

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СВЧ НАГРЕВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Ю. М. Федюшко, доктор технических наук

А. Ю. Федюшко, инженер

*Таврический государственный агротехнологический
университет*

e-mail: nni.energy@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены вопросы определения изменения электрофизических параметров диэлектриков микроволновыми технологическими установками.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость, коэффициент затухания, технологический комплекс, СВЧ обработка

Известно, что изменение температуры диэлектрика приводит к изменению его электрофизических параметров, таких как комплексная диэлектрическая проницаемость, коэффициент затухания, коэффициенты теплопроводности, теплоемкости и плотности. Для учета изменения этих параметров при математическом моделировании СВЧ нагрева необходимо проведение предварительных экспериментов, позволяющих выявить вид зависимости этих параметров от температуры.

Цель исследований - обоснование подхода, состоящего в сборе и обработке изменяющейся в процессе СВЧ обработки информации непосредственно в процессе функционирования микроволнового технологического комплекса.

Материал и методика исследований. Микроволновые технологические установки осуществляют специально организованное воздействие электромагнитной энергии СВЧ и КВЧ диапазонов (СВЧ обработку) на материалы, вещества и биологические объекты с целью изменения их свойств. При высокой интенсивности и большой длительности воздействия электромагнитной энергии происходит значительное повышение температуры диэлектрика с возможным изменением фазового состояния.

Проектирование и разработка универсальных микроволновых технологических установок зачастую сдерживается тем, что отсутствуют адекватные математические модели процессов распространения электромагнитных и тепловых полей в диэлектриках. Сложность ситуации заключается в том, что электрические и теплофизические параметры диэлектрика (диэлектрическая проницаемость, коэффициент затухания, коэффициент теплопроводности, скорость перемещения диэлектрика и др.), а также напряженность электрического поля изменяются при

изменении температуры. Зависимость этих параметров от температуры может быть определена, как правило, лишь экспериментально.

Однако, в реальности может оказаться, что диэлектрики, подлежащие СВЧ обработке, имеют зависимости этих параметров от температуры, отличающиеся от полученных в эксперименте. Так, например, при СВЧ обработке многокомпонентных смесей даже незначительное изменение процентного содержания входящих в нее компонентов может привести к заметному изменению зависимости этих параметров от температуры. Поэтому микроволновая технологическая установка должна отслеживать эти изменения и достаточно быстро автоматически подстраиваться.

Результаты исследований. В процессе СВЧ обработки должно осуществляться такое управление длительностью и амплитудой импульсов, подаваемых на анод магнетронов многоэлементной системы возбуждения электромагнитного поля, в результате которого будет достигнуто и будет поддерживаться требуемое распределение температурного поля в диэлектрике.

В последнем случае управление осуществляется на основе построенной математической модели, параметры которой при необходимости корректируются.

Поэтому микроволновую технологическую установку (рис. 1.) будем рассматривать в виде системы автоматического управления с адаптацией параметров математической модели по измеренным значениям параметров диэлектрика (диэлектрическая проницаемость, коэффициент затухания, скорость перемещения диэлектрика, напряженность электрического поля и др.), изменяющихся при изменении температуры диэлектрика.

Очевидно, что работа подобной микроволновой технологической установки будет носить циклический характер, при котором будут чередоваться циклы управления и циклы коррекции параметров и структуры математической модели.

Пусть после i циклов управления величина критерия рассогласования ΔT температуры диэлектрика $T_i(\vec{r})$, измеренной в блоке 4, и расчетной температуры $\tilde{T}_i(\vec{r})$, вычисленной в блоке 5, больше δ , где δ – допустимая величина погрешности математической модели. В блоке 6 формируется команда, по которой в блоке 3 отключается питание магнетрона, а в блоке 4 производится измерение диэлектрической проницаемости ϵ , коэффициента затухания α и др.

В блоке 5 по вновь измеренным значениям параметров диэлектрика вычисляется температура $\tilde{T}_i(\vec{r})$. Если величина критерия рассогласования $\Delta T < \delta$, то в блоке 6 формируется команда на включение питания магнетрона в блоке 3. Если же $\Delta T > \delta$, что возможно, например, либо при слишком большой погрешности измерений, либо за счет появления другого источника теплоты, то в этом случае после анализа

ситуации и устранения причин процесс управления и контроля может быть продолжен в соответствии с предложенным алгоритмом.

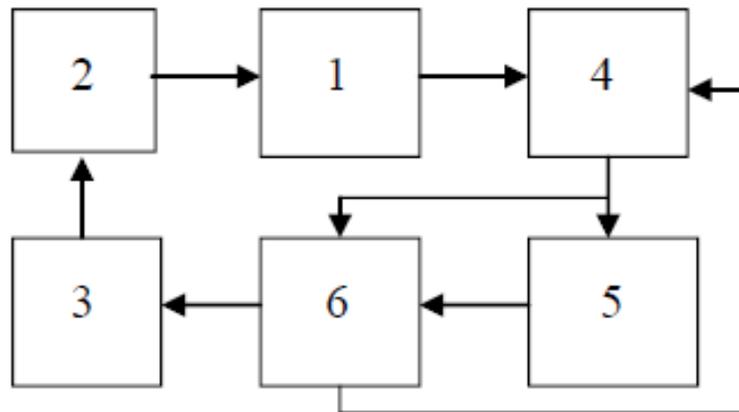


Рис.1. Обобщенная структурная схема микроволнового технологического комплекса:

1 – камера СВЧ обработки (она может быть открытого или закрытого типа, в виде отрезка прямоугольного или цилиндрического волновода заполненного диэлектриком полностью или частично); 2 – блок излучателей электромагнитного поля (электромагнитное поле в камере СВЧ нагрева может быть создано системой щелевых, рупорных или штыревых излучателей и др.);

3 – блок питания камеры (источник питания, магнетрон, работающий в непрерывном или импульсном режиме и линия передачи); 4 – блок измерения параметров диэлектрика (температуры, диэлектрической проницаемости, коэффициента затухания и др.) и электромагнитного поля; 5 – блок математического моделирования (вычислительный блок, в котором осуществляется расчет температуры диэлектрика по выбранной математической модели и измеренным значениям параметров диэлектрика, параметрам камеры СВЧ и параметрам электромагнитного поля); 6 – блок сравнения (осуществляет на основе определенного критерия рассогласования формирование команды на переход от процесса управления к процессу коррекции параметров математической модели по результатам измерения параметров диэлектрика и параметров электромагнитного поля).

При этом под контролем будем понимать формирование текущего состояния электромагнитного и теплового полей в виде непрерывных функций пространственных координат. С этой задачей тесно связана задача осуществления максимально достоверного контроля полей при ограниченном числе датчиков.

Восстановление полей в виде непрерывных функций пространственных координат по результатам измерения в дискретной совокупности точек становится возможным лишь благодаря наличию априорной информации о свойствах измеряемых полей.

Для выбора точек контроля предлагаются подходы, основанные на учете более полной априорной информации о подлежащих контролю полях.

В каждом цикле измерения эти поля описываются детерминированными, но заранее неизвестными функциями пространственных координат, изменяющимися от одного цикла измерения к другому. В связи с этим функцию $T(\vec{x})$, описывающую зависимость температурного поля от пространственных координат, будем считать реализацией из некоторого статистического ряда функций. Изложим предлагаемый подход к проектированию системы контроля температурного поля, а в последствии покажем, как его можно применить для контроля электромагнитного поля.

Зададимся достаточно большим числом базисных функций $T_i(\vec{x})$. Тогда любую реализацию можно представить с требуемой точностью в виде разложения по базисным функциям

$$T(\vec{x}) = \sum_{i=1}^1 \alpha_i T_i(\vec{x}), \quad (1)$$

где α_i – коэффициенты, имеющие случайный характер и однозначно определяющие конкретную реализацию температурного поля.

Их статистические характеристики могут быть определены, например, путем цифрового моделирования или экспериментального измерения в лабораторных условиях достаточно полного набора реализаций температурного поля. В дальнейшем предполагается, что α_i – центрированные случайные величины, распределенные по нормальному закону с заданной матрицей корреляции R .

Синтез системы контроля пространственного поля (электромагнитного или температурного) включает две основные задачи: определение координат m \vec{x}_m размещения умеренного числа M датчиков и восстановление непрерывной функции $T(\vec{x})$ по измеренным значениям поля в точках контроля $\tilde{T}(\vec{x}_1), \tilde{T}(\vec{x}_2), \tilde{T}(\vec{x}_m)$.

Восстановление непрерывной реализации поля по значениям в точках контроля сводится к определению по некоторому правилу оценок $\tilde{\alpha}_i$ коэффициентов α_i . Восстановленная реализация поля имеет вид

$$\tilde{T}(\vec{x}) = \sum_{i=1}^1 \tilde{\alpha}_i T_i(\vec{x}). \quad (2)$$

Точность восстановления поля оцениваем следующим выражением:

$$\delta^2 = \frac{M \|T(\vec{x}) - \tilde{T}(\vec{x})\|^2}{M \|T(\vec{x})\|^2}, \quad (3)$$

где символом M обозначено усреднение по множеству реализаций подлежащих восстановлению полей.

Если функции контроля $T_1(\vec{x})$, $T_2(\vec{x})$, $T_m(\vec{x})$ образуют ортонормированную систему функций, то величина, определяющая близость функций $T(\vec{x})$ и $\tilde{T}(\vec{x})$, совпадает с величиной, характеризующей близость коэффициентов α_i и $\tilde{\alpha}_i$, так как

$$\begin{aligned} M\|T(\vec{x}) - \tilde{T}(\vec{x})\|^2 &= \iiint_{\Omega} M \left| \sum_{i=1}^1 \alpha_i T_i(\vec{x}) - \sum_{i=1}^1 \tilde{\alpha}_i T_i(\vec{x}) \right|^2 d\vec{x} = \\ &= \sum_{i=1}^1 M |\alpha_i - \tilde{\alpha}_i|^2 = M \|\alpha_i - \tilde{\alpha}_i\|^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Поэтому точность восстановления поля определяем из выражения:

$$\delta^2 = \frac{M \|\tilde{\alpha} - \alpha\|^2}{M \|\alpha\|^2}. \quad (5)$$

Выводы

Одновременная оптимизация координат точек контроля и алгоритма вычисления оценок представляет трудно разрешимую проблему, поэтому задачи выбора координат точек контроля и алгоритма вычисления оценок $\tilde{\alpha}_i$ коэффициентов α_i должны рассматриваться по отдельности.

Каждой реализации случайного температурного поля $T(\vec{x})$ соответствует значение плотности вероятности, характеризующее частоту появления этой реализации. То есть можно говорить о «более вероятных» и «менее вероятных» реализациях. Имея это в виду, задачу восстановления температурного поля $T(\vec{x})$ по измеренным в точках контроля значениям можно сформулировать следующим образом: среди всех непрерывных функций $\tilde{T}(\vec{x})$, имеющих в точках контроля измеренные значения, найти такую функцию $\tilde{T}(\vec{x})$, для которой значение плотности вероятности $w(\tilde{T}(\vec{x}))$ будет наибольшим.

Список литературы

1. Сили И. И. Применение информационно-энергетических излучений для угнетения репродуктивной способности колорадского жука: тезисы за материалами научно-практической студенческой конференции / И. И. Сили // Проблемы энергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2015. – С. 47 – 49.
2. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К.: Техника, 1975. – 168 с.
3. Архангельский Ю. С. Измерения в СВЧ электротехнологии: учеб. пособие / Ю. С. Архангельский, С. Г. Калганова. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2008. – 152 с.

4. Беспалов А. В. Системы управления химикотехнологическими процессами: учеб. пособие / А. В. Беспалов, Н. И. Харитонов. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 696 с.

5. Морозов Г. А. Низкоинтенсивные микроволновые технологии. Методы и аппаратура / Г. А. Морозов, О. Г. Морозов, Н. Е. Стахова и др.. – М.: Радио и связь, 2003 – 128 с.

МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ НВЧ НАГРІВУ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

Ю. М. Федюшко, О. Ю. Федюшко

Анотація. *Розглянуті питання визначення зміни електрофізичних параметрів діелектриків мікрохвильовими технологічними установками.*

Ключові слова: *діелектрична проникність, коефіцієнт загасання, технологічний комплекс, НВЧ обробка*

MATHEMATICAL ANALYSIS OF PROCESS SHF HEATING BY TECHNOLOGICAL COMPLEXES

Y. Fedyushko A. Fedyushko

Annotation. *Work is sanctified to the questions of determination of change of electrophysics parameters of dielectrics by microwave technological options.*

Key words: *inductivity, fading coefficient, technological complex, microwave treatment*