

УДК. 621.317.39

С.Р. Зиборов, канд. техн. наук,

И.Б. Широков канд. техн. наук,

С.Н. Поливкин

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, Стрелецкая балка, Севастополь, Украина, 99053

E-mail rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

ГОМОДИННЫЙ СВЧ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЛАЖНОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СМЕСИ

Проанализированы известные СВЧ методы измерения влажности материалов. Разработана структурная схема гомодинного измерителя влажности многокомпонентной смеси в процессе ее приготовления в смесительную камеру. Проанализированы погрешности измерителя и указаны возможные области его применения.

Многие современные материалы, используемые в строительстве, пищевой и химической промышленности, представляют собой отвердевшую многокомпонентную смесь, в процессе приготовления которой различные твердые компоненты и воду, взятые в определенных количественных соотношениях, смешивают в специальной камере (миксере). Качество таких материалов в значительной степени зависит от правильного выбора количественного соотношения между компонентами смеси. Одним из методов повышения качества материала является текущий контроль состава используемой смеси и его автоматическая коррекция на всех этапах технологического цикла приготовления смеси. При этом наибольшие сложности вызывает точный контроль содержания воды в смеси, т.е. ее влажности. Это обусловлено, с одной стороны, наличием некоторой начальной влажности компонентов смеси, с другой стороны, неоднородностью состава смеси в разных точках ее объема даже после ее перемешивания.

Несмотря на значительные успехи в разработке дозаторов и миксеров с компьютеризированными системами управления, смеси, получаемые при одинаковых весовых соотношениях компонентов, часто имеют после их отверждения разные характеристики. Во многих случаях основной причиной этого является неточное определение влажности смеси. Поэтому разработка бесконтактных методов измерения влажности смесей является актуальной проблемой производства многокомпонентных материалов.

Обычно требуемой влажности смеси добиваются путем добавления воды непосредственно в процессе перемешивания смеси в миксере. Для получения нужного состава смеси необходимо:

- контролировать количественное соотношение между исходными компонентами смеси во время их взвешивания и загрузки в миксер;

- измерять влажность смеси, начиная с момента ее загрузки в миксер, а затем в процессе ее перемешивания вплоть до момента получения смеси с заданной влажностью;

- по результатам измерения влажности оперативно формировать команды управления системой дозированного добавления воды в миксер.

Наиболее полно поставленным требованиям удовлетворяет радиоволновой метод измерения влажности с использованием сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля. Возможность применения радиоволновых методов для определения влажности материалов основывается на двух физических явлениях: поглощении и рассеянии СВЧ радиоволн во влажной среде [1]. В результате **амплитуда, фаза и угол поворота плоскости поляризации** волны как отраженной от материала, так и прошедшей через него содержат информацию о влажности материала.

Достоинствами радиоволновых методов измерения влажности являются:

- высокая точность измерения влажности материалов, имеющих большой объем, когда другие методы практически нереализуемы;

- возможность измерения влажности, как исходных (“сухих”) компонентов смеси, так и влажной смеси на всех этапах ее приготовления;

- отсутствие электрического контакта влагомера с контролируемой смесью;

- возможность измерения наряду с влажностью других параметров материала (вязкости, кинетики отверждения, геометрических размеров изделия и т. п.);

- простота сопряжения радиоволновых влагомеров с системами управления технологическими процессами, а также с ЭВМ;

- безопасность обслуживающего персонала.

Общими недостатками известных СВЧ влагомеров являются повышенные требования к стабильности частоты СВЧ генератора. Использование гомодинного преобразования частоты позволяет устранить указанные недостатки [2]. Структурная схема гомодинного СВЧ влагомера изображена на рисунке 1.

Синтезатор частоты СЧ и генератор, управляемый напряжением, ГУН образуют перестраиваемый высокостабильный СВЧ генератор, частота которого f_0 задается кодом N_f . Выходной сигнал ГУН усиливается управляемым усилителем мощности УМ, коэффициент усиления которого определяется кодом N_p .

С выхода усилителя мощности УМ сигнал поступает на следующие устройства:

- на синтезатор частоты для обеспечения автоматической подстройки частоты ГУН;

- через аттенуатор $At1$ на управляемый фазовращатель УФв для формирования опорного сигнала;
- через циркулятор Π на передающую антенну $A1$ для облучения контролируемого материала.

Усилитель мощности УМ и синтезатор частоты СЧ образуют цепь обратной связи системы фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) генератора, управляемого напряжением, ГУН. Система ФАПЧ не-

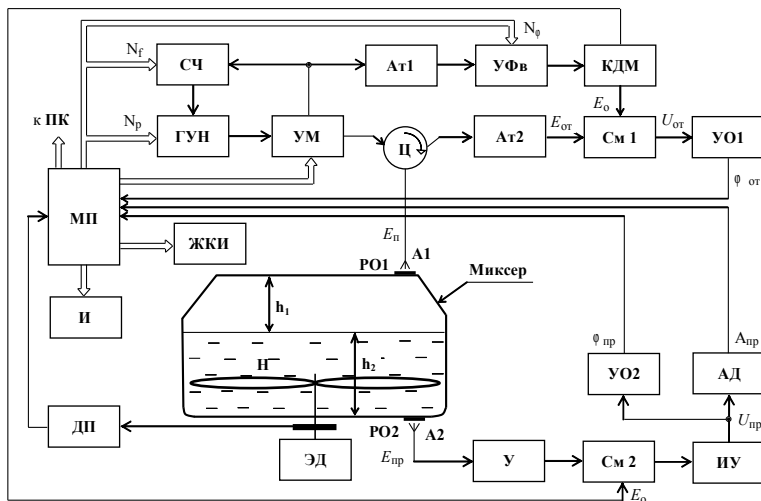


Рисунок 1 – Структурная схема гомодинного СВЧ влагомера

прерывно подстраивает частоту ГУН с погрешностью, равной нестабильности частоты синтезатора частоты СЧ, которая в свою очередь определяется нестабильностью частоты опорного кварцевого генератора, входящего в структуру синтезатора частоты.

Опорный сигнал E_o получают путем сдвига частоты выходного сигнала усилителя мощности на фиксированную низкую частоту. Частотный сдвиг достигается с помощью управляемого фазовращателя УФв, который периодически изменяет вносимый им фазовый сдвиг от 0 до 2π . В результате такой фазовой модуляции выходной сигнал фазовращателя имеет частоту

$$f_0 = f + \frac{1}{T} = f + F,$$

где T – период изменения фазы управляемого фазовращателя; $F = 1/T$ – частота сдвига.

Управляющим сигналом фазовращателя является код N_ϕ . С выхода управляемого фазовращателя опорный СВЧ сигнал подается через кольцевой

делитель мощности КДМ на гетеродинные входы смесителей СМ1 и СМ2. Управляющие коды N_f , N_p , N_ϕ вырабатываются микропроцессором МП.

Передающая антенна А1 через радиопрозрачное окно РО1, вмонтированное в верхнюю стенку миксера, излучает зондирующую (падающую) электромагнитную волну в направлении влажной смеси, которая заполняет часть объема миксера, заштрихованного на рисунке 1 штриховыми линиями.

Часть энергии падающей волны $E_{\text{п}}$, излучаемой антенной А1, отражается от поверхности смеси в обратном направлении, образуя основную отраженную волну, фаза которой $\varphi_{\text{от}}$ несет информацию о расстоянии h_1 от передающей антенны до поверхности смеси.

Часть энергии падающей волны проходит через смесь в направлении приемной антенны А2, образуя основную прошедшую волну $E_{\text{пр}}$. Величина ослабления прошедшей волны несет информацию о влажности W смеси. Начальная фаза прошедшей волны $\varphi_{\text{пр}}$ несет информацию о влажности W и о глубине h_2 смеси.

Датчик положения ДП ножа Н миксера обеспечивает прерывание работы усилителя мощности УМ на время, в течение которого ножи миксера перекрывают прохождение радиоволн от передающей антенны А1 к приемной А2 в систему. С этой целью датчик ДП сопряжен с электродвигателем ЭД, вращающим нож миксера, а выходной сигнал датчика подается на микропроцессор МП, управляющий коэффициентом усиления усилителя мощности УМ.

Отраженный сигнал с частотой f улавливается передающей антенной А1 и через циркулятор Ц и СВЧ аттенуатор Ат2 поступает на сигнальный вход смесителя СМ1, где умножается на опорный сигнал с частотой $f + F$. В результате на выходе смесителя СМ1 образуется сигнал разностной низкой частоты F , который усиливается и ограничивается по амплитуде частотно-избирательным усилителем-ограничителем УО1. Начальная фаза выходного сигнала $U_{\text{от}}$ усилителя-ограничителя совпадает с начальной фазой отраженной волны $E_{\text{от}}$ и пропорциональна расстоянию h_1 от передающей антенны А1 до поверхности смеси

$$\varphi_{\text{от}} = k_1 h_1, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент пропорциональности.

Прошедшая электромагнитная волна улавливается приемной антенной А2, усиливается СВЧ усилителем У и поступает на сигнальный вход смесителя СМ2. Прошедшая волна с частотой f перемножается в смесителе СМ2 с опорным сигналом с частотой $f + F$. В результате на выходе смеси-

теля См2 образуется сигнал $U_{\text{пр}}$ разностной низкой частоты F , который усиливается по амплитуде избирательным усилителем ИУ. Амплитуда выходного сигнала избирательного усилителя пропорциональна амплитуде прошедшей волны $E_{\text{пр}}$, а его начальная фаза совпадает с начальной фазой прошедшей волны.

Для раздельной обработки амплитуды и начальной фазы выходного сигнала избирательного усилителя этот сигнал подают на усилитель-ограничитель УО2 и амплитудный детектор АД. Амплитуда выходного сигнала усилителя-ограничителя постоянна, а его фаза совпадает с начальной фазой $\varphi_{\text{пр}}$ прошедшей волны, которая содержит информацию как о расстоянии между антеннами А1, А2, так и о влажности W смеси

$$\varphi_{\text{пр}} = k_2 h_1 + k_3 h_2 = \Phi_1(W), \quad (2)$$

где k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности; $\Phi_1(W)$ – монотонная функция, вид которой зависит от свойств смеси, определяющих ее диэлектрическую проницаемость, и, следовательно, скорость распространения электромагнитных волн в смеси.

Выходной сигнал амплитудного детектора АД, пропорциональный амплитуде прошедшей волны, также содержит информацию о влажности контролируемой смеси

$$A_{\text{пр}} = \Phi_2(W), \quad (3)$$

где $\Phi_2(W)$ – монотонная функция, определяемая свойствами смеси, от которых зависит затухание энергии электромагнитной волны при ее распространении в этой смеси.

Выходные аналоговые сигналы усилителей-ограничителей УО1, УО2 и амплитудного детектора АД поступают на микропроцессор МП, в котором с помощью встроенных мультиплексора и аналого-цифрового преобразователя аналоговые сигналы преобразуются в цифровые. Микропроцессор выполняет вторичную обработку измерительных сигналов в цифровом виде с использованием соответствующего программного обеспечения и выводит результаты измерения величин (1) – (3) на многострочный жидкокристаллический индикатор ЖКИ. Кроме того, микропроцессор поддерживает интерфейс, обеспечивающий передачу информации в цифровом виде в персональный компьютер ПК.

Использование гомодинного преобразованием частоты позволяет понизить требования к стабильности частоты и начальной фазы сравниваемых по фазе сигналов, поскольку СВЧ сигналы, разность фаз между которыми измеряется, получают от одного и того же СВЧ генератора, а сигнал управления фазовращателем и опорный сигнал фазометра формируют с помощью микропроцессора.

Выбор рабочей частоты измерителя обусловлен рядом ограничений. Ограничение со стороны минимальной частоты связано с допустимыми размерами радиопрозрачного окна в корпусе миксера, при которых не должна существенно ухудшаться его прочность. Ограничение со стороны максимальной частоты связано с увеличением затухания электромагнитных волн во влажной среде. Кроме того, при длине волны меньше толщины слоя контролируемой смеси возникает неоднозначность измерения фазового сдвига, а значит, и параметров смеси.

Анализ показывает, что на частотах выше 1,5 ГГц минимально допустимый диаметр радиопрозрачного окна составляет порядка 7 см. Использование частоты выше 2 ГГц ведет к росту неопределенности измерения фазового сдвига. С целью исключения взаимных помех измерителя и систем мобильной связи (1,8 ГГц) и глобального позиционирования (1,1 – 1,45 ГГц) рабочая частота измерителя была выбрана равной 1,6 ГГц. Другим фактором в пользу такого выбора рабочей частоты явилась также возможность использования готовых малогабаритных СВЧ узлов измерителя.

К основным источникам погрешности разработанного измерения влажности можно отнести следующие: интерференция электромагнитной волны; отраженной от стенок миксера с основными отраженной и прошедшей волнами; изменение температуры смеси; проникновение зондирующей волны в СВЧ тракт отраженной волны; доплеровский сдвиг частоты, обусловленный движением смеси в миксере; неоднородность смеси; дискретность измерения амплитуды и фазового сдвига; погрешности узлов влагомера.

Поскольку основными информационными параметрами гомодинного влагомера являются амплитуда $A_{\text{пр}}$ и фаза $\varphi_{\text{пр}}$ прошедшей волны, то погрешность измерения влажности определяется видом функциональных зависимостей $W = \Psi_1(\varphi_{\text{пр}})$, $W = \Psi_2(A_{\text{пр}})$, обратных функциям (2) и (3) соответственно и погрешностями измерения величин $A_{\text{пр}}$ и $\varphi_{\text{пр}}$.

Часть энергии падающей волны, попадающая на внутренние стенки миксера, образует дополнительную отраженную волну, которая интерферирует с основной отраженной волной, изменяя ее амплитуду и начальную фазу. При этом возможно частичное прохождение дополнительной отраженной волны через смесь и образование дополнительной прошедшей волны, которая интерферирует с основной прошедшей волной, изменяя ее амплитуду и начальную фазу. Указанные явления вызывают погрешность измерения влажности, которая может быть минимизирована путем предварительной калибровки измерителя. Данная составляющая погрешности существенно зависит от конструкции миксера и места установки передающей и приемной антенн, поэтому ее оценка может быть выполнена только при проведении натурных испытаний влагомера.

Поскольку основным параметром, несущим информацию о влажности смеси является начальная фаза прошедшей волны, то оценим погрешность ее измерения.

Изменение температуры смеси вызывает изменение ее диэлектрической проницаемости ϵ , что в свою очередь приводит к изменению скорости распространения, а значит, и фазового сдвига прошедшей электромагнитной волны, т. е.

$$\Delta \varphi_{\epsilon} = \frac{\varphi}{2} \lambda \gamma_{\epsilon}, \quad (4)$$

где γ_{ϵ} – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости влажной смеси, который принимает значение от 10^{-4} до $2 \cdot 10^{-4}$ 1/К [1].

Температурная составляющая погрешности (4) может быть устранена путем измерения текущей температуры и введения поправки, компенсирующей указанную погрешность.

Погрешность, обусловленная недостаточной развязкой между СВЧ трактами измерителя, достигает максимального значения, когда мешающий сигнал сдвинут по фазе относительно полезного сигнала на 90° . Возникающую при этом фазовую погрешность можно оценить соотношением

$$\Delta \varphi_{\Pi} \approx \arctg 10^{\frac{D}{20}}, \quad (5)$$

где D – уровень развязки между трактами в децибелах.

Для стандартных СВЧ элементов (циркуляторов, направленных ответвителей и т.п.) уровень развязки между трактами составляет $D = -30$ дБ, что вызывает погрешности $\gamma_{\Pi} = 0,031$ и $\Delta \varphi_{\Pi} = 1,8$ град.

При вращательном движении смеси частота отраженной волны изменяется по отношению к частоте падающей (зондирующей) волны на величину доплеровского сдвига частоты [2]

$$f_{\text{доп}} = \pm \frac{f V_p}{c}, \quad (6)$$

где V_p – радиальная скорость сближения или удаления передающей антенны и облучаемых участков поверхности смеси; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитной волны.

Положительный знак в формуле (6) соответствует сближению, а отрицательный – удалению детали и антенны измерителя.

Поскольку при преобразовании частоты доплеровский сдвиг частоты переносится без изменения на низкую частоту F , то возникающий из-за этого фазовый сдвиг с учетом (6) определяться выражением

$$\Delta \varphi_{\text{доп}} = \frac{360 f_{\text{доп}}}{F} = \frac{360 V_p f}{c F}. \quad (7)$$

Для миксера диаметром $D = 1 \text{ м}$, вращающегося с угловой скоростью $\omega_{\text{угл}} = \pi \text{ рад/с}$ (30 оборотов в минуту), максимальная линейная скорость вращающейся смеси составляет $V_{\text{л}} = D\omega_{\text{угл}}/2 = 0,5\pi \text{ м/с}$. При облучении поверхности смеси с высоты 0,5 м слабо направленной антенной с углом раскрытия диаграммы направленности $\alpha = 45^\circ$ радиальная скорость облучаемых участков поверхности смеси не превышает $V_{\text{р}} \approx V_{\text{л}} \sin(\alpha/2) \approx 0,6 \text{ м/с}$. Тогда погрешность (7) равна

$$\Delta \varphi_{\text{доп}} \approx \frac{360 \cdot 0,6 \cdot 1,6 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8 \cdot 10^3} \approx 1,2 \text{ град}.$$

Погрешность дискретности измерения фазы определяется числом разрядов N микропроцессора

$$\Delta \varphi_{\text{д}} = \frac{360}{2^N}. \quad (8)$$

Например, при однобайтовом цифровом представлении значений фазы $N = 8$ погрешность (8) составит $\Delta \varphi_{\text{д}} = 360/2^8 \approx 1,4 \text{ град}$.

Погрешность усилителей-ограничителей при изменении их входного сигнала с частотой 10 кГц в динамическом диапазоне 60 дБ не превышает [3] $\Delta \varphi_{\text{yo}} \approx 0,5 \text{ град}$.

Поскольку составляющие погрешности (4), (5), (7), (8) некоррелированы между собой и являются достаточно малыми величинами одного порядка, то оценка полной погрешности измерения фазы может быть определена в виде

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{\Sigma} &\approx \sqrt{\Delta \varphi_{\varepsilon}^2 + \Delta \varphi_{\text{п}}^2 + \Delta \varphi_{\text{доп}}^2 + \Delta \varphi_{\text{д}}^2 + \Delta \varphi_{\text{yo}}^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\varphi}{2} \lambda \gamma_{\varepsilon}\right)^2 + \left(\arctg 10^{\frac{D}{20}}\right)^2 + \left(\frac{360 V_{\text{р}} f}{c F}\right)^2 + \left(\frac{360}{2^N}\right)^2 + \Delta \varphi_{\text{yo}}^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя в (9) найденные выше значения составляющих погрешности и полагая полную компенсацию температурной погрешности (4), находим

$$\Delta \varphi_{\Sigma} \approx \sqrt{1,8^2 + 1,2^2 + 1,4^2 + 0,5^2} \approx 2,6 \text{ град}.$$

Рассмотрим составляющую погрешности, связанную с неточностью изготовления узлов влагомера, узлы СВЧ тракта которого реализованы на микрополосковых линиях (МПЛ).

Одной из основных характеристик МПЛ является их волновое сопротивление $Z_{\text{в}}$. Определим отклонение величины $Z_{\text{в}}$ в технологическом процессе изготовления печатных плат. Согласно [4] относительное измене-

ние Z_B при небольших изменениях размеров и диэлектрической проницаемости МПЛ составляет

$$\gamma_z = \frac{\Delta Z_B}{Z_B} = m_1 \frac{\Delta w}{w} + m_2 \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} + m_3 \frac{\Delta h}{h}, \quad (10)$$

где $m_1 = 0,5$;

$$m_2 = m_3 = \begin{cases} \frac{-60 \left(1 - \left(\frac{w}{4h} \right)^2 \right)}{Z_B \sqrt{\varepsilon}} & \text{при } \frac{w}{h} < 2 \\ \frac{Z_B w \sqrt{\varepsilon}}{120h\pi} \left(1 + \frac{1}{\pi \left(\frac{w}{2h} + 0,92 \right)} \right) & \text{при } \frac{w}{h} \geq 2 \end{cases};$$

ε – диэлектрическая проницаемость подложки; $\Delta \varepsilon$ – отклонение диэлектрической проницаемости от номинального значения; w – ширина МПЛ; Δw – отклонение ширины МПЛ, связанное с погрешностью изготовления; h – толщина подложки МПЛ; Δh – отклонение толщины подложки МПЛ.

В СВЧ каскадах измерителя были использованы МПЛ с волновым сопротивлением $Z_B = 50$ Ом, имеющие следующие параметры: $\varepsilon = 4,2$, $\Delta \varepsilon = 0,1$, $w = 3$ мм, $h = 1,5$ мм, $\Delta h = 0$. Погрешность изготовления МПЛ составляла $\Delta w = 0,1$ мм. Подставляя численные значения в (10), получаем $\gamma_z \approx 1,6\%$.

Описанный измеритель влажности был разработан для использования в системе контроля содержания влаги в многокомпонентной смеси, загружаемой в смесительную камеру технологической линии производства кирпича, и автоматического управления технологическим процессом приготовления смеси. Предложенный принцип построения измерителя может быть также использован при создании влагомеров пищевых продуктов, бумаги, тканей, сыпучих материалов, почвы и т. п.

Предполагается разработка программного обеспечения измерителя влажности, изготовление и исследование характеристик опытного образца прибора, с последующими его натурными испытаниями на предприятии, что составит предмет дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. – В 2-х кн, Кн. 1; Под ред. В. В. Клюева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 488 с.

2. А.С. 1486942 СССР, МКИ G01R 19/04, 25/00. Устройство для измерения амплитуды и разности фаз / И.Б. Широков.(СССР) — Заявл. 24.10.87; Опубл. 11.09.1989, Бюл. № 22.
3. Вимірювання різниці фаз у радіоелектроніці / М.Т. Бова, В.О. Гойжевський, С.М. Маєвський. — К.: Вища шк., 1972. — 232 с.
4. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств/ С. И. Бахарев, В. И. Вольман, Ю. И. Либ; Под ред. В. И. Вольмана. — М.: Радио и связь, 1982. — 328 с.

Поступила в редакцию 10.11.2005г.