

на правах рукописи

РАХАЕВА ЕЛЕНА АЛЕКСАНДРОВНА

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ТЕМ-КАМЕРАХ**

Специальность 01.04.01 - Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Самара 2008

Работа выполнена в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева и Институте систем обработки изображений Российской академии наук

Научный руководитель доктор физико-математических наук, профессор
Николай Львович Казанский

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Юрий Леонидович Ратис

кандидат физико-математических наук, доцент
Валерий Васильевич Зайцев

Ведущая организация: Самарский отраслевой научно-исследовательский институт радио

Защита состоится 17 июня 2008 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 при Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева, по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева.

Автореферат разослан 16 мая 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
профессор

В.Г. Шахов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена разработке методов расчета и анализу характеристик электромагнитных полей в ТЕМ-камерах, которые используются при проведении испытаний электронных компонентов и систем на электромагнитную совместимость.

Актуальность темы

В современной экспериментальной физике и технике идет активное внедрение электронных узлов и микрокомпьютерных систем, которые позволяют расширить функциональные возможности и улучшить технические характеристики аппаратуры. Ключевой проблемой такой аппаратуры является надежность используемых в них электронных компонентов. Одной из причин выхода из строя электронных компонентов является воздействие электромагнитных полей большой интенсивности, имеющих искусственное или естественное (природное) происхождение. Это обуславливает необходимость проведения испытаний электронных систем и приборов на устойчивость к электромагнитным полям большой амплитуды.

Известно несколько методов проведения испытаний на электромагнитную совместимость, среди которых наиболее распространенными являются испытания в ограниченном пространстве экранированного помещения. Одним из вариантов экранированного помещения является ТЕМ-камера, состоящая из отрезка регулярной полосковой линии передачи, на концах которой включены пирамидальные переходы, представляющие собой нерегулярные линии передачи.

Характеристики регулярных полосковых линий передач исследовались в работах Нефедова Е.И., Никольского В.В., Веселова Г.И., Неганова В.А., Шугурова В.К., характеристики нерегулярных линий – в работах Фельдштейна А.Л., Каценеленбаума Б.З., Темнова В.М.

В то же время для ТЕМ-камер отсутствует корректная методика расчета ее основных параметров и конструктивных элементов, а также результаты расчета электромагнитного поля внутри нее, что не позволяет правильно интерпретировать полученные экспериментальные данные.

Все это обуславливает актуальность исследования электродинамических характеристик ТЕМ-камер.

Цель работы

Разработать методы расчета и исследовать характеристики электромагнитных полей в ТЕМ-камере.

В соответствии с поставленной целью определены основные **задачи диссертации:**

1. Исследовать характеристики электромагнитных полей в регулярной части ТЕМ-камеры.
2. Разработать метод расчета и рассчитать внешние электродинамические характеристики пирамидальных переходов.

3. Разработать метод расчета и рассчитать частотные характеристики ТЕМ-камеры.
4. Разработать метод идентификации собственных типов волн в регулярной части ТЕМ-камеры, обуславливающих резонансные явления в ней.
5. Определить условия возбуждения резонансов в ТЕМ-камере.

Методы исследования

При расчете электромагнитных полей применялся метод частичных областей, основанный на строгом решении уравнений Максвелла; при расчете характеристик нерегулярных линий и частотных характеристик ТЕМ-камеры использовались многомодовые матрицы рассеяния.

Для подтверждения достоверности полученных теоретических результатов проводились экспериментальные исследования характеристик ТЕМ-камеры.

Научная новизна работы

1. По соотношениям, полученным методом частичных областей, произведен расчет дисперсионных характеристик и составляющих электромагнитного поля в ТЕМ-камере. Уточнены размеры рабочей зоны ТЕМ-камеры, рассчитаны структуры полей 10 собственных типов волн регулярной части ТЕМ-камеры.
2. Предложен метод расчета внешних электродинамических характеристик нерегулярных линий передач с использованием многомодовой матрицы рассеяния, с помощью предложенного метода рассчитаны внешние электродинамические характеристики пирамидальных переходов.
3. Предложен метод расчета частотных характеристик ТЕМ-камеры с использованием многомодовой матрицы рассеяния.
4. Предложен метод идентификации собственных типов волн, обуславливающих резонансы в ТЕМ-камере.
5. Получено условие для расчета резонансных частот ТЕМ-камеры при ее работе в многомодовом режиме.

Практическая значимость работы

Практическая значимость проведенных в диссертационной работе исследований заключается в возможности использования полученных результатов при проектировании испытательных комплексов на основе ТЕМ-камер, при интерпретации экспериментальных результатов испытаний электронных компонентов и систем на электромагнитную совместимость.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты расчета дисперсионных характеристик, распределения электромагнитного поля и структур полей в регулярной части ТЕМ-камеры, размеры ее рабочей зоны.
2. Метод расчета внешних электродинамических характеристик нерегулярных линий передач с использованием многомодовых матриц рассеяния, результаты

расчета многомодовых матриц рассеяния пирамидальных переходов ТЕМ-камеры.

3.Метод расчета частотной характеристики ТЕМ-камеры с использованием многомодовой матрицы рассеяния при учете в ее регулярной части всех распространяющихся типов волн, результаты расчета частотной характеристики ТЕМ-камеры.

4.Метод идентификации собственных типов волн, обуславливающих возбуждение резонансов в ТЕМ-камере, условие для расчета ее резонансных частот.

Внедрение результатов исследования в практику

Результаты проведенных исследований использованы при разработке, вводе в эксплуатацию, проведении испытаний и интерпретации полученных результатов в Дирекции по техническому развитию ОАО «АВТОВАЗ».

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались на 5 Международных, 4 Российских, 2 межвузовских конференциях и семинарах, защищены патентом на изобретение и опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 4 работы – в ведущих рецензируемых журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией.

Объем и структура работы Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы (140 наименований). Работа изложена на 128 страницах и содержит 40 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, дан краткий обзор научных работ по рассматриваемым вопросам, показана научная новизна полученных результатов.

В первой главе рассмотрены различные методы формирования электромагнитных полей при проведении испытаний на электромагнитную совместимость, среди которых наибольшее распространение получил метод с использованием ТЕМ-камеры (рис. 1).

Регулярная часть ТЕМ-камеры представляет собой полосковую линию,

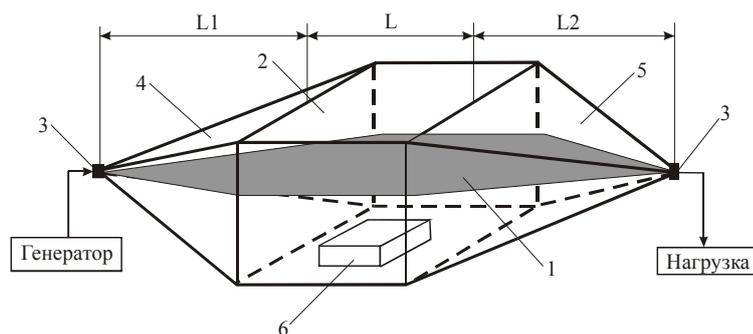


Рис. 1

состоящую из центрального проводника 1 и наружного экрана прямоугольного сечения 2. Для согласования геометрических размеров регулярной части ТЕМ-камеры с высокочастотными разъемами 3 генератора и нагрузки на ее входе и

выходе включены пирамидальные переходы 4,5 обеспечивающие постоянство волнового сопротивления по всей длине ТЕМ-камеры. Генератор, пирамидальные переходы и согласованная нагрузка обеспечивают в регулярной части ТЕМ-камеры режим бегущей Т-волны, которая имитирует электромагнитную волну в открытом пространстве. Объект испытаний б помещается в середину регулярной части ТЕМ-камеры, где электромагнитное поле имеет минимальную неравномерность и не содержит продольных составляющих.

Анализ литературы показал, что для ТЕМ-камер отсутствуют результаты расчета характеристик электромагнитного поля, нет строгих методов расчета ее частотных характеристик и методов идентификации типов волн, обуславливающих резонансы электромагнитного поля, а также методов расчета ее резонансных частот.

Во второй главе рассмотрено решение задачи расчета электромагнитных полей в регулярной части ТЕМ-камеры методом частичных областей. В соответствии с этим методом регулярная часть ТЕМ-камеры (рис. 2)

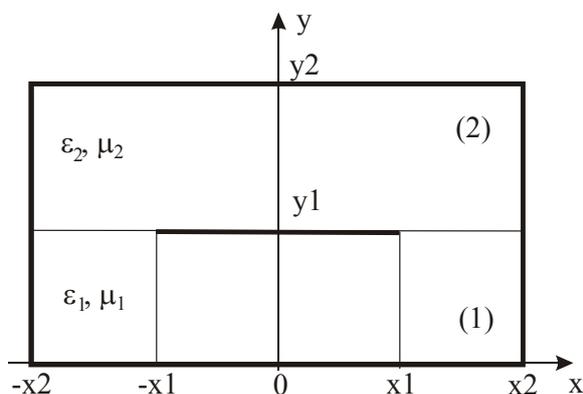


Рис. 2

представляется в виде первой (1) и второй (2) частичных областей.

Составляющие полей собственных типов волн в каждой из областей записаны в виде рядов по тригонометрическим функциям, удовлетворяющим уравнениям Максвелла и условиям на границе областей. В соотношениях для составляющих полей неизвестные амплитудные коэффициенты и коэффициент распространения γ_p

собственного p -го типа волны определяются из граничных условий в плоскости расположения центрального проводника.

Граница раздела между первой и второй частичными областями рассматривается как третья (3) вырожденная область, имеющая в направлении оси y нулевую протяженность. Электрическое поле в третьей частичной области должно удовлетворять уравнениям Максвелла, условию Мейкснера на краю центрального проводника $x = \pm x_1$ и граничным условиям в плоскости $x = \pm x_2$. Этим условиям удовлетворяет представление электрического поля в виде

$$\begin{aligned}
 E_{z3}(x) &= \sum_n C_n \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}\right)^2} \cdot U_{2n+1}\left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}\right), \\
 E_{x3}(x) &= \sum_n D_n \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}\right)^2}} \cdot T_{2n}\left(\frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}\right),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $T_n(x)$, $U_n(x)$ - полиномы Чебышева первого и второго рода,
 $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$.

Определение структур полей в регулярной части ТЕМ-камеры сводится к решению однородной системы линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов C_n , D_n в разложениях составляющих поля

$$\begin{bmatrix} c1_{00} & c1_{01} & c1_{02} & \dots & d1_{00} & d1_{01} & d1_{02} & \dots \\ c1_{10} & c1_{11} & c1_{12} & \dots & d1_{10} & d1_{11} & d1_{12} & \dots \\ c1_{20} & c1_{21} & c1_{22} & \dots & d1_{20} & d1_{21} & d1_{22} & \dots \\ \dots & \dots \\ c2_{00} & c2_{01} & c2_{02} & \dots & d2_{00} & d2_{01} & d2_{02} & \dots \\ c2_{10} & c2_{11} & c2_{12} & \dots & d2_{10} & d2_{11} & d2_{12} & \dots \\ c2_{20} & c2_{21} & c2_{22} & \dots & d2_{20} & d2_{21} & d2_{22} & \dots \\ \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ \dots \\ D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где коэффициенты $c1_{kn}$, $c2_{kn}$, $d1_{kn}$, $d2_{kn}$ определяются геометрическими размерами линии передачи и электродинамическими параметрами сред.

Условие существования нетривиального решения системы, состоящее в равенстве нулю ее определителя, дает трансцендентное уравнение для расчета дисперсионных характеристик собственных волн регулярной части ТЕМ-камеры $\gamma_p(f)$, которое решается методом редукции.

Коэффициенты C_n и D_n находятся с точностью до постоянного множителя из соотношения (2). Электрическое и магнитное поля в 1-ой и 2-ой областях определяются через составляющие поля в 3-ей области E_{z3} , E_{x3} .

В третьей главе рассчитаны дисперсионные характеристики и распределения составляющих электрического и магнитного полей собственных типов волн регулярной части ТЕМ-камеры.

В качестве объекта исследования характеристик и экспериментальной проверки достоверности проведенных расчетов была использована ТЕМ-камера с геометрическими размерами (рис. 1, 2) $L1=8450$ мм, $L=8000$ мм, $L2=10360$ мм, $x1=5600$ мм, $x2=9000$ мм, $y2=2 \cdot y1=8000$ мм.

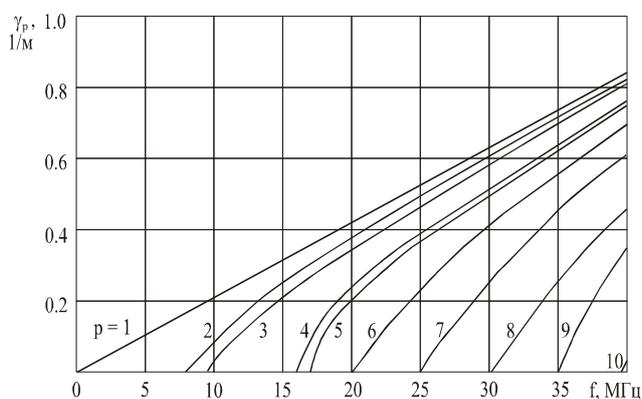


Рис. 3

Численно определены условия, при которых погрешность расчета дисперсионной характеристики не превышает 10^{-6} .

Рассчитаны дисперсионные характеристики (рис. 3), показывающие частотные зависимости коэффициента распространения γ_p собственных типов волн,

распространяющихся в регулярной части ТЕМ-камеры.

Из представленных результатов следует, что в регулярной части ТЕМ-камеры при частотах $f > 8.33$ МГц кроме основной Т-волны (кривая $p=1$) возможно возбуждение распространяющихся высших типов волн (кривые $p=2, 3, \dots, 10$).

Рассчитаны распределения составляющих электрического и магнитного полей в регулярной части ТЕМ-камеры, построены структуры полей 10-и собственных типов волн. На рис. 4 приведены в качестве примера структуры 1-го (рис. 4а) и 5-го (рис. 4б) собственных типов волн.

Для основного типа волны (рис. 4а) под центральным проводником ТЕМ-камеры существует область пространства, в которой структура поля близка к структуре поля плоской волны и в которой располагается рабочая область ТЕМ-камеры.

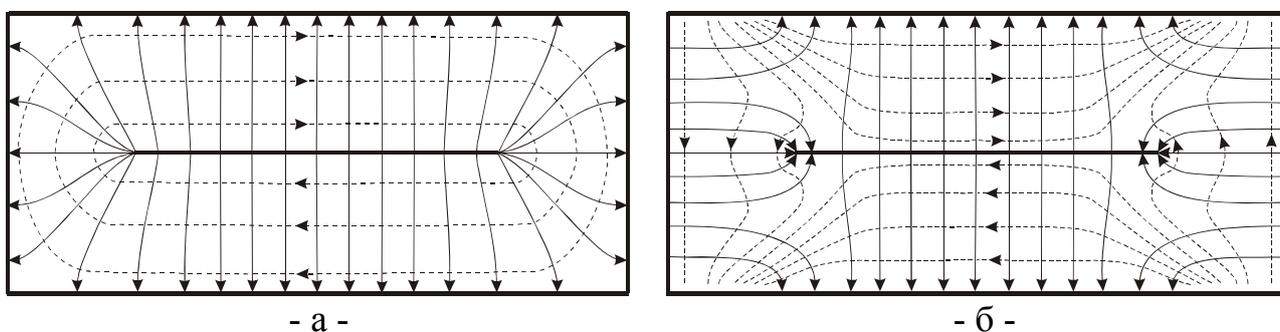


Рис. 4

Рассчитана неравномерность поперечной составляющей электрического поля в регулярной части ТЕМ-камеры. Показано, что рабочий объем ТЕМ-камеры можно увеличить в 1.2 раза по сравнению с рекомендуемым ГОСТ Р 51048-97 при требуемой неравномерности поля в рабочей области менее 3 дБ.

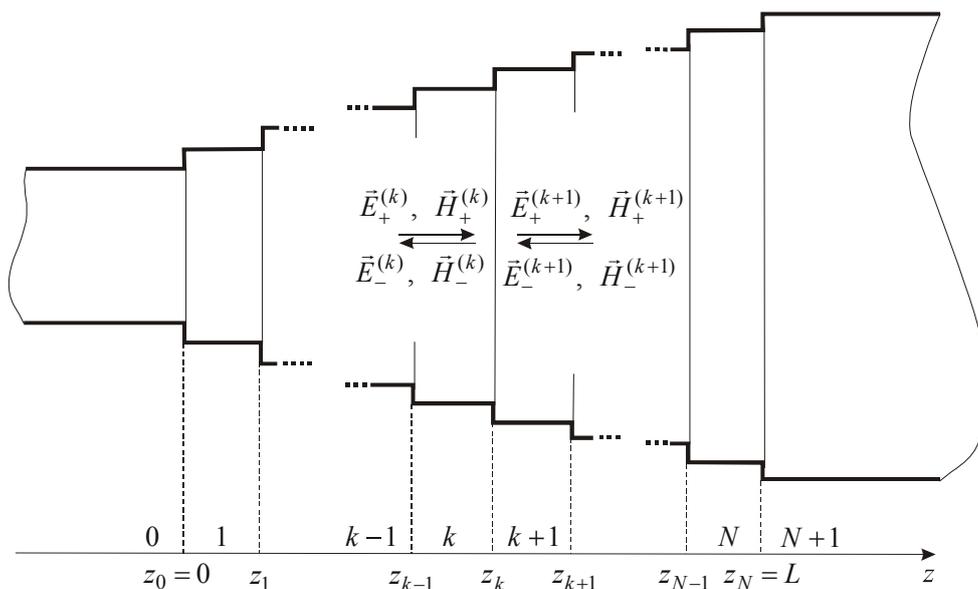


Рис. 5

В четвертой главе рассмотрен предложенный соискателем метод расчета электродинамических характеристик нерегулярных линий с использованием многомодовых матриц рассеяния, в котором отрезок нерегулярной линии передачи заменен каскадным соединением N многополюсников, описывающих характеристики регулярных отрезков линии передачи, и $N + 1$ многополюсников, описывающих характеристики неоднородностей в виде скачков геометрических размеров поперечного сечения линии передачи и электродинамических параметров заполняющих сред (рис. 5).

Многомодовую матрицу рассеяния k -го регулярного отрезка линии передачи длиной $\Delta l_k = z_k - z_{k-1}$ при учете в нем P собственных типов волн можно записать в виде блочной матрицы

$${}^{(k)}S = \begin{bmatrix} {}^{(k)}S_{11} & {}^{(k)}S_{12} \\ {}^{(k)}S_{21} & {}^{(k)}S_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{где } {}^{(k)}S_{11} = {}^{(k)}S_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad {}^{(k)}S_{21} = {}^{(k)}S_{12} = \begin{bmatrix} \exp(-i\gamma_1^{(k)}\Delta l_k) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \exp(-i\gamma_P^{(k)}\Delta l_k) \end{bmatrix}.$$

Многомодовую матрицу рассеяния k -ой неоднородности в виде скачка геометрических размеров и электродинамических параметров среды заполнения можно записать в виде блочной матрицы (3), где

$${}^{(k)}S_{11} = \begin{bmatrix} {}^{(k)}S_{11}^{(1,1)} & {}^{(k)}S_{11}^{(1,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{11}^{(1,P1)} \\ {}^{(k)}S_{11}^{(2,1)} & {}^{(k)}S_{11}^{(2,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{11}^{(2,P1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^{(k)}S_{11}^{(P1,1)} & {}^{(k)}S_{11}^{(P1,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{11}^{(P1,P1)} \end{bmatrix},$$

$${}^{(k)}S_{22} = \begin{bmatrix} {}^{(k)}S_{22}^{(1,1)} & {}^{(k)}S_{22}^{(1,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{22}^{(1,P2)} \\ {}^{(k)}S_{22}^{(2,1)} & {}^{(k)}S_{22}^{(2,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{22}^{(2,P2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^{(k)}S_{22}^{(P2,1)} & {}^{(k)}S_{22}^{(P2,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{22}^{(P2,P2)} \end{bmatrix},$$

$${}^{(k)}S_{21} = [{}^{(k)}S_{12}]^T = \begin{bmatrix} {}^{(k)}S_{21}^{(1,1)} & {}^{(k)}S_{21}^{(1,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{21}^{(1,P1)} \\ {}^{(k)}S_{21}^{(2,1)} & {}^{(k)}S_{21}^{(2,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{21}^{(2,P1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^{(k)}S_{21}^{(P2,1)} & {}^{(k)}S_{21}^{(P2,2)} & \dots & {}^{(k)}S_{21}^{(P2,P1)} \end{bmatrix}.$$

В этих соотношениях $P1, P2$ - число учитываемых типов волн слева и справа от неоднородности; $p1 = 1, 2, \dots, P1, p2 = 1, 2, \dots, P2$; ${}^{(k)}S_{ij}^{(p1,p2)}$ - комплексный коэффициент передачи матрицы рассеяния k -ой неоднородности со входа j на вход i , причем на вход j падает волна типа $p2$, а на входе i возбуждается волна типа $p1$; ${}^{(k)}S_{ii}^{(p1,p2)}$ - коэффициент отражения от i -го входа при падении на вход волны типа $p2$ и отражении от него волны типа $p1$.

Элементы этой матрицы рассеяния определяются из решения задачи дифракции электромагнитных волн на скачке геометрических размеров в полосковой линии.

Число учитываемых типов волн слева и справа от скачка параметров линии передачи определяется точностью вычисления элементов многомодовой матрицы рассеяния неоднородности, а число разбиений N - точностью вычисления многомодовой матрицы рассеяния всей нерегулярной линии передачи.

По известным многомодовым матрицам рассеяния вычисляется результирующая матрица рассеяния нерегулярной линии передачи.

Достоинством предложенного метода является независимое друг от друга определение для достижения заданной точности вычисления внешних электродинамических характеристик числа учитываемых собственных типов волн P в регулярных отрезках линии передачи и числа разбиений N . Кроме того, при вариации закона изменения продольной зависимости параметров нерегулярной линии не требуется заново рассчитывать многомодовые матрицы рассеяния неоднородностей в виде скачка геометрических размеров.

Изложенный метод был использован для расчета многомодовых матриц рассеяния пирамидальных переходов ТЕМ-камеры.

Рассчитана многомодовая матрица рассеяния неоднородности в виде скачка геометрических размеров в полосковой линии. Численно определено, что при учете $p=10$ собственных типов волн погрешность расчета элементов матрицы рассеяния не превышает 10^{-7} .

Рассчитаны многомодовые матрицы рассеяния пирамидальных переходов ТЕМ-камеры. Определено, что при числе разбиений пирамидального перехода $N \geq 10$ погрешность вычисления элементов многомодовой матрицы рассеяния не превышает значения 10^{-6} . Установлено, что с наибольшей амплитудой основная Т-волна регулярной части ТЕМ-камеры возбуждает в пирамидальных переходах 5-ый собственный тип волны (рис.4б), что обусловлено подобием в области расположения центрального проводника структуры поля этого типа

волны структуре поля основного типа. Все остальные типы волн по амплитуде не превышают значения 0.0001.

Рассчитана частотная зависимость фазы коэффициента отражения для пятого типа волны $\varphi_{11}^{(5,5)}$ при различном числе разбиений N (рис. 6). Из представленных зависимостей видно, что при частотах $f < 17.5$ МГц фаза коэффициента отражения 5-го высшего типа

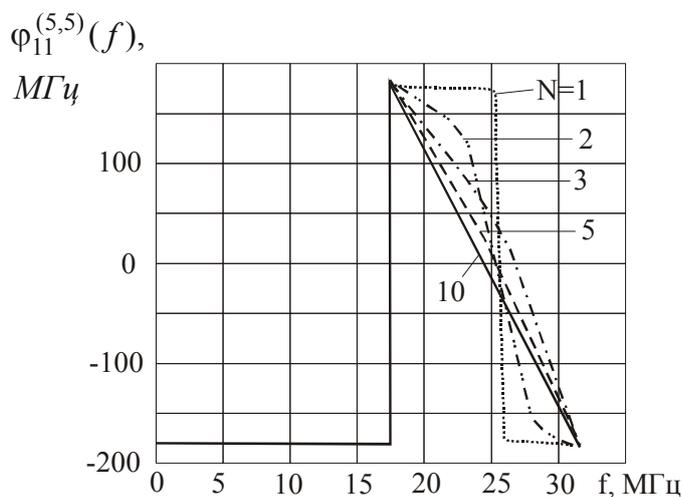


Рис. 6

волны постоянна и равна -180^0 . Это обусловлено тем, что пирамидальный переход в этом диапазоне частот не допускает распространение данного типа волны. По мере увеличения частоты свыше 17.5 МГц в пирамидальном переходе критическое сечение, которое разделяет область с распространяющейся и затухающей волнами, смещается внутрь перехода, и вносимый фазовый сдвиг изменяется.

Закон изменения фазового сдвига от частоты также зависит от числа разбиений N . По мере увеличения числа разбиений частотная зависимость фазы коэффициента отражения стабилизируется, и при числе разбиений $N \geq 10$ погрешность вычисления фазы коэффициента отражения не превышает значения 10^{-6} .

В пятой главе рассмотрен предложенный соискателем метод расчета частотной характеристики ТЕМ-камеры с использованием многомодовых матриц рассеяния. ТЕМ-камеру при расчете частотных характеристик можно представить в виде каскадного соединения трех многомодовых многополюсников (рис. 7), которые описывают внешние электродинамические характеристики регулярной части и двух пирамидальных переходов.

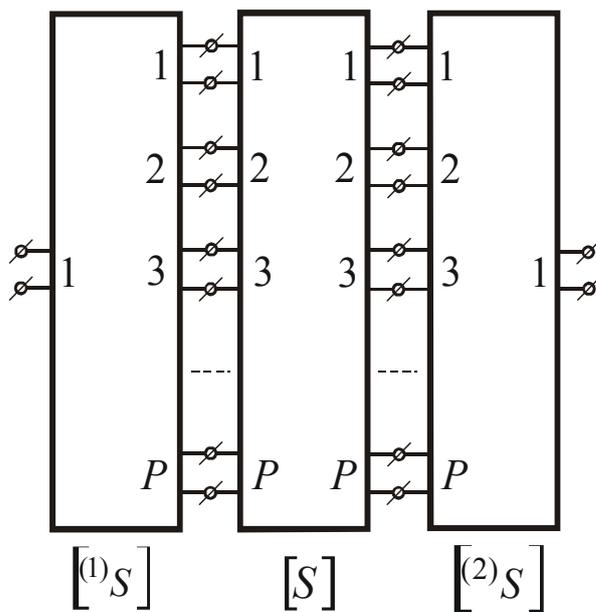


Рис. 7

Число входов у многополюсников определяется числом учитываемых типов волн.

В матрицах рассеяния пирамидальных переходов со сторон, подключенных к регулярной части, учитывалось P распространяющихся собственных типов волн, а со сторон сечения с малыми геометрическими размерами – только один. В этом случае многомодовая матрица рассеяния регулярной части ТЕМ-камеры описывается соотношением (3) при $\Delta l_k = L$, а многомодовые

матрицы рассеяния первого и второго пирамидальных переходов записываются в виде

$$[{}^{(1)}S] = \begin{bmatrix} (1)S_{11}^{(1,1)} & (1)S_{12}^{(1,1)} & (1)S_{12}^{(1,2)} & \dots & (1)S_{12}^{(1,P)} \\ (1)S_{21}^{(1,1)} & (1)S_{22}^{(1,1)} & (1)S_{22}^{(1,2)} & \dots & (1)S_{22}^{(1,P)} \\ (1)S_{21}^{(2,1)} & (1)S_{22}^{(2,1)} & (1)S_{22}^{(2,2)} & \dots & (1)S_{22}^{(2,P)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (1)S_{21}^{(P,1)} & (1)S_{22}^{(P,1)} & (1)S_{22}^{(P,2)} & \dots & (1)S_{22}^{(P,P)} \end{bmatrix},$$

$$\left[{}^{(2)}S \right] = \begin{bmatrix} {}^{(2)}S_{11}^{(1,1)} & {}^{(2)}S_{11}^{(1,2)} & \dots & {}^{(2)}S_{11}^{(1,P)} & {}^{(2)}S_{12}^{(1,1)} \\ {}^{(2)}S_{11}^{(2,1)} & {}^{(2)}S_{11}^{(2,2)} & \dots & {}^{(2)}S_{11}^{(2,P)} & {}^{(2)}S_{12}^{(2,1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ {}^{(2)}S_{11}^{(P,1)} & {}^{(2)}S_{11}^{(P,2)} & \dots & {}^{(2)}S_{11}^{(P,P)} & {}^{(2)}S_{12}^{(P,1)} \\ {}^{(2)}S_{21}^{(1,1)} & {}^{(2)}S_{21}^{(1,2)} & \dots & {}^{(2)}S_{21}^{(1,P)} & {}^{(2)}S_{22}^{(1,1)} \end{bmatrix}.$$

Рассчитана с использованием алгоритма объединения матриц частотная характеристика коэффициента передачи на основной моде ТЕМ-камеры в диапазоне частот от 0 до 30 МГц (рис. 8) при учете в регулярной части $P = 7$ собственных типов волн.

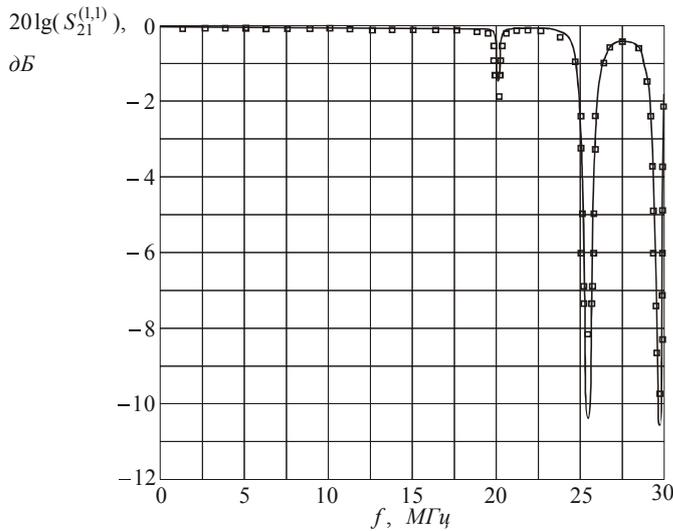


Рис. 8

ТЕМ-камеры подтверждаются проведенными экспериментальными измерениями (точки на рис. 8). Экспериментально измеренные резонансные частоты совпадают с теоретически рассчитанными с погрешностью менее 3%, что подтверждает адекватность предложенной расчетной модели ТЕМ-камеры.

Для определения собственного типа волны, обуславливающего резонансы, ко входам многополюсников, соответствующим тем типам волн, которые необходимо исключить из анализа, следует подключить согласованные нагрузки. В результате этого в алгоритме расчета внешних электродинамических характеристик будут учитываться только анализируемые типы волн.

Установлено, что резонансы обусловлены 5-ым собственным типом волны регулярной части ТЕМ-камеры.

Получено соотношение для расчета коэффициента передачи ТЕМ-камеры по основному типу волны при учете в ее регулярной части первого и пятого собственных типов волн.

$$S_{21}^{(1,1)} = \begin{bmatrix} {}^{(2)}S_{21}^{(1,1)} & {}^{(2)}S_{21}^{(1,5)} \end{bmatrix} \cdot \left([E] - \begin{bmatrix} {}^{(1)}S_{22}^{(1,1)} e^{-i2\theta_1} & {}^{(1)}S_{22}^{(1,5)} e^{-i(\theta_1+\theta_5)} \\ {}^{(1)}S_{22}^{(5,1)} e^{-i(\theta_1+\theta_5)} & {}^{(1)}S_{22}^{(5,5)} e^{-i2\theta_5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{(2)}S_{11}^{(1,1)} & {}^{(2)}S_{11}^{(1,5)} \\ {}^{(2)}S_{11}^{(5,1)} & {}^{(2)}S_{11}^{(5,5)} \end{bmatrix} \right)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} {}^{(1)}S_{21}^{(1,1)} \\ {}^{(1)}S_{21}^{(5,1)} \end{bmatrix},$$

Из представленной зависимости следует, что в ТЕМ-камере наблюдаются резонансы. На этих резонансных частотах структура поля в регулярной части искажается, и результаты проведения испытаний на электромагнитную совместимость становятся недостоверными.

Представленные результаты расчета частотной зависимости коэффициента передачи

где $[E]$ - единичная матрица.

Резонансы соответствуют минимуму коэффициента передачи на основной моде ТЕМ-камеры. В приближении слабой связи основного типа волны с 5-ым высшим типом аналитическое выражение условия резонанса имеет вид

$${}^{(1)}\varphi_{22}^{(5,5)} + 2\theta_5 + {}^{(2)}\varphi_{11}^{(5,5)} = 2\pi k, \quad (4)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$,

θ_5 - фазовый набег 5-го типа волны в регулярной части ТЕМ-камеры,

${}^{(1)}\varphi_{22}^{(5,5)}$, ${}^{(2)}\varphi_{11}^{(5,5)}$ - фазовые углы коэффициента отражения 5-го типа волны соответственно от 1-го и 2-го пирамидальных переходов.

На рис. 9 представлена рассчитанная частотная зависимость суммарного фазового сдвига $\varphi_\Sigma = {}^{(1)}\varphi_{22}^{(5,5)} + 2\theta_5 + {}^{(2)}\varphi_{11}^{(5,5)}$ для ТЕМ-камеры.

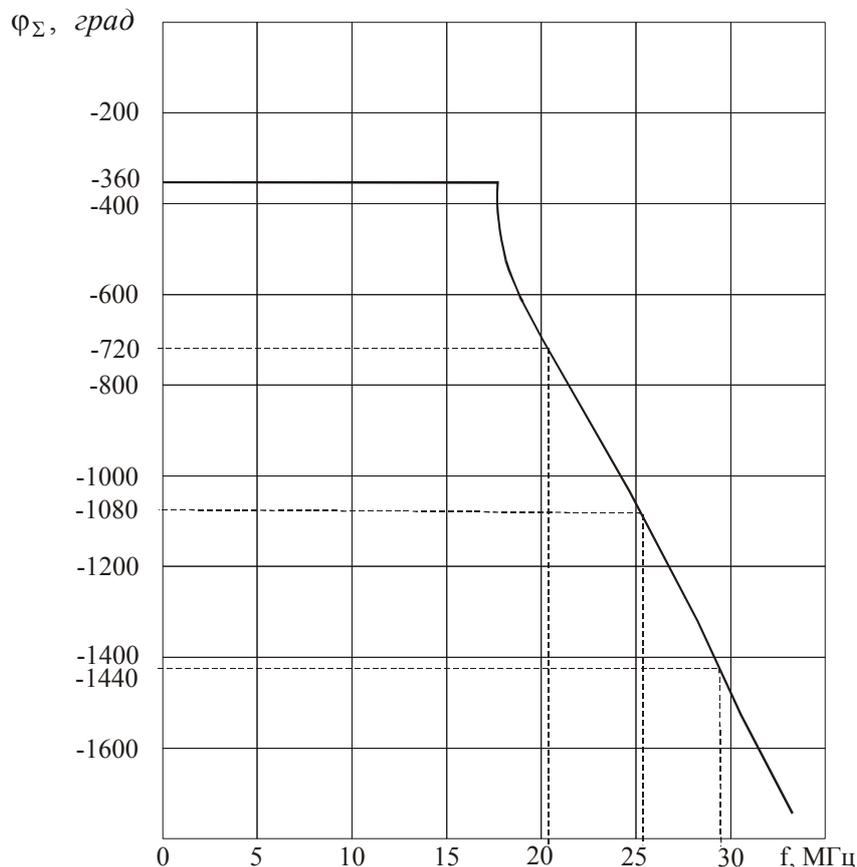


Рис. 9

Из представленных результатов видно, что условия резонанса, описываемые соотношением (4), выполняются для частот 20, 25.8 и 29.6 МГц, что соответствует ранее проведенным расчетам и результатам экспериментальных исследований.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Предложен метод расчета внешних электродинамических характеристик нерегулярных линий передач с использованием многомодовых матриц рассеяния, применимый для расчета нерегулярных линий передач любого типа.

2. Предложен метод расчета частотной характеристики ТЕМ-камеры с использованием многомодовой матрицы рассеяния, позволяющий учесть в ее регулярной части все распространяющиеся типы волн.

3. Предложен метод идентификации собственных типов волн, обуславливающих возбуждение резонансов в ТЕМ-камере.

4. В рамках численного эксперимента произведен расчет ТЕМ-камеры с поперечными размерами регулярной части $18 \text{ м} \times 8 \text{ м}$, шириной центрального проводника $11,2 \text{ м}$, расположенного симметрично относительно центра ТЕМ-камеры, и продольными размерами: регулярной части – 8 м ; двух пирамидальных переходов на входе и выходе регулярной части – соответственно $8,45 \text{ м}$ и $10,36 \text{ м}$. Расчет показал, что при частотах свыше $8,33 \text{ МГц}$ в регулярной части ТЕМ-камеры распространяются кроме основной Т-волны высшие типы волн; размеры рабочей зоны ТЕМ-камеры можно увеличить в $1,2$ раза по сравнению с рекомендуемым ГОСТ Р 51048-97 при требуемой неравномерности поля в рабочей области менее 3 дБ .

С помощью предложенных методов:

– рассчитаны многомодовые матрицы рассеяния пирамидальных переходов ТЕМ-камеры с относительной погрешностью расчета элементов матриц не более 10^{-6} , которая обеспечивается при числе разбиений $N > 10$ и числе учитываемых собственных типов волн $P = 10$;

– рассчитана частотная характеристика ТЕМ-камеры и определены ее резонансные частоты, численно равные 20 , $25,8$ и $29,6 \text{ МГц}$; на этих частотах электромагнитное поле в регулярной части становится неоднородным, что препятствует проведению испытаний на электромагнитную совместимость;

– определено, что резонансы в ТЕМ-камере обусловлены пятым собственным типом волны в ее регулярной части; установлено, что причиной возбуждения этого типа волны является наличие в ТЕМ-камере пирамидальных переходов; получено выражение для расчета резонансных частот ТЕМ-камеры.

Основные результаты опубликованы:

– в ведущих рецензируемых журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией:

1. Казанский, Н.Л. Расчет характеристик нерегулярных линий передач [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.А. Рахаева // Антенны. – 2007. – №10. – С. 51-55.

2. Казанский, Н.Л. Расчет характеристик пирамидального перехода ТЕМ-камеры [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.А. Рахаева // Известия Самарского научного центра РАН. – 2007. – Т.9. – №3. – С. 598 – 605.

3. Казанский, Н.Л. Расчет частотной характеристики ТЕМ-камеры [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.А. Рахаева // Компьютерная оптика. – 2007.– Т. 31. - № 3. – С. 52 - 54.
4. Казанский, Н.Л. Метод расчета резонансных характеристик ТЕМ-камеры [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.А. Рахаева // Компьютерная оптика. – 2007.– Т. 31. - № 3. – С. 55 - 58.

– в других изданиях:

5. Пат. 2234767 Российская Федерация, МПК⁷H01P1/15. Диодный выключатель [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.А. Рахаева; заявитель и патенто-обладатель Институт систем обработки изображений Российской академии наук.- № 2002132350/09; заявл. 02.12.2002.
6. Рахаева, Е.А. Соотношения для расчета составляющих электромагнитных полей в полосковых линиях [Текст] / Е.А. Рахаева, Н.Л. Казанский // Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы радиоэлектроники». - Самара: НТЦ. - 2003. - С. 23-24.
7. Подлипов, Г.А. Соотношения для расчета составляющих электромагнитных полей в полосковых линиях [Текст] / Г.А. Подлипов, Е.А. Рахаева, Н.Л. Казанский // Межвузовский сборник научных работ. – Самара: СГАУ. - 2003. -№ 4. - С. 63-65.
8. Казанский, Н.Л. Расчет структур полей собственных волн в Т-камере [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.А. Рахаева, Г.А. Подлипов // Труды Всероссийской научной конференции «Математическое моделирование и краевые задачи». – Самара: Самарский государственный технический университет. – 2004. - С. 110-112.
9. Рахаева, Е.А. Расчет диаграммы типов колебаний в экранированной симметричной полосковой линии [Текст] / Е.А. Рахаева, Н.Л. Казанский, Г.А. Подлипов // Вестник СГАУ, серия "Актуальные проблемы радиоэлектроники". - Самара: СГАУ. – 2004. - С. 77-80.
10. Рахаева, Е.А. Структура собственных типов волн электромагнитного поля в экранированной симметричной полосковой линии передачи [Текст] / Е.А. Рахаева, Н.Л. Казанский // Вестник СГАУ, серия "Актуальные проблемы радиоэлектроники". - Самара: СГАУ. - 2004. – С. 81-83.
11. Казанский, Н.Л. Расчет характеристик электромагнитного поля в ТЕМ-камере [Текст] / Н.Л. Казанский, Г.А. Подлипов, Е.А. Рахаева, М.А. Саржин, Рахаев А.А. // Восьмая Российская научно-техническая конференция по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. - Санкт-Петербург. – 2004. - С. 504-507.
12. Kazansky, N.L. Calculation of electromagnetic field characteristics in TEM-cell [Text] / N.L. Kazansky, G.A. Podlypnov, E.A. Rakhaeva, M.A. Sarzhin // 6th International Symposium On Electromagnetic Compatibility And Electromagnetic Ecology. - Saint-Petersburg. – 2005. - Pp. 226-228.
13. Казанский, Н.Л. Дисперсионные характеристики собственных типов волн регулярной части ТЕМ-камеры [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.А. Рахаева // Сборник тезисов докладов «Третья летняя школа молодых ученых по

- дифракционной оптике и обработке изображений». — Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет. - 2005. – С. 41-43.
14. Рахаева Е.А. Структуры полей и дисперсионные характеристики симметричной полосковой линии [Текст] / Е.А. Рахаева // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов V Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Самара: Самарское книжное издательство. – 2006. - С. 31-32.
 15. Рахаева Е.А. Определение рабочего объема ТЕМ-камеры [Текст] / Е.А. Рахаева // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов V Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Самара: Самарское книжное издательство. – 2006. - С. 269-270.
 16. Казанский, Н.Л. Расчет размеров рабочей зоны ТЕМ-камеры [Текст] / Н.Л. Казанский, Е.А. Рахаева, Г.А. Подлипнов, М.А. Саржин, В.В. Сухов // 9 Российская научно-техническая конференция по электромагнитной совместимости и электромагнитной безопасности. - Санкт-Петербург. – 2006. - С. 551-554.
 17. Rakhaeva, E.A. Research of resonance effects in TEM-cell [Text] / E.A. Rakhaeva, N.L. Kazansky, G.A. Podlypnov, A.A. Rakhaev, V.V. Suhov, M.A. Sarzhin // 7th International Symposium On Electromagnetic Compatibility And Electromagnetic Ecology. - Saint-Petersburg. – 2007. - Pp. 104-106.
 18. Рахаева Е.А. Расчет внешних электрических характеристик нерегулярных линий передач [Текст] / Е.А. Рахаева // Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов VI Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». – Казань. – 2007. – С. 110 – 111.