



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-5-29-34>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.385.6

## ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ НА ПЕТЛЯЮЩИХ ВОЛНОВОДАХ СО СКАЧКОМ ПОТЕНЦИАЛА

А.В. АКСЕНЧИК, И.Ф. КИРИНОВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 10 ноября 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** С использованием компьютерного моделирования проведено исследование влияния скачка потенциала на процессы взаимодействия в лампах бегущей волны (ЛБВ) О-типа. В этих приборах осуществляется взаимодействие электронного потока с замедленной электромагнитной волной. Для замедления электромагнитной волны используются различные электродинамические системы: спиральные, на цепочках связанных резонаторов и др. В данной работе выбрана замедляющая система в виде цепочки петляющих прямоугольных волноводов. Достоинство системы в том, что она обладает широкой полосой пропускания и каждое звено такой цепочки является согласованным с рядом стоящими. Для оценки влияния скачка потенциала на процессы взаимодействия в ЛБВ О-типа разработана математическая модель, в которой учтены наиболее полно все факторы, влияющие на процессы взаимодействия. К ним относятся: релятивистские эффекты при движении и взаимодействии электронов; провисания полей в зазорах волновода; потери в стенках волновода; учет полей пространственного заряда. По данной модели составлена программа, с помощью которой проведены расчеты различных вариантов ЛБВ для ускоряющих напряжений 20–500 кВ, токов электронного луча 0,3...160 А. При проведении расчетов зазор со скачком потенциала располагался в разных местах замедляющей системы ЛБВ, причем выбиралось такое его расположение, где проявляется максимальное влияние на процессы группирования электронов. Как показали расчеты, скачок потенциала позволяет увеличить выходную мощность ЛБВ на 15–20 %. Можно отметить для сравнения, что применение скачка потенциала в многорезонаторных клистродах [1] также приводит к увеличению выходной мощности на 15–25 %. Это подтверждает достоверность математических моделей, применяемых в ЛБВ и клистродах.

**Ключевые слова:** усилитель О-типа, прямоугольный волновод, оптимизация, ЛБВ, скачок потенциала.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Аксенчик А.В., Киринович И.Ф. Лампы бегущей волны на петляющих волноводах со скачком потенциала. Доклады БГУИР. 2021; 19(5): 29-34.

## TRAVELING-WAVE TUBES ON LOOPING WAVEGUIDES WITH A POTENTIAL JUMP

ANATOLIY V. AKSENCHYK, IRYNA F. KIRYNOVICH

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 10 November 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** Using computer simulation, a study of the effect of a potential jump on the interaction processes in O-type traveling-wave tubes has been carried out. In these devices, the interaction of the electron beam with a slowed down electromagnetic wave is carried out. To slow down the electromagnetic wave, various electrodynamic systems are used: spiral, on chains of coupled resonators, etc. In this work, we have chosen a slowing down system in the form of a chain of looping rectangular waveguides. Its advantage is that it has a wide bandwidth and each link in such a chain is coordinated with the adjacent ones. To assess the effect of a potential jump on the interaction processes in O-type traveling-wave tubes, a mathematical model has been developed, which takes into account most fully all the factors influencing the interaction processes. These include: relativistic effects during the motion and interaction of electrons, sagging of fields in the gaps of the waveguide, losses in the walls of the waveguide, taking into account the space charge fields (taking into account the periodization of the fields). Based on the developed model, a program was compiled and calculations of various variants of TWT were carried out for accelerating voltages of 20–500 kV, electron beam currents of 0.3...160 A. When performing calculations, the gap with a potential jump was located in different places of the TWT slow-wave structure and its location was chosen where the maximum effect on the electron bunching processes is manifested. As the calculations have shown, the potential jump makes it possible to increase the output power of the TWT by 15–20 %. It can be noted for comparison that the use of a potential jump in multi-cavity klystrons [1] also leads to an increase in the output power by 15-25 %. This confirms the reliability of the mathematical models used in TWT and klystrons.

**Keywords:** O-type amplifier, rectangular waveguide, optimization, TWT, potential jump.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Aksenchyk A.V., Kirynovich I.F. Traveling-wave tubes on looping waveguides with a potential jump. Doklady BGUIR. 2021; 19(5): 29-34.

### Введение

В работе [1] отмечалось, что применение скачка потенциала в клистронах позволяет увеличить коэффициент полезного действия (КПД) и выходную мощность клистрона за счет того, что уменьшается относительный и абсолютный скоростной разброс электронов в сгустке. Это дает возможность увеличить напряжения на зазорах отбирателя, что и приводит к увеличению КПД и выходной мощности клистрона.

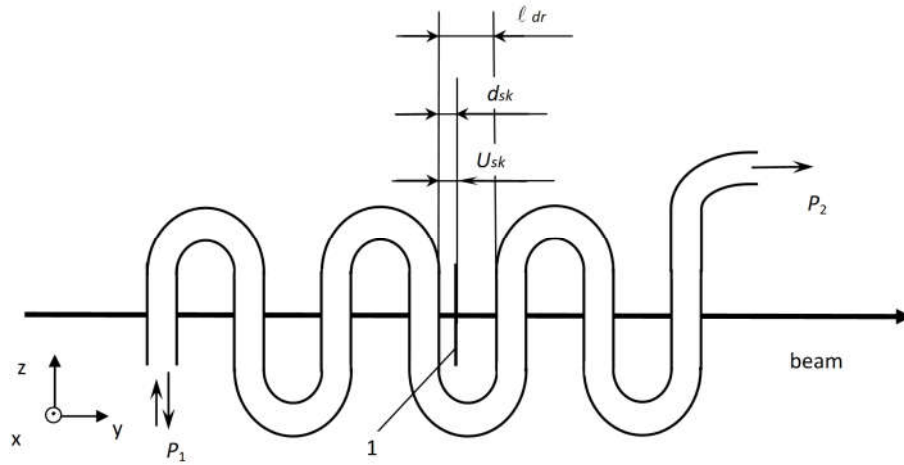
В данной работе проведено исследование влияния скачка потенциала на режим работы лампы бегущей волны (ЛБВ) с замедляющей системой на петляющих волноводах и ее выходные характеристики.

Зазор со скачком потенциала образуем путем расположения после  $k$ -го зазора специальной пластины 1 (накладки), рис. 1, на которую подается ускоряющий потенциал  $V_{sk}$ . Пластина имеет отверстие, соответствующее внутреннему размеру трубы дрейфа. Эта пластина располагается на расстоянии  $d_{sk}$  от стенки волновода (рис. 1);  $\ell_{dr}$  – длина трубки дрейфа.

В зазоре волновода на электроны действуют высокочастотное поле  $\dot{E}^0 = \text{Re}(E_m e^{j(\omega t + \theta_k)})$  и поле пространственного заряда  $\dot{E}^p$ , т. е. появляется составляющая  $\dot{E}_y = \dot{E}^0 + \dot{E}^p$ .

В данном случае длина зазора волновода совпадает с размером узкой стенки волновода. После выхода из зазора волновода электроны попадают в зазор длиной  $d_{sk}$  с ускоряющим

потенциалом  $V_{sk}$  (рис. 1). Появляется еще одна составляющая электрического поля  $\vec{E}^{sk} = V_{sk} / d_{sk}$ , действующего на электроны. В этом зазоре электроны получают дополнительное ускорение, в результате изменяется абсолютный и относительный разброс скоростей электронов, что позволяет улучшить выходные характеристики прибора.



**Рис. 1.** Схема ЛВВ со скачком потенциала: 1 – пластина, на которую подан потенциал  $V_{sk}$   
**Fig. 1.** TWT circuit with a potential jump: 1 – plate to which the potential  $V_{sk}$  is applied

### Уравнения движения электронов

Уравнения движения электрона записываем в релятивистском приближении:

$$\frac{dv}{dt} = -\eta_0 \sqrt{\left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)^3} \cdot \dot{E}_y, \quad (1)$$

где  $v$  – продольная скорость электрона,  $c$  – скорость света,  $\eta_0 = e/m_0$ ,  $e$  – заряд электрона,  $m_0$  – масса покоя электрона, электронный поток имеет начальную скорость  $v_0$ .

В работе [2] описана методика учета полей, действующих на электрон в зазоре волновода.

Вводим безразмерные переменные:

$$T = y / L, \quad \vartheta = \omega t, \quad \gamma_0 = \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)^{-1/2}, \quad (2)$$

$$V_i = \frac{v_i}{v_0}, \quad u_i = \omega t_i - \omega y / v_0, \quad \vartheta_0 = \frac{L\omega}{v_0}, \quad \gamma_i = \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)^{-1/2},$$

$$\vartheta_k = \Gamma \ell_k, \quad T_{ok} = y_1 / L, \quad T_{lk} = y_2 / L,$$

$$\sigma_a = \frac{(\gamma_0 - 1) \lambda}{2\pi\beta_0 d}; \quad \xi_k = \sum_m \frac{\dot{U}_m^\pm}{U_0}, \quad \dot{U}_m^\pm = \dot{E}_{\pm mn} d, \quad \sigma_p = \frac{eI_0}{\omega^2 v_0 m_0 \varepsilon_0 r^2}.$$

Описание переменных приведено в работе [3].

Проводя нормировку уравнения (1) с учетом переменных (2), записываем релятивистское уравнение движения электрона в следующем виде:

$$\frac{dV_i}{dT} = \frac{\vartheta_0}{\gamma_i^3 V_i} [-\sigma_a \operatorname{Re}(\xi_k e^{j(u_i + \vartheta_0 T + \vartheta_k)}) \varepsilon^0 (T - T_{ok}) + \sigma_p F_p], \quad (3)$$

$$\frac{du_i}{dT} = \vartheta_0 \left( \frac{1}{v_i} - 1 \right), \quad (4)$$

где функции  $\varepsilon^0(T - T_0)$ ,  $\varepsilon_p(y)$ ,  $F_p$  описаны в работе [3].

Уравнение возбуждения ЛБВ получаем с использованием уравнений Максвелла, применением леммы Лоренца (описано в работе [2]).

Решая совместно уравнение возбуждения, уравнения движения (3), (4), определяем в зазорах волновода наведенные токи  $J_k$ . Применяя алгоритм, описанный в работе [3], рассчитываем возбуждение цепочки четырехполюсников наведенными токами.

### Результаты расчетов

По представленной математической модели с учетом потерь в стенках волновода, провисания полей в зазорах волновода, релятивистских эффекты [3] проведем расчеты различных конструкций ЛБВ.

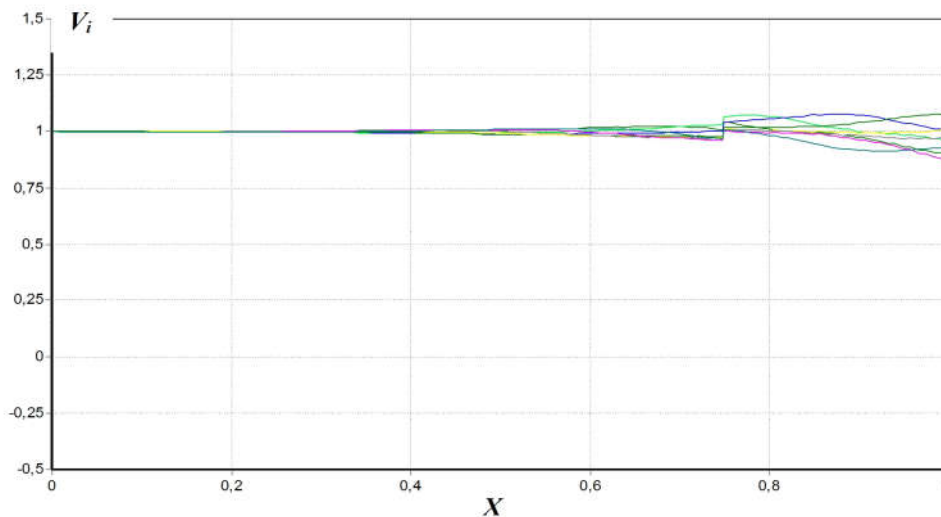
Для напряжения  $U_0 = 24$  кВ и тока луча  $I_0 = 0,40$  А на частоте  $f_0 = 33,016799$  ГГц получаем мощность на выходе лампы  $P_{out} = 1,074$  кВт, мощность сигнала на входе лампы составляет  $P_{in} = 0,795$  Вт, КПД равен 0,124.

За счет провисания высокочастотного поля в трубках дрейфа углы пролета частиц большие ( $\approx 2,33$  рад), поэтому для получения приемлемого усиления сигнала выбираем число зазоров достаточно большое –  $N = 60$ . Число изогнутых секций волновода также равно 60.

Этот вариант выбираем за основу и рассчитываем вариант E2 нерелятивистской ЛБВ со скачком потенциала. Ускоряющий скачок потенциала величиной  $V_{sk} = 0,000002 U_0$  располагаем после зазора с  $N = 45$  на расстоянии  $X = 0,75$  (рис. 2).

После оптимизации варианта E2 получен коэффициент полезного действия, равный 0,0685, мощность на выходе лампы составляет 1,3 кВт.

Графики скоростной модуляции, т. е. зависимости относительной скорости  $V_i = \frac{v_i}{v_0}$  крупных частиц от продольной координаты  $X$ , отображены на рис. 2.



**Рис. 2.** Графики скоростной модуляции варианта E2  
**Fig. 2.** Graphs of high-speed modulation of variant E2

График скоростной модуляции (рис. 2) показывает, что скачок потенциала находится на  $X = 0,75$ . Как следует из расчетов, в варианте E2 ЛБВ со скачком потенциала выходная мощность увеличивается примерно на 0,22 кВт, или на 20 %.

Проверим влияние скачка потенциала на режим работы релятивистских ЛБВ. Вначале рассчитаем релятивистскую ЛБВ (вариант E3) без скачка потенциала.

Выбираем ускоряющее напряжение  $U_0 = 499$  кВ, ток электронного луча  $I_0 = 160,73$  А,  $f_0 = 4,99649$  ГГц. Оптимизационный расчет режима ЛБВ дает КПД, равный 0,66, выходную мощность  $P_{out} = 53,48$  МВт. Из-за больших углов пролета (3,028 рад) число зазоров выбрали равным 33.

Рассчитаем вариант Е4 релятивистской ЛБВ со скачком потенциала. Скачок потенциала расположен после зазора  $N = 26$ , (на рис. 3  $X = 0,8$ ) значение скачка потенциала  $U_{sk} = 0,000001 \cdot U_0$  [кВ]. Ток электронного луча  $I_0 = 160,71$  А. Размеры остальных параметров совпадают с вариантом Е3. После проведения оптимизации электронный КПД  $\eta_e = 0,6789$ , мощность сигнала на выходе лампы  $P_{out} = 61,25$  МВт, мощность сигнала на входе лампы  $P_{in} = 1,027$  МВт. Графики скоростной модуляции варианта Е4 приведены на рис. 3. Скачок потенциала расположен на  $X = 0,8$ . Анализ траекторий показывает, что после скачка потенциала уменьшается относительный скоростной разброс электронов на  $X = 0,8 \dots 0,87$  (рис. 3). Это приводит к увеличению наведенного тока в зазорах, повышению напряжения на зазорах и к увеличению выходной мощности ЛБВ.

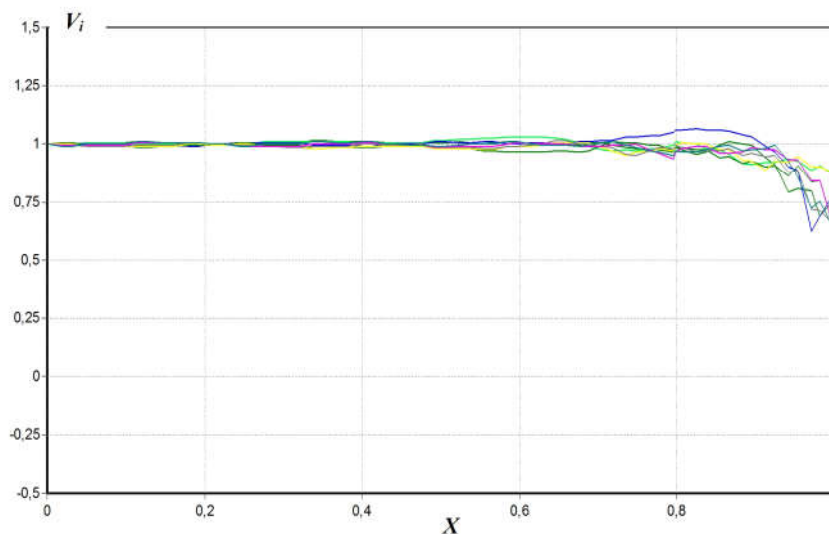


Рис. 3. Графики скоростной модуляции варианта Е4  
Fig. 3. Graphs of high-speed modulation of variant E4

Анализ результатов расчетов вариантов Е3 и Е4 показывает, что в релятивистской ЛБВ со скачком потенциала выходная мощность повышается примерно на 7,8 МВт, что соответствует 15 %.

### Заключение

Сформулирована математическая модель и предложен алгоритм расчета ЛБВ на петляющем волноводе со скачком потенциала для ускоряющих напряжений 20–500 кВ. В модели учтены релятивистские эффекты, провисание полей в зазорах волновода, потери в стенках волновода. Разработана компьютерная программа и проведены расчеты ЛБВ с ускоряющими напряжениями 24, 500 кВ со скачком потенциала. Расчеты показали, что использование скачка потенциала позволяет увеличить выходную мощность приборов на 15–20 %. Для сравнения можно отметить, что применение скачка потенциала в многорезонаторных клистродах [1] также приводит к увеличению выходной мощности на 15–25 %. Это подтверждает достоверность математических моделей, применяемых в ЛБВ и клистродах.

### Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.  
All authors have equally contributed to writing the article.

### Список литературы

1. Аксенчик А.В., Кураев А.А. Многорезонаторные клистроны со скачком потенциала. *Радиотехника и электроника*. 1989;34(10): 2157-2165.
2. 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;10:46-56.
3. Aksenchyk A., Kuraev A., Kirinovich I. *Millimeter and submillimeter O-type amplifiers and oscillators. (The theory and optimization)*. Germany: Palmarium Academic Publishing; 2014.

### References

1. Aksenchyk A.V., Kuraev A.A. [Multi-cavity klystrons with a potential jump]. *Radiotekhnika i elektronika = Journal of Communications Technology and Electronics*. 1989;34(10): 2157-2165. (in Russ.)
2. Aksenchyk A.V., Kravchenko V.F. [Optimization BWO and TWT of O-type on folded rectangular waveguides for a millimeter and submillimeter range of lengths of waves]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*. 2007;10:46-56. (in Russ.)
3. Aksenchyk A., Kuraev A., Kirinovich I. *Millimeter and submillimeter O-type amplifiers and oscillators. (The theory and optimization)*. Germany: Palmarium Academic Publishing; 2014.

### 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.Sc., Professor, Professor at the Computational Methods and Programming Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kirynovich I.F., PhD., Associate Professor at the Engineering Psychology and Ergonomics Department of the 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. Brovka str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-44-702-00-95;  
e-mail: aksenchik@bsuir.by  
Aksenchyk Anatoly Vladimirovich