

**УДК: 621. 586****ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ВОЛНОВОДНЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ НЕТОЧНОСТЬЮ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕМЕНТОВ****Усманова Хулкар Асадуллаевна, Тургунбаев Асадулла,  
Мамадияров Сардорбек****Дилмурод огли (Ташкентский государственный технический университет)**

**Аннотация:** В статье рассматриваются методы и способы расчета погрешности сверхвысокочастотных волноводных преобразователей обусловленных неточностью изготовления геометрических размеров элементов. Основным критерием при этом выбирается допустимое значение погрешности, обусловленной изменением размеров измерительной камеры. По полученным результатам нами рассчитаны значения погрешности для рекомендованных размерах измерительной камеры и параметров волны.

**Ключевые слова:** измерения, сверхвысокочастотный метод, волноводный преобразователь, градировочная характеристика, неточности изготовления, размеры измерительной камеры.

Измерения характеристик дисперсных материалов относятся к числу основных качественных параметров и для решения этих задач необходимо совершенствовать управление технологическими процессами на основе применения современных средств автоматизации и экспрессных приборов контроля качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Одним из основных параметров, влияющих на оптимальность протекания технологических процессов и качества выпускаемой продукции, является влажность. Поэтому создание измерителей влажности для дисперсных материалов в настоящее время приобретает особое значение.

Известно, что одним из перспективных методов измерений влажности является сверхвысокочастотный метод [1-3]. Преимуществами сверхвысокочастотной влагометрии являются: возможность бесконтактного измерения. Контроль влажности методом сверхвысокой частоты предусматривает воздействие на контролируемый материал переменной электромагнитной волны, в котором информация о влажности представляется как функция двух переменных - ослаблением и фазовым сдвигом электромагнитной волны.

Нами рассмотрены сверхвысокочастотные преобразователи влажности, в

которых используются антенны, канализирующие сверхвысокочастотную энергию в определённом объёме, замкнутом в пространстве, ограниченном металлическими стенками, или использующие микрополосковые линии. Измерительные камеры (кюветы) служат для локализации сверхвысокочастотной энергии в контролируемом образце материала, а также для формирования пробы определённым образом. При измерениях в свободном пространстве измерительные кюветы выполняются из материала прозрачного для электромагнитного поля и служат в основном для формирования пробы в определённом объёме и обеспечения необходимых условий измерения [4-6].

Исследуемая погрешность волноводных преобразователей имеет место для серийных преобразователей, когда типу одной серии приписывается номинальная градуировочная характеристика. При этом как изменение размеров, так и неравномерности стенок преобразователей приводят к погрешности, обусловленной изменением картины электромагнитного поля в волноводе.

Рассмотрим влияние неточности изготовления элементов преобразователей. Основными геометрическими размерами первичных преобразователей волноводного типа, определяющими их идентичность является высота, ширина и длина измерительной камеры, в случае измерения в свободном пространстве определяющим параметром является толщина образца контролируемого материала. Однако в чистом виде измерения в свободном пространстве не осуществляется, т.к. обычно приборы имеют защитный кожух, который в случае отсутствия металлической измерительной камеры определяет условия распространения (сверхвысокочастотной) волны. Поэтому задача исследования сводится к определению допусков геометрических размеров преобразователя волноводного типа.

Основным критерием при этом выбирается допустимое значение погрешности, обусловленной изменением размеров измерительной камеры. Исследование проводим на математической модели первичного преобразователя волноводного типа с размерами измерительной камеры  $a$ ,  $b$ ,  $l$ , для случая измерения ослабления сверхвысокочастотного сигнала.

Ослабление сверхвысокочастотной энергии в измерительной камере выражаются формулой [7]

$$A = 10 \lg \left[ 1 - \frac{2\gamma_{\varepsilon} \sqrt{\mu_0} * abl}{\sqrt{\varepsilon_a} \sqrt{(mb l)^2 + (nal)^2 + (pab)^2}} \right] \quad (1)$$

где  $\varepsilon_a$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость материала, Ф/м;  
 $\gamma_0$  - удельная электрическая проводимость материала ом/м.

Это выражение было получено нами, учитывая, что для рассматриваемого случая  $\gamma_\theta \geq \gamma_a$  и  $\mu_a = \mu_0$  т.е. пренебрегая потерями в металле и магнитными потерями в материале как величинами второго порядка малости.

Изменение ослабления, обусловленное изменением размеров измерительной камеры на  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta l$  определяются из выражения

$$\Delta A = \frac{\partial A}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial A}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial A}{\partial l} \Delta l \quad (2)$$

из (1) и (2) определяем

$$\Delta A = \frac{-8.68_\epsilon \sqrt{\mu_0} [m^2 b^3 l^3 \Delta a + a^3 l^3 n^2 \Delta b + a^3 b^3 p^2 \Delta l]}{\sqrt{\epsilon_a \left[ 1 - \frac{2\gamma_\theta \sqrt{\mu_0} * abl}{\sqrt{\epsilon_a \sqrt{(mbl)^2 + (nal)^2 + (pal)^2}}} \right] [(mbl)^2 + (nal)^2 + (pal)^2]^{\frac{3}{2}}}} \quad (3)$$

При этом погрешность измерения влажности составит

$$\Delta W = \frac{-8.68_\epsilon \sqrt{\mu_0} [m^2 b^3 l^3 \Delta a + a^3 l^3 n^2 \Delta b + a^3 b^3 p^2 \Delta l]}{S_w \left[ \sqrt{\epsilon_a [(mbl)^2 + (nal)^2 + (pal)^2]} - 2\gamma_\theta \sqrt{\mu_0} * abl \right]} * \frac{1}{[(mbl)^2 + (nal)^2 + (pab)^2]} \quad (4)$$

где  $S_w$  - чувствительность преобразователя, дБ/%.

Проанализируем выражение (4). При  $\Delta a \rightarrow 0$ ,  $\Delta b \rightarrow 0$ ,  $\Delta l \rightarrow 0$  имеем  $\Delta W_A \rightarrow 0$ . Величина  $\Delta W_A$  прямо пропорциональна изменениям размеров камеры  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta l$ . Таким образом из (4) можно найти такие значения  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta l$ , при которых погрешность  $\Delta W_A$  не превысит допустимую. Определим относительное значение погрешности, т.к. ее допустимое значение выражено в относительных единицах и составляет 1%, т.е. на порядок меньше суммарной погрешности.

Учитывая, что

$$W = \frac{A}{S_w} \quad \text{и} \quad \delta = \frac{\Delta W_A}{W} 100\%$$

имеем

$$\delta = \frac{2\gamma_{\varepsilon} \sqrt{\mu_0} * [m^2 b^3 l^3 \Delta a + a^3 l^3 n^2 \Delta b + a^3 b^3 p^2 \Delta l] 100}{\ln \left[ 1 - 2\gamma_{\theta} \frac{\sqrt{\mu_0} * a b l}{\sqrt{\varepsilon_a [(m b l)^2 + (n a l)^2 + (p a b)^2]}} \right]^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{1}{\frac{\sqrt{\varepsilon_a [(m b l)^2 + (n a l)^2 + (p a b)^2]} - 2\gamma^B \sqrt{\mu_0} * a b l}{[(m b l)^2 (n a l)^2 (p a b)^2]^{\frac{1}{2}}}} \quad (5)$$

Из выражения (5) можно определить значения  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta l$ , при которых  $\delta \leq 1\%$  для различных типов волн, задаваясь значениями  $m, n, p = 0, 1, 2, \dots$

Например для волны типа  $E_{110}$  ( $m=1, n=1, p=0$ ) имеем

$$\delta = \frac{-2\gamma_{\varepsilon} \sqrt{\mu_0} * [b^3 \Delta a + a^3 \Delta b] 100}{\ln \left[ 1 - 2\gamma_{\theta} \frac{\sqrt{\mu_0} * a b l}{\sqrt{\varepsilon_a [a^2 + b^2]}} \right] \left[ \sqrt{\varepsilon_a [a^2 + b^2]} - 2\gamma^B \sqrt{\mu_0} * a b \right] [a^2 + b^2]}$$

По формуле (5) нами рассчитаны значения погрешности для рекомендованных размерах измерительной камеры и параметров волны  $m, n, p$ . Результаты расчетов показывают, что при длине волны  $\lambda=3,2$  см и размерах камеры соответственно 5-10, 5-10, 8-25 см допустимая неточность изготовления деталей измерительной камеры составляют  $\Delta a=0,5$ мм,  $\Delta b=0,5$ мм,  $\Delta l=0,5$ мм.

### Литература

1. Секанов Ю.П., Лисовский В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. – Минск, 2005. 320 с.
2. Саитов Р.И. СВЧ влагометрия сельскохозяйственных продуктов. - Уфа «Гилем», 2009. - 127 с.
3. Исмагуллаев П.Р., Усманова Х.А., Тургунбаев А. Влагометрия хлопка и хлопковых материалов: Монография, Изд-во «Фан ва технологиялар». - Ташкент, 2017. - 262 с.
4. [info@sovlat.ru](mailto:info@sovlat.ru). Микроволновые и СВЧ влагомеры.

5. Усманова Х.А., Тургунбаев А. Сверхвысокочастотный преобразователь влажности сыпучих и волокнистых материалов. Приборы. Москва. 2020. №3. С.33-39.
6. Usmanova Kh.A., Turgunbaev A., Kuziev B.. Research of a Laboratory Installation for Measuring the Humidity Characteristics of Bulk Materials. International Journal of Control and Automation. Vol.13, № 4, 2020.pp. 237-244.
7. Бензарь В.Г. Техника СВЧ влагометрии. - Минск, 1974. -.332 с.