

УДК 621.384.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РЕЗОНАТОРА, ВОЗМУЩЕННОГО ОБРАЗЦАМИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

© 2023 г. М. В. Лалаян^а, Ю. Ю. Лозеев^{а, *}, А. И. Макаров^а, С. М. Полозов^{а, **}

^аНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*e-mail: YYLozeev@mephi.ru

**e-mail: SMPolozov@mephi.ru

Поступила в редакцию 21.12.2022 г.

После доработки 11.02.2023 г.

Принята к публикации 11.02.2023 г.

При создании ускорителей ионов, работающих в импульсном режиме, в качестве материала высокочастотных резонаторов используют аустенитную нержавеющую сталь с медным гальваническим покрытием. Для резонаторов с элементами сложной формы нанесение медного покрытия является сложной технологической задачей, что порождает интерес изготовить стальной резонатор без медного покрытия. Однако, в таком случае важно аккуратно оценить рост высокочастотных потерь в структуре по сравнению с расчетными величинами, что неоднократно наблюдалось экспериментально. Для проведения такой оценки был собран макет на основе цилиндрического высокочастотного резонатора с двумя устройствами связи. На макете были исследованы электродинамические характеристики высокочастотного резонатора, в центр которого помещались исследуемые образцы стали. Полученные результаты показали значительное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями собственной добротности резонатора. В численных расчетах использовались стандартные параметры для стали марки 12X18H10T. Также для образцов были оценены значения относительной магнитной проницаемости μ , исходя из предположения о том, что магнитные свойства аустенитной стали на поверхности могли измениться при обработке.

Ключевые слова: ускоритель ионов, высокочастотный резонатор, ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, собственная добротность, магнитная проницаемость, аустенитная нержавеющая сталь, высокочастотные потери, медное гальваническое покрытие, анализатор цепей, коэффициент передачи.

DOI: 10.31857/S1028096023070087, **EDN:** TDRSGR

ВВЕДЕНИЕ

Основным материалом, используемым для изготовления нормально проводящих ускоряющих резонаторов, работающих при комнатной температуре, является бескислородная медь. Она обладает высокой тепло- и электропроводностью на высоких частотах, хорошо поддается механической обработке, пайке, сварке, неферромагнитна [1]. Для ускорителей электронов бескислородную медь используют повсеместно, так как для изготовления ускоряющего резонатора требуется несколько десятков килограммов материала. Для линейных ускорителей ионов резонаторы целиком состоящие из меди из-за высокой стоимости используют только для установок, работающих в режиме, близком к непрерывному. Для импульсных ускорителей, например для инжекторов в синхротроны, более дешевым решением является нержавеющая сталь с медным гальваническим

покрытием внутренних поверхностей. Однако для резонаторов с электродами сложной формы, например, для резонаторов с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой [2] (рис. 1), нанесение равномерного слоя меди на наконечники электродов является сложной технологической задачей, ни один из доступных методов нанесения покрытий (гальваника, напыление) не позволяет получать однородность слоя по толщине лучше 20–40 мкм, особенно на поверхностях сложной трехмерной формы. В связи с этим проверить, насколько вырастут потери высокочастотной мощности в резонаторе, если отказать от медного покрытия и оставить наконечники электродов стальными, является актуальной задачей. Необходимость такого анализа обусловлена, в частности, аномальным расхождением расчета собственной добротности резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, разработанного коллективом

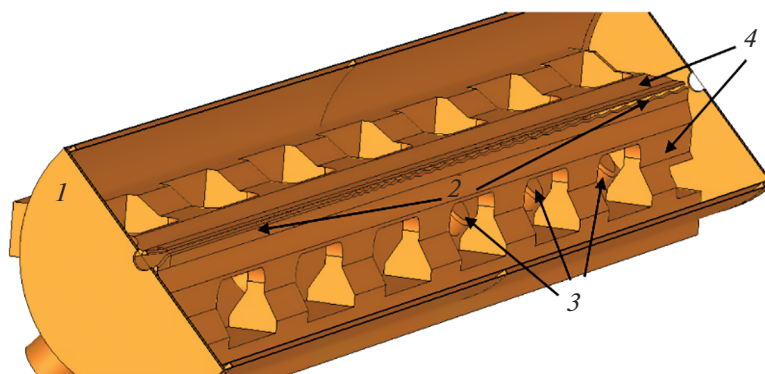


Рис. 1. Сечение модели четырехкамерного резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. Длина резонатора 5 м, радиус обечайки 33 см: 1 – обечайка резонатора, 2 – головки электродов, 3 – подстроечные плунжеры, 4 – ускоряющие электроды.

сотрудников НИЯУ МИФИ, Объединенного института ядерных исследований, Института теоретической и экспериментальной физики для реконструкции системы инжекции пучка в ускорительный комплекс NICA и изготовленного опытным производством Всероссийского научно-исследовательского института технической физики, с экспериментальными данными [3, 4]. Так как модуляция электродов в первой трети резонатора не превышала 3–30 мкм и при производстве не было гарантировано равномерное покрытие медью с необходимой точностью, четыре электрода в начале резонатора были оставлены без меднения. Измеренная добротность резонатора отличалась от расчетной на 48% и составила 5600 [5]. Электродинамический расчет модели резонатора с наконечниками из нержавеющей стали показал, что собственная добротность резонатора должна была уменьшиться менее, чем на 1%. При расчетах были использованы параметры аустенитной стали марки 12Х18Н10Т, которые указывает большинство производителей: удельное сопротивление $\rho = 0.725$ мкОм · м относительная магнитная проницаемость $\mu \approx 1$. Однако существующий опыт изготовления подобных резонаторов говорит о том, что измеренная добротность готового резонатора может отличаться от расчетной не более, чем на 20% [6–13]. Настолько неожиданное расхождение экспериментальных данных и численного расчета привело к идее собрать макет на основе цилиндрического резонатора и проследить за изменениями собственной добротности резонатора макета при помещении внутрь образцов нержавеющей стали и сравнить их с результатами численного моделирования характеристик макета.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

По определению собственная добротность резонатора – это отношение запасенной в резона-

торе энергии к мощности, рассеиваемой в нем за период времени. Тогда добротность можно представить как:

$$Q_0 = 2\mu\sqrt{\omega\mu_0\mu_{\text{ст}}\sigma_{\text{ст}}}\int_V |H_M|^2 dv / \sqrt{2\mu_{\text{ст}}}\int_S |H_t|^2 ds, \quad (1)$$

где Q_0 – собственная добротность резонатора, H_M – амплитуда напряженности магнитного поля, H_t – тангенциальная компонента напряженности магнитного поля, ω_0 – резонансная циклическая частота, μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_{\text{ст}}$ – магнитная проницаемость материала стенок резонатора, $\sigma_{\text{ст}}$ – удельная проводимость материала стенок резонатора, V – внутренний объем резонатора, S – площадь внутренней поверхности резонатора.

В формулу вычисления добротности входят два параметра материала внутренней поверхности резонатора – проводимость и относительная магнитная проницаемость. Отклонения этих двух параметров от расчетных значений и отвечают за потенциальное уменьшение добротности готового резонатора.

Большой интерес представляет изменение магнитной проницаемости материала стенок, особенно их поверхностного слоя: существуют экспериментальные исследования изменения магнитной проницаемости хромоникелевых нержавеющей сталей, подвергнутых холодной обработке [14–16], связанного с мартенситным превращением в аустенитных сталях [17–20]. Так, например, в работе [14] показано, что после пластического растяжения удельная магнитная восприимчивость стали марки 08Х18Н10 меняется на 26%. В работе [15] показано, что в процессе деформации при некоторых скоростях растяжения относительная магнитная проницаемость стали марки SUS304 достигала значения 2.8. Для рассматриваемой задачи необходимо дополнительно учитывать, что

при частотах 80–300 МГц, используемых в высокочастотных резонаторах ускорителей ионов, толщина скин-слоя на превышает нескольких мкм и влияние деформации поверхности электрода и магнитной проницаемости слоя металла, подвергнутого обработке, может оказывать более сильное влияние на электродинамические характеристики резонатора, чем при постоянном токе или при низких частотах.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерения собственной добротности использована схема с резонатором с двумя устройствами связи [1] (рис. 2). Собственная добротность резонатора в таком случае можно определить следующим образом:

$$Q_0 = (\omega_0 / 2\Delta\omega)(1 + \chi_1 + \chi_2), \quad (2)$$

где $\Delta\omega$ – расстройка частоты, χ_1 и χ_2 – коэффициенты связи с резонатором.

Все необходимые для расчета добротности величины определяются из зависимости коэффициента передачи мощности K_{Π} от частоты. Кривые $K_{\Pi}(\omega)$ снимали при подключении портов векторного анализатора цепей к обоим устройствам связи резонатора. Проведено пять измерений: пустого резонатора и с каждым из четырех тестовых образцов. В качестве образцов использовали небольшие цилиндры из нержавеющей стали, обточенные по боковой поверхности на глубину 0.5 мм на токарном станке. Дополнительная обработка необходима для приближения свойств образцов к головкам электродов резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, изготавливаемых фрезерованием и точением. Для образцов были рассчитаны площади поверхности каждого из брусков: 3466, 3310, 3320 и 3000 мм² (образцы 1–4 соответственно).

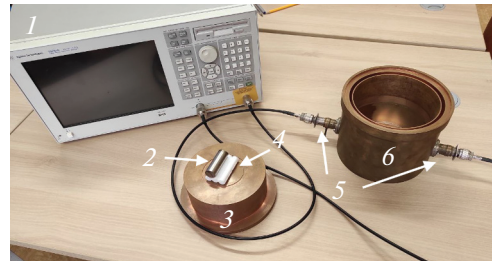


Рис. 2. Экспериментальный макет: 1 – векторный анализатор цепей Agilent; 2 – образец стали; 3 – основание резонатора; 4 – фторопластовая подложка; 5 – вводы мощности; 6 – крышка резонатора.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В центр эталонного цилиндрического резонатора, порты которого подключены к анализатору цепей (Agilent 8753ET), помещали фторопластовую подложку, на которой размещали образцы. Положение стального образца вблизи оси резонатора позволяло возбудить в нем основной вид колебаний E_{010} на частоте, близкой к 1.5 ГГц. Первое измерение проведено для пустого резонатора без образцов и фторопластовой подставки для определения собственной добротности макета. По снятой зависимости K_{Π} от частоты в диапазоне от 1400 до 1700 МГц была определена резонансная частота f_0 , а также измерены коэффициенты связи петель ввода мощности с резонатором. Далее с помощью формулы (2) была определена собственная добротность резонатора Q_0 .

Далее измерения повторяли для каждого из четырех образцов. После этого было проведено численное моделирование добротности пустого резонатора и с каждым из образцов 1–4 с учетом индивидуальной геометрии брусков. Результаты измерений и расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение электродинамических характеристик макета, полученных экспериментально и численно, без образцов (0) и с каждым из образцов 1–4: коэффициент передачи мощности K_{Π} ; резонансная частота f_0 ; добротность резонатора Q_0 ; степень различия результатов

№ образца	K_{Π}	Численное моделирование		Экспериментальное исследование		$\Delta Q, \%$	$\Delta f, \%$
		$f_0, \text{ ГГц}$	Q_0	$f_0, \text{ ГГц}$	Q_0		
0	1.0	1.6290	11 231	1.6273	11 059	3.0	0.1
1	2.1	1.4995	8591	1.5054	7584	13.3	0.4
2	2.2	1.5010	8809	1.5068	8072	9.1	0.4
3	2.3	1.5090	8914	1.5138	8155	9.3	0.3
4	2.4	1.5168	9224	1.5241	8595	7.3	0.5

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Как видно из табл. 1, значение собственной добротности пустого резонатора оказалось меньше расчетного на $\Delta Q_0 = 3.0\%$, в то время как для измерений с образцами разница от 7 до 13%. Значения измеренной резонансной частоты также отличаются от расчетных и можно предположить, что это может давать свой вклад в изменение значения добротности, которая обратно пропорциональна квадратному корню из частоты f_0 [1]. Однако разница расчетных и измеренных значений частоты Δf_0 не превышает десятых долей процента и влиянием такой зависимости можно пренебречь.

Для образца 1, с наибольшей площадью поверхности, разница значения измеренной добротности в сравнении с расчетной оказалась наибольшей; у образца 4, с наименьшей площадью — наименьшей. У образцов 2 и 3 с близкими значениями площади поверхности значения ΔQ_0 также близки. Это позволяет сделать вывод, что с увеличением площади поверхности образца растет и отклонение в расчетах добротности.

Из предположения, что разница в ΔQ_0 была вызвана изменением μ , была проведена серия расчетов резонатора макета с варьированием μ образцов. Разницу ΔQ_0 между экспериментальными значениями добротности и расчетными значениями добротности удалось компенсировать, если при расчетах использовать значения μ от 2.0 до 2.5. Данные значения магнитной проницаемости существенно выше, чем в работе [6], но близки к результатам, полученным в работе [15]. Однако такое сильное изменение величины μ в [15] объясняется тем, что измерение μ происходило одновременно с деформацией стали. В нашем же случае, выбранный метод измерения с помощью ВЧ-полей обладает большей чувствительностью к свойствам поверхности магнитных образцов, чем к их объемным свойствам. Тогда предположение о том, что магнитные свойства стали могли сильнее измениться на поверхности, хорошо согласуется с полученными значениями μ , что и привело к снижению добротности резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой [5] почти в два раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксперимента показали, что при моделировании электродинамических характеристик ВЧ-резонатора с образцами аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали марки 12X18H10T изменение магнитной проницаемости поверхности образца, появившееся в ходе его механической обработки, вносит значительное искажение (порядка 10%) в расчет собственной

добротности. Это вызвано различием μ на поверхности металла и по его объему, что в свою очередь приводит к более существенному падению собственной добротности на высоких частотах по сравнению с постоянным током. Значения μ , которые необходимо использовать при расчетах, также были оценены в ходе проведения исследований. Полученные результаты позволили объяснить существенное расхождение расчетной и измеренной величин собственной добротности резонатора с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой, разработанного для системы инжекции коллайдера NICA ОИЯИ. Также полученные данные позволят в дальнейшем более точно прогнозировать рабочие характеристики резонаторов и точнее оценивать требуемую для их питания ВЧ-мощность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках договора № 075-15-2021-1358 от 12.10.2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Собенин Н.П., Милованов О.С.* Техника сверхвысоких частот. М.: Энергоатомиздат, 2007. 545 с.
2. А. с. 265312 (СССР). Линейный ускоритель ионов / ОИПТЗ. Владимирский В.В., Капчинский И.М., Тепляков В.А. // Б.И. 1970. № 10. С. 75.
3. *Koshelev V. et al.* // Proc. of LINAC2016, East Lansing, MI, USA, 2016. P. 575.
4. *Butenko A.V., Bazanov A.M., Donets D.E. et al.* Commissioning of New Light Ion RFQ Linac and First Nuclotron Run with New Injector // Proc. of RuPAC2016. St. Petersburg, Russia, 2016. P. 153. <https://www.doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-FRCAMH02>
5. *Kuzmichev V.G., Kozlov A.V., Kulevoypresenter T. et al.* The RF Power System for RFQ-injector of Linac-20 // Proc. of RuPAC2016. St. Petersburg. 2016. P. 297. <https://www.doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2016-TUPSA038>
6. *Hasegawa K., Mizumoto M., Ito N. et al.* // J. Nucl. Sci. Technol. 1997. V. 34. № 7. P. 622. <https://www.doi.org/10.1080/18811248.1997.9733720>
7. *Lu L., Ma W., Zhai Y.H. et al.* High Power Test of the LEAF-RFQ // Proc. of LINAC2018. Beijing, 2018. P. 808. <https://www.doi.org/10.18429/JACoW-LINAC2018-THPO052>
8. *Belyaev O.K., Ershov O.V., Maltsev I.G. et al.* IHEP Experience on Creation and Operation of RFQS // Proc. of LINAC2000. Monterey, 2000. P. 1. <https://www.doi.org/10.48550/arXiv.physics/0008020>
9. *Bartz U., Schempp A.* A CW RFQ prototype. // Proc. of IPAC2011. San Sebastian. Spain, 2011. P. 2559.

10. *Morishita T., Kondo Y., Hasegawa K. et al.* Vane Machining by the Ball-end-Mill for the New RFQ in the J-Parc LINAC // Proc. of LINAC2010. Tsukuba, Japan, 2010. P. 521.
11. *Ostroumov P.N., Barcikowski A., Clift B. et al.* High Power Test of a 57-MHz CW RFQ // Proc. of LINAC2006. Knoxville, Tennessee USA, 2006. P. 767.
12. *Koubek B., Grudiev A., Timmins M.* // Phys. Rev. Accelerators Beams. 2017. V. 20. № 8. P. 1. <https://www.doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.080102>
13. *Zhao B., Chen Sh., Zhu T. et al.* // Nucl. Engineer. Technol. 2019. V. 51. № 2. P. 556. <https://www.doi.org/10.1016/j.net.2018.10.003>
14. *Снежной Г.В., Мищенко В.Г., Снежной В.Л.* // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2014. № 2. С. 9.
15. *Cao B., Iwamoto T., Bhattacharjee P.P.* // Mater. Sci. Engineer. A. 2020. V. 774 P. 11. <https://www.doi.org/10.1016/j.msea.2020.138927>
16. *Mumtaz K. et al.* // J. Mater. Sci. 2004. V. 39 P. 85. <https://www.doi.org/10.1023/B:JMSC.0000007731.38154.e1>
17. *Manjanna J. et al.* // J. Mater. Sci. 2008. V. 43. P. 2659. <https://www.doi.org/10.1007/s10853-008-2494-4>
18. *Lebedev A.A., Kosarchuk V.V.* // Int. J. Plasticity. 2000. V. 16. № 7–8. P. 749. [https://www.doi.org/10.1016/S0749-6419\(99\)00085-6](https://www.doi.org/10.1016/S0749-6419(99)00085-6)
19. *Rocha M., Oliveira C.* // Mater. Sci. Engineer. A. 2009. V. 517. № 1–2. P. 281. <https://www.doi.org/10.1016/j.msea.2009.04.004>
20. *Das A., Tarafder S.* // Int. J. Plasticity. 2009. V. 25. № 11. P. 2222. <https://www.doi.org/10.1016/j.ijplas.2009.03.003>

Measurements of Electrodynamics Parameters of a Cylindrical RF-Cavity with Stainless Steel Samples

M. V. Lalayan¹, Yu. Yu. Lozev^{1, *}, A. I. Makarov¹, S. M. Polozov^{1, **}

¹National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, 115409 Russia

*e-mail: YYLozev@mephi.ru

**e-mail: SMPolozov@mephi.ru

Stainless steel with galvanic copper coating is often used as a material for ion linear accelerators RF cavities. However, for the cavities with complex inner surfaces obtaining a uniform copper coating becomes technologically challenging. The solution might be found in manufacturing the cavity without copper coating at all, though in that case the amount of power losses in the cavity should be carefully estimated. To make such estimations the experiment was carried out, where the electrodynamic properties of a test cavity with two coupling loops were measured with the stainless steel samples placed inside it. The results of this experiment showed sufficient difference between the simulated and measured Q-factor values for the same 12X18H10T sample steel grade. Thus, an assumption was made the magnetic properties of austenitic steel samples could have changed during the manufacturing process, so the magnetic permeability values for the steel samples were estimated.

Keywords: Ion accelerator, RF-cavity, radio-frequency quadrupole, Q-factor, magnetic permeability, austenitic stainless steel, RF-losses, copper galvanic plating, network analyzer, power gain.