

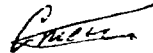
0 7 2 3 4 3 8 - 1

СТЕЦАНОВ ВЛАДИМИР ВИКТОРОВИЧ

СИНТЕЗ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СВЧ
ЭНЕРГИИ В МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
УСТАНОВКАХ

Специальность: 05.12.07 - Антенны, устройства СВЧ
и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Казань 2001

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.И. Туполева

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Седелников Ю.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Даутов О.Ш.

кандидат технических наук
Головин Е.М.

Ведущая организация: ООО "ЭМА" Экологическая и медицинская аппаратура
(научные исследования и разработки)
г. Каменск-Уральский.

Защита состоится "8" сентября 2001 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.079.04 при Казанском государственном техническом университете им. А.И. Туполева по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технического университета им. А.И. Туполева.

Автореферат разослан "11" сентября 2001 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000977447

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Козлов В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние два десятилетия в ряде стран значительно возрос интерес к микроволновым технологиям, которые прекрасно зарекомендовали себя в промышленности, сельском хозяйстве, быту и в других сферах человеческой деятельности. Микроволновые технологии основаны на использовании эффекта воздействия сверхвысокочастотных электромагнитных полей на материальную среду, в результате чего происходит более или менее равномерный ее нагрев.

В большинстве случаев используемые в практике микроволновые технологические установки (МВТУ) представляют собой замкнутые камеры, в которые помещают обрабатываемые материалы, обладающие, как правило, полупроводящими свойствами. В свою очередь замкнутые СВЧ камеры эквивалентны многомодовым частично заполненным резонаторам с относительно низкодобротными собственными модами. При выполнении условий возбуждения могут возникнуть различные типы колебаний, которые различаются по фазе и пространственному распределению электромагнитной энергии. В результате интерференции колебаний образуется более сложная структура поля. Объемные полые резонаторы, их возбуждение, анализ электромагнитных полей рассматривались в работах Вайнштейна Л.В., Григорьева А.Д., Янкевича В.Б., Маркова Г.Т., Чаплина А.Ф., Никольского В.В., Войтовича Н.Н., Каценеленбаума А.Н. и других ученых. Однако, крайне мало работ посвящено рассмотрению частично заполненных резонаторов и определению распределения СВЧ энергии в заполняющем материале.

Когда воздействие СВЧ энергии связано с нагревом материала, вводится понятие «требуемые характеристики поля», означающее получение заданного пространственного распределения выделяемой мощности, т.е. величины пропорциональной квадрату модуля напряженности электрического поля. В большинстве случаев для эффективной СВЧ обработки материалов требуется обеспечить равномерное распределение энергии по их объему, что является одной из серьезных проблем создания технологических СВЧ установок. Например, возникают трудные задачи создания равномерного нагрева полимеров, имеющих малую теплопроводность, особенно при разработке поточных линий массового изготовления, когда операцию нагрева надо включать в общую технологическую линию всего цикла работ.

Объемные резонаторы с малым числом видов колебаний практически непригодны для равномерного нагрева диэлектрических изделий большого объема. В областях с большой напряженностью поля будет наблюдаться перегрев, а остальные части изделия будут нагреваться слабо.

Описанные в отечественной и зарубежной литературе способы получения равномерного распределения поля в объемном резонаторе, основанные на возбуждении большого числа колебаний в камере одним возбуждающим элементом, используя подвижные или неподвижные возмущающие средства в виде нерегулярностей, возвратно-поступательных или вращающихся отражателей (диссекторов), вращающихся столиков и т.п.,

не всегда дают желаемую равномерность и математически не описываются. Напротив, интерференция типов колебаний может привести к существенно неравномерному характеру поля в заполненной части камеры.

Необходимо отметить, что задачи синтеза полей в резонаторах в отличие от задач анализа являются крайне малоизученными и редко освещаемыми в литературе, и в настоящее время не существует никакой универсальной методики синтеза.

Таким образом, на сегодняшний день является актуальным получение решений для различных задач, связанных с обеспечением более эффективного возбуждения, в число которых входит задача разработки численных процедур и методики синтеза равномерного распределения СВЧ энергии.

Цель работы. Повышение однородности распределения СВЧ энергии в заполненной части прямоугольной СВЧ камеры при многоэлементном возбуждении.

Решаемые задачи.

1. Построение математической модели многоэлементного возбуждения прямоугольной частично заполненной СВЧ камеры.
2. Выбор критерия и построение методики синтеза равномерных распределений.
3. Решение задач оптимизации для когерентного и некогерентного многоэлементного возбуждения.
4. Сравнительный анализ возможностей повышения равномерности распределения при различных параметрах материала, типах возбуждений и используемых возбуждающих элементах.

Методы исследований. Методы вычислительной электродинамики и математической физики. Численные методы оптимизации: динамическое программирование; симплексный метод. Метод псевдообратной матрицы при решении переопределенной системы уравнений.

Научная новизна заключается в том, что впервые:

1. Построены математические модели частично заполненной рабочей камеры при многоэлементном возбуждении излучателями различного типа.
2. Сформулированы и решены задачи нахождения амплитудно-фазового распределения токов возбуждающих элементов, обеспечивающих повышение равномерности распределения СВЧ энергии.
3. Разработана и апробирована методика синтеза равномерного распределения удельной поглощенной СВЧ энергии в материале.
4. Предложена методика организации равномерной обработки материала.
5. Получены сравнительные данные эффектов повышения равномерности для материала с разбросом в параметрах для различных типов возбуждений и используемых возбуждающих элементов.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечиваются выбором модели возбуждения резонатора достаточно адекватной по отношению к реальной СВЧ камере, применением известных численных методов оптимизации при построении методики синтеза равномерного

КАЗАНСКОГО ГОС. УНИВЕРСИТЕТА
им. Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО

распределения СВЧ энергии.

Практическая ценность. Результаты работы в виде предложенных методик позволяют повысить равномерность распределения СВЧ энергии в обрабатываемом материале, что необходимо для совершенствования многочисленных технологических процессов. Разработанные численные процедуры и методика синтеза равномерного распределения СВЧ энергии для материала, обладающим некоторым разбросом в электрических параметрах, посредством отыскания оптимального амплитудно-фазового распределения токов возбуждающих элементов могут применяться при проектировании СВЧ камеры прямоугольной формы. Также открывается перспектива автоматического управления амплитудно-фазовым распределением токов с целью синтеза любого заданного распределения СВЧ энергии. Приведенный сравнительный анализ качества распределения в зависимости от количества, типов возбуждающих элементов, способов многоэлементного возбуждения и от электрических параметров материала дает основания для практических рекомендаций по выбору оптимального способа возбуждения проектируемой СВЧ камеры.

Научные положения выдвигаемые на защиту.

1. Модели многоэлементного возбуждения прямоугольного резонатора различными типами излучателей.
2. Методики расчета оптимального амплитудно-фазового распределения токов элементов при когерентном многоэлементном возбуждении и амплитудного распределения при некогерентном возбуждении
3. Методика и результаты синтеза равномерного распределения СВЧ энергии.
4. Результаты сравнительного анализа критерия равномерности распределения при когерентном и некогерентном возбуждениях, а также при различных параметрах материала.

Практическое использование результатов работы.

Результаты работы в виде методик и численных данных анализа использованы в НИР и НИОКР, проводимых НИЦПРЭ КГТУ им. А.Н. Туполева, по проектированию микроволновых технологических установок.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 7-ой Международной Крымской конференции “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, 1997 г.), на 3-ей Республиканской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (Казань, 1997 г.), на 9-ой Международной конференции молодых ученых “Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений” (Казань, 1998 г.), на 7-й Международной конференции по микроволновому и высокочастотному нагреву (Ислания, Валесия, 1999 г.), на 10-ой Международной Крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2000 г.), на 7-й Международной конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2001 г.).

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе статей - 6, тезисов докладов - 2

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится описание области исследования, обосновывается актуальность работы, определяются научная новизна, цель работы, решаемые задачи, практическая ценность и дается краткое содержание работы.

Первая глава посвящена анализу литературных источников. Рассматривается современное состояние вопросов, связанных с практической реализацией МВТУ, обеспечением оптимальных режимов обработки материала, повышением равномерности поглощенной СВЧ энергии в материале, моделированием возбуждения резонаторов СВЧ установок, методами их электродинамического расчета, методами оптимизации целевой функции и задачами оптимального возбуждения.

Отмечается, что достаточно много работ посвящено анализу полей и собственных частот резонаторов, причем в большей степени изучены полые резонаторы. Возбуждение в большинстве случаев подразумевается одноэлементным и в некоторых источниках оптимизируется местоположение, ориентация излучателя для получения равномерного распределения СВЧ энергии. По вопросам многоэлементного возбуждения СВЧ камеры существует значительный пробел, также как и по вопросу разработки эффективных процедур синтеза равномерного распределения. Таким образом, определен назревающий к настоящему времени недостаток научного знания определяющий новизну и актуальность диссертационной работы.

Во второй главе строится модель СВЧ камеры при двух типах многоэлементного возбуждения (когерентного и некогерентного) как совокупность модели самой камеры и модели возбуждающего элемента. Описываются когерентная и некогерентная модели возбуждения (рис.1) и приводятся выражения для расчета электромагнитного поля и выделяемой СВЧ энергии.

Энергия, выделяющаяся в однородном материале, при когерентном и некогерентном возбуждении может быть представлена формулами (1) и (2) соответственно:

$$W_k(x, y, z) = \frac{\sigma}{2} \left| \sum_1^N \dot{E}_n(x, y, z) \right|^2, \quad (1)$$

$$W_n(x, y, z) = \frac{\sigma}{2} \sum_1^N \left| \dot{E}_n(x, y, z) \right|^2, \quad (2)$$

где $\dot{\vec{E}}_n(x, y, z)$ - напряженность электрического поля, создаваемая n-ым возбудителем, σ - удельная проводимость материала.

Путем подбора оптимального месторасположения излучателей и амплитуднофазового распределение возбуждающих токов открывается возможность управлять возбуждением тех или иных мод резонатора и, тем самым, синтезировать различные распределения СВЧ энергии внутри материала.

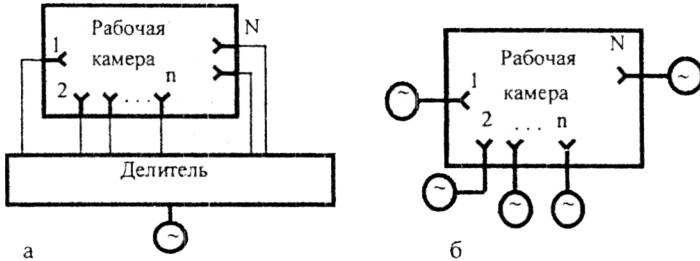


Рис.1. а) - когерентное возбуждение; б) - некогерентное возбуждение

СВЧ камера представляется в виде многомодового частично заполненного резонатора, для которого расчет поля от отдельного возбуждающего источника, в общем случае представляет, весьма сложную задачу. Для ряда простых форм, в частности прямоугольной, этот расчет может быть произведен на основе численных методов и методов вычислительной электродинамики.

В качестве математической модели частично заполненного резонатора прямоугольной формы выбрана модель, предложенная профессором Даутовым О.Ш. Резонатор представляется в виде двух отрезков короткозамкнутых волноводов прямоугольного сечения, один из которых полый, а другой заполнен обрабатываемым материалом с комплексной диэлектрической проницаемостью $\dot{\epsilon}_0 = \epsilon_{0a} - i \frac{\sigma}{\omega}$ (рис.2). Классификация волн на типы E и H производится относительно оси Z.

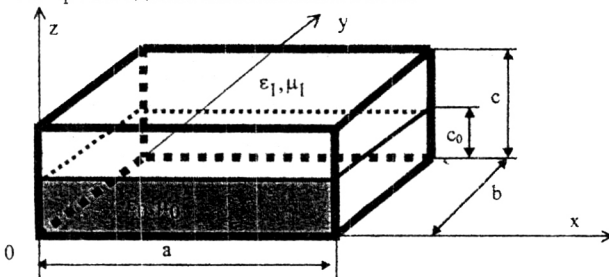


Рис.2. Частично заполненный прямоугольный резонатор

В рассмотрение возбуждения выбранной модели резонатора вводятся сторонние поверхностные электрические или магнитные токи, заменяющие собой действие излучателя на резонатор. Поле от отдельного возбуждающего элемента $\dot{\vec{E}}(x, y, z)$ представляется в виде разложения:

$$\dot{\vec{E}}(x, y, z) = \sum_{mnp} \left(\dot{A}_{mnp} \dot{\vec{E}}_{0mnp}^e(x, y, z) + \dot{B}_{mnp} \dot{\vec{E}}_{0mnp}^h(x, y, z) \right). \quad (3)$$

$\dot{\vec{E}}_{0mnp}^e(x, y, z)$ и $\dot{\vec{E}}_{0mnp}^h(x, y, z)$ - электрические поля собственных мод с индексами m, n, p колебаний электрического и магнитного типов соответственно, \dot{A}_{mnp} и \dot{B}_{mnp} - коэффициенты, имеющие смысл амплитуд собственных волн при возбуждении поверхностными токами:

$$\dot{A}_{mnp} = - \frac{i \left(\omega \int_S \dot{\vec{\eta}}^e \dot{\vec{E}}_{0mnp}^e ds + \omega_{mnp}^e \int_S \dot{\vec{\eta}}^m \dot{\vec{H}}_{0mnp}^e ds \right)}{\left(\omega^2 - \left(\omega_{mnp}^e \right)^2 \right) \left(\int_{V_0} \dot{\epsilon}_0 \left| \dot{\vec{E}}_{0mnp}^e \right|^2 dv + \int_{V_1} \dot{\epsilon}_1 \left| \dot{\vec{E}}_{0mnp}^e \right|^2 dv \right)}, \quad (4)$$

$$\dot{B}_{mnp} = - \frac{i \left(\omega \int_S \dot{\vec{\eta}}^e \dot{\vec{E}}_{0mnp}^h ds + \omega_{mnp}^h \int_S \dot{\vec{\eta}}^m \dot{\vec{H}}_{0mnp}^h ds \right)}{\left(\omega^2 - \left(\omega_{mnp}^h \right)^2 \right) \left(\int_{V_0} \dot{\epsilon}_0 \left| \dot{\vec{E}}_{0mnp}^h \right|^2 dv + \int_{V_1} \dot{\epsilon}_1 \left| \dot{\vec{E}}_{0mnp}^h \right|^2 dv \right)}, \quad (5)$$

где ω - частота возбуждения, $\omega_{mnp}^{e,h}$ - собственные частоты, $\dot{\vec{\eta}}^{e,m}$ - возбуждающие электрические и магнитные токи.

Распределение электрического поля зависит от типа возбуждающих элементов и их размещения. Так, при возбуждении резонатора с верхней стенки штырем возникают поля E типа, а при возбуждении щелью возникают поля как E , так и H типов.

В работе рассматриваются возбуждения четвертьволновыми штырями (вибраторами) и полуволновыми щелями, описываются модели отмеченных излучателей при возбуждении резонатора, а также рассчитываются интегралы, входящие в числители формул (4), (5).

Таким образом, зная параметры материала, размеры резонатора и возбуждающие токи, поля собственных мод $\dot{\vec{E}}_{0mnp}^e(x, y, z)$ и $\dot{\vec{E}}_{0mnp}^h(x, y, z)$, амплитуды \dot{A}_{mnp} и \dot{B}_{mnp} по формулам (1), (2) определяется распределение СВЧ энергии. Соотношение (3) может использоваться в качестве прямого оператора задачи оптимизации.

Для оценки равномерности распределения СВЧ энергии и наличия возможности сравнения между собой различных распределений в работе предлагается и обосновывается использование в качестве критерия равномерности отношение среднеквадратического отклонения к среднему. При обосновании применяется вероятностный подход, при котором значение удельной поглощенной СВЧ энергии для случайно распределенной точки в объеме камеры считается случайной величиной с некоторой плотностью распределения.

В рамках решаемых задач под оптимальным распределением энергии подразумевается ее равномерное распределение.

Приведенные результаты расчетов произвольных многоэлементных возбуждений позволяют заключить, что существуют такие способы возбуждения, месторасположение элементов, амплитуднофазовые распределения возбуждающих токов, что достигается улучшение равномерности распределения СВЧ энергии по объему материала.

В третьей главе решаются задачи построения процедур синтеза равномерного распределения. Рассматриваются две процедуры синтеза. Первая процедура основана на численных методах оптимизации распределения. Производится поиск минимума выбранного критерия равномерности. Варьируемыми параметрами являются амплитуды и фазы возбуждающих элементов, расположение которых считается фиксированным. Вторая процедура состоит в решении системы уравнений относительно неизвестных комплексных токов или их модулей (в зависимости от модели возбуждения), обуславливающих удовлетворительное заданное равномерное распределение. В результате обеих процедур получается распределение токов возбуждающих элементов, определяющее приближенное к равномерному распределение СВЧ энергии.

В общем случае задача численной оптимизации сводится к отысканию глобального экстремума функции с многими переменными. Решение такого рода задач разбивается на два этапа:

- 1) поиск точки в окрестности, которой наиболее вероятен глобальный экстремум - локализация экстремума;
- 2) поиск экстремума в окрестности точки, определенной на первом этапе, локальными методами оптимизации.

На первом этапе используется метод динамического программирования, который дает весьма рациональную возможность свести многомерную экстремальную задачу к последовательности одномерных задач.

На втором этапе решения задачи оптимизации из множества локальных методов оптимизации выбран наиболее привлекательный по своей прозрачности, эффективности и простоте симплексный метод.

Симплекс - геометрическая фигура, порожденная $n+1$ точкой в n -мерном пространстве. Поиск экстремума начинается с симплекса произвольной формы, но имеющий одну из вершин, определенную методом динамического программирования. Значение целевой функции вычисляется в $n+1$ вершине симплекса. В результате последовательных итераций симплекс

модифицируется, двигаясь к точке оптимума и сжимаясь вокруг нее. Симплекс преобразуется с помощью различных операций, таких как отражение, растяжение, редукция и сжатие.

В результате решения задачи численной оптимизации определяется оптимальное амплитудно-фазовое распределение, которому соответствует распределение СВЧ мощности $W_{\text{opt}}(x_i, y_j, z_k)$.

При организации второй процедуры синтеза требуется формирование системы уравнений. Заданным считается распределение СВЧ энергии $W_{\text{зад}}(x_i, y_j, z_k)$.

При когерентном возбуждении в силу (1), для составления системы уравнений производится переход от $W_{\text{зад}}(x_i, y_j, z_k)$ заданному электрическому полю $\dot{E}_{\text{зад}}(x_i, y_j, z_k)$, являющемуся суперпозицией электрических полей от отдельных возбуждающих элементов. Такой переход неоднозначен ввиду отсутствия предопределяющей связи между $W_{\text{зад}}$ и компонентами $\dot{E}_{x \text{ зад}}$, $\dot{E}_{y \text{ зад}}$ и $\dot{E}_{z \text{ зад}}$.

Если при численной оптимизации полученное распределение W_{opt} оказывается неудовлетворительным, то на основе уже известных W_{opt} и \dot{E}_{opt} формируется удовлетворительное распределение $W_{\text{зад}}$ и $\dot{E}_{\text{зад}}$. Каждая точка в распределении W_{opt} более или менее "подтягивается" к среднему значению таким образом, чтобы она попала в заранее выбранные гредель по минимуму и максимуму, т.е. сжатие приводит к выравниванию распределения. Преобразованное W_{opt} считается за $W_{\text{зад}}$. Соответствующее распределение напряженности электрического поля определяется как:

$$\dot{E}_{\text{зад}}(x_i, y_j, z_k) = \sqrt{\frac{W_{\text{зад}}(x_i, y_j, z_k)}{W_{\text{срт}}(x_i, y_j, z_k)}} \dot{E}_{\text{opt}}(x_i, y_j, z_k). \quad (6)$$

Система уравнений для когерентного возбуждения строится на основании (3), где $\dot{E}_{\text{отпр}}^{e,h}$ заменяется на \dot{E}_{0s} :

$$\dot{E}_{\text{зад}}(x_i, y_j, z_k) = \dot{i}^{(1)} \sum_s C_s^{(1)} \dot{E}_{0s} + \dot{i}^{(2)} \sum_s C_s^{(2)} \dot{E}_{0s} + \dots + \dot{i}^{(N)} \sum_s C_s^{(N)} \dot{E}_{0s}, \quad (7)$$

где $\dot{i}^{(n)}$ - искомый комплексный ток n-го элемента.

Запись (7) приводится к скалярной системе уравнений размерностью $[3M \times N]$, где M - количество рассматриваемых точек, N - количество элементов:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_x \\ \dots \\ \dot{q}_y \\ \dots \\ \dot{q}_z \end{bmatrix} \dot{i} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{x\text{зад}} \\ \dots \\ \dot{E}_{y\text{зад}} \\ \dots \\ \dot{E}_{z\text{зад}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Для удовлетворительного описания заданного распределения M велико и $3M \gg N$. При решении применяется метод псевдообратной матрицы, в результате чего получается такой вектор \dot{i} , для которого отклонения правых частей уравнений системы от левых минимальны по среднеквадратическому критерию близости:

$$\sum_{m=1}^{3M} \left| \sum_{n=1}^N \dot{i}^{(n)} \dot{q}_{x,y,z}^{(n)}(u_m) - \dot{E}_{x,y,z \text{ зад}}(u_m) \right|^2 \rightarrow \min_{\dot{i}^{(n)}}, \quad (9)$$

Вектор токов выражается следующим образом:

$$\dot{i} = \left[\dot{q}'_T \dot{q} \right]^{-1} \left[\dot{q}'_T \dot{E} \right], \quad (10)$$

где $\left[\dot{q}' \right]^*$ – комплексно-сопряженная и транспонированная матрица, $\left[\dot{q}' \right]^{-1}$ – обратная матрица.

Таким образом, для когерентного возбуждения определяется амплитудное $\left| I_{\text{опт}} \right\rangle$ и фазовое $\left| \varphi_{\text{опт}} \right\rangle$ распределения токов возбуждающих элементов, которым соответствует распределение удельной мощности, приближающееся к заданному.

При некогерентном возбуждении достаточно задать распределение $W_{\text{зад}}$, которое выражается из (2):

$$W_{\text{зад}}(x_i, y_j, z_k) = \sum_1^N \left| \dot{i}^{(n)} \right|^2 \left| \dot{q}_n(x_i, y_j, z_k) \right|^2. \quad (11)$$

Таким образом, решается система уравнений, относительно квадратов модулей токов возбуждающих элементов:

$$\left[\dot{q}' \right] I' = \left| W_{\text{зад}} \right\rangle \quad (12)$$

Решение скалярной системы уравнений (12) размерностью $[M \times N]$ методом псевдообратной матрицы позволяет определить оптимальное амплитудное распределение токов возбуждающих элементов $\left| I_{\text{опт}} \right\rangle$.

Приводится пример последовательного применения процедур синтеза распределения при пятиэлементном когерентном возбуждении СВЧ камеры прямоугольной формы четвертьволновым штырем. На рис.3,4 представлены картины нормированных к среднему распределений СВЧ энергии в выбранном сечении до и после применения процедур. Равномерность по сравнению с неоптимизированным распределением повысилась 1,5 раз по выбранному

критерию.

Для сравнения эффекта повышения равномерности при применении оптимального многоэлементного возбуждения на рис. 5 приведено распределение при одноэлементном возбуждении штырем. Равномерность распределения по выбранному критерию, получаемого после численной оптимизации улучшилась в 2,4 раза по сравнению с одноэлементным возбуждением.

Равномерность распределения при решении системы уравнений относительно получаемой равномерности после численной оптимизации практически не меняется, что подтверждает достаточно высокое приближение решение задачи оптимизации к глобальному экстремуму.

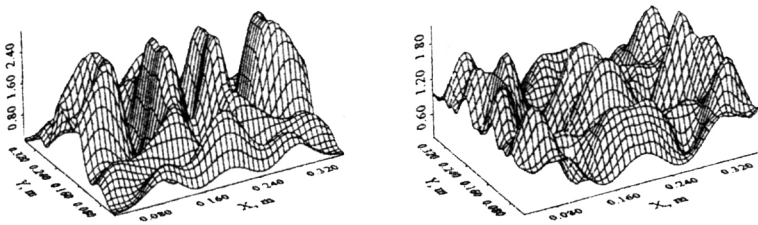


Рис.3. Нормированное к среднему распределение СВЧ энергии в сечении $Z=c_0/2$ при когерентном возбуждении пятью штырями: а) до оптимизации; б) после оптимизации.

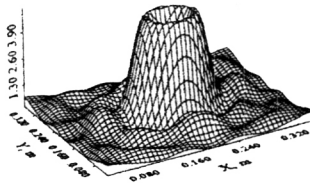


Рис.4. Нормированное к среднему распределение СВЧ энергии при одноэлементном возбуждении в сечении $Z=c_0/2$.

В четвертой главе описывается методика синтеза равномерного распределения для материала с некоторым разбросом в электрических параметрах. Приводятся результаты расчетов в виде графиков зависимостей критерия равномерности от параметров материала, количества и типа возбуждающих элементов, способа возбуждения. По графикам производится сравнительный анализ и выносятся рекомендации по выбору способа возбуждения при заданных параметрах СВЧ камеры и заполняющего

материала.

На рис.6 представлена схема методики синтеза равномерного распределения. Входными переменными являются диэлектрическая проницаемость, проводимость, число возбуждающих элементов. Расчет проводится по двум ветвям, соответствующим различным типам возбуждающих элементов. Каждая такая ветвь разделяется еще на две, соответствующих когерентному и некогерентному возбуждениям.

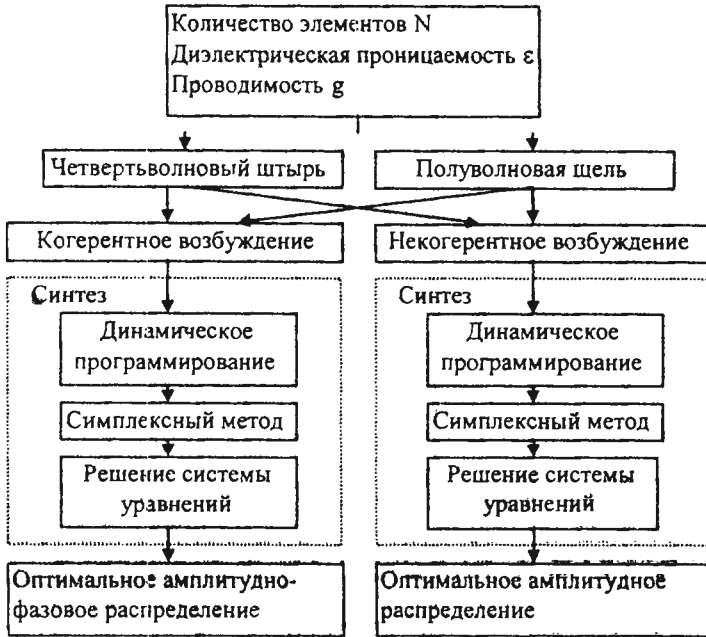


Рис.6. Схема методики синтеза равномерного распределения СВЧ энергии

В случае когерентного возбуждения для простоты рассмотрения амплитудное распределение токов излучателей считается равномерным, а поиску подлежит фазовое распределение, которое отыскивается методом динамического программирования и затем уточняется применением симплексного метода. В целях дальнейшего повышения равномерности распределения, полученного после применения симплексного метода, путем решения системы уравнения уточняется как амплитудное, так и фазовое распределение токов. На каждом этапе контролируется критерий равномерности. В результате получается оптимальное амплитудно-фазовое распределение токов излучателей.

В случае некогерентного возбуждения отыскивается только оптимальное амплитудное распределение по той же схеме: метод

динамического программирования, симплексный метод, решение системы уравнений.

Таким образом, синтез равномерного распределения разбивается на три этапа:

- 1) оптимизация распределения токов элементов методом динамического программирования;
- 2) дальнейшая оптимизация симплексным методом;
- 3) уточнение распределения токов путем решения системы уравнений.

На первом этапе входными параметрами являются:

- изменяемый параметр материала;
- значение изменяемого параметра материала;
- количество возбуждающих элементов;
- тип элементов;
- тип возбуждения.

При когерентном возбуждении определяются фазы элементов с шагом 45° . При некогерентном возбуждении сначала отыскиваются абсолютные амплитуды элементов с дискретным шагом, а затем проводится нормировка к максимальному значению амплитуды.

Выходными параметрами являются:

- критерий - Q_d ;
- оптимальное фазовое или амплитудное распределение;
- три дополнительных неоптимальных, но близкие к оптимальному, фазовые или амплитудные распределения.

На втором этапе входными параметрами являются входные и выходные параметры первого этапа. Выходные параметры следующие:

- критерий - Q_s ;
- оптимальное фазовое или амплитудное распределение.

Входные данные на третьем этапе представляют собой входные параметры первого этапа и выходные данные второго этапа. На выходе определяется результат всей процедуры синтеза:

- критерий - Q_c ;
- оптимальное амплитудно-фазовое или амплитудное распределение.

Приводятся результаты синтеза равномерного распределения по предложенной методике для наполовину заполненной прямоугольной СВЧ камеры. Исследовано поведение критерия равномерности при различных типах излучателей, их количестве и типах возбуждения в следующих случаях:

- $\epsilon = \text{const}$, $g \in (g - 50\%, g + 50\%)$;
- $g = \text{const}$, $\epsilon \in (\epsilon - 50\%, \epsilon + 50\%)$.

Параметры материала выбраны соответствующими типовым параметрам семян сельскохозяйственных культур: $\epsilon = 2,3$ и $g = 0,008$ См/м.

Результаты проведенных расчетов сведены в таблицы, по которым строятся графики зависимости критерия от одного из параметров материала при различном количестве возбуждающих элементов.

Для рассматриваемого в работе материала с выбранными параметрами, имеющими некоторый разброс, отмечено следующее:

- Зависимость критерия равномерности от проводимости материала при фиксированной диэлектрической проницаемости менее выражена по сравнению с зависимостью от диэлектрической проницаемости при фиксированной проводимости для любого вида возбуждения и количества возбуждающих элементов.
- При любых рассмотренных типах возбуждающих элементов некогерентное возбуждение эффективнее когерентного.
- При увеличении количества элементов происходит сначала улучшение показателя равномерности, затем процесс замедляется.
- Штыревое возбуждение предпочтительнее щелевого с точки зрения синтеза наиболее равномерного распределения СВЧ энергии и простоты реализации.

На рис.7 представлены графики зависимости среднего критерия равномерности Q_a от количества элементов при когерентном и некогерентном возбуждении. Среднее значение критерия вычисляется путем усреднения критерия при различных параметрах среды для конкретного способа возбуждения. На графики наносится допустимое значение критерия равномерности. Участки кривых, оказавшиеся ниже допустимого значения определяют необходимый вид возбуждения, тип и количество возбуждения.

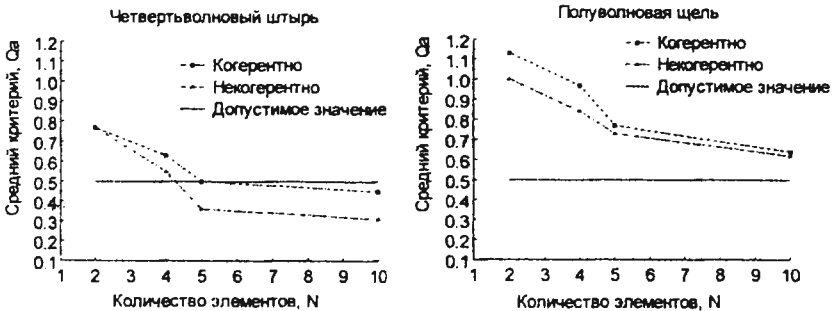


Рис.7

Таким образом, для выработки рекомендаций по организации равномерной обработки материала с известными параметрами и их отклонениями от типичных значений необходимо произвести действия по следующей методике:

- 1) Осуществить синтез равномерного распределения СВЧ энергии по предложенной методике синтеза, построить графики критерия равномерности
- 2) Построить графики среднего значения критерия равномерности от количества возбуждающих элементов (рис.7).
- 3) Определить допустимый уровень критерия равномерности и нанести

его на графики среднего критерия.

- 4) учитывая трудоемкость технической реализации, выбрать вид возбуждения, тип и количество возбуждающих элементов, которые обеспечивают значение критерия равномерности не выше допустимого.
- 5) Из предшествующих данных синтеза выбрать оптимальные амплитуды и фазы элементов для средних значений параметров материала.

Методика синтеза равномерного распределения СВЧ энергии при многоэлементном возбуждении применена на практике при проектировании нескольких микроволновых установок.

В заключении излагаются основные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложении приводятся программы процедур синтеза и акты внедрения результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Построена модель многоэлементного возбуждения частично заполненного прямоугольного резонатора. Получены соотношения для определения результирующего распределения СВЧ энергии для когерентного и некогерентного возбуждения штырем и щелью. Определен критерий равномерности распределения: минимум отношения среднеквадратического отношения к среднему.
2. Разработаны две процедуры синтеза равномерного распределения, в результате которых определяется оптимальное распределение токов возбуждающих элементов:
 - оптимизация распределения токов возбуждающих элементов методом динамического программирования, с последующей оптимизацией распределения симплексным методом;
 - решение системы уравнений относительно неизвестных комплексных токов или их модулей (в зависимости от модели возбуждения), обуславливающих удовлетворительное заданное равномерное распределение.
3. На основе разработанных процедур оптимизации найдены оптимальное амплитудно-фазовое распределение токов излучателей при когерентном многоэлементном возбуждении и оптимальное амплитудное распределение токов при некогерентном многоэлементном возбуждении.
4. Многоэлементное возбуждение способствует повышению равномерности распределения СВЧ энергии в обрабатываемом материале. Приведенный пример синтеза равномерного распределения при пятиэлементном когерентном возбуждении свидетельствует о повышении равномерности распределения СВЧ энергии по выбранному критерию в 2,4 раза по сравнению с одноэлементным возбуждением.
5. Разработана методика синтеза равномерного распределения СВЧ энергии:
 - 1) определение распределения токов возбуждающих элементов методом динамического программирования;

- 2) уточнение распределения токов симплексным методом;
 - 3) коррекция распределения токов путем решения системы уравнений.
6. Произведен сравнительный анализ различных способов многоэлементного возбуждения с различными типами излучателей для рассматриваемого в работе материала с разбросом в параметрах. Основные результаты:
 - Зависимость критерия от проводимости материала при фиксированной диэлектрической проницаемости менее выражена по сравнению с зависимостью от диэлектрической проницаемости при фиксированной проводимости для любого вида возбуждения и количества возбуждающих элементов.
 - При любых рассмотренных типах возбуждающих элементов некогерентное возбуждение эффективнее когерентного.
 - При увеличении количества элементов наблюдается относительно быстрое улучшение показателя равномерности, затем этот процесс замедляется.
 - Штыревое возбуждение предпочтительнее щелевого с точки зрения синтеза наиболее равномерного распределения СВЧ энергии и простоты реализации.
 7. Предложена методика по выработке практических рекомендаций по организации равномерной обработки материала при многоэлементном возбуждении проектируемой СВЧ камеры.
 8. Методика синтеза равномерного распределения СВЧ энергии и методика организации равномерной обработки материала при многоэлементном возбуждении применены на практике при проектировании нескольких микроволновых установок.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аяфиногентов В.И., Седелников Ю.Е., Степанов В.В., Потапова О.В. Многоэлементное возбуждение электромагнитных полей в СВЧ-технологических установках // 7-я Междунар. Крымская конф. "СВЧ техника и телекоммуникационные технологии", 15-18 сент. 1997 г.: Материалы конф. – Севастополь, 1997. С.200–201.
2. Степанов В.В. Улучшение равномерности электромагнитного поля в частично заполненных СВЧ-камерах прямоугольной формы / Казан. гос. техн. ун-т. - Казань, 1998. - 15 с. Деп. в ВИНИТИ 01.07.98. № 1996-В98.
3. Степанов В.В. Улучшение равномерности электромагнитного поля в частично заполненных СВЧ камерах прямоугольной формы. 3-я Республиканская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, тез. докл. Казань 1997 г.
4. Бадретдинов М.М., Степанов В.В. Возбуждение камер микроволновых установок для производства и обработки полимерных материалов // 9-я Междунар. конф. молод. ученых. «Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений» 19-21 мая 1998 г.: тез. докл. Казань, 1998. С.246.

5. Степанов В.В. Синтез равномерного распределения СВЧ энергии в частично заполненном резонаторе / Казан. гос. техн. ун-т. - Казань, 2000. - 24 с. Деп. в ВИНТИ 30.05.00. № 1551-В00.
6. Степанов В.В. Применение многоэлементного возбуждения для повышения равномерности распределения СВЧ энергии в частично заполненных СВЧ камерах // 10-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» 11-15 сент. 2000 г.: Материалы конф., Севастополь, 2000. С.589–590.
7. Степанов В.В. Оптимизация равномерного распределения СВЧ энергии в частично заполненном резонаторе // 10-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии» 11-15 сент. 2000 г.: Материалы конф. Севастополь, 2000. С.591–593.
8. Седельников Ю.Е., Степанов В.В. Повышение равномерности энергии электромагнитных полей в микроволновых установках при многоэлементном возбуждении. // 7-я Междунар. конф. «Радиолокация, навигация, связь» 24-26 апреля 2001 г.: Сборник докл., Воронеж, 2001. С.632-639.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1.0. Усл.печ.л.0.93 Усл.кр.-отт. 0.98. Уч.изд.л.1.02.
Тираж 100. Заказ 576.

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета
420111, Казань, К. Маркса, 10.

2