

МЕТОД РАСЧЕТА РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ТЕМ-КАМЕРЫ

Н.Л. Казанский^{1,2}, Е.А. Рахаева^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

²Самарский государственный аэрокосмический университет, Самара, Россия

Аннотация

Предложен метод расчета резонансных частот и частотных характеристик объемных резонаторов на запертых модах с использованием многомодовых матриц рассеяния. С использованием этого метода выявлены собственные типы волн, обуславливающие резонансы в ТЕМ-камере, определены ее резонансные частоты.

Введение

При проведении испытаний электронных компонентов и систем используются ТЕМ-камеры [1]. При больших размерах поперечного сечения регулярной части ТЕМ-камеры на некоторых частотах в ней могут возбуждаться паразитные резонансы электромагнитного поля. Как показано в [2, 3], причиной возбуждения резонансов являются высшие типы волн, распространяющиеся в регулярной части ТЕМ-камеры. При возбуждении резонансов в ТЕМ-камере в регулярной части в месте расположения объекта испытаний электромагнитное поле становится неравномерным, что препятствует проведению испытаний на электромагнитную совместимость.

Целью работы является определение собственных типов волн, обуславливающих резонансы в ТЕМ-камере и расчет ее резонансных частот.

1. Существующие методы расчета частотных характеристик объемных резонаторов

При расчете частотных характеристик ТЕМ-камеру можно интерпретировать как многомодовый объемный резонатор.

В настоящее время известны работы, в которых рассматриваются внешние электрические характеристики многомодовых объемных резонаторов с использованием высших распространяющихся типов волн. Такие резонаторы представляют собой, как правило, отрезок круглого или прямоугольного волновода большого сечения, в котором выполняются условия распространения для одного или нескольких высших типов волн. На входе и выходе такого регулярного отрезка включены конусные или пирамидальные переходы, для которых во всем диапазоне частот в области малых размеров поперечного сечения распространяющимся является только основной тип волны.

Такие резонаторы на высших типах колебаний получили название резонаторов на сверхразмерных волноводах или резонаторов на запертых модах [4]. Резонансы в этих структурах могут быть обусловлены только распространяющимися в регулярной части основным или высшими типами волн.

В регулярной части ТЕМ-камеры также выполняются условия распространения для нескольких высших типов волн. В то же время во всех сечениях пирамидальных переходов условия распространения

выполняются только для одного основного типа волны. В результате этого какой-либо высший тип волны, распространяющийся в регулярной части ТЕМ-камеры, доходит до критического сечения в пирамидальном переходе и отражается от него.

Представляет большой теоретический и практический интерес определение условий возбуждения резонансов в ТЕМ-камере, выявление причин их возникновения и расчет внешних электрических характеристик всей ТЕМ-камеры.

В настоящее время известны работы по расчету характеристик резонаторов на запертых модах [4-6]. Однако в этих работах заранее известен высший тип волны, который обуславливает резонанс, и задача заключается в определении внешних электрических характеристик резонатора.

Для ТЕМ-камеры необходимо решить другие задачи:

- идентифицировать тип волны, обуславливающий появление резонансов;
- определить структуру или элемент резонатора, обеспечивающего связь резонансного поля с полем основной волны;
- рассчитать амплитудно-частотную характеристику резонатора на запертых модах;
- определить резонансные частоты.

Все перечисленные выше задачи можно решить, если воспользоваться предложенным авторами методом расчета электродинамических характеристик объемных резонаторов с использованием многомодовых матриц рассеяния.

2. Идентификация типов волн, обуславливающих резонансы в ТЕМ-камере

При расчете частотных характеристик ТЕМ-камеру можно представить в виде каскадного соединения многомодовых многополосников, описывающих электродинамические характеристики пирамидальных переходов и ее регулярной части (рис. 1).

В [3] рассчитана частотная характеристика ТЕМ-камеры, по которой определены ее резонансные частоты в диапазоне частот от 0 до 30 МГц при учете в ее регулярной части семи распространяющихся типов волн. В качестве объекта для расчета частотных характеристик была выбрана ТЕМ-камера, установленная в Дирекции по техническому развитию ОАО «АВТОВАЗ» и предназначенная для проведения ис-

питаний транспортных средств на электромагнитную совместимость.

Представляет большой интерес выяснить причины появления резонансов и условия их возникновения. Для этого необходимо определить типы волн, обуславливающие появление резонансов.

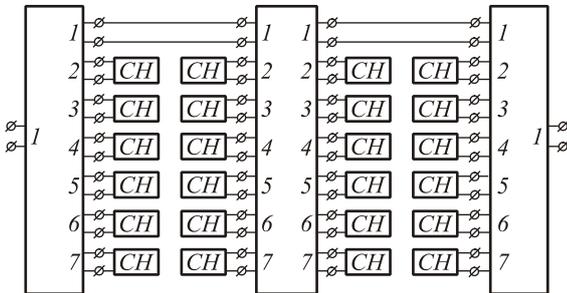


Рис. 1. Расчетная модель ТЕМ-камеры при учете только одного основного типа волны в регулярной части (СН – согласованная нагрузка)

Известно, что элементы многомодовых матриц рассеяния регулярной части ТЕМ-камеры и пирамидальных переходов не зависят от параметров нагрузок, подключенных к их входам. Это позволяет при анализе частотных характеристик всей ТЕМ-камеры ограничить число учитываемых в регулярной части высших распространяющихся типов волн и тем самым выявить те типы волн, которые обуславливают появление резонансов. Для этого ко входам многополосников, соответствующих тем типам волн, которые необходимо исключить из анализа, следует подключить согласованные нагрузки. В результате этого в алгоритме расчета внешних электрических характеристик будут учитываться только анализируемые типы волн.

Рассчитаем частотную характеристику ТЕМ-камеры в случае, когда в регулярной части учитывается только один первый распространяющийся тип волны. Для этого ко входам многополосников с номерами 2-7, в которых распространяются эти собственные типы волн, необходимо подключить согласованные нагрузки. В этом случае расчетная модель ТЕМ-камеры будет иметь вид, показанный на рис. 1.

Используя результаты расчета многомодовых матриц рассеяния пирамидальных переходов [7] и алгоритм расчета каскадного соединения многополосников [8], можно рассчитать частотную характеристику ТЕМ-камеры при учете только одного первого собственного типа волны. Результаты расчета частотной характеристики приведены на рис. 2.

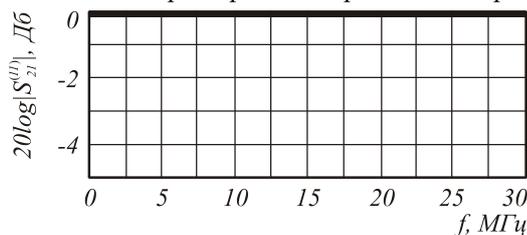


Рис. 2. Частотные характеристики ТЕМ-камеры при учете первого собственного типа волны в ее регулярной части

Из представленной частотной зависимости коэффициента передачи ТЕМ-камеры следует, что при учете только первого собственного типа волны в ее регулярной части резонансы отсутствуют. Обусловлено это тем, что нерегулярные отрезки линий передачи (пирамидальные переходы) имеют малые коэффициенты отражения для основной волны, и в них не выполняются условия, необходимые для возбуждения резонансов.

Рассмотрим расчет частотной характеристики ТЕМ-камеры при учете в ее регулярной части 1, 2, 3, 4, 6 и 7 распространяющихся типов волн.

Расчетная модель ТЕМ-камеры для этого случая показана на рис. 3.

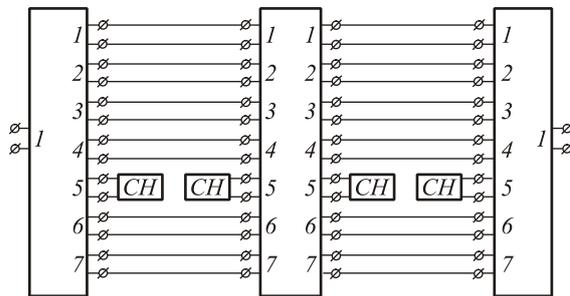


Рис. 3. Расчетная модель ТЕМ-камеры при учете в регулярной части 1, 2, 3, 4, 6 и 7 распространяющихся типов волн

Рассчитанная частотная характеристика ТЕМ-камеры совпадает с частотной характеристикой при учете только основной Т-волны, изображенной на рис. 2. Это означает, что эти распространяющиеся типы волн не вызывают появление резонансов в ТЕМ-камере.

Особенностью этих типов волн является отсутствие их возбуждения основной волной в пирамидальных переходах, так как для этих типов волн соответствующие элементы матриц рассеяния обоих пирамидальных переходов равны нулю во всем диапазоне частот [7].

Рассмотрим расчет частотной характеристики ТЕМ-камеры при учете в регулярной части первого и пятого собственных типов волн. Расчетная модель ТЕМ-камеры для этого случая показана на рис. 4.

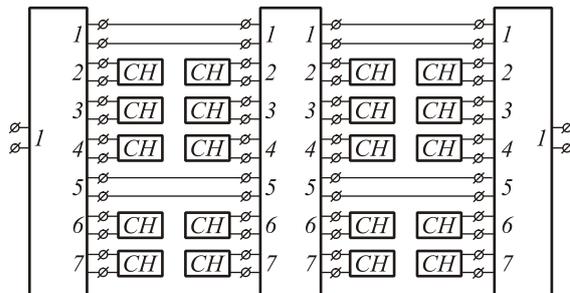


Рис.4. Расчетная модель ТЕМ-камеры при учете в регулярной части первого и пятого распространяющихся типов волн

Проведенные расчеты частотной характеристики данной модели показали, что частотная зависимость выраженного в децибелах модуля коэффициента передачи ТЕМ-камеры по основной моде при учете в ее регулярной части первого и пятого распространяющихся собственных типов волн, приведенная на рис. 5, совпадает с частотной зависимостью для ТЕМ-камеры ([3], рис.3а).

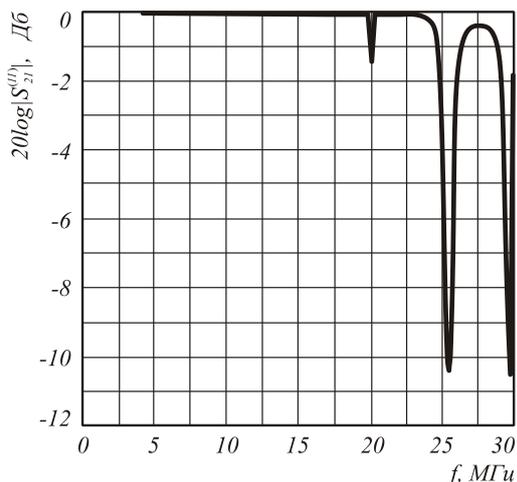


Рис. 5. Частотная характеристика ТЕМ-камеры по основной моде при учете в ее регулярной части первого и пятого собственных типов волн

Это означает, что именно пятый собственный тип волны регулярной части ТЕМ-камеры обуславливает появление резонансов в ТЕМ-камере.

Причиной возбуждения этого типа волны в регулярной части ТЕМ-камеры является наличие в ее конструкции пирамидальных переходов, в которых при распространении основного типа волны происходит возбуждение пятого высшего типа волны [7].

4. Условия возбуждения резонансов в ТЕМ-камере

Представляет интерес определить условия возбуждения резонансов для этого типа волны в ТЕМ-камере. Для этого запишем выражения для многомодовых матриц рассеяния пирамидальных переходов $[^1S]$, $[^2S]$ и регулярной части ТЕМ-камеры $[S]$ при учете первого и пятого типов волн.

$$[^1S] = \begin{bmatrix} ^1S_{11}^{(11)} & ^1S_{12}^{(11)} & ^1S_{12}^{(15)} \\ ^1S_{21}^{(11)} & ^1S_{22}^{(11)} & ^1S_{22}^{(15)} \\ ^1S_{21}^{(51)} & ^1S_{22}^{(51)} & ^1S_{22}^{(55)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$[^2S] = \begin{bmatrix} ^2S_{11}^{(11)} & ^2S_{11}^{(15)} & ^2S_{12}^{(11)} \\ ^2S_{11}^{(51)} & ^2S_{11}^{(55)} & ^2S_{12}^{(51)} \\ ^2S_{12}^{(11)} & ^2S_{12}^{(51)} & ^2S_{22}^{(11)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \exp(-i\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \exp(-i\theta_5) \\ \exp(-i\theta_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-i\theta_5) & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $\theta_{1,5} = \gamma_{1,5}L$.

Используя алгоритм расчета каскадного соединения многополосников [8], можно записать выражение для коэффициента передачи ТЕМ-камеры по основной моде при учете основной волны и 5-го высшего типа волны

$$[S_{21}] = [^2S_{21}^{(11)} \quad ^2S_{21}^{(15)}] \cdot \left([E] - \begin{bmatrix} ^1S_{22}^{(11)} e^{-i2\theta_1} & ^1S_{22}^{(15)} e^{-i(\theta_1+\theta_5)} \\ ^1S_{22}^{(51)} e^{-i(\theta_1+\theta_5)} & ^1S_{22}^{(55)} e^{-i2\theta_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ^2S_{22}^{(11)} & ^2S_{22}^{(15)} \\ ^2S_{22}^{(51)} & ^2S_{22}^{(55)} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} ^1S_{21}^{(11)} \\ ^1S_{21}^{(51)} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $[E]$ – единичная матрица.

Резонанс соответствует минимуму коэффициента передачи на основной моде ТЕМ-камеры. Для произвольных значений элементов матриц рассеяния пирамидальных переходов из соотношения (4) получить условие резонанса в простой аналитической форме не представляется возможным, однако в приближении слабой связи основного типа волны с 5-м высшим типом такое аналитическое выражение условия резонанса имеет вид

$$^1\varphi_{22}^{(55)} + 2\theta_5 + ^2\varphi_{11}^{(55)} = 2\pi k, \quad (5)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, θ_5 – фазовый набег 5-го типа волны в регулярной части ТЕМ-камеры, $^1\varphi_{22}^{(55)}$, $^2\varphi_{11}^{(55)}$ – фазовые углы коэффициента отражения 5-го типа волны соответственно от 1-го и 2-го пирамидальных переходов.

Физически это условие означает для 5-го высшего типа волны синфазность полей, переотраженных от пирамидальных переходов, в какой-либо точке внутри регулярной части ТЕМ-камеры.

Резонансные частоты ТЕМ-камеры можно определить из соотношения (5) численно. Входящие в это соотношение фазовые углы θ_5 , $^1\varphi_{22}^{(55)}$ и $^2\varphi_{11}^{(55)}$ зависят от частоты.

На рис.6 приведены рассчитанные частотные зависимости фазового сдвига 5-го собственного типа волны $\theta_5 = \gamma_5 L$, вносимого регулярной частью ТЕМ-камеры длиной L (кривая 1).

Из представленной зависимости видно, что до частоты 17,5 МГц фазовый угол не изменяется и численно равен 0° . Обусловлено это тем, что в указанном частотном диапазоне пятый собственный тип волны является для регулярной части ТЕМ-камеры нераспространяющимся. При увеличении частоты свыше 17,5 МГц 5-й собственный тип вол-

ны становится распространяющимся, и фазовый сдвиг коэффициента передачи изменяется.

Рассчитанная частотная зависимость фазы коэффициента отражения 5-го собственного типа волны [7] для первого перехода ${}^1\varphi_{22}^{(55)}$ приведена на рис. 6 (кривая 2).

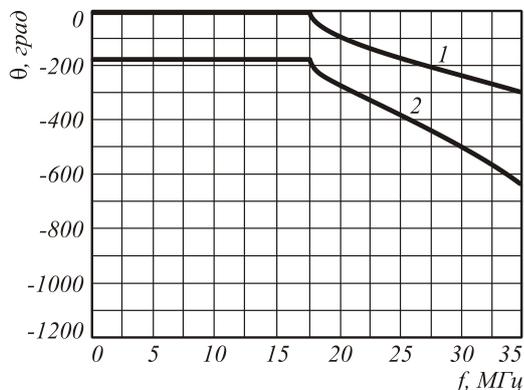


Рис. 6. Частотные зависимости фазового сдвига 5-го собственного типа волны θ_5 ,

вносимого регулярной частью ТЕМ-камеры (кривая 1), и фазы коэффициента отражения от пирамидального перехода 5-го собственного типа волны ${}^1\varphi_{22}^{(55)}$ (кривая 2)

Из представленной зависимости следует, что при частотах менее 17,5 МГц фаза коэффициента постоянна и равна -180° . Обусловлено это тем, что в указанном частотном диапазоне в пирамидальном переходе не выполняются условия распространения пятого собственного типа волны, а критическое сечение для этого типа волны расположено в сечении пирамидального перехода с наибольшими размерами.

По мере увеличения частоты свыше 17,5 МГц плоскость критического сечения, от которого отражается пятый собственный тип волны, смещается внутрь пирамидального перехода, и фаза коэффициента отражения ${}^1\varphi_{22}^{(55)}$ изменяется.

Аналогичный вид имеет частотная зависимость фазы коэффициента отражения второго пирамидального перехода ${}^2\varphi_{11}^{(55)}$.

Спектр резонансных частот ТЕМ-камеры можно определить по соотношению (5). На рис. 7 представлена рассчитанная частотная зависимость суммарного фазового сдвига ${}^1\varphi_{22}^{(55)} + 2\theta_5 + {}^2\varphi_{11}^{(55)}$ для ТЕМ-камеры.

Из представленного графика видно, что условия резонанса, описываемые соотношением (5), выполняются для частот 20 МГц, 25,8 МГц и 29,6 МГц, что соответствует ранее проведенным расчетам и результатам экспериментальных исследований.

Таким образом, предложенный метод расчета частотных характеристик ТЕМ-камеры с использованием многомодовых матриц рассеяния адекватно описывает в ней резонансные явления.

Заключение

Предложенная методика идентификации собственных типов волн позволила выявить, что возбуждение резонансов в ТЕМ-камере обусловлено пятым собственным типом волны в ее регулярной части.

Определено, что причиной возбуждения этого типа волны является наличие в ТЕМ-камере пирамидальных переходов.

Получено условие для расчета резонансных частот ТЕМ-камеры, определены ее резонансные частоты.

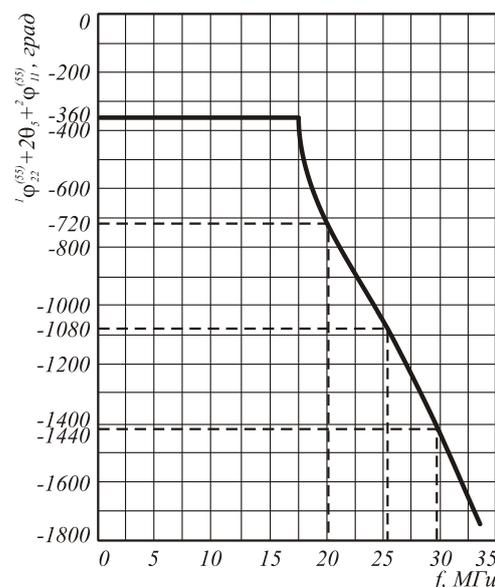


Рис. 7. Частотные зависимости фазовых сдвигов в ТЕМ-камере

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» («BRNE», CRDF Project RUX0-014-SA-06) и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 07-07-97601-р_офи, 06-07-08074-офи).

Литература

1. Crawford M.L. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1974. – Vol. EMC-16. N. 4. – Pp. 40-46.
2. Rakhaeva E.A., Kazansky N.L., Podlypnov G.A., Rakhaev A.A., Suhov V.V., Sarzhin M.A. Research of resonance effects in TEM-cell // 7-th international symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology. - Saint-Petersburg. 2007. – Pp. 104-106.
3. Казанский Н.Л., Рахаева Е.А. Расчет частотной характеристики ТЕМ-камеры // Компьютерная оптика, 2007. - Т. 31. - №3. – С. 52-54.
4. Волноводные неоднородности // Резонансное рассеяние волн / В.И. Шестопалов, А.А. Кириленко, Л.А. Рудь. – Киев: Наукова думка, 1986. - Т.2. – 216 с.
5. Данилов Ю.Ю., Кузиков С.В., Петелин М.И. К теории компрессора микроволновых импульсов на основе бочкообразного резонатора с винтовым гофром // Журнал технической физики. 2000. - Т.70. - Вып. 1. – С. 65-67.

6. Майстренко В.К., Радионов А.А., Щербakov В.В. Расчет открытого предельного биконического резонатора // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 1998. - Т.1. - №2-3. - С. 95-97.

7. Казанский Н.Л., Рахаева Е.А. Расчет характеристик пирамидального перехода ТЕМ-камеры // Известия Самарского научного центра РАН, 2007. - Т. 9. - №3. (в печати).

8. Микроэлектронные устройства СВЧ/Г. И. Веселов, Е. Н. Егоров, Ю. Н. Алёхин и др. // Под ред. Г.И. Веселова. - М.: Высшая школа, 1988. - 280 с.

THE METHOD OF CALCULATING THE RESONANT FREQUENCIES OF TEM-CELL

N.L. Kazanskiy^{1,2}, E.A. Rakhaeva^{1,2}

¹ *Image Processing Systems Institute of the RAS, Samara, Russia,*

² *Samara State Aerospace University (SSAU), Samara, Russia*

Abstract

The method of calculating the resonant frequencies and frequency characteristics of resonant cavities at the locked modes using multimode scattering matrices has been presented. Using this method, the eigenmodes that determine the resonances in TEM-cell have been identified and its resonant frequencies have been determined.

Keywords: electromagnetic compatibility, test TE-cell, method of electromagnetic calculation, resonant frequencies.

Citation: Kazanskiy NL, Rakhaeva EA. The method of calculating the resonant frequencies of TEM-cell [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(3): 55-58.

Acknowledgements: The research was financially supported by the Russian-American Basic Research and Higher Education Program (BRHE, CRDF Project RUX0-014-SA-06) and the Russian Foundation for Basic Research (grants Nos. 07-07-97601-r_ofi, 06-07-08074-ofi).

References:

- [1] Crawford ML. Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 1974; EMC-16(4): 40-46.
- [2] Rakhaeva EA, Kazanskiy NL, Podlypnov GA, Rakhaev AA, Suhov VV, Sarzhin MA. Research of resonance effects in TEM-cell. 7-th international symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology. Saint-Petersburg 2007; 104-106.
- [3] Kazanskiy NL, Rakhaeva EA. Calculation of the frequency characteristic of TEM-cell [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(3): 52-54.
- [4] Shestopalov VP, Kirilenko AA, Rud LA. Waveguide nonhomogeneities. Resonance wave scattering [In Russian]. Kiev: Naukova Dumka 1986; 2: 216 p.
- [5] Danilov YuYu, Kuzikov SV, Petelin MI. Theory of a microwave-pulse compressor based on a barrel-shaped cavity with helical-corrugated surface. Technical Physics 2000; 45(1): 63-65. DOI: 10.1134/1.1259570.
- [6] Maistrenko VK, Radionov AA, Scherbakov VV. Calculation of the open limit biconical cavity [In Russian]. Wave Process Physics and Radio Engineering Systems 1998; 1(2-3): 95-97.
- [7] Kazanskiy NL, Rakhaeva EA. Calculation of the characteristics of the pyramidal transition of TEM-cell [In Russian]. Proceedings of the Samara Research Center of RAS 2007; 9(3): 598-605.
- [8] Veselov GI (ed.), Egorov EN, Alekhin YuN, et al. Microwave microelectronic devices [In Russian]. Moscow: "Vysshaya shkola" Publisher, 1988; 280 p.