

DOI 10.15826/urej.2019.3.4.003

УДК 621.385.6

## Мощные релятивистские генераторы на прямолинейных электронных потоках с электродинамическими фильтрами на концах

С. В. Колосов ✉, М. П. Батура, О. О. Шатилова

Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

✉ kolosov@bsuir.by

### Аннотация

Представлены результаты расчетов мощных генераторов СВЧ-излучения на прямолинейных электронных потоках на резонаторах с электродинамическими фильтрами на концах резонаторов. В основу методики расчета процессов в нерегулярном волноводе положены идеи А. Г. Свешникова, основанные на методе преобразования координат, который позволяет искать решение задачи возбуждения нерегулярного волновода путем разложения этого решения по системе базисных функций регулярного волновода. Это позволяет свести 3-мерную задачу к одномерной, что существенно сокращает объем вычислений и повышает точность решения. Расчеты проводились с помощью компьютерной программы Гуго-К. Наличие электродинамических фильтров на концах волновода позволило повысить добротность резонатора и уменьшить СВЧ-излучение в область катода. Было показано, что мощность таких генераторов может достигать 21 Мвт, что может обеспечить эффективное подавление работы электронных устройств предполагаемого противника.

### Ключевые слова

генераторы СВЧ, нерегулярные волноводы, релятивистские электронные потоки

### Для цитирования

Колосов С. В., Батура М. П., Шатилова О. О. Мощные релятивистские генераторы на прямолинейных электронных потоках с электродинамическими фильтрами на концах. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):369–377. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.003

## Powerful relativistic generators on rectilinear electron beams with electrodynamic filters at the ends

S. V. Kolosov ✉, M. P. Batura, O. O. Shatilova

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
st. P. Brovka, 6, Minsk, 220013, Belarus

✉ kolosov@bsuir.by

### Abstract

This paper presents the results of the calculations of high-power generators of microwave radiation on the rectilinear electron beam on

resonators with electrodynamic filters at the ends of the resonators. The results of calculations of high-power generators of microwave radiation on rectilinear electron beam on resonators with electrodynamic filters at the ends of the resonators are presented. The methodology for calculating processes in the irregular waveguide is based on the ideas of A. G. Sveshnikov, based on the coordinate transformation method, which allows searching for a solution of the excitation problem of the irregular waveguide by expanding this solution into the system of basic functions of the regular waveguide. allows you to search for a solution to the excitation problem of an irregular waveguide by expanding this solution into a system of basic functions of a regular waveguide. This allows reducing the 3-dimensional problem to the one-dimensional one allows us to reduce a 3-dimensional problem to a one-dimensional one, which significantly reduces the amount of computation and increases the accuracy of the solution. The calculations are carried out using the computer program Gyro-K. The presence of electrodynamic filters at the ends of the waveguide makes it possible to increase the quality factor of the resonator and reduce microwave radiation to the cathode region. We demonstrate that the power of such generators may reach 21 MW, which may provide effective suppression of the electronic devices of the alleged enemy.

### Keywords

microwave generators, irregular waveguides, relativistic electron beams

### For citation

KolosoV S. V., Batura M. P., Shatilova O. O. Powerful relativistic generators on rectilinear electron beams with electrodynamic filters at the ends. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):369–377. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.003

## 1. Введение

Имеются прекрасные обзоры по релятивистской высокочастотной электронике и ее применению (например, [1]). Возможности создания высокоэффективных мощных электронных приборов СВЧ приведены в работах [2–5]. Однако приведенные в этих работах варианты Черенковских генераторов и клистрон-генераторов обладают одним недостатком. На входе пространства взаимодействия электронного потока с электромагнитными волнами стоит отражающий фильтр в виде одной круговой канавки. Он не может достаточно эффективно отражать бегущую на катод встречную волну. Это понижает КПД генератора и может привести к выходу его из строя. В данной работе была поставлена задача минимизировать проходящую на катод мощность встречной волны за счет поиска оптимальной конструкции заградительного фильтра на входе рабочей области генератора СВЧ-излучения.

## 2. Результаты расчетов оптимальных конструкций релятивистских генераторов на прямолинейных электронных потоках

Теория, описывающая процессы взаимодействия электронных потоков с электромагнитными волнами в нерегулярных цилиндрических волноводах, приведена в [6; 7]. В основу методики расчета процессов в нерегулярном волноводе положены идеи А. Г. Свешникова [8], основанные на методе преобразования координат, который позволяет искать решение задачи возбуждения нерегулярного волновода путем разложения этого решения по системе базисных функций регулярного волновода. Это позволяет свести 3-мерную задачу к одномерной, что существенно сокращает объем вычислений и повышает точность решения. Расчеты проводились с использованием программы Gyro-K [9] и программы оптимизации Opti-K. В этих программах все используемые величины задаются в нормированном виде. Например, все длины задаются в радианах

$$l = \frac{2\pi L}{\lambda}.$$

Мощный электронный поток можно создать с помощью импульсных сильноточных электронных пушек с холодными кольцевыми катодами в режиме взрывной эмиссии, формирующих высокопереванские релятивистские электронные пучки [10–12].

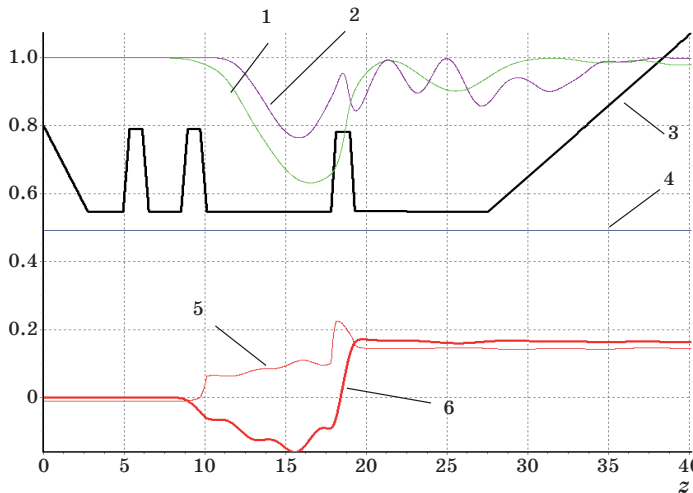
В работах [4; 5] были приведены результаты расчетов клистрон-генераторов, но с единичными загораживающими фильтрами. Но такие варианты приборов не позволяют полностью отразить электромагнитную волну, идущую на катод, и на выходном фильтре должна создаваться очень высокая напряженность поля, что может вызвать эмиссию электронов со стенки волновода.

На рис. 1 показаны интегральные функции, описывающие процессы в таком приборе.

Как показано на рис. 1, основная отдача мощности электронным потоком происходит в районе последней канавки, что возможно только в очень сильной напряженности ВЧ электрического поля, и видно по кривой 6, что часть ВЧ-мощности идет обратно на катод. Функции продольной группировки по первой и второй гармониках рабочей частоты:

$$\left. \begin{aligned} F_1(z) &= 1 - \left[ \left( \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \sin t_i \right)^2 + \left( \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos t_i \right)^2 \right], \\ F_2(z) &= 1 - \left[ \left( \frac{2}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos t_i \sin t_i \right)^2 + \left( \frac{2}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \cos^2 t_i - 1 \right)^2 \right] \end{aligned} \right\},$$

где  $t_i$  – нормированное время (в радианах) прохождения сечения  $z$   $i$ -м электроном.



**Рис. 1.** Интегральные характеристики клистрон генератора с единичными фильтрующими канавками:

1 – функция продольной группировки по первой гармонике; 2 – функция группировки по второй гармонике; 3 – профиль волновода в длинах волн; 4 – радиус электронного потока; 5 – волновой КПД; 6 – электронный КПД

**Fig. 1.** Integral characteristics of a klystron generator with single filtering grooves:

1 – the function of longitudinal grouping by the first harmonic, 2 – the function of grouping by the second harmonic, 3 – the waveguide profile at wavelengths, 4 – the radius of the electron beam, 5 – the wave efficiency, 6 – the electronic efficiency

#### Электронный КПД

$$\eta_e = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} \frac{1 - R_0/R_i}{1 - R_0},$$

где  $R_i = \sqrt{1 - (\beta_{xi}^2 + \beta_{yi}^2 + \beta_{zi}^2)}$  и  $\beta_i$  – нормированные к скорости света скорости электронов по осям координат.

#### Волновые КПД

$$\eta_{np}^e = \frac{\pi R_0 e_{np}}{(1 - R_0)\sigma} \operatorname{Im} \{ A_{np}^e V_{np}^* \},$$

где

$$e_{np} = \frac{1}{2} \cdot J_{n-1}^2(v_{np}),$$

$n$  – азимутальный индекс типа волны,  $p$  – радиальный индекс типа волны,  $v_{np}$  – корни функции Бесселя ( $J_n(v_{ni}) = 0$ ), нормированный токовый параметр

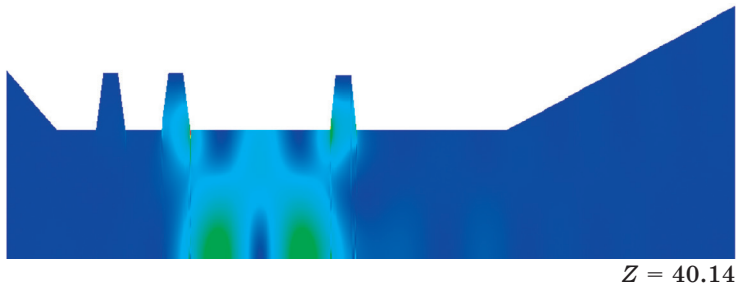
$$\sigma = \frac{\eta_0 \mu_0}{c} I_0 = 0.73723 \cdot 10^{-3} I_0 [A],$$

нормированная напряженность электрической составляющей ВЧ-поля

$$\dot{A}_{mnp}^e = \frac{\dot{E}_{\perp mnp}^e \eta_0}{c^2}, \quad \dot{V}_{np} = -\frac{d\dot{A}_{np}^e}{dz} + v_{np} \dot{C}_{np}, \quad \dot{C}_{mnp} = \frac{\dot{E}_{znp}^e \eta_0}{\omega_0 c} -$$

нормированная напряженность электрической продольной составляющей ВЧ поля.

На следующем рисунке показано распределение электрической напряженности поля вдоль продольного сечения волновода (рис. 2).



**Рис. 2.** Поперечное сечение распределения модуля электрической напряженности ВЧ-поля в генераторе

**Fig. 2.** Cross-section of the distribution of the module of the electric strength of the RF field in the generator

Предлагаемая структура электродинамической системы представляет собой отрезок круглого волновода с гребенчатыми фильтрами на концах волновода. Основным рабочим типом волны была выбрана мода  $E_{01}$ .

На первом шаге оптимизации был проведен поиск структуры электродинамического фильтра в начале волновода, который бы не допускал прохождение встречной волны в сторону катода. Была найдена такая структура четырехзвенного фильтра, которая пропускала не более 1 % мощности встречной волны, в то время как в вариантах из работ [4; 5] проходит в сторону катода более 4 % мощности встречной волны. В конце волновода тоже расположен уже трехзвенный фильтр. В итоге создается резонатор с холодной нагруженной добротностью  $Q = 1/\Delta f \sim 500$  ( $\Delta f$  определяется по уровню 0,5 от квадрата напряженности поля на частотной характеристике резонатора), как это следует из частотной характеристики резонатора (рис. 3).

Оптимизация такого генератора привела к следующему результату. Ток электронного потока составил 1150А, ускоряющее напряжение – 79 Кв. Нормированная длина рабочей области генератора составила 13,5 рад., нормированный радиус цилиндрического электронного потока – 2,814 рад. КПД тако-

го генератора достиг 23 %. В то время как рассчитанный в [3] клистрон с двумя резонансными канавками может обеспечить КПД не более 18 %. На рис. 4 приведены интегральные характеристики рассчитанного нами релятивистского клистрона, а на рис. 5 – поперечное сечение распределения модуля электрической напряженности ВЧ поля в генераторе.

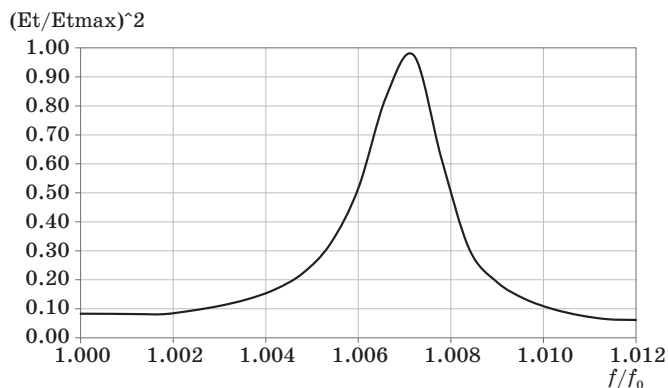


Рис. 3. Частотная характеристика резонатора

Fig. 3. Frequency response of the resonator

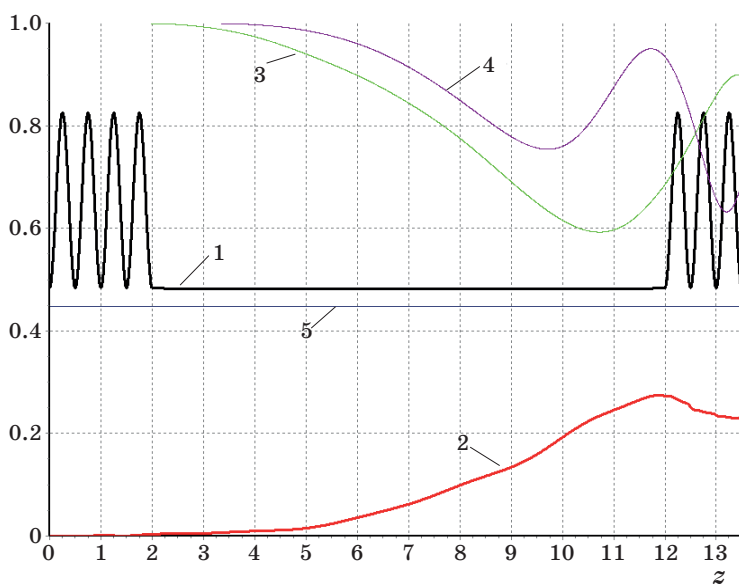
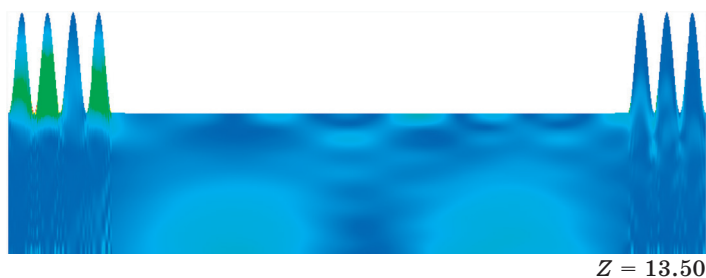


Рис. 4. Интегральные характеристики клистрона:

1 – профиль волновода; 2 – КПД; 3 – функция продольной группировки электронов по первой гармонике рабочей частоты; 4 – по второй гармонике; 5 – радиус электронного потока

Fig. 4. Integral characteristics of the klystron:

1 – waveguide profile, 2 – efficiency, 3 – function of the longitudinal bunching of electrons by the first harmonic of the operating frequency, 4 – by the second harmonic, 5 – radius of the electron beam



**Рис. 5.** Поперечное сечение распределения модуля электрической напряженности ВЧ-поля в генераторе

**Fig. 5.** Cross section of the distribution of the module of the electric field of the RF field

В расчетах учитывалось 8 типов волн от  $E_{01}$  до  $E_{08}$ , число шагов интегрирования составляло 4 000, число электронных траекторий – 64, что позволило с достаточной точностью смоделировать процессы в генераторе с нерегулярной электродинамической системой.

### 3. Заключение

Мощность электронного потока на входе резонатора составляет 90,85 Мвт. При КПД прибора 23 %, выходная мощность ВЧ-волны  $E_{01}$  будет равна 21 Мвт. Как следует из рис. 4, электронный поток взаимодействует с ВЧ полем резонатора почти на всей его длине, что видно по характеру нарастания КПД в резонаторе. В вариантах клистрон-генераторов из [4], процесс отбора энергии от электронного потока происходит только при прохождении последней канавки резонатора, что из-за высокого значения напряженности ВЧ-поля может приводить к его пробое. Оптимизированный вариант генератора, описанный в данной работе, свободен от указанных выше недостатков.

### Список литературы

1. Gaponov-Grekhov A. V., Granatstein V. L. *Applications of High-Power Microwaves*. Boston: Artech House; 1994.
2. Батура М. П., Кураев А. А. *Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ*. Минск: БГУИР; 2007.
3. Корниленко В. Н., Черепенин В. А. Особенности формирования пространственно-временной структуры излучения многоволнового Черенковского генератора. *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2012;20(6):118–123. DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-6-118-123
4. Гуринович А. Б., Кураев А. А., Сеницын А. К. Релятивистский клистрон-генератор с пространственно-развитым сильноточным пучком. *Доклады БГУИР*. 2009;(1):28–33.



5. Кураев А. А., Рак А. О., Гуринович А. Б. Черенковские усилители и генераторы на нерегулярных волноводах. Lambert; 2017.

6. Колосов С. В. *Оптимизация электронных приборов СВЧ с нерегулярными волноводами*. Lambert; 2018.

7. Kolosov S. V. *Optimization of microwave electronic devices with irregular waveguides*. Lambert; 2019.

8. Свешников А. Г. К обоснованию метода расчета распространения электромагнитных колебаний в нерегулярных волноводах. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1963;3(2):314–326.

9. Колосов С. В., Зайцева И. Е. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ. *СВЧ электроника*. 2017;(2):46–48.

10. Бугаев С. П., Литвинов А. Е., Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Взрывная эмиссия электронов. *Успехи физических наук*. 1975;115:101–120. DOI: 10.3367/UFNr.0115.197501d.0101

11. Месяц Г. А. Первичные и вторичные процессы взрывной электронной эмиссии. *Журнал прикладной механики и технической физики*. 1980;(5):138–144.

12. Месяц Г. А. (ред.) *Эмиссионная сильноточная электроника*. Новосибирск: Наука; 1984.

## References

1. Gaponov-Grekhov A. V., Granatstein V. L. *Applications of High-Power Microwaves*. Boston: Artech House; 1994.

2. Batura M. P., Kuraev A. A., *Fundamentals of the theory, calculation and optimization of modern electronic microwave devices*. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics; 2007. (In Russ.)

3. Kornienko V. N., Cherepenin V. A. Features of time-spatial structure formation of the multiwave Cherenkov Oscillator radiation. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2012;20(6):118–123. (In Russ.) DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-6-118-123

4. Gurinovich A. B., Kuraev A. A., Sinitsyn A. K. Relativistic klystron generator with a spatially developed high-current beam. *Reports BSUIR*. 2009;1(39):28–33. (In Russ.)

5. Kuraev A. A., Rak A. O., Sinitsyn A. K. *Cherenkov amplifiers and generators on irregular waveguides*. Lambert; 2017.

6. Kolosov S. V. *Optimization of microwave electronic devices with irregular waveguides*. Lambert; 2018.

7. Kolosov S. V. *Optimization of microwave electronic devices with irregular waveguides*. Lambert; 2019.

8. Sveshnikov A. G. On the justification of the method for calculating the propagation of electromagnetic waves in irregular waveguides. *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1963;3(2):314–326 (In Russ.)



9. Kolosov S. V., Zaitseva I. E. GYRO-K computer program for the development and design of gyroresonance devices microwave. *Microwave electronics*. 2017;(2):46–48. (In Russ.)

10. Bugaev S. P., Litvinov E. A., Mesyats G. A., Proskurovskii D. I. Explosive emission of electrons. *Sov. Phys. Usp.* 1975;115:101–120. (In Russ.) DOI: 10.3367/UFNr.0115.197501d.0101

11. Mesyats G. A. Primary and secondary processes of explosive electron emission. *J. Prikl. fur. and tech. Fiz.* 1980;(5):138–144. (In Russ.)

12. Mesyats G. A. (ed.) *Emission high-current electronics*. Novosibirsk: Nauka; 1984. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Колосов Станислав Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

**Батура Михаил Павлович**, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

**Шатилова Ольга Олеговна**, старший преподаватель кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Беларусь, 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

### Information about the authors

**Stanislav V. Kolosov**, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics, 6 P. Brovka st., Minsk, 220013, Belarus.

**Mikhail P. Batura**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics, 6 P. Brovka st., Minsk, 220013, Belarus.

**Olga O. Shatilova**, Assistant, Department of Computational Methods and Programming, Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics, 6 P. Brovka st., Minsk, 220013, Belarus.

Поступила / Received: 24.11.2019

Принята в печать / Accepted: 06.12.2019