



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-5-45-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.86

МОЩНАЯ ВЫСОКООРБИТНАЯ ГИРО-ЛБВ

С.В. КОЛОСОВ, О.О. ШАТИЛОВА

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

Поступила в редакцию 18 декабря 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В работе приведены результаты поиска оптимальной конструкции высокоорбитной гиро-ЛБВ, которая бы позволила уменьшить значение магнитостатического поля при работе на высоких частотах, близких к миллиметровому диапазону длин волн, повысить коэффициент и полосу усиления и увеличить КПД гиро-ЛБВ. Для поиска оптимальной конфигурации высокоорбитной гиро-ЛБВ была использована программа Гуго-К, где уравнения возбуждения электронным потоком нерегулярного волновода строятся на основе метода преобразования координат А.Г. Свешникова, который основан на замене задачи возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода с единичным радиусом. Этот метод позволяет искать решение волновых уравнений в виде разложений по системе базисных функций регулярного цилиндрического волновода. Для решения уравнений Максвелла был использован метод Галеркина, который также называется методом ортогонализации. Коэффициенты разложения поля по собственным базисным функциям определяются в этом методе из условия ортогональности невязок уравнений собственным базисным функциям регулярного волновода. Граничные условия на открытых концах волновода определяются для каждой моды регулярного волновода отдельно, что устраняет некорректность задания граничных условий для полного поля, как это происходит при использовании «*ris*» технологии. В результате получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для коэффициентов разложения, зависящих теперь только от продольной координаты. Такой подход позволяет преобразовать трехмерную задачу возбуждения нерегулярного волновода в одномерную задачу. Омические потери в стенках волновода учитываются на основе граничных условий Щукина – Леонтовича. Для самосогласованного решения задачи возбуждения нерегулярного волновода электронном потоком использовался итерационный метод последовательной нижней релаксации. Получен оптимизированный вариант высокоорбитной гиро-ЛБВ, который обладает электронным КПД 28 %, волновым КПД 23 %, коэффициентом усиления 34 Дб и полосой усиления 11 % при рабочей частоте более 30 ГГц. Это было достигнуто за счет введения дополнительного проводящего участка волновода в поглощающую часть волновода, что привело к улучшению азимутальной группировки электронов на ларморовской орбите и, как следствие, к повышению КПД лампы. Увеличение в два раза длины волновода позволило увеличить коэффициент усиления лампы. Омические потери энергии в стенках волновода достигают 5 % от мощности электронного потока. Реализация такой мощной гиро-ЛБВ (2 Мвт) в диапазоне миллиметровых длин волн позволит существенно увеличить возможности радиолокации на дальних расстояниях и повысить разрешающую способность радиолокатора.

Ключевые слова: гиротрон, лампа бегущей волны (ЛБВ).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Колосов С.В., Шатилова О.О. Мощная высокоорбитная гиро-ЛБВ. Доклады БГУИР. 2021; 19(5): 45-51.

POWERFUL HIGH-ORBIT GYRO-TWT

STANISLAV V. KOLOSOV, OLGA O. SHATILOVA

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

Submitted 18 December 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Annotation. This paper presents the results of a search for the optimal design of a high-orbit gyro-TWT, which would make it possible to reduce the magnetostatic field when operating at high frequencies close to the millimeter wavelength range, increase the gain and gain bandwidth, and increase the efficiency of the gyro-TWT. To search for the optimal configuration of the high-orbit gyro-TWT, the Gyro-K program was used, in which the equations for the excitation of an irregular waveguide by an electron beam are constructed on the basis of the coordinate transformation method of A.G. Sveshnikov, which is based on replacing the problem of exciting an irregular waveguide with the problem of exciting a regular waveguide with a unit radius. This method allows one to search for the solution of wave equations in the form of expansions in terms of the system of basis functions of a regular cylindrical waveguide. To solve Maxwell's equations, the Galerkin method was used, which is also called the orthogonalization method. The coefficients of the expansion of the field in terms of eigenbasis functions are determined in this method from the condition of the orthogonality of the residuals of the equations for the eigenbasis functions of a regular waveguide. The boundary conditions at the open ends of the waveguide are determined for each mode of the regular waveguide separately, which eliminates the incorrectness of setting the boundary conditions for the full field, as is the case when using the “pic” technology. As a result, we obtain a system of ordinary differential equations for the expansion coefficients, which now depend only on the longitudinal coordinate. This approach makes it possible to transform the three-dimensional problem of excitation of an irregular waveguide into a one-dimensional problem. Ohmic losses in the walls of the waveguide are taken into account on the basis of the Shchukin – Leontovich boundary conditions. For a self-consistent solution of the problem of excitation of an irregular waveguide by an electron beam, the iterative method of sequential lower relaxation was used. An optimized version of a high-orbit gyro-TWT has been obtained, which has an electronic efficiency of 28 %, a wave efficiency of 23 %, a gain of 34 dB and a gain band of 11 % at an operating frequency of more than 30 GHz. This was achieved by introducing an additional conducting section of the waveguide into the absorbing part of the waveguide, which led to an improvement in the azimuthal grouping of electrons in the Larmor orbit and, as a consequence, to an increase in the lamp efficiency. A twofold increase in the waveguide length made it possible to increase the lamp gain. Ohmic energy losses in the walls of the waveguide reach 5 % of the power of the electron beam. The implementation of such a powerful gyro-TWT (2 MW) in the millimeter wavelength range will significantly increase the capabilities of radar at long distances and increase the resolution of the radar.

Keywords: gyrotron, traveling-wave tube (TWT).

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

For citation. Kolosov S.V., Shatilova O.O. Powerful high-orbit gyro-TWT. Doklady BGUIR. 2021; 19(5): 45-51.

Введение

В настоящее время большой интерес вызывает возможность создания генераторов и особенно усилителей миллиметрового диапазона длин волн. Наиболее перспективными для этого представляются гирорезонансные приборы, которые обладают еще и большой выходной мощностью электромагнитного сигнала.

Возможности гирорезонансных приборов достаточно подробно описаны в обзоре [1] и статье [2]. Некоторые варианты реализации высокогармонических гиротронов с большими орбитами приведены в [3]. В таких приборах электроны вращаются вокруг оси прибора и взаимодействие электронов осуществляется с электромагнитными волнами с ненулевым азимутальным индексом, который и определяет номер гармоники от циклотронной частоты вращения электронов. В указанной работе приведены данные о высокоорбитных гиротронах,

работающих на 2, 3 и 4-й гармониках гирочастоты. Однако КПД таких приборов не превышал 1 % от мощности электронного потока, но при этом появилась возможность существенно, в 2, 3, 4 раза, уменьшить значение магнитостатического поля. В работе [4] приведен вариант создания высокоорбитной гиро-ЛБВ, работающей на 8-й гармонике гирочастоты. КПД такой лампы не превышал 1 %, коэффициент усиления составлял всего 10 ДБ, полоса усиления 4,3 % и выходная мощность 500 Вт. В работе [5] приведены результаты расчетов высокоорбитной гиро-ЛБВ, работающей на четвертой гармонике гирочастоты и рабочей частоте 35 ГГц. Было показано, что электронный КПД может достигать 19 % при полосе усиления 3,5 % и длине лампы 125,6 рад. В центральной части волновода располагался участок с поглощающим электромагнитные волны покрытием. В работе [6] приведен пример разработки гиро-ЛБВ на частоту, близкую к 100 ГГц, с коэффициентом усиления 49 Дб и КПД около 20 %.

Создание мощных усилителей миллиметрового диапазона длин волн позволит существенно увеличить возможности радиолокации на дальних расстояниях и повысить разрешающую способность радиолокаторов.

Результаты расчета гиро-ЛБВ

Расчеты гиро-ЛБВ проводились с использованием программы Gyro-K [7]. Математическая модель процессов, происходящих в электронных приборах с нерегулярным волноводом, основана на методе преобразования координат А. Г. Свешникова [8], который позволяет проводить замену задачи возбуждения нерегулярного волновода задачей возбуждения регулярного волновода с единичным радиусом. Описание математической модели процессов в гиро-ЛБВ дано в работах [9–11]. Для повышения коэффициента усиления была вдвое увеличена длина лампы по сравнению с вариантом, приведенным в [5]. Кроме того, участок волновода с поглощающим покрытием разбивался на два участка, что позволило повысить КПД за счет улучшения фазовой группировки электронов, так как образовывался небольшой участок волновода где осуществлялась дополнительная фазовая группировка электронного потока. Для повышения КПД лампы магнитостатическое поле в конце волновода понижалось для сохранения условий синхронизма электронного потока с вращающимся электромагнитным полем волны H_{41} , так как при отборе поперечной энергии у вращающегося вокруг оси электронного потока он переходит на более низкую орбиту и начинает вращаться с большей поперечной скоростью, а понижающееся магнитостатическое поле сохраняет азимутальную скорость электронного потока и поддерживает условия синхронизма электронного потока с вращающимся электромагнитным полем волновода. В программе Gyro-K все расчеты проводятся в нормированных параметрах, что позволяет распространять результаты этих расчетов на любой частотный диапазон. Частота учитывается только при расчете потерь мощности в стенках волновода. При расчете данной гиро-ЛБВ основные потери энергии высокочастотных волн происходят из-за наличия поглощающих вставок в стенках волновода, но они обеспечивают поглощение встречной волны, что устраняет возможность автогенерации ЛБВ.

В результате поиска оптимальной конструкции гиро-ЛБВ по значениям радиуса волновода, магнитостатического поля, тока электронного потока, питч фактора и ускоряющего напряжения были получены следующие параметры гиро-ЛБВ: ускоряющее напряжение 103 Кв ($\beta_0 = 0,5542$), электронный ток 87А ($\sigma = 0,0646$), питч фактор 1,447, нормированный радиус

волновода $g = \frac{2\pi b}{\lambda_0} = 5,4332$, магнитостатическое поле $F = \frac{\mu_0 e H_z^0(z)}{\omega_0} = \frac{1,7588 \cdot 10^{11} B_0 [T]}{2\pi f_0 [Hz]} = 0,28012$,

коэффициент усиления $K_{yc} = 34$ Дб. Интегральные характеристики данной гиро-ЛБВ приведены на рис. 1.

На кривой 2 (профиль волновода) серым цветом отмечены области волновода с поглощающим покрытием.

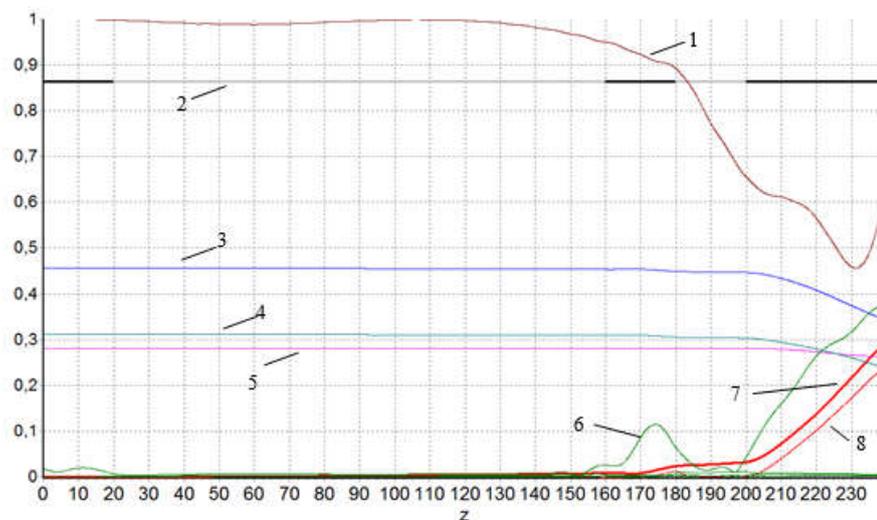


Рис. 1. Здесь: 1 – функция группировки по первой гармонике рабочей частоты, 2 – профиль волновода $g/(2\pi)$, 3 – среднее значение поперечной скорости электронов, 4 – среднее значение радиуса вращения электронов, 5 – нормированное значение магнитоэстатического поля, 6 – нормированное значение амплитуды электромагнитной волны H_{41} , 7 – электронный КПД, 8 – волновой КПД

Fig. 1. Here: 1 – function of grouping by the first harmonic of the operating frequency, 2 – waveguide profile $g/(2\pi)$, 3 – the average value of the transverse electron velocity, 4 – the average value of the electron rotation radius, 5 – the normalized value of the magnetostatic field, 6 – the normalized value of the electromagnetic wave amplitude H_{41} , 7 – electronic efficiency, 8 – wave efficiency

Из рис. 2 следует, что полоса усиления данной gyro-ЛБВ составляет 11 %, но при этом потери мощности достигают 5 % от мощности электронного потока.

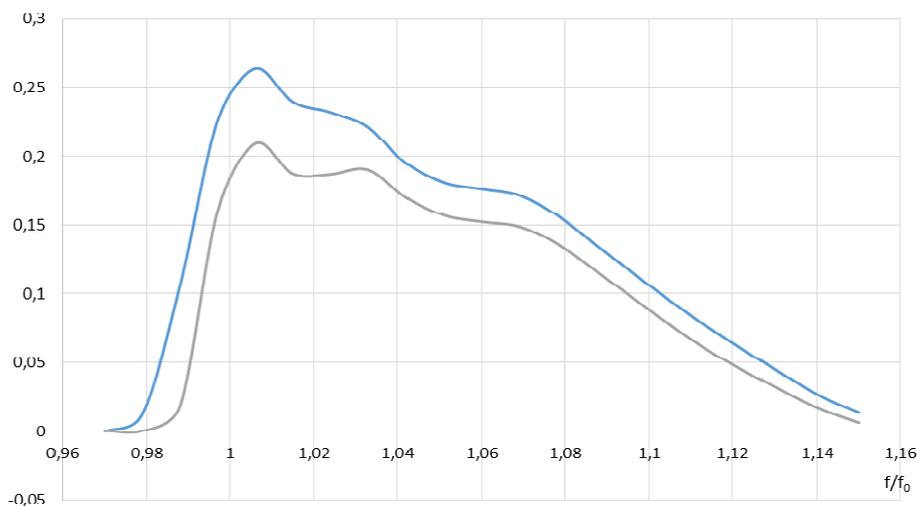


Рис. 2. Частотная характеристика gyro-ЛБВ, сверху электронный КПД, снизу волновой КПД

Fig. 2. Frequency response of gyro-TWT, top electronic efficiency, bottom wave efficiency

На рис. 3 показано, что максимальное значение напряженности электромагнитного поля наблюдается только в конце волновода.



Рис. 3. Распределение модуля напряженности электромагнитного поля в продольном сечении волновода

Белым пунктирным цветом на рис. 4 показана окружность начального распределения электронов в высокоорбитной ЛБВ.

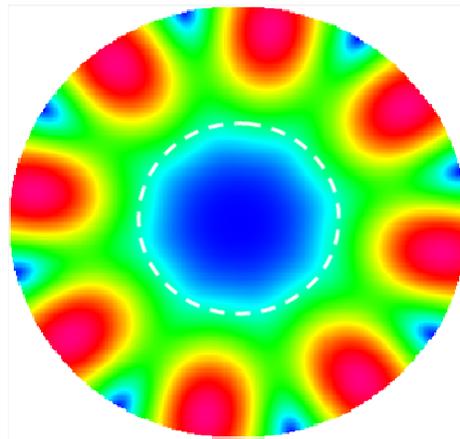


Рис. 4. Поперечное распределение модуля напряженности электромагнитного поля в конце волновода моды H_{41}
Fig. 4. Transverse distribution of the electromagnetic field intensity modulus at the end of the waveguide mode H_{41}

Следует отметить, что наблюдается формирование двух фазовых пакетов электронов в средней части лампы, что может сказаться на появлении излучения на второй гармонике рабочей частоты (рис. 5, 6).

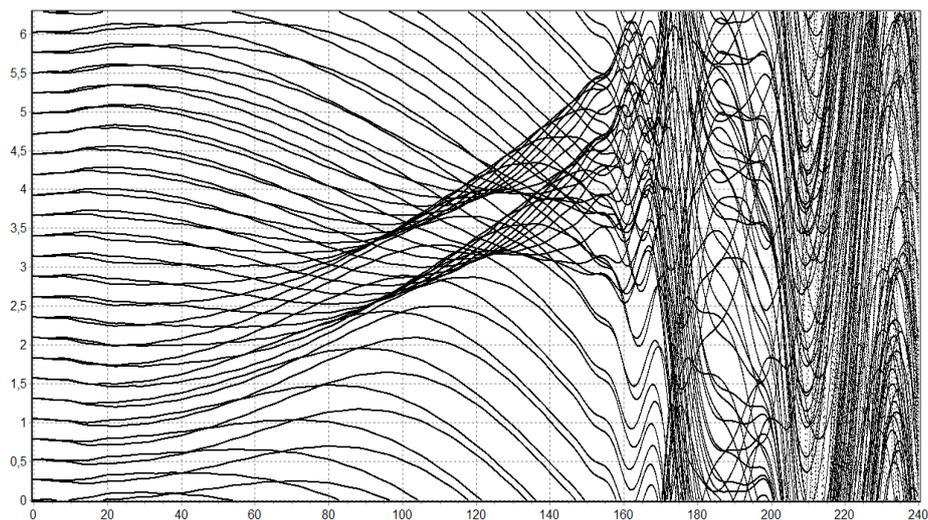


Рис. 5. Фазовые траектории электронов
Fig. 5. Phase trajectories of electrons

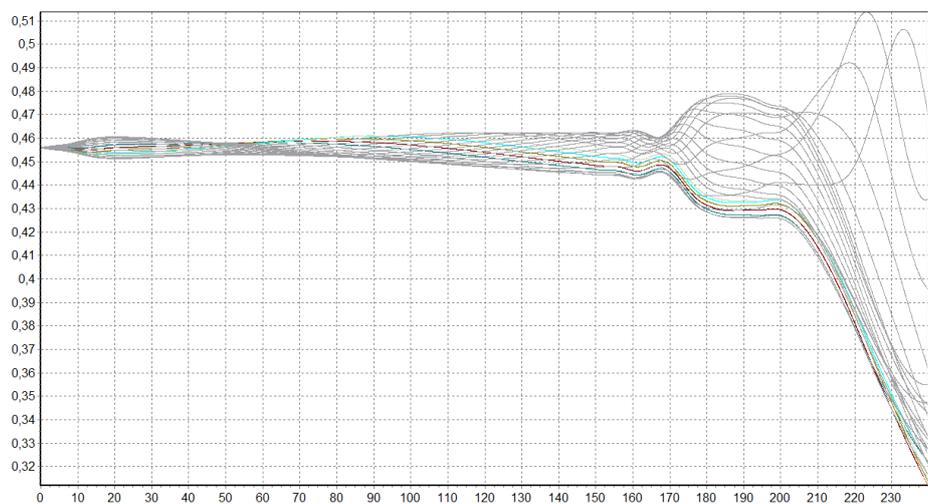


Рис. 6. Поперечные нормированные скорости электронов
Fig. 6. The normalized transverse velocity of electrons

Заключение

В отличие от описанного в [5] варианта высокоорбитной giro-ЛБВ, в статье приведен более эффективный вариант высокоорбитной giro-ЛБВ, которая обладает электронным КПД 28 %, волновым КПД 23 %, коэффициентом усиления 34 Дб и полосой усиления 11 %. Это было достигнуто за счет введения дополнительного проводящего участка волновода в поглощающую часть волновода, что привело к улучшению азимутальной группировки электронов на ларморовской орбите, и увеличением в два раза длины волновода, что позволило увеличить коэффициент усиления лампы. Омические потери энергии в стенках волновода достигают 5 % от мощности электронного потока. Реализация такой мощной giro-ЛБВ (2 Мвт) в диапазоне частот, близких к миллиметровому диапазону длин волн, позволит существенно увеличить возможности радиолокации на дальних расстояниях и повысить разрешающую способность радиолокаторов. Основным недостатком высокоорбитных giro-ЛБВ является существенное понижение коэффициента связи электронного потока с электромагнитными волнами волновода при больших азимутальных индексах ТЕ волн, что приводит к значительному повышению требуемого для эффективной работы таких ламп тока электронного потока. Поэтому приемлемый компромисс возможен только при азимутальном индексе волны, равном двум.

Список литературы

1. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. *KIT Scientific Reports* 7750; 2017: 183.
2. Zapevalov V.E. Evolution of the gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012;54(8-9):507-518.
3. Furuno D.S., MkDermott, Kou C.S., Luhmann N.C. Operation of a Large-Orbit High-Harmonic Gyro-Traveling-Wave Tube Amplifier. *IEEE Transaction on Plasma Science*. 1990;18(3):313-320.
4. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Osharin I., Terahertz Large-Orbit High-Harmonic Gyrotron at IAP RAS: Recent Experiment and New Designs. *IEEE Transaction on Electron Devices*. February 2018;(99):1-7.
5. Колосов С.В. Сравнение возможностей высокоорбитной giro-ЛБВ и пениотронного усилителя на Н₄₁ моде. *Доклады БГУИР*. 2013;7(77):90-95.
6. Xu Zeng, Efeng Wang, Jinjun Feng, A Study of W-band TE₀₂ mode gyro-TWT. *Terahertz Science and Technology*. December 2016;9(4):141-142.
7. Колосов С.В., Зайцева И.Е. Компьютерная программа GYRO-K для разработки и проектирования гирорезонансных приборов СВЧ. *СВЧ электроника*. 2017;2:46-48.
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. Kolosov S.V. Optimization of microwave devices with irregular waveguide. *LAP LAMPERT Academic Publishing RU*. 2019: 192.
10. Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок. *Техника и приборы СВЧ*. 2009;2:8-13.
11. Кураев А.А., Ковалев И.С., Колосов С.В. *Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ*. Минск: Наука и техника; 1975.

References

1. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers. *KIT Scientific Reports* 7750; 2017: 183.
2. Zapevalov V.E. Evolution of the gyrotrons. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2012;54(8-9):507-518.
3. Furuno D.S., MkDermott, Kou C.S., Luhmann N.C. Operation of a Large-Orbit High-Harmonic Gyro-Traveling-Wave Tube Amplifier. *IEEE Transaction on Plasma Science*. 1990;18(3):313-320.
4. Bandurkin I.V., Bratman V.L., Kalynov Yu.K., Osharin I., Terahertz Large-Orbit High-Harmonic Gyrotron at IAP RAS: Recent Experiment and New Designs. *IEEE Transaction on Electron Devices*. February 2018;(99):1-7.
5. Kolosov S.V. Comparison of the capabilities of a high-orbit gyro-TWT and a peniotron amplifier on the Н₄₁ mode. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2013;7(77):90-95. (in Russ.)

6. Xu Zeng, Efeng Wang, Jinjun Feng, A Study of W-band TE₀₂ mode gyro-TWT. *Terahertz Science and Technology*. December 2016;9(4):141-142.
7. Kolosov S.V., Zaitseva I.E. [Computer program GYRO-K for the development and design of microwave gyroresonant devices]. *SVCH elektronika = Microwaveelectronics*. 2017;2:46-48. (in Russ.)
8. Sveshnikov A.G. [To substantiation of the method for calculating the propagation of electromagnetic oscillations in irregular waveguides]. *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1963;3(2):314-326. (in Russ.)
9. Kolosov S.V. Optimization of microwave devices with irregular waveguide. *LAP LAMPERT Academic Publishing RU*. 2019: 192.
10. Kolosov S.V., Kuraev A.A., Senko A.V. [Excitation equations for irregular waveguides with finite wall conductivity]. *Tekhnika i pribory SVCH = UHF Technics and Devices*. 2009;2:8-13. (in Russ.)
11. Kuraev A.A., Kovalev I.S., Kolosov S.V. [Numerical optimization methods in microwave electronics problems]. Minsk: Science and Technology; 1975. (in Russ.)

Вклад авторов

Колосов С.В. поставил задачу по повышению электронного КПД в высокоорбитной гиро-ЛБВ с поглощающими электромагнитные волны участками волновода в гиротронах.

Шатилова О.О. произвела расчеты высокоорбитной гиро-ЛБВ по программе Gyro-K и показала указанные в заключении статьи результаты.

Authors' contribution

Kolosov S.V. set the task of increasing the electronic efficiency in a high-orbit gyro-TWT with sections of the gyrotron waveguide absorbing electromagnetic waves.

Shatilova O.O. performed the calculations of a high-orbit gyro-TWT using the Gyro-K program and showed the mentioned in the conclusion of the article results.

Сведения об авторах

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

Шатилова О.О., старший преподаватель кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kolosov S.V., PhD, Professor at the Department of Computational Methods and Programming of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shatilova O.O., Senior Lecturer at the Department of Computational Methods and Programming 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;
e-mail: kolosov@bsuir.by
Колосов Станислав Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
e-mail: kolosov@bsuir.by
Kolosov Stanislav Vasil'evich