

УДК 621.385.6

## ОПТИМИЗАЦИЯ НЕРЕГУЛЯРНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЛОВ О-ТИПА НА ВОЛНООБРАЗНО ИЗОГНУТЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ

А.В. АКСЕНЧИК, А.А. КУРАЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники**П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 27 марта 2006*

Сформулирована одномодовая самосогласованная математическая модель ЛОВ О-типа на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе с использованием эквивалентных четырехполюсников. В модели используются релятивистские уравнения движения. Показано, что нерегулярные релятивистские ЛОВ сверхвысокой мощности (0,2–0,7 ГВт) на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе в СМ диапазоне длин волн могут иметь КПД 15–50%, а в ММ-диапазоне регулярные ЛОВ имеют КПД 10%.

*Ключевые слова:* оптимизация, лампа бегущей волны (ЛБВ), лампа обратной волны О-типа (ЛОВ-О), нерегулярный, релятивистский.

### Введение

Мощные приборы СВЧ-лампы бегущей (ЛБВ) и обратной (ЛОВ) волны основаны на использовании длительного взаимодействия замедленной электромагнитной (ЭМ) волны и электронного потока. При этом для эффективной передачи энергии от электронного потока ЭМ-волны в ЛБВ должно выполняться условие синхронизма, т.е. скорость электронов примерно равна скорости ЭМ-волны в замедляющей системе (ЗС). При использовании ЗС типа цепочек связанных резонаторов (ЦСР) взаимодействие с электромагнитной волной происходит дискретно — в зазорах резонаторов, составляющих ЗС. Используя нерегулярную ЗС и оптимизируя ее параметры, можно получить ЛБВ и ЛОВ на ЦСР высокой эффективности с КПД 40–80%, в том числе и в ММ-диапазоне [1–3]. ЗС на ЦСР, в отличие от спиральных, позволяют значительно лучше организовать отвод тепла от ЗС, сделать конструкцию жесткой, повторяемой и продвинуться в диапазон больших мощностей. Однако ее недостатком при больших уровнях мощности является возможность ВЧ пробоя в тонкостенных окнах связи. В настоящее время появился интерес к приборам, в которых осуществляется взаимодействие электронов с полем незамедленных волн типов  $H_{10}$ ,  $H_{30}$ ,  $H_{50}$ , ... волнообразно изогнутого волновода [1–4] различного сечения (прямоугольного, П-образного (ребристые волноводы), H-образного).

На рис. 1 показана схема прибора, в котором осуществляется дискретное взаимодействие прямолинейного электронного потока с полем  $H_{10}$  волны волнообразно изогнутого прямоугольного волновода.

Назовем такой волновод — WB (wavy bending) волновод. Электронный поток проходит в таком волноводе через отверстия посередине широкой стенки (в максимуме поперечного электрического поля). Технологически такую конструкцию изготовить легче, чем ЗС на ЦСР. Приборы могут быть высокой и сверхвысокой мощности.

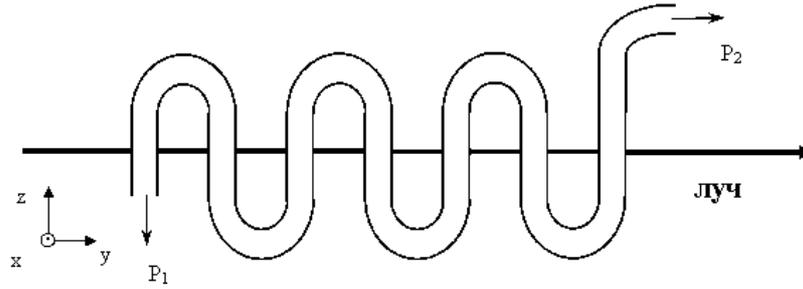


Рис. 1. Схема прибора

При определенных длинах труб дрейфа и фазах поля в зазорах происходит не только увеличение модуляции электронного потока, но и за счет возбуждения обратной волны возникает положительная обратная связь и самовозбуждение прибора. Возбужденная обратная ЭМ-волна с увеличивающейся амплитудой от конца к началу прибора переносит преобразованную энергию электронного потока в начало области взаимодействия — на входной конец волновода в согласованную нагрузку (антенну и т.п.) поступает мощность  $P_1$  (рис. 1). Прибор работает в режиме ЛОВ. Для обеспечения синхронизма необходимо так подобрать длины отрезков волновода  $l$  и длины труб дрейфа, чтобы электрон при движении вдоль оси  $Y$ , попадал бы в поле  $E_y$ ,  $H_{10}$  волны одной и той же фазы.

В настоящей работе сформулирована упрощенная (одномодовая) математическая модель ЛОВ и результаты оптимизационных расчетов ЛОВ  $O$ -типа на WB волноводе (BWO WB) в СМ- и ММ-диапазоне волн.

#### Одномодовая математическая модель нерегулярной ЛОВ на волнообразно изогнутом прямоугольном волноводе с использованием эквивалентных четырехполюсников

Описанный прибор (рис. 1) моделируется цепочкой эквивалентных четырехполюсников [1]. Один четырехполюсник моделирует одну полуволну волнообразно изогнутого прямоугольного волновода. На входе цепочки, слева, подключен генератор входного сигнала  $\dot{E}_0$  с внутренним сопротивлением  $Z_0$ , равным эквивалентному сопротивлению волновода  $Z_W$ . Затем следует согласующий четырехполюсник  $M_0$ , эквивалентный отрезку волновода до первого зазора. После последнего зазора, справа, подключен  $M_{n+1}$  четырехполюсник для согласования волновода с нагрузкой, имеющей импеданс  $Z_n$ . Ввиду того что четырехполюсники моделируют отрезки одного и того же волновода, они оказываются согласованными и при изменении частоты. Полагаем, что нагрузка с сопротивлением  $Z_n$  согласована с волноводом, имеющим эквивалентное сопротивление  $Z_W$  на опорной частоте.

*Уравнение возбуждения волновода.* При выводе уравнений используем обычную для волноводов прямоугольную систему координат (рис. 1): ось  $Z$  направлена вдоль волновода, ось  $Y$  — перпендикулярна широкой стенке волновода и совпадает с направлением движения электронов, ось  $X$  — перпендикулярна узкой стенке волновода.

Представим возбужденное поле волны  $H_{10}$  (другие моды — закритические на  $\omega$ ) в виде:

$$\dot{\vec{E}} = C_{\pm p} \dot{\vec{E}}_{\pm p}, \quad \dot{\vec{H}} = C_{\pm p} \dot{\vec{H}}_{\pm p} \quad (1)$$

Здесь под индексом " $p$ " имеется в виду двойной индекс "10" волны  $H_{10}$ . Используя уравнения Максвелла, применяя лемму Лоренца, можно получить уравнение возбуждения волновода. Будем рассматривать возбуждение и распространение в прямоугольном волноводе волны поля  $H_{10}$ , тогда уравнение возбуждения конвекционным током  $\dot{\vec{J}}$  принимает вид

$$C_{\pm p} = N_p^{-1} \int_V \dot{\vec{J}} \cdot \dot{\vec{E}}_{\mp p} dV, \quad (2)$$

где знак (+) соответствует волнам, движущимся в положительном направлении оси  $Z$ , знак (–) в противоположном направлении;  $N_p = \int_s \left\{ [\dot{\vec{E}}_p, \dot{\vec{H}}_{-p}] - [\dot{\vec{E}}_{-p}, \dot{\vec{H}}_p] \right\} \bar{i}_z dS$  — обобщенная норма волны, пропорциональна мощности волны;  $\dot{\vec{J}} = \dot{J}_\omega \bar{i}_y$ ,  $\dot{J}_\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \dot{J}_m(t, y) e^{-jq\omega t}$  — амплитуда гармоники конвекционного тока на частоте  $q\omega$ ;  $q$  — номер гармоники; интеграл  $\int_V \dot{\vec{J}} \cdot \dot{\vec{E}}_{\mp p} dV$ , пропорционален мощности, отдаваемой модулированным электронным потоком ЭМ-волне на частоте  $\omega$  и используется при расчете волнового КПД.

В данной модели волновод возбуждается поперечным током  $\dot{J}_\omega$ , занимающим небольшой объем  $V$  (тонкий луч). Коэффициенты  $C_{\pm p}$  вне этого объема от координаты  $z$  не зависят, постоянны. Обозначим относительную амплитуду возбужденного поля:  $\bar{E} = -jC_{\pm p} \omega \mu_0 \chi_x / \chi^2$ . После проведения преобразований [3] запишем  $\bar{E}$  в виде:

$$\bar{E} = B e^{\pm j\Gamma Z_1} \frac{8}{3\pi\Gamma r} \sin(\Gamma r) \sin\left(\frac{\pi x_1}{a}\right) \frac{I_1}{N_e} \int_{y_1}^{y_2} \sum_{i=1}^{N_e} e^{-j\omega t_i} \varepsilon^0(y) dy \quad (3)$$

где  $B = \omega \mu_0 \chi_x^2 A$ ;  $\varepsilon^0(y)$  — весовая функция пространственного распределения поля зазора, рассчитывается методом сеток.

Интеграл в (3) вычисляем численно, совместно с интегрированием уравнений движения электронов. После интегрирования уравнения (3) поле  $\dot{\vec{E}}_y$  ЭМ-волны в волноводе будет представлено в следующем виде:

$$\dot{\vec{E}}_{y\pm 10} = \bar{E} \sin \frac{\pi x}{a} \exp(\mp j\Gamma Z + j\omega t) \bar{i}_y. \quad (4)$$

Используя (4), введем напряжение  $\dot{U}_k$  на  $k$ -м зазоре (шириной  $d$ ):

$$\dot{U}_k = \bar{E} \sin \frac{\pi x_1}{a} \exp(\mp j\Gamma Z_k + j\omega t) d, \quad (5)$$

где  $x_1, Z_k$  — координаты центра радиуса трубки дрейфа в волноводе.

Наведенный ток в  $k$ -м зазоре с учетом безразмерных параметров вычисляется так:

$$\dot{j}_k^* = \frac{2I_0 U_0}{\dot{U}_k} \frac{\gamma_0 + 1}{\gamma_0^2} \frac{\vartheta_0}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \int_{T_{0k}}^{T_{1k}} \varepsilon^0(T - T_0) \exp(j(u_i + \vartheta_i T + \vartheta_k)) dT, \quad (6)$$

где  $T = y/L$ ;  $\vartheta = \omega t$ ;  $\gamma_0 = (1 - (v_0/c)^2)^{-1/2}$ ;  $\vartheta_k = \Gamma \ell_k$ ;  $V_i = \frac{v_i}{v_0}$ ;  $u_i = \omega t_i - \omega y/v_0$ ;  $\vartheta_0 = \frac{L\omega}{v_0}$ ;

$\gamma_i = (1 - (v_i/c)^2)^{-1/2}$ ;  $T_{0k} = y_1/L$ ;  $T_{1k} = y_2/L$ ;  $y$  — продольная координата электрона;  $L$  — длина ЛБВ;  $r$  — радиус электронного луча;  $d = y_2 - y_1$  — длина зазора;  $\omega$  — опорная частота;  $c$  — скорость света в вакууме;  $v_0$  — начальная скорость электронного потока.

*Уравнения движения электронов.* Для моделирования электронного потока используется метод крупных частиц. Нормированные релятивистские уравнения движения крупных частиц во внешнем электромагнитном поле без учета торможения излучением (т.е. до  $v_0/c < 0,99$ ) в одномерном приближении приведены в [3].

Уравнения движения [3] и уравнение (6) образуют самосогласованную нелинейную систему уравнений ЛОВ на WB.

Заметим, что для выполнения условия синхронизма, т.е. постоянства фазы СВЧ поля при прохождении электронным сгустком зазоров в волноводе (рис. 1), использовалась оптимизация распределения коэффициента фазы четырехполюсников (эквивалентных отрезкам волновода). В четырех-шести точках задавалось первое приближение распределения коэффициента фазы на всех четырехполюсниках, а затем для аппроксимации использовался аппарат атомарных функций [3].

Описанная одномодовая математическая модель является общей для ЛБВ и ЛОВ на WB волноводе. Реализация работы прибора в режиме ЛОВ осуществляется при оптимизации — соответствующим выбором конструкции целевой функции, а также выбором начальных условий: для ЛОВ мощность обратной волны на входе прибора должна быть максимальной ( $P_1$ , рис. 1), а мощность ЭМ-волны на выходе волновода ( $P_2$ , рис. 1) нулевой.

### Результаты расчетов

Для расчета BWO WB используется описанная выше математическая модель с соответствующими граничными условиями. Режим самовозбуждения на определенной частоте достигается, когда поле в конце волновода (или мощность ЭМ-волны  $P_2$ , рис. 1) близко к нулю. При этом энергия сгруппированного электронного луча преобразуется в основном в энергию обратной волны (мощность ЭМ-волны  $P_1$ , рис. 1).

Для расчетов BWO WB использовался волновод с размерами  $a=4,6$  см,  $b=1$  см, радиус электронного луча  $r=0,6$  см, длина волны генерации  $\lambda=6$  см. В табл. 1 приведены значения электронного КПД  $\eta_e$  оптимальных вариантов ЛОВ для разных токов луча  $I_0$  и разного числа зазоров  $N$  (изогнутых секций волновода), ускоряющее напряжение  $U_0=400$  кВ.

Таблица 1. Значения электронного КПД для разного числа зазоров  $N$

КПД	N	$I_0=250$ А	$I_0=500$ А	$I_0=800$ А	$I_0=1000$ А	$I_0=1400$ А
$\eta_e$	9	0,402	0,49			
	7		0,238	0,307	0,304	
	5			0,317	0,365	0,292

В табл. 2 для оптимальных вариантов ЛОВ с разными токами луча приведены значения электронного КПД  $\eta_e$ , ускоряющее напряжение  $U_0=800$  кВ, число зазоров  $N=5$ .

Таблица 2. Значения электронного КПД с разными токами луча

$I_0$ , кА	1,7	2,0	2,5	3,0
$\eta_e$	0,187	0,166	0,214	0,291

Проводились расчеты ЛОВ для ускоряющего напряжения 1000 кВ, размеры волновода  $a=4,6$  см,  $b=2$  см, ток луча 5 кА, расчетный электронный КПД  $\eta_e=0,14$ , выходная мощность 700 МВт.

На рис. 2 приведены зависимости электронного КПД  $\eta_e$  и волнового КПД  $\eta_w$  от нормированной длины прибора  $T$  для ускоряющего напряжения  $U_0=400$  кВ, тока луча  $I_0=1000$  А,  $N=5$  (табл. 1).

На рис. 3 показана зависимость электронного  $\eta_e$  (кривая 1) и волнового  $|\eta_w|$  (кривая 2) КПД от тока электронного луча для варианта ЛОВ с  $U_0=400$  кВ, тока луча  $I_0=500$  А,  $N=5$  (табл. 1).

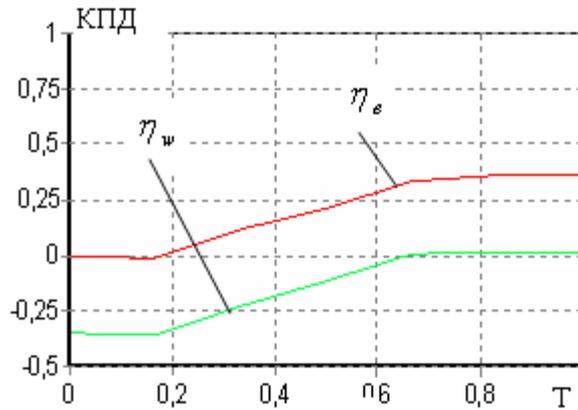


Рис. 2. Зависимости электронного КПД  $\eta_e$  и волнового КПД  $\eta_w$  от нормированной длины прибора  $T$  для ускоряющего напряжения  $U_0=400$  кВ, тока луча  $I_0=1000$  А

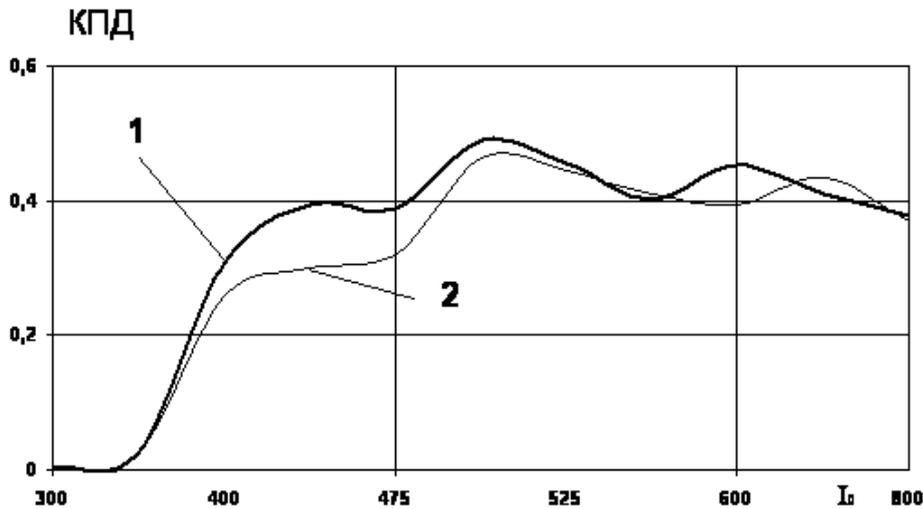


Рис. 3. Зависимость электронного  $\eta_e$  (кривая 1) и волнового  $|\eta_w|$  (кривая 2) КПД от тока электронного луча для варианта ЛОВ с  $U_0=400$  кВ, тока луча  $I_0=500$  А

Проведена оптимизация регулярной ЛОВ ММ-диапазона: длина волны 0,8 см, ускоряющее напряжение 35 кВ, число зазоров  $N=25$ , размеры волновода  $a=0,42$  см,  $b=0,05$  см, ток луча 4 А, количество лучей — 8, электронный КПД  $\eta_e=0,10$ , выходная мощность 15 кВт.

Как показали расчеты, при увеличении тока электронного луча для увеличения эффективности взаимодействия между пучком и волной необходимо уменьшать количество зазоров или длину прибора.

Следует остановиться также на важной для приборов большой мощности проблеме приближения рабочей напряженности поля в волноводе к предельной по величине ВЧ-пробоя в вакууме 200–1000 кВ/см [5]. В приведенных вариантах ЛОВ максимальная амплитуда напряженности ВЧ-поля  $E_{\max}$  в зазоре составляла 100–600 кВ/см.

Таким образом, во всех вариантах  $E_{\max}$  не приближается к предельно допустимой для вакуума. Однако  $E_{\max}$  во всех вариантах превышает допустимую для воздушного заполнения волновода величину 30 кВ/см. Это означает, что в конструкциях, реализующих указанные варианты, должен предусматриваться либо распределенный вывод энергии, либо лучевой (квазиоптический) со сверхразмерным сечением луча.

## Заключение

Предложены математическая модель и алгоритм расчета ЛОВ на волнообразно изогнутом волноводе. Использовалась методика оптимизации распределений коэффициентов фаз эквивалентных четырехполюсников. Для аппроксимации распределений коэффициентов фаз использовался аппарат атомарных функций. Приведенные результаты оптимизации генераторов BWO WB показали, что возможно генерирование СВЧ колебаний сверхвысокой мощности в СМ-диапазоне с расчетным электронным КПД 14–50% для ускоряющих напряжений 400–1000 кВ, при токах электронного луча 0,2–5 кА. В миллиметровом диапазоне генераторы ЛОВ могут иметь расчетный электронный КПД 10%. Исследованные в работе конструкции приборов могут с успехом использоваться в качестве мощных источников СВЧ колебаний дециметрового, сантиметрового, миллиметрового диапазонов для систем связи, радионавигации, радиолокации и др.

## OPTIMIZATION OF IRREGULAR RELATIVISTIC O-TYPE BWO ON THE WAVY BENDING RECTANGULAR WAVEGUIDES

A.V. AKSENCHYK, A.A. KURAYEV

### Abstract

In the papers the one-mode self-consistent mathematical model of O-type BWO on the wavy bending rectangular waveguide with the use of equivalent quadripoles is described. The relativistic equations of motions are used in model. It is shown that irregular relativistic BWOs of ultrahigh power (0,2–0,7 GW) on wavy bending rectangular waveguide in CM a wavelength range can have calculated electron efficiency of 15–50%, and regular BWOs in MM-range have calculated efficiency up to 10%.

### Литература

1. *Seong-Tae Han, Jung-II Kim, Gun-Sik Park* // 3<sup>rd</sup> IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2002, California, April 23–25. 2002. P. 94–95.
2. *Lyon D.B., Theiss A.J.* Litton folded-waveguide high-power millimeter-wave TWTs. IEDM. 1994. P. 918–920.
3. *Аксенчик А.В.* // Докл. БГУИР. 2004. Т. 2, № 2. С. 78–90.
4. *Aksenchyk A.V., Kurayev A.A., Sinitsyn A.K.* // Journal of Communications Technology and Electronics. 2005. Vol. 50, No. 5. P. 580–585.
5. *Кухаркин Е.С., Сестрорецкий Б.В.* Электрическая прочность волноводных устройств. М., 1963.