

### УЛУЧШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ РЕЗОНАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

При оценке влажности сыпучих материалов с помощью СВЧ средств основными факторами, ухудшающими метрологические показатели, являются флуктуации плотности, размеров, формы и положения пробы материала относительно первичного измерительного преобразователя [1]. Эти и другие факторы с подобным влиянием на результаты оценок принято называть мешающими.

Повысить точность можно путем исключения указанных флуктуаций или применением дополнительных измерений их влияния, основанных на аналогичных или иных физических принципах. В обоих случаях это приводит к усложнению измерителя и процедуры измерения.

Представляют интерес методы измерения, в которых информация о влажности не зависит от мешающих факторов и извлекается только из измерений на СВЧ.

Плотностно-независимые измерения влажности в [2,3] реализованы путем измерений двух параметров электромагнитной волны методом свободного пространства. При этом контролируется ослабление и сдвиг фазы электромагнитной волны, прошедшей через слой исследуемого материала [2] или два сдвига фазы на двух различных частотах для одного и того же образца [3].

Установки, реализующие методы свободного пространства, громоздкие и нормально работают только в стационарных лабораторных условиях. Для проведения измерений требуется значительное количество материала в виде плоскопараллельной пластины или кюветы с материалом. Трудно избавиться от влияния специфических для методов свободного пространства мешающих факторов – дифракции на краях образца, взаимного влияния различных частей установки вследствие переотражений.

Резонаторные методы [4] более консервативны к факторам внешней геометрии и, на наш взгляд, позволяют более целенаправленно реализовать оценку влажности, инвариантную также к структуре образца (включая плотность пробы и геометрию частиц для сыпучих материалов).

Рассмотрим вначале некоторые теоретические предпосылки.

Фундаментальными выходными сигналами резонаторных измерительных преобразователей (РИП) являются изменение их добротности и резонансной частоты. Производными от них могут быть изменение коэффициента передачи мощности через РИП на какой-либо частоте, фазовый сдвиг прошедших через РИП СВЧ колебаний и т.п.

Из общих представлений о факторах, определяющих добротность резонатора и его резонансную частоту, следует, что

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 1 - \left( 1 + \frac{\Delta f}{f_0} \right) \left( 1 + \frac{\Delta w}{w_{30}} \right) \left( 1 + \frac{\Delta P}{P_c} + \frac{P_{\text{ОБР}}}{P_c} \right)^{-1},$$

где  $\frac{\Delta f}{f_0}$  – относительное изменение резонансной частоты РИП, вызванное влиянием объекта (влаж-

ность образца);  $\frac{\Delta w}{w_{30}}$ ;  $\frac{\Delta P_c}{P_c}$  – соответственно изменение запасаемой энергии электромагнитного

поля; изменение мощности собственных потерь в стенках РИП и на излучение;  $P_{\text{ОБР}}$  – мощность потерь в объекте.

В грубом приближении можно считать, что

$$\frac{\Delta f}{f_0} \ll 1; \quad \frac{\Delta w}{w_{30}} \ll 1; \quad \frac{\Delta P_c}{P_c} \ll \frac{P_{\text{ОБР}}}{P_c}. \quad (1)$$

Тогда

$$\frac{\Delta Q}{Q} \approx 1 - \frac{1}{1 + \frac{P_{\text{ОБР}}}{P_c}}.$$

Если  $\frac{P_{\text{ОБР}}}{P_{\text{С}}} \ll 1$ , то  $\frac{\Delta Q}{Q} \approx \frac{P_{\text{ОБР}}}{P_{\text{С}}} = Q_0 \frac{P_{\text{ОБР}}}{2\pi f_0 W_{30}}$ ,  $\frac{P_{\text{ОБР}}}{W_{30}}$  можно представить в таком прибли-

жении в виде:

$$\frac{P_{\text{ОБР}}}{W_{30}} = \frac{\int_{v_{\text{обр}}} \epsilon_{\text{ОБР}} \epsilon_0 2\pi f_0 \text{tg} \delta_{\text{ОБР}} E^2 dv}{\int_{v_{\text{рез}}} \epsilon_0 \epsilon_v E^2 dv} = \epsilon_{\text{обр}} 2\pi f_0 \text{tg} \delta_{\text{ОБР}} \eta, \quad (2)$$

где  $\eta = \frac{\int_{v_{\text{обр}}} E^2 dv}{\int_{v_{\text{рез}}} E^2 dv}$  – коэффициент заполнения электромагнитного поля резонатора образцом.

Нетрудно заметить, что

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx (\epsilon_{\text{ОБР}} - 1) \eta. \quad (3)$$

Следовательно, в таком приближении комбинированный сигнал измерительной информации в виде

$$(\Delta Q/Q)(\Delta f/f_0)^{-1} = \frac{\epsilon_{\text{ОБР}}}{(\epsilon_{\text{ОБР}} - 1)} Q_0 \text{tg} \delta_{\text{ОБР}} \quad (4)$$

инвариантен к изменению положения образца в поле резонатора и изменению структуры самого образца а также его эффективной диэлектрической проницаемости в пределах соответствия требованиям (1) использованного приближения.

На практике удобнее измерять не  $\Delta Q/Q$ , а соответствующее этой величине изменение коэффициента передачи РИП. Нетрудно показать, что

$$\sqrt{\frac{P_0}{P_1}} - 1 = \frac{1}{1 + 2\xi_0} \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (5)$$

где  $P_0$  – мощность на выходе РИП в отсутствии образца;  $P_1$  – мощность на выходе РИП при наличии образца;  $\xi_0$  – коэффициент связи РИП с внешним трактом.

В результате можно утверждать, что построенный по этому принципу измеритель влажности будет иметь градуировку, которая не зависит от геометрии образца, его положения в поле резонатора, а также от структуры, влияющей на  $\epsilon_{\text{ОБР}}$ .

Градуировка будет определяться только зависимостью  $\text{tg} \delta_{\text{ОБР}}$  от влажности объекта.

Заметим, что требование (1) и формул (2 и 3) хорошо выполняются в условиях малого возмущения поля резонатора объектом и согласованного влияния объекта на потери мощности в резонаторе и на накопление энергии в нем. Последнее обстоятельство имеет место только в закрытых резонансных объемах. Для так называемых апертурных РИП [4] потери СВЧ мощности в объекте будут входить в потери на излучение, а изменение запасаемой энергии будет связано с перераспределением поля в резонаторе образцом, расположенным в излучательной апертуре.

По причине возможного невыполнения условия (1) и идентичного  $\eta$  в формулах (2) и (3) инвариантность комбинированного сигнала (4) будет неабсолютной. Поэтому в каждом конкретном случае необходим более строгий подход в постановке электродинамической задачи оценки влияния мешающих факторов.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований.

Достижение условия малого возмущения для образцов материала с различными диэлектрическими параметрами, в том числе и с различными значениями влагосодержания, требует создания РИП, в которых возможно производить плавное изменение уровня включения образца в поле резонатора.

Удобным для этой цели является преобразователь, состоящий непосредственно из резонатора, в котором запасается основная часть энергии, и измерительной секции, представляющей собой запердельный волновод для рабочей частоты и соединенный с резонатором через апертуру. При погружении образца в измерительную секцию по мере приближения его к апертуре происходит плавное увеличение уровня включения. Такой РИП является удобным и с метрологической точки зрения, поскольку отсутствуют потери на излучение через измерительную секцию, а также отсутствует воздействие атмосферных факторов (влажности воздуха) на резонатор, если апертуру заполнить радиопрозрачным негигроскопичным материалом.

В работе были рассчитаны и изготовлены такие РИП (рис. 1) с коаксиальным резонатором 1 и цилиндрической измерительной секцией 2, соединенные через кольцевую апертуру, в 3-см и 7-см диапазонах длин волн. Резонаторы имели два элемента связи с волноводным трактом и включались при измерениях на проход.

Экспериментальные исследования описанных РИП проводились с использованием панорамных измерителей КСВН и ослабления P2-61 и P2-56.

В 3-см диапазоне проводились измерения с фторопластом, деревом, ватой. Стержни из фторопласта и дерева (сосна) имели диаметр, равный внутреннему диаметру (10мм) измерительной секции. Контролировались изменения резонансной частоты  $\Delta f/f_0$  и мощности  $\Delta P/P_0$  на выходе резонатора на резонансной частоте при погружении стержней в измерительную секцию. Результаты измерений приведены на рис. 2. Точки на графиках для отдельных материалов соответствуют различным положениям образцов в измерительной секции.

Как видно из представленных графиков, погружение пробы материала в измерительную секцию приводит к одновременному повышению величин  $\Delta P/P_0$  и  $\Delta f/f_0$ . При малых возмущениях зависимость между этими величинами близка к линейной. Для сосны (линия 1) изменение  $\Delta P/P_0$  при изменении  $\Delta f/f_0$  происходит круче, чем для фторопласта (линия 2). Следовательно, в области возмущений, где  $\Delta P/P_0$  не превышает 0,2, можно производить измерения влажности, независимые от положения образца в измерительной секции.

Используя этот РИП, были проведены измерения с ватой при изменении ее плотности и влажности  $W$ . Результаты измерений для двух значений влажности (5 и 10 %), представленные на рис. 3, показали, что при изменении плотности ваты с определенной влажностью, происходит одновременное изменение  $\Delta P/P_0$  и  $\Delta f/f_0$ . При этом в области малых возмущений взаимосвязь между этими величинами близка к линейной. Следовательно, в этой области параметр  $(\Delta P/P_0)(\Delta f/f_0)^{-1}$  может использоваться для независимого от плотности контроля влагосодержания. Увеличение влажности приводит к повышению величины этого параметра.

В 7-см диапазоне проводились измерения с зерном пшеницы при изменении ее влажности от 5 до 20 %. Контрольные измерения влажности зерна производились стандартным методом высушивания. Измерения на СВЧ производились с использованием описанного ранее РИП и цилиндрического фторопластового контейнера для зерна. Контейнер с зерном погружался в измерительную секцию, которая имела диаметр 20 мм. На рис.4 приведена зависимость величины  $(\Delta P/P_0)(\Delta f/f_0)^{-1}$  от влажности. Как видно, между этими величинами существует хорошая корреляция.

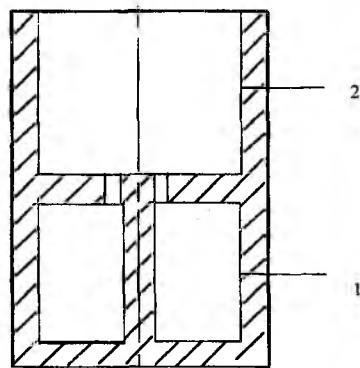


Рис. 1

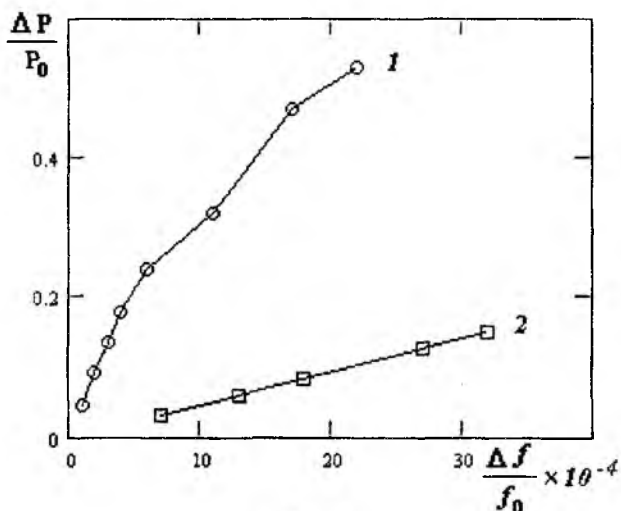


Рис. 2

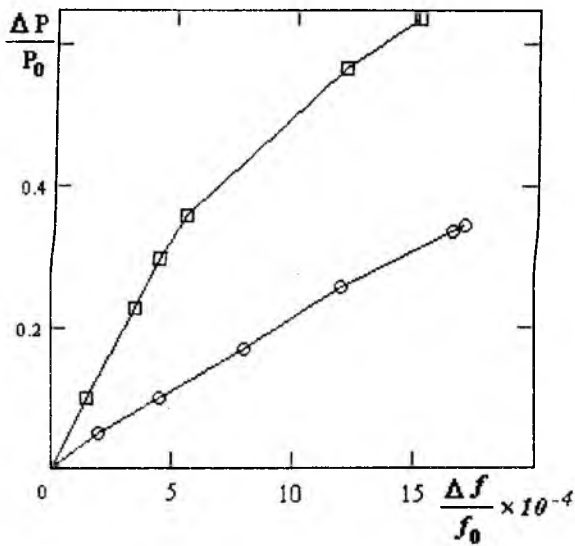


Рис. 3

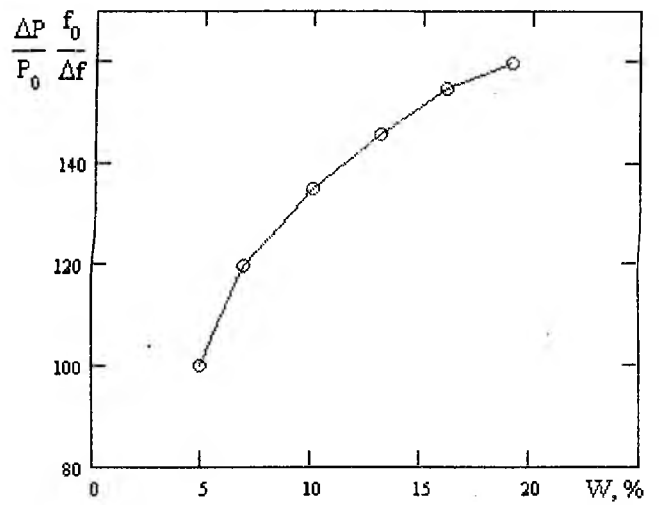


Рис. 4

На основании представленных результатов можно сделать вывод, что в области малых возмущений РИП возможны измерения влажности независимые от плотности и положения образца исследуемого материала относительно РИП. О влажности следует судить по отношению изменения добротности к изменению резонансной частоты. Удобными для этих измерений являются РИП, содержащие непосредственно резонатор и измерительную секцию в виде запредельного волновода. При этом между резонатором и измерительной секцией существует электромагнитная связь.

**Список литературы:** 1. *Исмагуллаев П.П.* Сверхвысокочастотная влагометрия // Измерения, контроль, автоматизация. 1989. 4(72). С. 22-31. 2. *S. Trabelsi, A.W. Krazsewski, S.O. Nelson.* New density-independent calibration function for microwave sensing of moisture content in particulate materials // IEEE Trans. Instrum. Meas. vol. 47. no. 3. pp.613-622. 1998. 3. *Y. Zhang, S. Okumura.* New density-independent moisture measurement using microwave phase shifts of two frequencies // IEEE Trans. Instrum. Meas. vol.48. no.6. pp.1208-1211. 1999. 4. *Панченко А.Ю., Гордиенко Ю.Е.* Приближение заданного поля в задачах определения характеристик резонансных СВЧ-датчиков апертурного типа // Радиотехника. 1998. Вып. 107. С. 93-103.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 21.01.2001