определяем наведенный ток j_m (см. пункты 3–5), затем находим напряжения и токи, возбужденные попутной волной:

$$U_m^{m+} = j_m \frac{Z_{\text{вх}1}^m Z_{\text{вх}2}^{m-1}}{Z_{\text{вх}1}^m + Z_{\text{вх}2}^{m-1}}; I_m^{m+} = j_m \frac{Z_{\text{вх}2}^{m-1}}{Z_{\text{вх}1}^m + Z_{\text{вх}2}^{m-1}}. \quad (5)$$

После этого по формулам (2) передачи энергии слева направо находим \dot{U}_k^{m+} , \dot{I}_k^{m+} , $k = m+1, \dots, N$. Результирующие напряжения на зазорах, возбужденные попутной волной, получаются суммированием:

$$\dot{U}_k^+ = \sum_{m=0}^k \dot{U}_k^{m+}; \quad \dot{I}_k^+ = \sum_{m=0}^k \dot{I}_k^{m+}; \quad k = 1, \dots, N. \quad (6)$$

Таким образом, продвигаясь от зазора к зазору с попутной волной, находим все необходимые характеристики ЛБВ.

3. При расчетах со встречной волной находим возбужденные наведенным током напряжения и токи слева от m -го зазора U_k^{m-} , I_k^{m-} , $k = m-1, \dots, 0$ по формулам (2) передачи энергии справа налево. Результирующие напряжения на зазорах, созданные встречной волной, получаются суммированием:

$$\dot{U}_k^- = \sum_{m=k+1}^N \dot{U}_k^{m-}, \quad \dot{I}_k^- = \sum_{m=k+1}^N \dot{I}_k^{m-}. \quad (7)$$

Для определения наведенного тока j_m необходимо найти суммарное напряжение на m -м зазоре $\dot{U}_m^+ + \dot{U}_m^-$. При этом надо учесть, что численный процесс установления суммарных напряжений на зазорах резонаторов очень неустойчив, и следует использовать алгоритм, описанный в пунктах 4, 5.

4. Используя последовательную нижнюю релаксацию, пересчитываем распределение встречной волны:

$$\dot{U}_{k,s+1}^- = \omega_r \dot{U}_{k,s+1}^- + (1 - \omega_r) \dot{U}_{k,s}^-, \quad (8)$$

где ω_r – параметр релаксации, s -номер итерации.

5. Следующие итерации надо повторять с пункта 2, но при расчетах \dot{U}_k будем учитывать амплитуду встречной волны: $\dot{U}_k = \dot{U}_{k,s+1}^+ + \dot{U}_{k,s+1}^-$.

Итерации повторяем до установления напряжений на зазорах \dot{U}_k с заданной точностью ε_T :

$$\varepsilon_{s+1} = \sum_{k=1}^n |\dot{U}_{k,s+1} - \dot{U}_{k,s}| / U_0 < \varepsilon_T.$$

Как отмечалось в работах [4, 5], для выполнения условия синхронизма, т. е. постоянства фазы СВЧ поля при прохождении электронным сгустком зазоров в волноводе (рис. 1), необходимо применять оптимизацию распределения коэффициентов фаз эквивалентных четырехполюсников. Для этого задается первое приближение распределения коэффициента фазы на всех четырехполюсниках. Для аппроксимации этого распределения применялся аппарат атомарных функций [4].

Описанная математическая модель является общей для ЛБВ и ЛОВ на волнообразно изогнутом волноводе. Для реализации режима ЛБВ при оптимизации параметров прибора выбирается определенный вид целевой функции с соответствующими начальными условиями. При этом надо учитывать, что мощность обратной волны P_1 (рис. 1) на входе прибора должна быть мала, а мощность волны P_2 (рис. 1) на выходе изогнутого волновода – максимальной.

Для реализации режима ЛОВ мощность обратной волны P_1 (рис. 1) на входе прибора должна быть максимальной, а мощность ЭМ волны на выходе изогнутого волновода P_2 (рис. 1) – нулевой.

Результаты расчетов и их обсуждение

По разработанной математической модели составлена программа анализа процессов взаимодействия ЭП с электромагнитными полями электродинамической системы, а также синтеза параметров генераторов ЛОВ. При выборе размеров прямоугольных волноводов, каналов дрейфа, ускоряющих напряжений, токов луча необходимо использовать рекомендации, приведенные в работах [1, 4, 5]. Как показано в работах [1, 4], в связи с низким сопротивлением связи электронного пучка и волны лишь при превышении некоторого порога тока пучка получают возбуждение и генерация колебаний в ЛОВ.

Проведены расчеты релятивистских ЛОВ с ускоряющим напряжением 400 кВ. Задаем длину волны генерируемых колебаний $\lambda = 6$ см, размеры волновода – $a = 4,8$ см, $b = 1$ см. Вначале рассчитываем регулярную ЛОВ. Вычисляем длины труб дрейфа и длины изогнутых отрезков волновода, используя формулы работы [5]. Задаем значение тока электронного луча $I_0 = 200$ А. С целью избежания электромагнитной связи между щелями связи по каналам дрейфа размеры канала дрейфа необходимо выбирать так, чтобы не было распространяющихся мод (H_{10}) по каналу [5]. Поэтому выбираем размеры канала дрейфа $a_1 \times b_1 = 2,5 \times 1,4$ см, рис. 2. Размер пучка электронов $h \times r = 2 \times 0,6$ см, рис. 2. Тогда минимальная длина волны, на которой может работать прибор без самовозбуждения, должна быть больше 5 см.

Для числа зазоров $N = 9$ при оптимизации регулярной ЛОВ получен электронный КПД $\eta_e = 0,165$ – вариант А1, при этом волновой КПД на 1-м зазоре $\eta_w = -0,154$. Отрицательное значение волнового КПД получается ввиду того, что возбужденная обратная ЭМ волна движется навстречу ЭП и групповая скорость энергии ЭМ волны направлена навстречу скорости ЭП. Энергия волны переносится в начало прибора – на левый конец изогнутого волновода, рис. 1. КПД ЛОВ $\eta_{BWO} = |\eta_w| = 0,154$, мощность выходного сигнала ЛОВ $P_{BWO} = 12,3$ МВт.

Далее, изменяя дискретно ток электронного пучка, определяем пусковой ток для этого варианта ЛОВ – $I_{пуск} = 170$ А. Задаем рабочий ток прибора $I_0 = 400$ А. Проводим расчет нерегулярной ЛОВ, оптимизируя длины труб дрейфа и длины изогнутых отрезков волновода. Получен электронный КПД $\eta_e = 0,356$, КПД ЛОВ $\eta_{BWO} = 0,326$, мощность выходного сигнала $P_{BWO} = 52,2$ МВт – вариант А2. На рис. 4 приведены зависимости электронного КПД η_e и волнового КПД η_w от нормированной длины прибора X .

Как видно из рис. 4, волновой КПД η_w минимален в конце прибора и максимален в начале лампы. Это свидетельствует о том, что возбужденная обратная ЭМ волна, взаимодействуя с ЭП, отбирает максимум энергии от сгруппированного ЭП и переносит ее в начало прибора. Взаимодействие ЭМ волны и ЭП идет на –1-й пространственной гармонике.

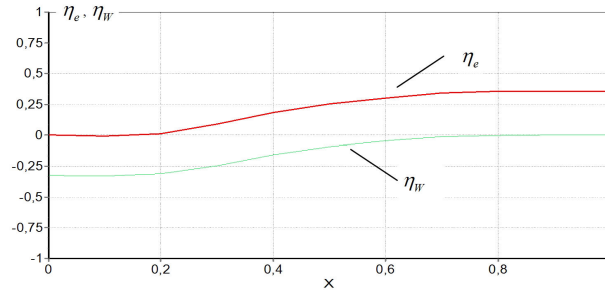


Рис. 4. Зависимости электронного КПД η_e и волнового КПД η_w от нормированной длины прибора X

Максимум функции группировки достигается в первой половине лампы. Это свидетельствует о том, что энергообмен и группировка сгустков происходят под воздействием ЭМ поля -1 -й пространственной гармоники, которое имеет максимальную амплитуду в начале лампы, в конце лампы амплитуда поля равна нулю.

Проведены расчеты режимов ЛОВ этого варианта прибора при разных токах электронного пучка: при $I_0 = 500$ А получен электронный КПД $\eta_e = 0,356$, КПД ЛОВ $\eta_{BWO} = 0,362$, мощность выходного сигнала $P_{BWO} = 66,5$ МВт; при $I_0 = 700$ А получен электронный КПД $\eta_e = 0,309$, КПД ЛОВ $\eta_{BWO} = 0,282$, мощность выходного сигнала ЛОВ $P_{BWO} = 79,1$ МВт. Проведены расчеты нерегулярных ЛОВ с ускоряющим напряжением 500 кВ (размеры канала дрейфа $a1 \times b1 = 2,5 \times 1,4$ см, размер пучка электронов $h \times r = 2 \times 0,6$ см): при $I_0 = 500$ А получен электронный КПД $\eta_e = 0,424$, КПД ЛОВ $\eta_{BWO} = 0,382$, мощность выходного сигнала $P_{BWO} = 95,6$ МВт. Пусковой ток этого варианта ЛОВ $I_{пуск} = 320$ А. При $I_0 = 700$ А получен электронный КПД $\eta_e = 0,416$, КПД ЛОВ $\eta_{BWO} = 0,365$, мощность выходного сигнала $P_{BWO} = 127,8$ МВт. При $I_0 = 900$ А получен электронный КПД $\eta_e = 0,422$, КПД ЛОВ $\eta_{BWO} = 0,3925$, мощность выходного сигнала $P_{BWO} = 176,6$ МВт.

Так как электронный КПД ЛОВ имеет значения $0,15 \dots 0,39$, то с целью увеличения КПД и выходной мощности генерируемых колебаний проведены расчеты двухсекционных гибридных приборов ЛОВ–ЛБВ [5]. Первая секция – это генератор ЛОВ (невысокой мощности). В ней происходит предварительная модуляция ЭП по скорости и плотности. Промодулированный по скорости и плотности электронный пучок поступает во вторую секцию, работающую в режиме ЛБВ. Промодулированный по скорости и плотности пучок электронов наводит в ЗС второй секции ЭМ волну, которая, взаимодействуя с ЭП, увеличивает модуляцию ЭП и получает дальнейшее усиление. С выхода второй секции усиленная ЭМ волна поступает в нагрузку. Проведены расчеты такого гибридного прибора и получены следующие параметры для ускоряющего напряжения 500 кВ, тока ЭП $I_0 = 400$ А: размеры канала дрейфа $a1 \times b1 = 2,5 \times 1,4$ см, размер пучка электронов $h \times r = 2 \times 0,6$ см. Первая секция ЛОВ имеет электронный КПД $\eta_e = 0,035$, КПД ЛОВ $\eta_{BWO} = 0,02$, мощность выходного сигнала ЛОВ $P_{BWO} = 4,1$ МВт. Вторая секция – нерегулярная ЛБВ – состоит из 14 изогнутых отрезков волновода. После оптимизации нерегулярной ЛБВ получен электронный КПД $\eta_e = 0,506$, волновой КПД $\eta_w = 0,395$, мощность выходного сигнала $P_{BWO} = 79,2$ МВт.

Заключение

На основе разработанной математической модели предложен алгоритм расчета релятивистских ЛОВ на волнообразно изогнутом волноводе с ленточными электронными пучками. Для оптимизации параметров ЛОВ предложена методика оптимизации распределений коэффициентов фаз эквивалентных четырехполосников с применением атомарных функций. Показано, что в сантиметровом расчетный электронный КПД нерегулярных релятивистских ЛОВ достигает 30–42 %, выходная мощность – 50–170 МВт для ускоряющих напряжений пучка электронов 400–500 кВ, токов ЭП 400–900 А. Показано, что, используя гибридные приборы ЛОВ–ЛБВ, можно повысить электронный КПД генераторов до 50 %.

Список литературы

1. Аксенчик А.В. Моделирование и оптимизация нерегулярных ЛБВ, ЛОВ типа «О» // Докл. БГУИР. 2004. № 2 (6). С. 78–90.
2. Reseach on X-band sheet beam electron optics system / Ding Zhao [et al.] // IVEC. 2012. P. 173–174.
3. Theory and experimental investigation on the high performance transport of sheet electron beam for the XSBK and XSBK / Cunjun Ruan [et al.] // IVEC. 2012. P. 147–148.
4. Аксенчик А.В., Кравченко В.Ф. Оптимизация ЛОВ и ЛБВ О-типа на волнообразно изогнутых прямоугольных волноводах для миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 10. С. 46–56.
5. Аксенчик А., Кураев А., Киринович И. Усилители и генераторы О-типа миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн (теория и оптимизация). Германия: Palmarium Academic Publishing, 2014. 154 с.

References

1. Aksenchik A.V. Modelirovanie i optimizacija nereguljarnyh LBV, LOV tipa «O» // Dokl. BGUIR. 2004. № 2 (6). S. 78–90. (in Russ.)
2. Reseach on X-band sheet beam electron optics system / Ding Zhao [et al.] // IVEC. 2012. P. 173–174.
3. Theory and experimental investigation on the high performance transport of sheet electron beam for the XSBK and XSBK / Cunjun Ruan [et al.] // IVEC. 2012. P. 147–148.
4. Aksenchik A.V., Kravchenko V.F. Optimizacija LOV i LBV O-tipa na volnoobrazno izognutyh prjamougol'nyh volnovodah dlja millimetrovogo i submillimetrovogo diapazona dlin voln // Uspehi sovremennoj radioelektroniki. 2007. № 10. S. 46–56. (in Russ.)
5. Aksenchik A., Kuraev A., Kirinovich I. Usiliteli i generatory O-tipa millimetrovogo i submillimetrovogo diapazonov dlin voln (teorija i optimizacija). Germanija: Palmarium Academic Publishing, 2014. 154 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Аксенчик А.В., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Киринович И.Ф., к.ф.-м.н., доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Aksenchyk A.V., D.Sci, professor, professor of computational methods and programming department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Kirinovich I.F., PhD, associate professor of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-44-702-00-95;
e-mail: aksenchik@bsuir.by
Аксенчик Анатолий Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. + 375-44-702-00-95;
e-mail: aksenchik@bsuir.by
Aksenchyk Anatoly Vladimirovich