

ISSN 0368-1025

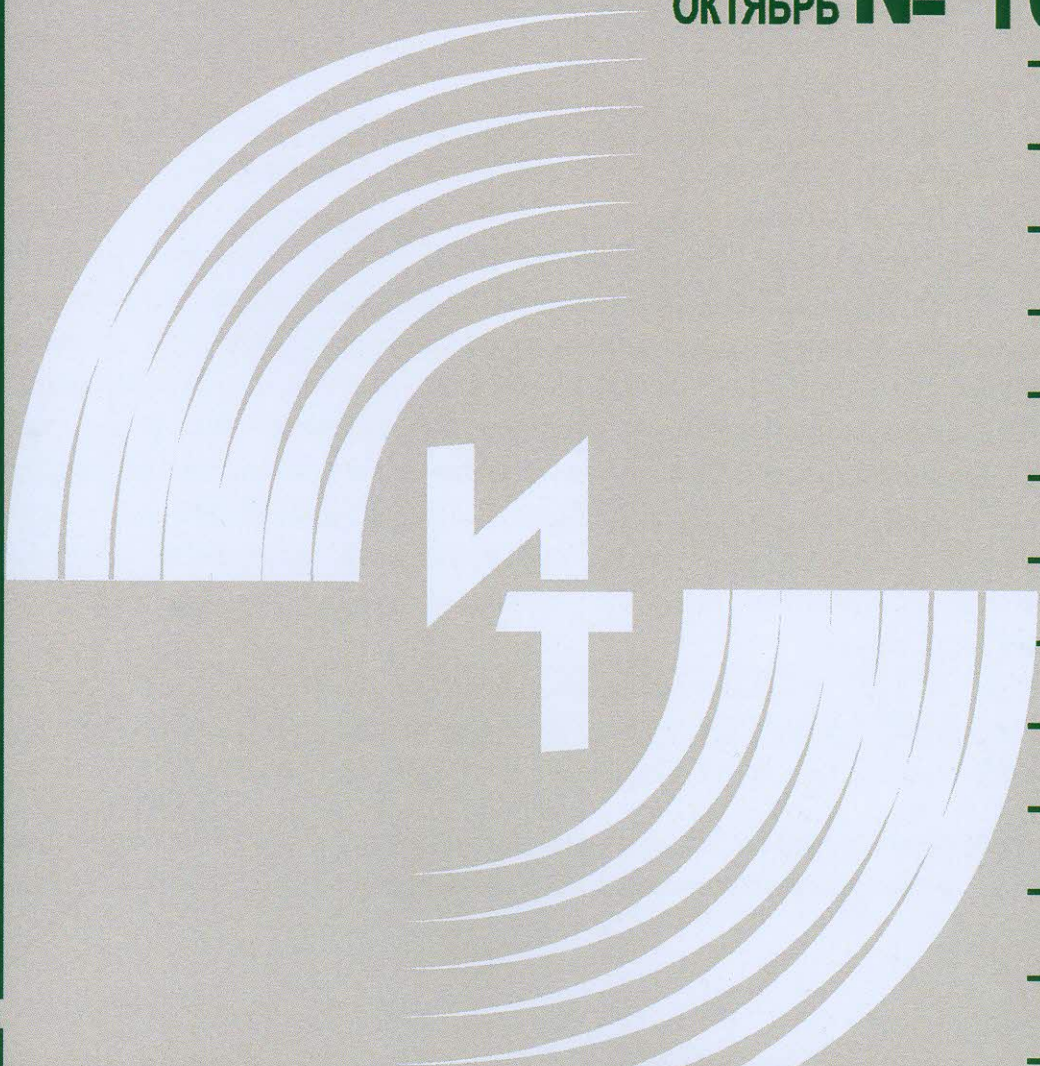


ИТ

# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

# 2015

ОКТАБРЬ № 10



ИТ



СТАНДАРТИНФОРМ

# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

## 2015

### № 10 октябрь

Ежемесячный  
научно-технический  
журнал  
основан в 1939 г.

#### УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство  
по техническому регулированию  
и метрологии

ФГУП «Всероссийский

## СОДЕРЖАНИЕ

### ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ЭТАЛОНЫ

- Е. П. Собина.* Государственный первичный эталон единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объема и размера пор твердых веществ и материалов ГЭТ 210—2014 . . . . . 3

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- А. М. Каверин, Д. С. Печерица.* Оценка точностных характеристик аппаратуры записи и воспроизведения сигналов космических навигационных систем . . . . . 8
- О. Н. Новоселов, И. Л. Гуфельд.* Прогнозирование состояния динамической системы по результатам измерений . . . . . 11
- М. И. Ломакин, А. В. Муравьев.* Управление процессом реинжиниринга информационной системы на основе комплексного мониторинга морального старения . . . . . 16

### ИЗМЕРЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

- А. К. Алимуратов, Ф. Ш. Муртазов.* Методы повышения эффективности распознавания речевых сигналов в системах голосового управления . . . . . 20

### ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. Х. Султанов, С. Л. Виноградов, И. Л. Виноградова, Л. З. Янтилина, В. С. Любобытов.* Построение профилемера для трубопроводов диаметром 100–300 мм на основе волоконно-оптического сенсора . . . . . 24
- В. М. Давыдочкин.* Минимизация погрешности измерения расстояния в частотных дальнометрах промышленного применения с весовым усреднением разностной частоты . . . . . 29
- В. М. Грецишников, В. Г. Домрачев, И. В. Ретинская, О. В. Теряева.* Оптоэлектронные цифровые преобразователи угла с весовым уплотнением каналов . . . . . 34

### ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

- Ю. С. Домнин.* Формула атомного фонтана . . . . . 39

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. С. Хлыстунов, В. В. Подувадьцев, Ж. Г. Могилюк.* Неопределенность в измерениях и проблемы достоверности мониторинга векторных параметров динамических процессов . 41
- С. А. Гудков, А. А. Кумарин.* Тензометрическая станция для испытания демпферов . . . . 45

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- М. Ф. Замалтдинов.* Метод измерения температуры на основе модуляции оптического излучения в чувствительном элементе волоконно-оптического датчика . . . . . 49
- В. Н. Нефедов, А. В. Мамонтов, В. П. Симонов, В. В. Афанасьев.* Измерение температуры листовых материалов в микроволновых установках типа бегущей волны . . . . . 53

### РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- В. А. Сергеев, С. Е. Резчиков.* Методическая погрешность измерений показателя степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума . . . . . 55
- Л. А. Литвинчук, Т. П. Мишура.* Снижение погрешностей измерений временных параметров когерентных сигналов с помощью фильтров сжатия . . . . . 60

### АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. Е. Исаев, И. В. Черников.* Использование сигналов с распределенной по частоте мощностью для лабораторной градуировки гидроакустического приемника . . . . . 64
- М. В. Мартынюк, А. В. Генералов, С. С. Наумов, С. Е. Залетнов, Д. В. Дмитриев, О. П. Тимофеева.* Разработка системы локального акустического позиционирования на базе персонального компьютера . . . . . 68

### ИНФОРМАЦИЯ

- IV Международная научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение экономики в современных условиях», XVII съезд Метрологической академии . . . . . 72*

*н 10-2015*

информации по стандартизации,  
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

Научно-техническая  
библиотека  
ВНИИ СФИ

## Измерение температуры листовых материалов в микроволновых установках типа бегущей волны

В. Н. НЕФЕДОВ, А. В. МАМОНТОВ, В. П. СИМОНОВ, В. В. АФАНАСЬЕВ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва, Россия, e-mail: a.mamontov@hse.ru

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований в области высокоэффективных микроволновых технологий термообработки листовых материалов. В качестве нагревательных элементов микроволновых устройств использованы двумерно-периодические замедляющие системы. Расхождение теоретических и экспериментальных характеристик распределения температуры в листовом материале и отклонение температуры от номинального значения соответственно не превышает 3 и 5 %.

**Ключевые слова:** СВЧ-устройство, распределение температуры, диэлектрический материал, замедляющая система.

The theoretical and experimental research results in the field of high-performance microwave technologies of sheet materials thermal processing are presented. The sections of two-dimensional periodic slow-wave systems are used as heating elements. The divergence of theoretical and experimental temperature distribution characteristics in the sheet material does not exceed 3%, and the temperature deviation in the material from the nominal temperature value does not exceed 5%.

**Key words:** microwave device, temperature distribution, dielectric material, slow-wave system.

Для создания высокоэффективных технологий термообработки листовых материалов больших площадей актуально использование микроволновых установок непрерывного действия. Наиболее перспективными являются микроволновые устройства, осуществляющие взаимодействие диэлектрического листового материала с полем бегущей волны. В качестве нагревательного элемента в таких устройствах используют двумерно-периодические замедляющие системы [1, 2].

Основу конструкции двумерно-периодической замедляющей системы составляют проводники многопроводных линий, расположенные вдоль оси  $Z$  параллельно друг другу и на равных расстояниях. На проводниках периодически размещены элементы конструкции — индуктивные диафрагмы, между которыми находятся двойные связи. Элементы конструкции обеспечивают необходимые электродинамические параметры замедляющей системы как в поперечном направлении  $X$  движения материала, так и в продольном направлении  $Z$  распространения энергии электромагнитного поля. Направление  $X$  характеризуется поперечным фазовым сдвигом  $\varphi_x$  на периоде пространства взаимодействия  $L_x$ , а продольное — сдвигом  $\varphi_z$  на периоде пространства взаимодействия  $L_z$ . В поперечном направлении рассматриваемая система ограничена электрическими стенками, расположенными в плоскостях симметрии системы. Между этими стенками устанавливается замедленная стоячая волна. В продольном направлении размер секции определяется шириной обрабатываемого диэлектрического материала  $l = N_z L_z$ , где  $N_z$  — число периодов пространства взаимодействия системы вдоль оси  $Z$ . Размер двумерно-периодической системы между двумя электрическими стенками определяется числом периодов пространства взаимодействия замедляющей системы  $N_x$  в направлении оси  $X$  и равен  $N_x L_x$ .

Количество периодов пространства взаимодействия  $N_x$  в направлении оси  $X$  определяется дисперсионными свойствами используемой системы [1, 2].

Секция устройства СВЧ-нагрева листовых материалов состоит из двумерно-периодической замедляющей системы, которая с одной стороны согласована с источником СВЧ-энергии, а с другой — с водяной нагрузкой, на которой установлен датчик мощности для контроля технологического процесса. Устройство СВЧ-нагрева предназначено для термообработки относительно тонких диэлектрических материалов ( $d \leq 0,05\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны источника СВЧ-энергии), в которых распределение температуры по толщине материала  $d$  можно не учитывать, а по ширине  $l$  оно задается условиями технологического процесса. Устройство СВЧ-нагрева образовано двумя одинаковыми по конструкции и параметрам секциями, которые расположены одна над другой, а энергия электромагнитного поля распространяется во взаимно противоположных направлениях (рис. 1).

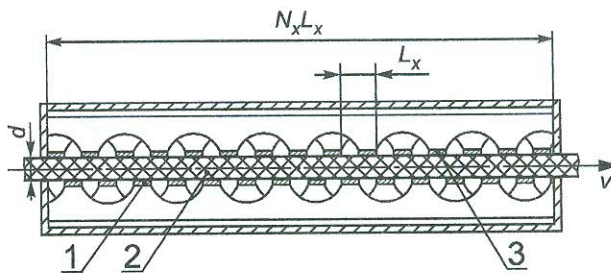


Рис. 1. Поперечное сечение устройства СВЧ-нагрева листовых материалов:

1, 3 — нижняя и верхняя секции, соответственно; 2 — диэлектрический материал;  $v$  — скорость движения материала

В замедляющей системе рабочими являются колебания с фазовым сдвигом вида  $\varphi_x = \pi(N_x - 1)/N_x$ . При этом коэффициент замедления системы на рабочей частоте колебаний электромагнитного поля  $k_3 = 5$ .

Каждую секцию устройства СВЧ-нагрева с обрабатываемым материалом можно, с физической точки зрения, представить эквивалентной моделью в виде нагруженной длинной линии [1, 3]. Рассмотрим нагрев листового материала, расположенного над поверхностью двумерно-периодической замедляющей системы, в стационарном режиме. Пусть источник СВЧ-энергии имеет выходную мощность  $P_{\text{вых}}$ , а листовый материал нагревается на длине электродинамической системы  $l$  от начальной  $T_n$  до конечной  $T_k$  температуры материала. Будем полагать, что постоянная затухания амплитуды электрического поля в материале при  $T_n, T_k$  соответствует значениям  $\alpha_n, \alpha_k$ . Пусть входная мощность  $P_{\text{вх}}$  практически полностью поглощается материалом на длине  $l$ .

Выражение для распределения мощности в обрабатываемом материале с диэлектрическими потерями можно записать в виде функции, учитывающей зависимость диэлектрических параметров материала от температуры в направлении оси  $Z$ :

$$P(z) = f(z, T)P_{\text{вх}}e^{-2\alpha_n z},$$

где  $f(z, T)$  — функция, учитывающая зависимость диэлектрических параметров от температуры в направлении распределения энергии электромагнитного поля.

Вид функции  $f(z, T)$  получен при условии линейной зависимости мнимых значений относительных диэлектрических проницаемостей материала с ростом температуры на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц [3]. Для источников СВЧ-энергии, расположенных слева и справа от замедляющей системы, соответственно

$$f_1(z, T) = \alpha_n / [\alpha_k - (\alpha_k - \alpha_n) \exp(-2\alpha_n z)];$$

$$f_2(z, T) = \alpha_n / [\alpha_k - (\alpha_k - \alpha_n) \exp(-2\alpha_n(l - z))].$$

При термообработке в непрерывном режиме относительно тонких листовых диэлектрических материалов необходимо учитывать конвективный теплообмен, так как пренебрежение им приводит к завышению до 20 % производительности установки СВЧ-нагрева.

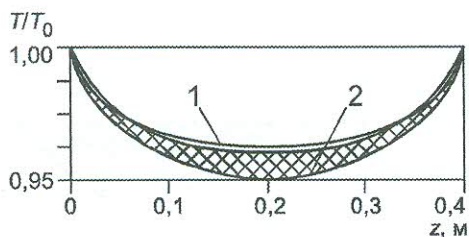


Рис. 2. Рассчитанные (1) и экспериментальные (2) характеристики распределения температуры в листовом материале для модуля устройства СВЧ-нагрева; заштрихованная область соответствует результатам проведения серии из восьми экспериментов

Распределение температуры в материале от нижней секции микроволнового устройства в направлении распространения энергии электромагнитного поля имеет вид [1]:

$$T_1(z) = T_n + \frac{2P_{\text{вх}}\alpha_k f_1^2(z, T)e^{-2\alpha_n z \tau}}{N_x L_x d \rho_d c_d + \gamma \tau},$$

где  $c_d, \rho_d$  — теплоемкость и плотность материала, соответственно;  $\tau$  — время обработки материала в микроволновом поле;  $\gamma$  — коэффициент конвективного теплообмена.

Распределение температуры в материале при нагреве двумя секциями СВЧ-устройства имеет вид [1]:

$$T_2(z) = T_1(z) + \frac{2P_{\text{вх}}\alpha_k f_2^2(z, T)e^{-2\alpha_n(l-z)\tau}}{N_x L_x d \rho_d c_d + \gamma \tau}.$$

### Параметры секции двумерно-периодической замедляющей системы и материала

Рабочая частота колебаний электромагнитного поля . . .	2450 МГц
Мощность источника СВЧ-энергии . . . . .	0,8 кВт
Коэффициент стоячей волны	
в полосе частот 100 МГц, не более . . . . .	1,45
на рабочей частоте . . . . .	1,17
Период замедляющей системы вдоль оси $L_z$ . . . . .	36 мм
Ширина материала $l$ . . . . .	400 мм
Ширина секции в поперечном направлении $N_x L_x$ . . . . .	200 мм
Продольный фазовый сдвиг на рабочей частоте $\varphi_z$ . . . . .	$0,2\pi$
Температура материала	
начальная $T_n$ . . . . .	$20^\circ\text{C}$
конечная $T_k$ . . . . .	$180^\circ\text{C}$
Фактор потерь	
$\epsilon_n''$ . . . . .	0,18
$\epsilon_k''$ . . . . .	$0,3$
Теплоемкость материала $c_d$ . . . . .	$0,8 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot^\circ\text{C})$
Плотность материала $\rho_d$ . . . . .	$2,4 \text{ г}/\text{см}^3$
Толщина материала $d$ . . . . .	3,0 мм
Скорость движения материала . . . . .	0,2 м/мин
Коэффициент конвективного теплообмена $\gamma$ . . . . .	$6 \text{ Вт}/(\text{см}\cdot^\circ\text{C})$

На рис. 2 показаны экспериментальные и рассчитанные характеристики распределения температуры композиционного материала в модуле устройства СВЧ-нагрева в относительных единицах. Отклонение температуры в материале от номинального значения температуры не превышает 5 %, а расхождение рассчитанных и измеренных характеристик распределения температуры в материале не более 3 %. Температуру материала измеряли по центральной линии секции микроволновой установки в направлении распространения энергии через каждые 50 мм при выключенном источнике СВЧ-энергии.

Полученные результаты могут быть использованы в технологических процессах термообработки листовых материалов в различных отраслях промышленности.

### Л и т е р а т у р а

1. Мамонтов А. В., Нефедов В. Н., Назаров И. В., Потапов Т. А. Микроволновые технологии: Монография. М.: Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского института электроники и математики (технического университета), 2008.

2. Шахбазов С. Ю., Нефедов М. В., Никишин Е. В., Лоик Д. А., Никишев А. О. Измерение распределения температурного поля по толщине листовых материалов в СВЧ-устройствах типа бегущей волны // Метрология. 2008. № 5. С. 38—44.

3. Назаров И. В., Нефедов М. В., Нефедов В. Н., Потапова Т. А., Мамонтов А. В. Измерение распределения температурного поля по сечению материалов в поле бегущей СВЧ-волны // Метрология. 2006 № 3. С. 9—20.

Дата принятия 16.04.2015 г.

## РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.3.049.77.019.3

### Методическая погрешность измерений показателя степени частотной зависимости спектра низкочастотного шума

В. А. СЕРГЕЕВ<sup>1,2</sup>, С. Е. РЕЗЧИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Ульяновск, Россия, e-mail: sva@ulstu.ru

<sup>2</sup>Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия, e-mail: flicker-noise@mail.ru

Рассмотрены особенности измерений параметров низкочастотного шума со спектром вида  $1/f^\gamma$  изделий электронной техники. Получены и проанализированы выражения для методической погрешности определения показателя степени  $\gamma$  по результатам однократных измерений спектральной плотности мощности шума методом непосредственной оценки на двух частотах с учетом тепловых и дробовых шумов контролируемого изделия. Даны рекомендации по минимизации суммарной погрешности определения  $\gamma$ .

**Ключевые слова:** низкочастотный, фликер-дробовый и тепловой шум, спектральная плотность мощности шума, показатель степени частотной зависимости.

The features of measurement of low-frequency noise parameters with  $1/f^\gamma$  form spectrum of electron technology products are considered. The expressions for methodical error of deformation of the exponent  $\gamma$  of noise frequency dependence by the results of single measurements of spectral density of the noise power by method of direct assessment at two frequencies with taking into account the level of thermal and shot noise of the product under control have been received and analysed. The recommendations on minimizing the total error of exponent determination are presented.

**Key words:** low frequency, shot and thermal noises, spectral density of noise power, exponent of frequency dependence.

Характеристики электрического шума являются источником важной информации о физических свойствах, качестве и надежности полупроводниковых изделий (ППИ) различного функционального назначения и конструктивно-технологического исполнения [1—7]. Для диагностики качества и прогнозирования надежности ППИ широко используют параметры низкочастотного (НЧ) шума с частотной зависимостью спектральной плотности мощности (СПМ) вида

$$G_{\text{НЧ}}(f) = A/f^\gamma, \quad (1)$$

где показатель степени  $\gamma$ , который может изменяться в диапазоне 0,3—3 и более, предлагается использовать в качестве информативного параметра [3—7].

Для каждого фиксированного значения частоты  $f_\Phi$  СПМ шума  $G(f)$  — это средняя мощность шума  $P_\Phi(f_\Phi, \Delta f)$ , выделяе-

мая на резисторе сопротивлением 1 Ом и приходящаяся на единицу полосы частот [8, 9]. Когда полоса частот  $\Delta f$  конечна, но настолько узка, что в ней СПМ можно полагать постоянной, имеем

$$G(f_0) \approx P_\Phi(f_\Phi, \Delta f) / \Delta f.$$

Если полосовым фильтром вырезать узкую полосу спектра шумового сигнала, а затем измерить его среднюю мощность, то СПМ шума можно определить по схеме, которая содержит последовательно соединенные маломушумящий усилитель, линейный полосовой фильтр, квадратичный детектор, усреднитель и регистрирующее устройство. Для случайных процессов с нулевым средним (к ним относится шумовое напряжение  $U_\Phi(t)$ ) статистическая погрешность измерения  $G(f)$  обусловлена погрешностью измерения дисперсии