

Верификация методов расчета типов колебаний в резонаторе

В. В. Матвееенко

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Беларусь, e-mail: vladimir66@bsuir.by

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. В работе исследуются резонаторы сложной формы, которые позволяют получить улучшенные электродинамические характеристики взаимодействия с электронным потоком. Приведён расчет мод H_{mnp} и E_{mnp} в резонаторе с азимутально-продольно нерегулярным сечением. Полученные решения основаны на методах [1, 2] при верификации с электродинамическим решением в аттестованном международном пакете CST Studio Suite [3].

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

Verifying methods for calculating oscillation types in a cavity

V. V. Matveyenka

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus,
e-mail: vladimir66@bsuir.by

Modern application of vacuum microwave cavities goes through many areas of science, technology and industry. These devices, due to their ability effectively to generate, amplify and filter microwave signals, find application in many scientific fields. This paper presented complex-shaped cavities that allow us to obtain improved electrodynamic characteristics of interaction with an electron flow. Solutions of calculating H_{mnp} and E_{mnp} modes inside cavities with an azimuthally-longitudinally irregular cross-section are obtained based on the methods [1, 2] under verification with an electrodynamic solution in the certified international CST Studio Suite package [3].

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

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. В настоящее время многие 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 задачу 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, и отбора на основе компьютерного моделирования эффективных по КПД схем и получение рекомендаций по их возможностям.

1. Расчет полей и резонансных частот для цилиндрического резонатора при диаметре и длине резонатора 1 см

Для расчета и сравнения альтернативных методов использовался один и тот же образец цилиндров в формате STL (STereoLithography), созданный сторонней программой SolidWorks 2024, который используется для экспорта и импорта 3D-моделей в виде полигональных сеток, что необходимо для обмена данными с другими программами или 3D-печати.

а) На модах H_{mnp} .

Расчет проводился для первых пятидесяти мод резонансной частоты тремя различными способами: аналитически, в среде CST Studio Suite 2025 [3] и проекционным методом, рассмотренном в [1, 2], результаты собственных значений приведены в табл. 1 и собственных векторов на рис. 1.

Собственные значения частоты цилиндрического резонатора для H_{mnp} -моды аналитически определяются как:

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

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

Таблица 1

Собственные значения для H_{mnp} -мод на интервале частоты от 0 до 50 ГГц

Mode	H_{mnp}	$f_{H_{mnp}}$ (1)	f_{CST}	$f_{пр. мет.}$
1	H_{001}	14,99	14,99	14,99
2	H_{111}	23,1	23,11	23,11
3	H_{002}	29,98	29,98	29,98
4	H_{211}	32,77	32,8	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}	42,8	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	48,3

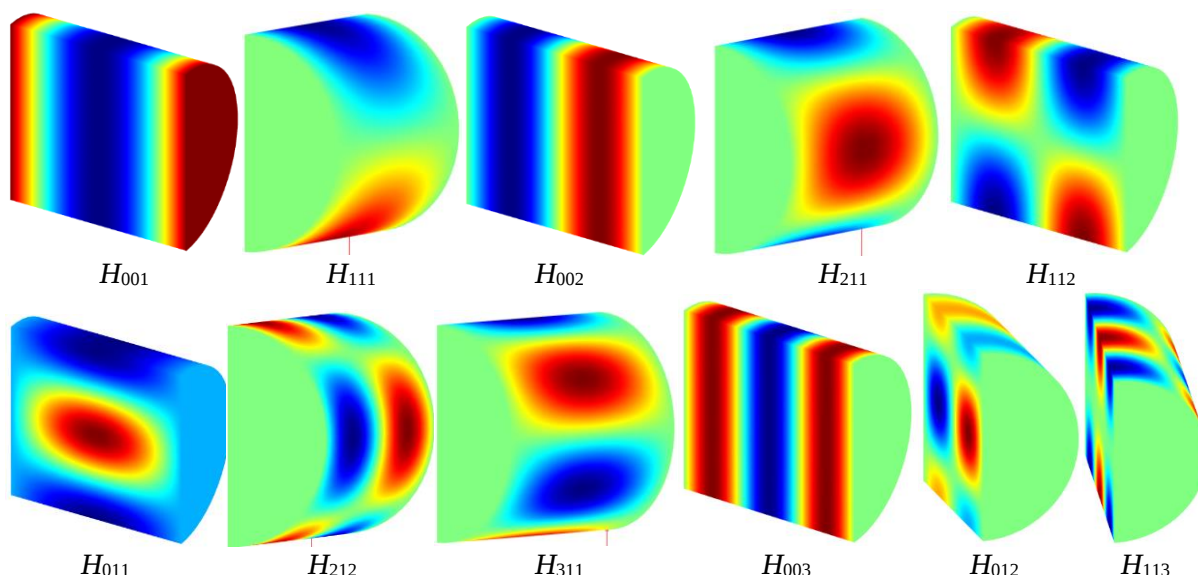


Рис. 1. Распределение силовых линий электромагнитного поля колебаний H_{mnp}

б) На модах E_{mnp} .

Вычисления проводились для первых пятидесяти мод резонансной частоты тремя различными способами: аналитически, в среде CST Studio Suite 2025 и проекционным методом, рассмотренном в [1, 2], результаты собственных значений приведены в табл. 2. Собственные значения частоты цилиндрического резонатора для E_{mnp} -моды аналитически определяются как:

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

Здесь a – радиус трубки резонатора, l – расстояние между торцевыми стенками, ν_{mn} – корни уравнений $J_{mn}(\nu_{mn}) = 0$ функции Бесселя 1 рода m -го и n -го порядков.

Таблица 2
Собственные значения для E_{mnp} -мод на интервале частоты от 0 до 50 ГГц

Mode	E_{mnp}	$f_{E_{mnp}}(2)$	f_{CST}	$f_{\text{пр. мет.}}$
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 для колебаний H_{mnp} и E_{mnp} между аналитическими формулами (1), (2), CST Studio Suite и проекционным методом [1, 2] совпадают.

Также были исследованы резонансные частоты E_{mnp} -мод, полученные в среде CST Studio Suite на том же интервале частот, затем аналитическим способом и

проекционным методом [1–6]. Результаты приведены в табл. 2. На рис. 2 представлены пучности электромагнитного поля для каждой моды E_{mnp} цилиндрического резонатора в заданном диапазоне частоты.

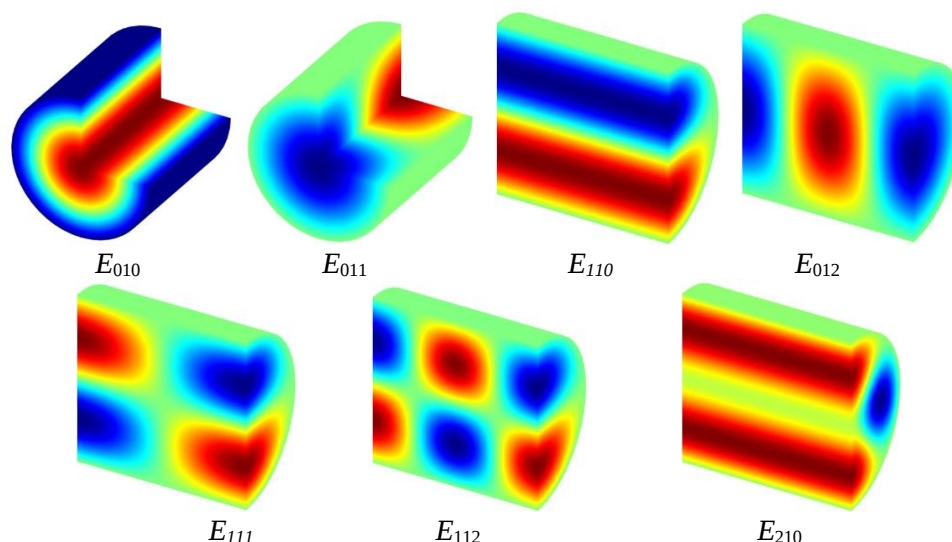


Рис. 2. Распределение силовых линий электромагнитного поля колебаний E_{mnp}

2. Расчет полей и резонансных частот для азимутально-продольно нерегулярного резонатора при радиусе 1–1,2 мм и длине 3,14 мм

Полученные результаты для колебаний H_{mnp} и E_{mnp} резонатора сложной формы представлены собственными векторами на рис. 3, а также табл. 3 и табл. 4, где аналитические формулы цилиндрических резонаторов (1), (2) указывают возможные границы решения для CST Studio Suite и проекционного метода.

Таблица 3

Собственные значения для H_{mnp} -мод на интервале частоты от 0 до 50 ГГц

Mode	H_{mnp}	$f_{H_{mnp}}$ (1) 1–1,2мм	$f_{пр. мет.}$
1	H_{001}	47,74	45,19
2	H_{002}	95,48	89,82
3	H_{111}	87,4–99,98	89,9
4	H_{112}	120,3–129,7	116,66
5	H_{211}	130,49–153,35	148,6
6	H_{011}	159,66–188,95	167,25

Таблица 4

Собственные значения для E_{mnp} -мод на интервале частоты от 0 до 50 ГГц

Mode	E_{mnp}	$f_{E_{mnp}}$ (1) 1–1,2мм	$f_{пр. мет.}$
1	E_{010}	95,62–114,74	112,1
2	E_{011}	106,9–124,3	121,8
3	E_{012}	135,1–149,3	147,1
4	E_{110}	152,4–182,8	178,4
5	E_{013}	172,2–183,5	181,7
6	E_{111}	159,66–188,95	184,6

Собственные вектора нерегулярного резонатора для колебаний H_{011} , E_{010} , E_{011} были получены проекционным методом [1, 2] на частотах 167,3; 112,1; 121,8 ГГц, а в CST Studio – на частоте 180,5; 105,5; 114,7 ГГц (рис. 3).

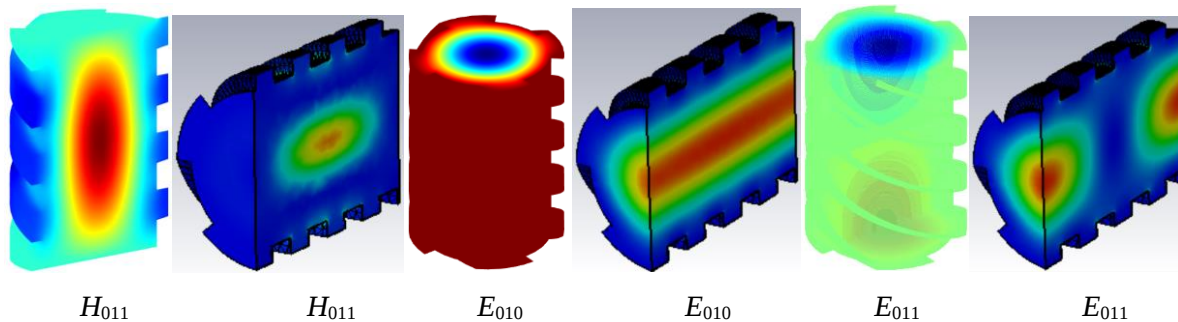


Рис. 3. Распределение силовых линий электромагнитного поля нерегулярного резонатора колебаний H_{001} -, E_{010} - и E_{011} -мод, полученных проекционным методом и при использовании пакета CST Studio соответственно

Заключение

Показаны два способа решения электродинамических задач в резонаторе. На основании этих результатов можно утверждать, что проекционный метод достаточно надежен и удобен для создания сложных резонаторов и волноводов в различных вакуумных приборах. Полученные решения основаны на методах [1, 2] при верификации с электродинамическим решением в аттестованном международном пакете CST Studio Suite [3–6].

Библиографические ссылки

1. Кравченко В. Ф. Уравнения возбуждения продольно-азимутально нерегулярных волноводов с учетом конечной проводимости стенок / В. Ф. Кравченко, А. А. Кураев, В. В. Матвеев // Физические основы приборостроения, 2024. Т. 13, № 3. С. 22–29.
2. Кураев А. А., Матвеев В. В. Клинонотрон на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами – горатрон // Доклады БГУИР, 2021. № 19. С. 100–106.
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, 2025 [Electronic resource]. URL: https://eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-STUDIO-SUITE.phtml. (date of access: 25.06.2025).
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, 2024 [Electronic resource]. URL: <https://www.solidworks.com/product/all-products> (date of access: 25.06.2025).
5. A New Superconducting Linac for The Nuclotron–NICA Facility: Progress Report / V. V. Matveyenka [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2018. V. 15, № 7. P. 831–834.
6. Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron–NICA / V. V. Matveyenka [et al.] // IPAC 2017 – Proceedings of the 8th International Particle Accelerator Conference. 8. 2017. P. 3282–3285.