http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-70-76

УДК 621.385

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ТИПОВ ВОЛН В РЕЗОНАТОРЕ С АЗИМУТАЛЬНО-ПРОДОЛЬНО НЕРЕГУЛЯРНЫМ СЕЧЕНИЕМ

В. В. МАТВЕЕНКО[1], И. П. МАТВЕЕНКО[2]

[1] Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)
[2]Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Современное использование вакуумных СВЧ-резонаторов охватывает множество областей науки, техники и промышленности. Эти устройства благодаря своей способности эффективно генерировать, усиливать и фильтровать СВЧ-сигналы находят применение во многих научных направлениях. Исследованы резонаторы сложной формы, которые позволяют получить улучшенные электродинамические характеристики взаимодействия с электронным потоком. Приведен расчет мод H_{mnp} и E_{mnp} в резонаторе с азимутально-продольно нерегулярным сечением. Полученные решения основаны на проекционных методах при верификации с электродинамическим решением в аттестованном международном пакете CST Studio Suite.

Ключевые слова: резонаторы на модах H_{mnp} и E_{mnp}, азимутально-продольно нерегулярный профиль, СВЧ-резонаторы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Матвеенко, В. В. Расчет электрических и магнитных типов волн в резонаторе с азимутально-продольно нерегулярным сечением / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 4. С. 70–76. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-70-76.

CALCULATING ELECTRIC AND MAGNETIC WAVE TYPES IN A CAVITY WITH AZIMUTHAL-LONGITUDINALLY IRREGULAR SECTION

VLADIMIR V. MATVEYENKA[1], IRINA P. MATVEYENKA[2]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)
[2]Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Modern use of vacuum microwave resonators covers many areas of science, technology and industry. These devices, due to their ability to effectively generate, amplify and filter microwave signals, are used in many scientific fields. Resonators of complex shape, which allow obtaining improved electrodynamic characteristics of interaction with an electron flow, are investigated. The calculation of the H_{mnp} and E_{mnp} modes in a resonator with an azimuthally-longitudinally irregular cross-section is presented. The obtained solutions are based on projection methods during verification with an electrodynamic solution in the certified international CST Studio Suite package.

Keywords: cavity at H_{mnp} and E_{mnp} mode frequencies, azimuthal-longitudinally irregular section, microwave cavities.

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

For citation. Matveyenka V. V., Matveyenka I. P. (2025) Calculating Electric and Magnetic Wave Types in a Cavity with Azimuthal-Longitudinally Irregular Section // *Doklady BGUIR*. 23 (4), 70–76. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-4-70-76 (in Russian).

Введение

Экспериментальные исследования вакуумных СВЧ-приборов достаточно затратные, это приводит к необходимости предварительно использовать соответствующие математические модели. Полученные компьютерные результаты обеспечивают на этапе эксперимента оптимальные варианты конструкции устройства и помогают значительно сократить время его создания. Существующие программы имеют вычислительные модули, предназначенные для решения подобных задач, но решают трехмерные задачи достаточно медленно, причем только для электромагнитных мод низкого порядка, так как не совсем корректные граничные условия на концах геометрии устройств приводят к паразитным решениям. Современное развитие вакуумной электроники СВЧ на одно из первых мест выдвигает задачи получения строгих математических моделей процессов взаимодействия электронных потоков с высокочастотными полями в электронных приборах различных типов, разработки эффективных методов и алгоритмов, создания пакетов программ, составляющих базу для проектирования новейших электронных приборов СВЧ, отбора на основе компьютерного моделирования эффективных по КПД схем и получения рекомендаций по их возможностям.

Расчет полей и резонансных частот для цилиндрического резонатора

При расчете и сравнении альтернативных методов использовался один и тот же образец цилиндра в формате STL (STereoLithography), созданный программой SolidWorks 2024, который применяется для экспорта и импорта 3D-моделей в виде полигональных сеток, что необходимо для обмена данными с другими программами или 3D-печати. Расчет полей и резонансных частот для цилиндрического резонатора производился при диаметре и длине резонатора 1 см на модах H_{mnp} и E_{mnp}.

На моде H_{mnp} расчет выполняли для первых 50-ти мод резонансной частоты тремя способами: аналитически, проекционным методом, рассмотренном в [1, 2], и в среде CST Studio Suite 2025 [3]. Полученные значения резонансных частот на модах H_{mnp} на интервале 0–50 ГГц приведены в табл. 1 (где f_{CST}, $f_{\text{пр.мет}}$ – собственные частоты цилиндрического резонатора для моды H_{mnp}, полученные соответственно в среде CST Studio Suite 2025 и проекционным методом), распределения силовых линий электромагнитного поля колебаний H_{mnp} показаны на рис. 1. Значения частоты f цилиндрического резонатора для моды H_{mnp} аналитически определялись по формуле

$$f_{Hmnp} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{\mu_{mn}}{\pi a}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}, \tag{1}$$

где a – радиус трубки резонатора; l – расстояние между торцевыми стенками; μ_{mn} – корень уравнения $J'_{mn}(\mu_{mn}) = 0$ функции Бесселя 1-го рода m-го и n-го порядков; $J'_{mn}(x)$ – производная по аргументу; c – скорость света.

Таблица 1. Значения резонансных частот на модах H_{mnp} на интервале 0–50 ГГц
Table 1. Resonance frequency values for H_{mnp} modes in the range 0–50 GHz

Номер моды	H_{mnp}	f_{Hmnp}, ГГц	f_{CST}, ГГц	$f_{\text{пр.мет}}$, ГГц
1	H_{001}	14,99	14,99	14,99
2	H_{111}	23,10	23,11	23,11
3	H_{002}	29,98	29,98	29,98
4	H_{211}	32,77	32,80	32,82
5	H_{112}	34,75	34,76	34,76
6	H_{011}	39,52	39,56	39,58
7	H_{212}	41,81	41,83	41,85
8	H_{311}	42,80	42,84	42,87
9	H_{003}	44,97	44,98	44,98
10	H_{012}	47,28	47,32	47,34
11	H_{113}	48,28	48,29	48,30

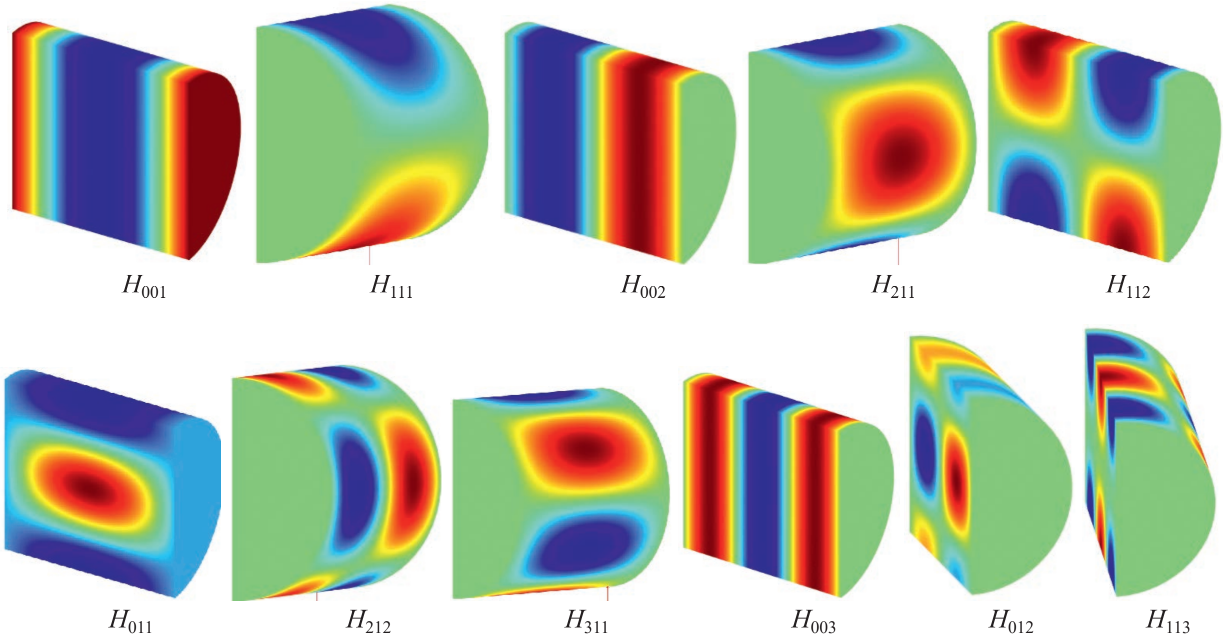


Рис. 1. Распределение силовых линий электромагнитного поля колебаний H_{mnp}
Fig. 1. Distribution of the electromagnetic field lines of oscillations H_{mnp}

На моде E_{mnp} расчет проводился для первых 50-ти мод резонансной частоты тремя способами: аналитически, в среде CST Studio Suite 2025 и проекционным методом, рассмотренном в [1–8]. Значения частоты цилиндрического резонатора для моды E_{mnp} аналитически определялись по формуле

$$f_{Emnp} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{\nu_{mn}}{\pi a}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2}, \tag{2}$$

где ν_{mn} – корень уравнения $J_{mn}(\nu_{mn}) = 0$ функции Бесселя 1-го рода m-го и n-го порядков.

Полученные значения резонансных частот на модах E_{mnp} на интервале 0–50 ГГц приведены в табл. 2, распределения силовых линий электромагнитного поля колебаний E_{mnp} показаны на рис. 2.

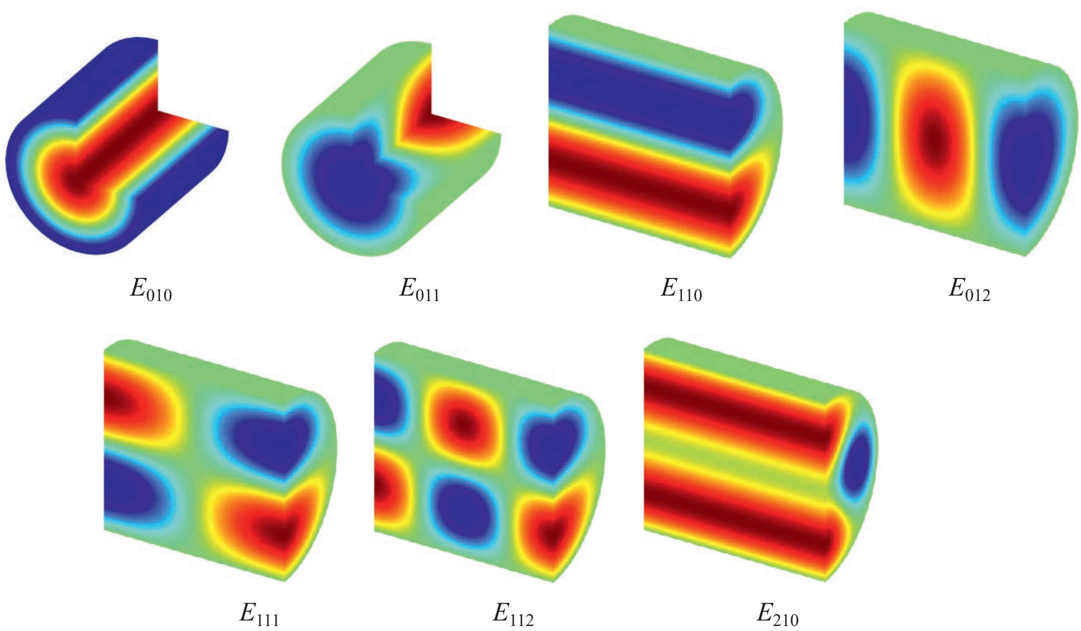


Рис. 2. Распределение силовых линий электромагнитного поля колебаний E_{mnp}
Fig. 2. Distribution of the electromagnetic field lines of oscillations E_{mnp}

Таблица 2. Значения резонансных частот на модах E_{mnp} на интервале 0–50 ГГц
Table 2. Resonance frequency values for E_{mnp} modes in the range 0–50 GHz

Номер моды	E_{mnp}	f_{Emnp}, ГГц	f_{CST}, ГГц	$f_{пр.мет}$, ГГц
1	E_{010}	22,95	22,97	22,99
2	E_{011}	27,41	27,43	27,45
3	E_{110}	36,57	36,61	36,62
4	E_{012}	37,75	37,77	37,78
5	E_{111}	39,52	39,56	39,58
6	E_{112}	47,28	47,32	47,33
7	E_{210}	49,01	49,05	49,1

Полученные результаты полностью совпадают между аналитическими формулами (1), (2), CST Studio Suite и проекционным методом [1, 2] для всех колебаний мод H_{mnp} и E_{mnp}.

Результаты исследований полей азимутально-продольно нерегулярных резонаторов

Расчет полей и резонансных частот для азимутально-продольно нерегулярного резонатора при радиусе 1,0–1,2 мм и длине 3,14 мм проводился следующим образом. Верификацию проекционного метода [1, 2] при помощи среды CST Studio Suite в пакете SolidWorks [4] выполняли в формате STL на азимутально-продольном нерегулярном резонаторе, изображенном на рис. 3.

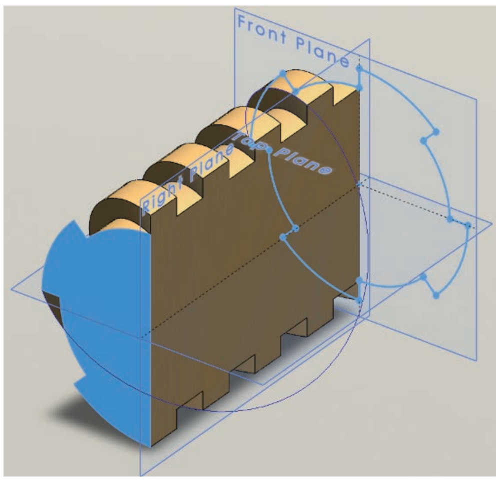
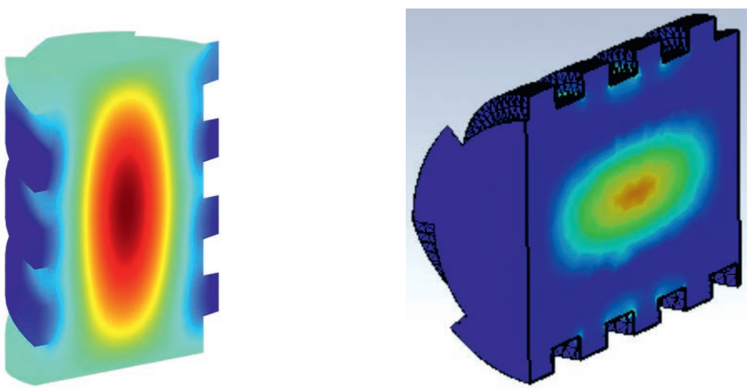


Рис. 3. Азимутально-продольно нерегулярный резонатор
Fig. 3. The cavity with azimuthal-longitudinally irregular section

Применяемый проекционный метод практически не подвержен проблеме граничных условий как CST Studio, поэтому значения колебаний моды H_{011} были получены вначале этим способом на частоте 167,25 ГГц, а затем в CST Studio на частоте 180,5 ГГц (рис. 4).



a *b*

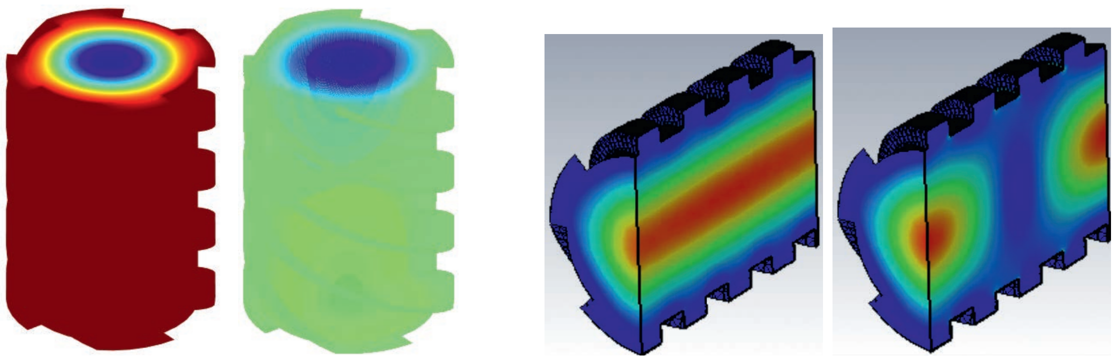
Рис. 4. Изображения колебаний моды H_{011}, полученных: *a* – проекционным методом; *b* – в пакете CST Studio
Fig. 4. Images of H_{011} mode oscillations obtained by: *a* – projection method; *b* – in the CST Studio package

Значения резонансных частот на модах H_{mnp} для азимутально-продольно нерегулярного резонатора и регулярных резонаторов при радиусе 1,0–1,2 мм и длине 3,14 мм, полученные проекционным методом и в пакете CST Studio, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения резонансных частот на модах H_{mnp}
Table 3. Resonance frequency values for H_{mnp} modes

Номер моды	H_{mnp}	f_{Hmnp}, ГГц	$f_{\text{пр.мет}}$, ГГц
1	H_{001}	47,74	45,19
2	H_{002}	95,48	89,82
3	H_{111}	87,40–99,98	89,90
4	H_{112}	120,30–129,70	116,66
5	H_{211}	130,49–153,35	148,60
6	H_{011}	159,66–188,95	167,25

На рис. 5 изображены колебания мод E_{010} и E_{011}, полученные проекционным методом [1, 2] на частотах 112,09 и 121,77 ГГц и в пакете CST Studio на частотах 105,5185 и 114,7973 ГГц.



a *b*

Рис. 5. Изображения колебаний мод E_{010} и E_{011}, полученных:
a – проекционным методом; *b* – в пакете CST Studio
Fig. 5. Images of E_{010} and E_{011} modes oscillations obtained by: *a* – projection method; *b* – in the CST Studio package

Значения резонансных частот на модах E_{mnp} для нерегулярного резонатора и регулярных резонаторов при радиусе 1,0–1,2 мм и длине 3,14 мм, полученные проекционным методом и при использовании пакета CST Studio, приведены в табл. 4.

Таблица 4. Значения резонансных частот на модах E_{mnp}
Table 4. Resonance frequency values for E_{mnp} modes

Номер моды	E_{mnp}	f_{Emnp}, ГГц	$f_{\text{пр.мет}}$, ГГц
1	E_{010}	95,62–114,74	112,1
2	E_{011}	106,90–124,30	121,8
3	E_{012}	135,10–149,30	147,1
4	E_{110}	152,40–182,80	178,4
5	E_{013}	172,20–183,50	181,7
6	E_{111}	159,66–188,95	184,6

Заключение

Показаны два способа решения электродинамических задач в резонаторе с азимутально-продольно нерегулярным сечением. На основании полученных результатов можно утверждать, что новый метод достаточно надежен и удобен для создания сложных резонаторов и волноводов в различных вакуумных приборах. Проведенные исследования основаны на методах [1, 2, 5–8] при верификации с электродинамическим решением в аттестованном международном пакете CST Studio Suite [3, 4, 9, 10].

Список литературы

1. Кураев, А. А. Уравнения возбуждения продольно-азимутально нерегулярных волноводов с учетом конечной проводимости стенок / А. А. Кураев, В. В. Матвеенко // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 1. С. 13–21. http:// dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-13-21.
2. Кураев, А. А. Клинотрон на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами – горатрон / А. А. Кураев, В. В. Матвеенко // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 2. С. 100–106. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-100-106.
3. CST Studio Suite [Electronic Resource] / 3D Modeling, Simulation, Social & Collaborative, and Information Intelligence Applications that Enable One to Create Virtual Twins to Visualize, Model and Simulate the Entire Environment of Sophisticated Experiences. Mode of access: https://eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml. Date of access: 25.06.2025.
4. SolidWorks [Electronic Resource] / Explore Trusted 3D CAD, 2D CAD, ECAD, and Product Development Solutions Used by Leading Innovators to Design, Refine, and Deliver High-Performance Products that Meet Evolving Market Demands. Mode of access: https://www.solidworks.com/product/all-products. Date of access: 25.06.2025.
5. Матвеенко, В. В. Моделирование электродинамических процессов СВЧ-сушки материалов с использованием пакета MATLAB / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 21–22 дек. 2022 г. Минск: Белор. гос. аграр. технич. ун–т, 2023.
6. Матвеенко, В. В. Оптимизация электродинамических процессов СВЧ-сушки материалов / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Актуальные проблемы устойчивого развития сельских территорий и кадрового обеспечения АПК: матер. Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 7–8 июня 2023 г. С. 570–574.
7. Матвеенко, В. В. Оптимизация конструктивных параметров СВЧ-камер для сушки материалов в сельском хозяйстве / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Агропромышленный комплекс в условиях инновационного развития: наука, технологии, кадровое обеспечение: матер. II Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 5–6 июня 2025 г. С. 363–366.
8. Матвеенко, В. В. Математическое моделирование электродинамических процессов СВЧ-сушки материалов / В. В. Матвеенко, И. П. Матвеенко // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса: матер. Респ. науч.-практ. конф. «Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО–2025». С. 140–142.
9. A New Superconducting Linac for the Nuclotron–Nica Facility: Progress Report / A. A. Bakinovskayae [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. Vol. 15, No 7. P. 831–834.
10. Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron-Nica / A. V. Butenko [et al.] // IPAC 2017 – Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference. P. 3282–3285.

Поступила 30.06.2025

Принята в печать 29.07.2025

References

1. Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2024) Excitation Equations for Longitudinally-Azimutally Irregular Waveguides Taking into Account the Finite of the Walls Conductivity. *Doklady BGUIR.* 22 (1), 13–21. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-1-13-21 (in Russian).
2. Kurayev A. A., Matveyenka V. V. (2021) Klynotron with Using the Open Resonator And Symmetric Conical Corrugated Mirrors – Goratron. *Doklady BGUIR.* 19 (2), 100–106. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-2-100-106 (in Russian).
3. *CST Studio Suite. 3D Modeling, Simulation, Social & Collaborative, and Information Intelligence Applications that Enable One to Create Virtual Twins to Visualize, Model and Simulate the Entire Environment of Sophisticated Experiences*. Available: https://eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml (Accessed 25 June 2024).
4. *SolidWorks. Explore Trusted 3D CAD, 2D CAD, ECAD, and Product Development Solutions Used by Leading Innovators to Design, Refine, and Deliver High-Performance Products that Meet Evolving Market Demands.* Available: https://www.solidworks.com/product/all-products (Accessed 25 June 2024).
5. Matveenka V. V., Matveenka I. P. (2023) Modeling of Electrodynamic Processes of Microwave Drying of Materials Using the MATLAB Package. *Energy Saving – the Most Important Condition for Innovative Development of the AIC, Collection of Scientific Articles of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 21–22.* Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University (in Russian).
6. Matveenka V. V., Matveenka I. P. (2023) Optimization of Electrodynamic Processes of Microwave Drying of Materials. *Actual Problems of Sustainable Development of Rural Areas and Personnel Provision in the Agro-Industrial Complex, Proceedings of the Scientific and Practical Conference, Minsk, June 7–8*. 570–574 (in Russian).

7. Matveenka V. V., Matveenka I. P. (2025) Optimization of Design Parameters of Microwave Chambers for Drying Materials in Agriculture. *Agro-Industrial Complex in the Context of Innovative Development: Science, Technology, Personnel Provision, Materials of the II International Scientific and Practical Conference, Minsk, June 5–6.* 363–366 (in Russian).
8. Matveenka V. V., Matveenka I. P. (2025) Mathematical Modeling of Electrodynamic Processes of Microwave Drying of Materials. *Agrarian Education and Science for the Agro-Industrial Complex: Materials of the Republican Scientific and Practical Conference "Belarusian Agro-Industrial Week BELAGRO-2025"*. 140–142 (in Russian).
9. Bakinovskaya A. A., Batouritski M. A., Bakhareva T. A., Butenko A. V., Gusarova M. A., Demyanov S. E., et al. (2018) A New Superconducting Linac for the Nuclotron–Nica Facility: Progress Report. *Physics of Particles and Nuclei Letters*. 15 (7), 831–834.
10. Butenko A. V., Emelianov N. E., Sidorin A. O., Syresin E. M., Trubnikov G. V., Gusarova M. A., et al. (2017) Status of r&d on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron-Nica. *IPAC 2017 - Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference*. 3282–3285.

Received: 30 June 2025

Accepted: 29 July 2025

Вклад авторов

Матвеенко В. В. определил общую концепцию работы и основные задачи.
Матвеенко И. П. определила способ генерации и осуществила реализацию генерации мод.

Authors' contribution

Matveyenka V. V. defined the general concept of the work and the main tasks.
Matveyenka I. P. defined the generation method and implemented the generation of modes.

Сведения об авторах

Матвеенко В. В., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Матвеенко И. П., канд. техн. наук, доц., доц. каф. автоматизированных систем управления производством, Белорусский государственный аграрный технический университет

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 25 952-69-91
E-mail: vladzimir66@bsuir.by
Матвеенко Владимир Владимирович

Information about the authors

Matveyenka V. V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Associate Professor at the Computational Methods and Programming Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Matveyenka I. P., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automated Production Control Systems, Belarusian State Agrarian Technical University

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 25 952-69-91
E-mail: vladzimir66@bsuir.by
Matveyenka Vladimir Vladimirovich