

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМФАКТОРОВ ВОЗМУЩАЮЩИХ ТЕЛ, ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЖИМАХ БЕГУЩЕЙ И СТОЯЧЕЙ ВОЛН

М.В. Лалаян, А.Ю. Смирнов, Н.П. Собенин

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

E-mail: sobenin@mail.ru

Приведено сравнение формфакторов возмущающих тел различных размеров по результатам измерений как изменения резонансной частоты, так и модуля коэффициента отражения. Тела, изготовленные из керамики и имеющие форму цилиндров, помещались в цилиндрический резонатор с возбужденными в нем колебаниями вида E_{010} . Изменение собственной частоты резонатора в результате возмущения, а также изменение коэффициента отражения измерялись с помощью векторного анализатора цепей.

1. ВВЕДЕНИЕ

Известные методики измерений ВЧ-полей в структурах со стоячей и бегущей волнами основаны на теореме малых возмущений [1]. В качестве измеряемой величины может служить как резонансная частота (резонансные измерения), так и коэффициент отражения (нерезонансные). Связь между измеренными величинами и амплитудой электрического ВЧ-поля следующая:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_p - f_0}{f_0} = -k_{Af} |E|^2 / U, \quad (1)$$

$$\Delta S_{11} = S_{11,p}(f) - S_{11,u}(f) = -j2\pi f \cdot k_{AS11} E^2 / P_{in} \quad (2)$$

для резонансных и нерезонансных измерений соответственно. В этих формулах f_0 (f_p) – невозмущенная (возмущенная) резонансная частота ячейки; $|E|$ – модуль поля в месте расположения возмущающего тела; U – энергия, запасенная в электромагнитном поле; P_{in} – мощность, поступающая в структуру; k_{Af} и k_{AS11} – калибровочные константы (далее – формфакторы возмущающих тел).

Ниже будет описано сравнение формфакторов различных тел, измеренных в эталонном резонаторе различными методами, с результатами численного моделирования.

2. КАЛИБРОВКА ТЕЛ

Экспериментальная установка с сетевым векторным анализатором Agilent 8753 ET и калибровочным резонатором показана на Рис.1. На Рис.2 представлены исследуемые тела, выполненные из специальной керамики ($\epsilon \approx 8$) в форме цилиндров с осевым отверстием для крепления их на тонкой леске. Эти тела помещали внутри резонатора на его оси, измеряя сдвиг резонансной частоты и изменение коэффициента отражения.

Затем рассчитывали формфакторы тел для обоих методов по следующим формулам [2]:

$$k_{Af} = \frac{|\Delta f|}{f_0 \frac{|E|^2}{U}} \quad (3)$$

(резонансный метод) и

$$k_{AS11} = \frac{|\Delta S_{11}|}{(1 - |\dot{S}_{11,u}|^2) Q_{0,u} |E|^2 / U} \quad (4)$$

(нерезонансный метод),

где $Q_{0,u}$ – собственная добротность резонатора, $f_0 = 2856$ МГц. Для эталонного резонатора, имеющего размеры: диаметр $2R = 80,0$ мм, длина $L = 103,7$ мм, и, возбужденного на волне E_{010} , отношение

$$\frac{|E|^2}{U} = \frac{2}{\epsilon_0 \pi R^2 L J_1^2(\nu_{01})} \quad (5)$$

и составляет $6,205 \cdot 10^{-16}$ Ом/м²·с.



Рис.1. Экспериментальная установка



Рис.2. Возмущающие керамические тела

На Рис.3 показаны подробности моделирования калибровочного резонатора и возмущающих тел.

В результате численного моделирования мы получали также изменение резонансной частоты и изменение коэффициента отражения.

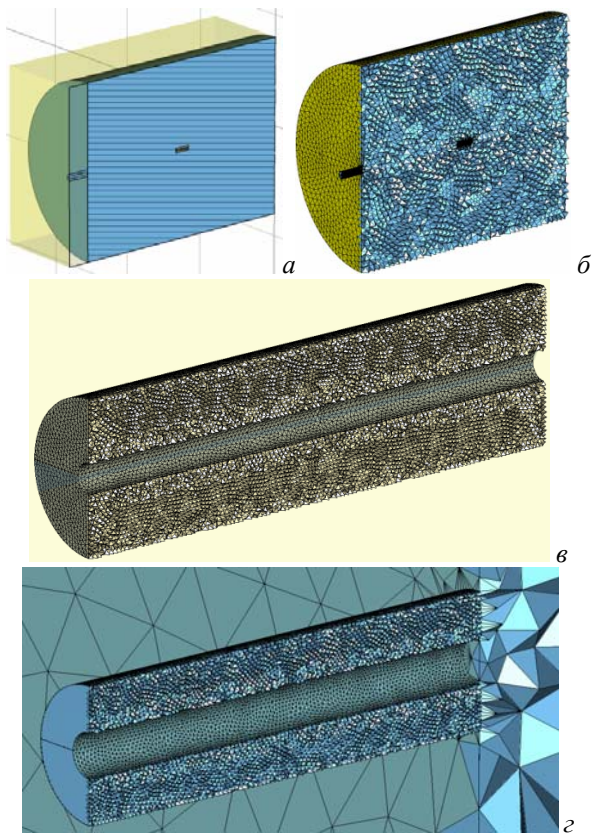


Рис.3. Модели: эталонный резонатор с возмущающим телом (а); их сеточные разбиения (б); локальное сеточное разбиение возмущающего тела (в); локальное сеточное разбиение возбуждающей антенны (г)

Экспериментальные и расчетные данные сведены в Табл.1. По ним построены графики зависимостей величины $k_{\Delta S11}/k_{\Delta f}$ от относительной частотной расстройки δ (Рис.4).

В работе [2] показано, что формфакторы, измеренные этими способами, связаны между собой соотношением:

$$k_{\Delta S11} = \frac{k_{\Delta f}}{\sqrt{1 + (Q\delta)^2}}, \quad (6)$$

из которого следует, что $k_{\Delta f} \rightarrow k_{\Delta S11}$ при $\delta \approx \Delta f/f_0$, $\Delta f/f_0 \rightarrow 0$.

Таблица 1

Ø, мм	L, мм	Δf, МГц	k _{Δf} , м ² ·с/Ом	k _{ΔS11} , м ² ·с/Ом	k _{ΔS11} /k _{Δf}
2	1	-0,0891	1,93·10 ⁻²⁰	0,0864·10 ⁻²⁰	0,448
2	2	-0,229	4,95·10 ⁻²⁰	0,1170·10 ⁻²⁰	0,236
2	3	-0,3951	8,55·10 ⁻²⁰	0,1215·10 ⁻²⁰	0,142
2	4	-0,5772	1,25·10 ⁻¹⁹	0,1227·10 ⁻²⁰	0,098
2	5	-0,7704	1,67·10 ⁻¹⁹	0,1231·10 ⁻²⁰	0,073
2	6	-0,9848	2,13·10 ⁻¹⁹	0,1232·10 ⁻²⁰	0,057
2	7	-1,1923	2,58·10 ⁻¹⁹	0,1233·10 ⁻²⁰	0,047
2	8	-1,4035	3,04·10 ⁻¹⁹	0,1234·10 ⁻²⁰	0,040
2	9	-1,6182	3,50·10 ⁻¹⁹	0,1235·10 ⁻²⁰	0,035
2	10	-1,835	3,97·10 ⁻¹⁹	0,1236·10 ⁻²⁰	0,031

Из этих графиков видно, что экспериментальные значения хорошо согласуются с расчетными, а характеры полученных графиков зависимостей подтверждают соотношение (6).

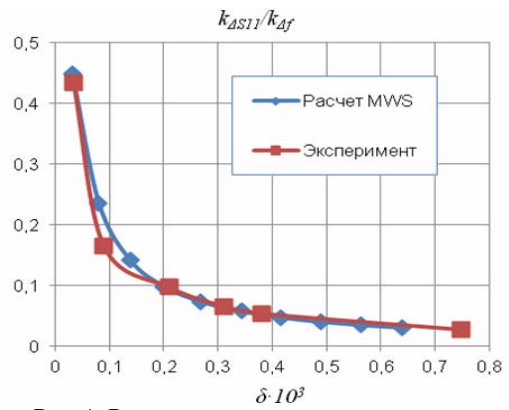


Рис.4. Расчетная и экспериментальная зависимости $k_{\Delta S11}/k_{\Delta f}$ от δ

3. ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМФАКТОРОВ

Если частота калибровочного резонатора не совпадает с частотой структуры, в которой измеряется ВЧ-поле, то необходимо также знать частотную зависимость формфакторов. Для этого смоделировали малое возмущающее металлическое тело (куб с ребром 1 мм), помещенное в центры призматических резонаторов, возбужденных на виде колебаний H_{101} на частотах 1000, 2000, 2854, 3000, 3500, 3900, 5000, 5712 МГц. Размеры резонаторов $a-h-a$, где ширина a зависит от частоты: $a = c/f_0\sqrt{2}$, $h = 20$ мм. На Рис.5 представлен смоделированный резонатор с возмущающим телом внутри и линиями электрического поля на виде колебаний H_{101} .

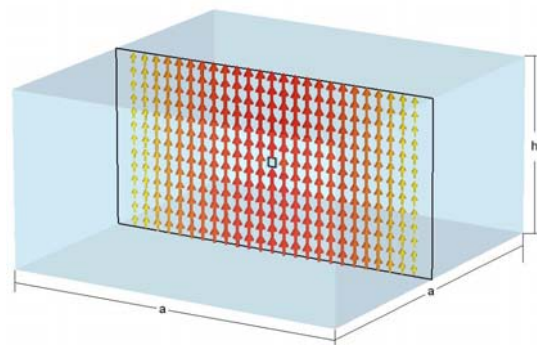


Рис.5. Призматический резонатор с возмущающим металлическим телом

Рассчитывали возмущенную и невозмущенную частоты, затем по формуле (3) вычисляли значение формфактора. Величину $|E|^2/U$ можно найти, исходя из следующих соображений. У вида колебаний H_{101} присутствует единственная составляющая электрического поля (назовем ее E_y), равная [3]:

$$E_x = E_z = 0, E_y = C \frac{\omega\mu\mu_0 \pi}{k_{kp}^2 a},$$

$$\begin{aligned} \frac{|E|^2}{U} &= \frac{\left| C \frac{\omega\mu\mu_0 \pi}{k_{kp}^2 a} \right|^2}{\frac{\epsilon_0}{2} \int_V \left(C \frac{\omega\mu\mu_0 \pi}{k_{kp}^2 a} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{\pi}{a}z\right) \right)^2 dV} = \\ &= \frac{1}{\frac{\epsilon_0}{2} h \left(\frac{a}{2}\right)^2} = \frac{8}{\epsilon_0 a^2 h}. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученные данные сведены в Табл.2. По ним построен график частотной зависимости формфактора рассматриваемого тела, показанный на Рис.6.

Таблица 2

f_0 , МГц	a , м	f_p , МГц	f_0 , МГц	Δf , МГц	$\Delta f/f_0$	$k_{\Delta f}$, 10^{-20} м ² ·с/Ом
1000	0,212	999,916	999,932	0,016	$1,614 \cdot 10^{-5}$	6,426
2000	0,106	1999,75	1999,85	0,092	$4,614 \cdot 10^{-5}$	4,593
2854	0,074	2855,53	2855,78	0,252	$8,817 \cdot 10^{-5}$	4,303
3000	0,071	2999,48	2999,77	0,288	$9,581 \cdot 10^{-5}$	4,238
3500	0,061	3499,30	3499,72	0,420	$1,120 \cdot 10^{-4}$	3,900
3900	0,054	3899,12	3899,69	0,570	$1,461 \cdot 10^{-4}$	3,824
5000	0,042	4998,44	4999,60	1,157	$2,313 \cdot 10^{-4}$	3,684
5712	0,037	5709,86	5711,54	1,685	$2,950 \cdot 10^{-4}$	3,599

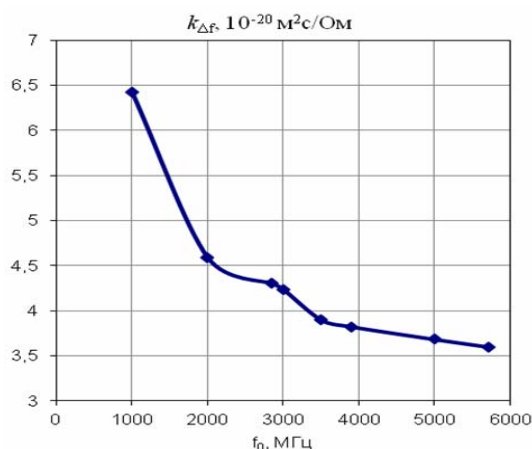


Рис.6. График частотной зависимости формфактора металлического тела

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное и аналитическое исследование формфакторов возмущающих тел различных размеров резонансным и нерезонансным методами. Получено хорошее согласование эксперимента с численным методом расчета. Изучено изменение величины формфактора в частотном диапазоне от 1 ГГц до 5712 МГц. Инструментальная погрешность измерения резонансной частоты составляет ± 5 Гц. Относительная погрешность определения формфактора $\pm 8\%$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. J.C. Slater. *Microwave Electronics*. New York, Van Nostrand.
2. D. Alessini, et al. About non resonant perturbation field measurement in standing wave cavities // *Proceedings of EPAC08*, Genoa, Italy, 2008.
3. N.P. Sobenin, B.V. Zverev. Electrodynamic Characteristics of Accelerating Cavities // *Foundation for International Scientific and Education Cooperation*, London, England, 1999.
4. P. Goudket, et al. Comparison of the Stretched-wire, Bead-pull and Numerical Impedance Calculations on 3.9 GHz Dipole Cavities // *Proc. of EPAC08*. Genoa, Italy, 2008.

Статья поступила в редакцию 25.09.2011 г.

FORMFACTOR OF BEADS FOR SW AND TW PERTURBATION FIELD MEASUREMENT ANALYSIS

M.V. Lalayan, A.Yu. Smirnov, N.P. Sobenin

Formfactors of perturbing objects (beads) used for different field strength measurement approaches in either travelling or standing wave mode are compared. Formfactor values were calculated using measured variations of cavity operating frequency or reflection coefficient correspondingly. Vector network analyzer based teststand was used. Cylindrical beads of different sizes were made of ceramics to eliminate magnetic field influence. Cavity used for experiments operated on TM_{010} - and TM_{020} -modes.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФОРМФАКТОРІВ ЗБУРЮЮЧИХ ТІЛ, ОТРИМАНИХ У РЕЖИМАХ БІГУЧОЇ І СТОЯЧОЇ ХВИЛІ

М.В. Лалаян, А.Ю. Смирнов, М.П. Собенін

Приведено порівняння формфакторів збуджуючих тіл різних розмірів за результатами вимірювань як зміни резонансної частоти, так і модуля коефіцієнта відображення. Тіла, які виготовлені з кераміки і мають форму циліндрів, поміщалися в циліндричний резонатор зі збуджуючими в ньому коливаннями виду E_{010} . Зміна власної частоти резонатора в результаті збудження, а також зміна коефіцієнта відбиття вимірювались за допомогою векторного аналізатора ланцюгів.