

УДК 621.311.25

В. В. Кухарчук, д. т. н, проф.; В. В. Богачук, к. т. н., доц.; В. Ф. Граняк

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД И ЦИФРОВОЕ СРЕДСТВО
ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ДИСПЕРСНЫХ
ДИЭЛЕКТРИКОВ**

Разработаны метод и средство цифрового измерения влажности гетерогенных дисперсных диэлектриков на основе сдвига фазы измерительного сигнала относительно опорного. В качестве сенсора предложен полосовой волновод, на поверхности которого размещен исследуемый образец.

Ключевые слова: влажность, смещение фазы, полосовой несимметричный волновод, статистическая характеристика.

Введение

Повышение точности и быстродействия измерения влажности готовой продукции перерабатывающей отрасли АПК является одним из перспективных направлений повышения ее качества [1]. Особенно остро эта проблема стоит при производстве молокопродуктов, в частности сливочного масла, экспресс-контроль на этапе производства которого значительно усложняется отсутствием первичных измерительных преобразователей, которые характеризовались бы достаточно высоким быстродействием, точностью и надежностью [2].

Учитывая сказанное выше, поиск новых способов опосредствованного измерения влажности сливочного масла, имеющих, как было показано в [2], быстродействие значительно выше по сравнению с прямыми методами, является перспективным направлением последующих научных исследований, а их успешное внедрение – перспективным направлением модернизации оборудования предприятий данной отрасли.

Постановка задачи

Как следует из анализа, приведенного в [2], наиболее перспективными и с точки зрения экспресс-измерения влажности являются методы, связанные с пропусканием или отражением от контролируемого образца электромагнитного излучения, с последующим измерением сдвига фазы и затухания информационной волны по сравнению с опорной. Не менее актуальным является и упрощение конструкции первичного преобразователя, который, имея отмеченные свойства сенсоров на основе электромагнитного излучения, был бы инвариантным к влиянию неинформативных параметров окружающей среды [3]. А так как при использовании несимметричного полосового волновода внешняя окружающая среда почти не перекрывается информативной волной [4], обеспечивающей возможность пренебречь влиянием его параметров, то применение такой конструкции является перспективным для построения измерительных преобразователей влажности. Причем, исходя из конструктивных рассуждений, наиболее целесообразным является использование в устройстве данной конструкции в качестве информативной волны метрового диапазона, который позволяет пренебречь влиянием собственной индуктивности зигзаговидной системы волновода [5].

Учитывая изложенное выше, очевидной является необходимость обстоятельного исследования особенностей взаимодействия электромагнитного излучения метрового диапазона с водой и влажными веществами, что позволит в дальнейшем использовать полученные результаты при построении сенсора влажности. Поэтому, исходя из выше-сказанного, проведение экспериментальных исследований влияния влаги на параметры

электромагнитного излучения диапазона частот 250 – 400 МГц и разработка конструкций первичного измерительного преобразователя, который бы обеспечил возможность использования особенностей этого влияния для получения достоверной информации о влажности контролируемого образца, является актуальной задачей, результаты которой носят научный и прикладной характер.

Анализ путей решения задачи

Согласно классическому подходу, линию передачи со сосредоточенными параметрами, которой является полосовой волновод, использованный при построении упомянутого выше сенсора, можно представить в виде упрощенного электрического круга, изображенного на рис. 1 [6].

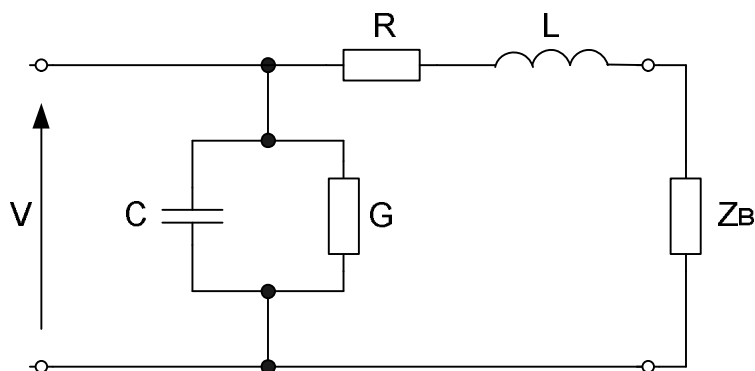


Рис. 1. Электрическая схема замещения волновода

Причем, как показано в работе [6], величины R и L характеризуют потери и нагромождения энергии в металлическом проводнике, а G и C – потери и нагромождения энергии в материале диэлектрика.

Основной особенностью несимметрического полосового волновода является то, что, при правильном выборе его параметров, в нем могут распространяться лишь поперечные магнитные волны, структура электромагнитного поля которых очень похожа на структуру поля поперечной электромагнитной волны [4]. А следовательно, поскольку часть электромагнитного поля будет распространяться вне пределов размещенного между центральным проводником и заземлением диэлектрика, то можно сделать вывод, что параметры C и G в значительной мере будут зависеть от структуры вещества, размещенного на внешней поверхности центрального проводника. Исходя из этого, поскольку для воды является характерным наличие относительно высокого коэффициента преломления, логично будет допустить, что фазные параметры такой волны будут в значительной мере зависеть от влажности образца, размещенного на поверхности такого волновода.

В таком случае сдвиг фазы исходной волны с довольно высокой точностью можно определить, исходя из соотношения [6]:

$$\Delta\varphi = \omega(LC)^{1/2} \Delta x, \quad (1)$$

где ω – угловая частота волны, которая распространяется в волноводе; Δx – длина волновода.

Анализируя выражение (1), можно сделать вывод, что величины ω , L та Δx для рассмотренного случая являются постоянными, а следовательно, данное выражение в сущности является функцией типа $\Delta\varphi = f(C)$.

Для подтверждения гипотезы о значительном влиянии влажности образца на параметры электромагнитной волны предложена экспериментальная установка, структурная

схема которой приведена на рис. 2.

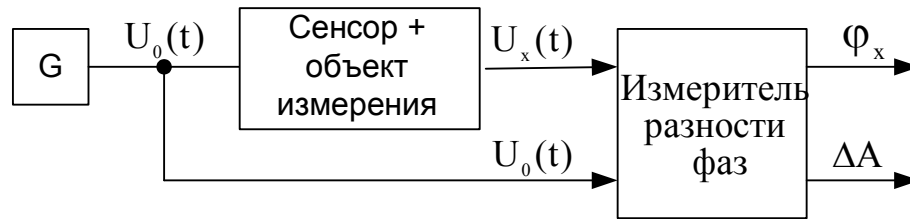


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки

Измерительный преобразователь представляет собой несимметричный полосовой волновод, геометрические размеры которого указаны на рис. 3. Как материал диэлектрической пластины был использован стеклотекстолит (электромагнитная проницаемость $\varepsilon = 5$, толщина стеклотекстолита $h = 2$ мм).

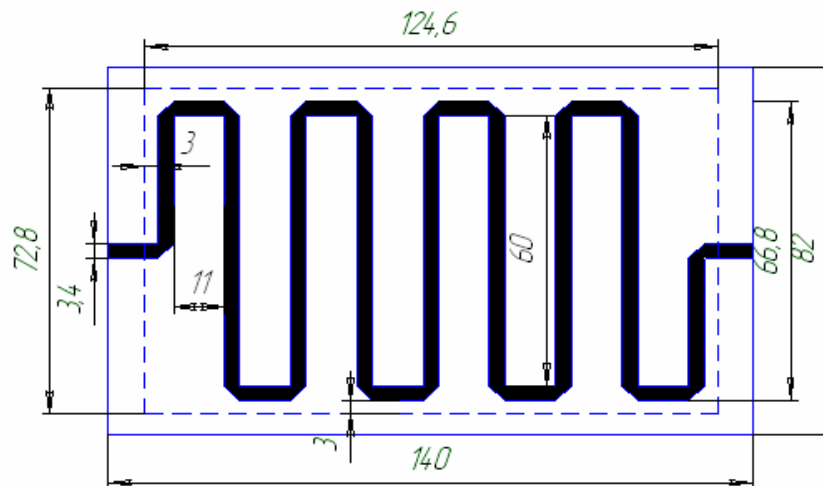


Рис. 3. Схема волновода

Соответственно, суммарное сопротивление волновода за (1) [4] составляет:

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon} \cdot \frac{L}{h} \cdot \left(1 + \frac{1,735}{\varepsilon^{0,0724} \left(\frac{L}{h}\right)^{0,836}}\right)} = 50 \text{ (Ом)}, \quad (2)$$

де L – ширина волновода (3,4 мм).

При исследовании интенсивности затухания и сдвига фазы были использованы: измеритель разницы фаз «ФК2 – 12» и генератор сигналов высокочастотный «Г4 – 107» (исходное напряжение генератора было зафиксировано на уровне $U_0(t) = 0,7$ (В)).

Эксперимент выполнен в два этапа в диапазоне изменения частоты электромагнитных волн 250 – 400 МГц.

На первом этапе получены характеристики затухания и смещения фазы для образцов с влажностью 100% и 50% (50% – дистиллированная вода, 50% – глицерин) и толщиной образца 10 мм. В результате исследования было получено следующие результаты, которые приведены на рис. 4 и рис. 5.

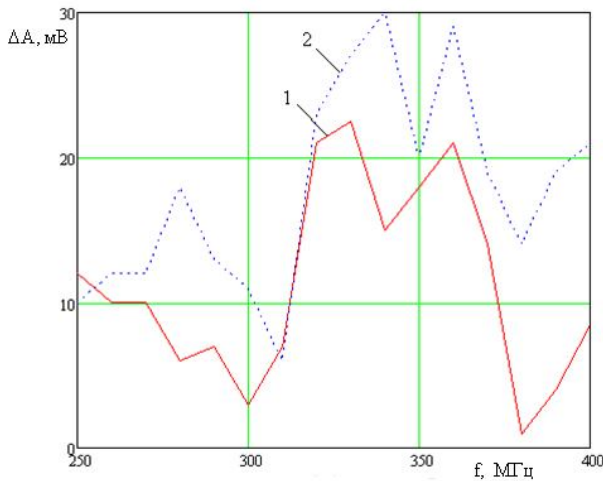


Рис. 4. Зависимость интенсивности затухания электромагнитной волны от частоты:
1 – образец с 100% влажности;
2 – образец с 50% влажности (50% – дистиллированная вода, 50% – глицерин)

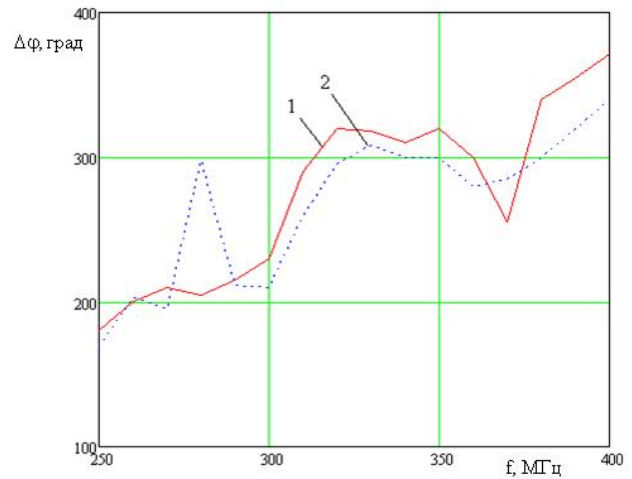


Рис. 5. Зависимость смещения фазы электромагнитной волны от частоты:
1 – образец с 100% влажности;
2 – образец с 50% влажности (50% – дистиллированная вода, 50% – глицерин)

На втором этапе получены характеристики затухания и смещения фазы для образцов с: $\approx 0\%$ (высушенное сливочное масло), 16,04%, 19,66%, 24,86%, 26,92% влажности. Толщина слоя каждого из образцов составляет 10 мм. В результате исследования были получены результаты, приведенные на рис. 6 и рис. 7.

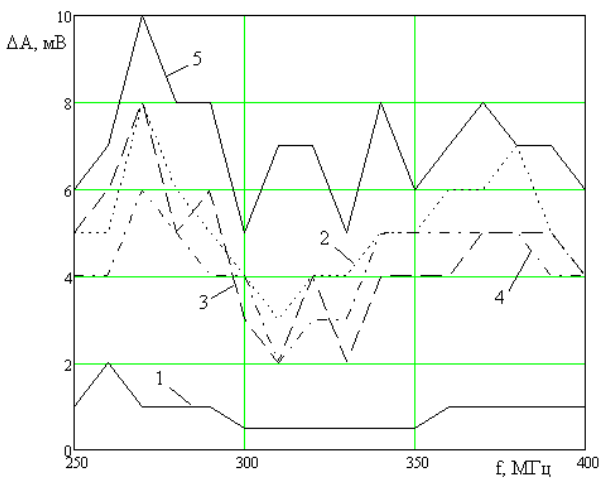


Рис. 6. Зависимость интенсивности затухания электромагнитной волны от частоты:
1 – образец с 0% влажности;
2 – образец с 16,04% влажности;
3 – образец с 19,66% влажности;
4 – образец с 24,82% влажности;
5 – образец с 26,92% влажности

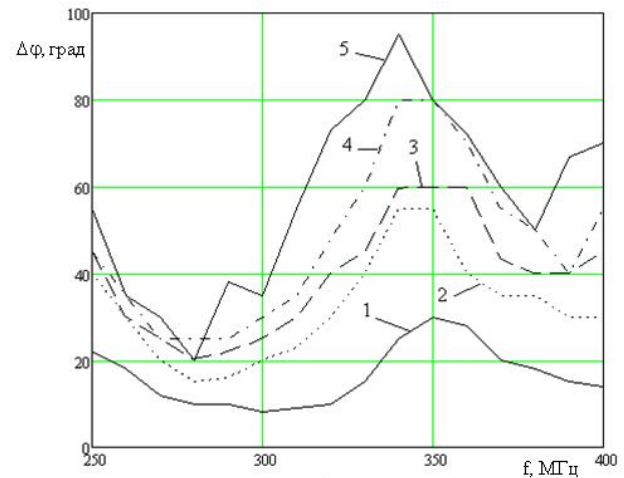


Рис. 7. Зависимость смещения фазы электромагнитной волны от частоты:
1 – образец с 0% влажности;
2 – образец с 16,04% влажности;
3 – образец с 19,66% влажности;
4 – образец с 24,82% влажности;
5 – образец с 26,92% влажности

Из полученных выше экспериментальных данных, как и ожидалось, vyplывает, что использование фазных смещений обеспечивает возможность построения измерительного преобразователя, причем использование параметра затухания волны из-за низкой чувствительности, является нецелесообразным.

Из анализа данных, полученных при измерении сдвига фазы для образцов с разной

влажностью (рис. 6), можно отметить также ярко выраженную нелинейность функции преобразования сенсора. Поскольку высокая чувствительность наблюдается не для всех исследуемых частот, то наиболее перспективными для построения сенсора влажности являются частоты 290, 300, 310, 320, 330 и 340 МГц.

При аппроксимации полученных данных по методу наименьших квадратов полиномами первого ($y = a[0] + a[1] \cdot x$) и второго ($y = a[0] + a[1] \cdot x + a[2] \cdot x^2$) порядка для отмеченных частот получено следующие результаты, приведённые в таблице 1.

Таблица 1

Результаты аппроксимации экспериментальных данных

Частота информативной волны, МГц	Полином 1-го порядка	Сумма квадратов отклонения полинома 1-го порядка	Полином 2-го порядка	Сумма квадратов отклонения полинома 2-го порядка
290	$a[0] = 7,167$ $a[1] = 0,86$	108,29	$a[0] = 10,128$ $a[1] = -0,489$ $a[2] = 0,052$	38,54
300	$a[0] = 6,874$ $a[1] = 0,956$	12,67	$a[0] = 8,011$ $a[1] = 0,439$ $a[2] = 0,02$	2,39
310	$a[0] = 5,443$ $a[1] = 1,427$	211,82	$a[0] = 9,273$ $a[1] = -0,317$ $a[2] = 0,067$	95,17
320	$a[0] = 5,289$ $a[1] = 1,996$	338,13	$a[0] = 10,318$ $a[1] = -0,294$ $a[2] = 0,088$	137,02
330	$a[0] = 10,672$ $a[1] = 2,135$	255,3	$a[0] = 15,386$ $a[1] = -0,012$ $a[2] = 0,083$	78,54
340	$a[0] = 20,906$ $a[1] = 2,407$	191,7	$a[0] = 25,31$ $a[1] = 0,402$ $a[2] = 0,077$	37,47

Статические характеристики преобразователя для каждой из указанных частот приведены на рис. 8 и рис. 9.

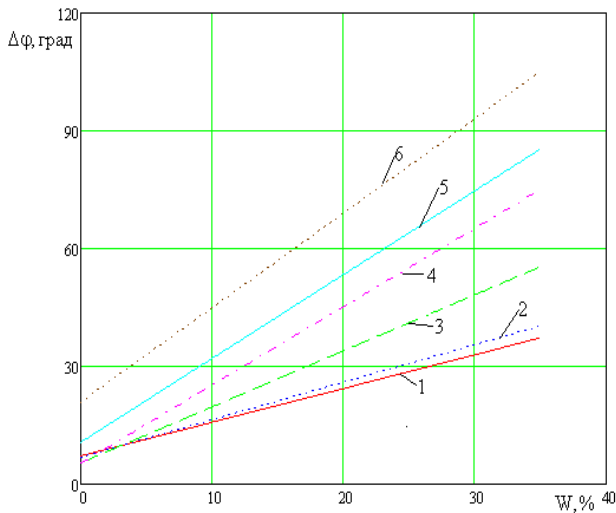


Рис. 8. Статические характеристики сенсора при аппроксимации результатов полиномом 2-го порядка:

- 1 – для частоты информативной волны 290 МГц;
- 2 – для частоты информативной волны 300 МГц;
- 3 – для частоты информативной волны 310 МГц;
- 4 – для частоты информативной волны 320 МГц;
- 5 – для частоты информативной волны 330 МГц;
- 6 – для частоты информативной волны 340 МГц

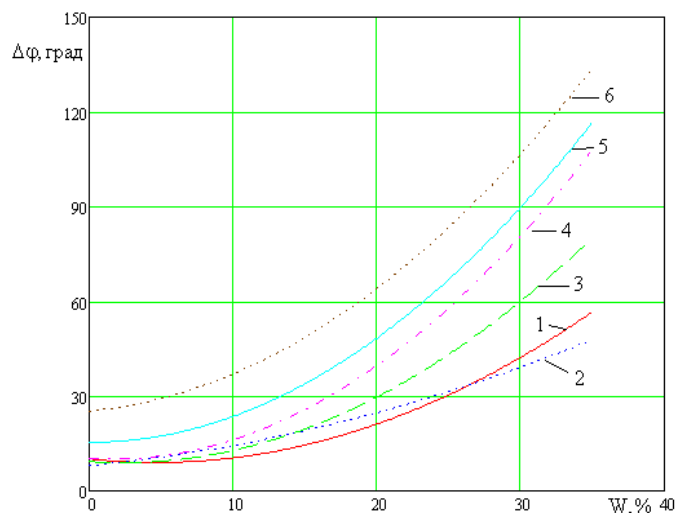


Рис. 9. Статические характеристики сенсора при аппроксимации результатов полиномом 3-го порядка:

- 1 – для частоты информативной волны 290 МГц;
- 2 – для частоты информативной волны 300 МГц;
- 3 – для частоты информативной волны 310 МГц;
- 4 – для частоты информативной волны 320 МГц;
- 5 – для частоты информативной волны 330 МГц;
- 6 – для частоты информативной волны 340 МГц

Соответственно, анализируя полученные суммы квадратов отклонения можно сделать вывод, что наиболее перспективной на указанном диапазоне является частота волны 300 МГц. Но значительным недостатком ее использования является невозможность измерения смещения фазы, используя стандартный цифровой канал разницы фаз, обусловленной выходом данной частоты, а тем более частоты сигнала квантования за верхний предел пропускания существующих цифровых схем.

Исходя из этого, целесообразным является применение специальных высокочастотных цифровых каналов, обеспечивающих возможность измерения разницы фаз волн метрового диапазона с довольно высокой точностью. В результате сочетания такого канала с разработанным сенсором, время измерения приближенно равно двойной длительности периода входной волны, а погрешность на частоте входной волны от 5 к $5 \cdot 10^8$ Гц не превышает:

$$\Delta \leq (0,1 + 10^{-7} f)^0, \quad (3)$$

где f – частота входной волны.

На основе вышеприведенного был разработан полосовой измеритель влажности, структурная схема которого приведена на рис. 10.

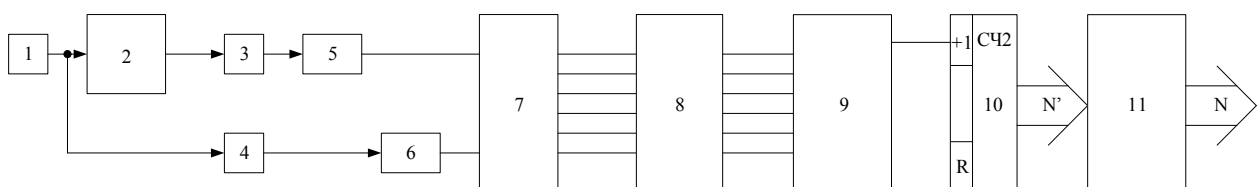


Рис. 10. Структурная схема полосового измерителя влажности

Данное средство содержит: 1 – генератор электромагнитных волн частотой 300 МГц, выход которого соединен со входом первичного измерительного преобразователя 2 и

вторым формирователем 4; 2 – описанный выше сенсор, выход которого соединен со входом первого формирователя 3; 3, 4 – соответственно первый и второй формирователи, выходы которых соединены со входами первого 5 и второго 6 импульсных фильтров соответственно; 5, 6 – первый и второй импульсные фильтры, выходы которых соединены с первым и вторым входом формирователя фазовых интервалов 7; 7 – формирователь фазовых интервалов, выходы которого подсоединены ко входам блока квантования 8; 8 – блок квантования, выходы которого соединены со входами элемента динамического добавления 9; 9 – элемент динамического суммирования, выход которого подсоединен ко входу двоичного счетчика 10; 10 – двоичный счетчик, выходы которого соединены со входами числового преобразователя 11; 11 – числовой преобразователь.

Принцип работы полосового измерителя влажности строится на том, что из генератора 1 на вход первичного измерительного преобразователя 2 и второго формирователя 4 подается сигнал частотой 300 МГц. Проходя через измерительный преобразователь 2, информативный параметр $U_I(t)$ в зависимости от влажности сдвигается по фазе относительно опорного сигнала $U_o(t)$ на разницу фаз:

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_1 = a_1 + a_2 \cdot W + a_3 \cdot W^2,$$

где W – влажность образца; φ_1 – фаза информационной волны; φ_0 – фаза опорной волны; a_1, a_2, a_3 – постоянные коэффициенты.

Из выхода 2 сигнал подается на вход первого формирователя 3. На выходе 3 и 4 формируются прямоугольные импульсы, фронт и срез которых привязаны к нуль-переходам входных сигналов.

Из выходов формирователей 3 и 4 сигналы поступают на первый 5 и второй 6 импульсные фильтры, с помощью которых осуществляется исключение погрешности, вызванной переходом через нуль-уровень напряжения сигнала на входе формирователя в момент времени, которое соответствует нулевым переходам входного сигнала. Причиной появления этой составной погрешности является наличие широкополосного шума во входном сигнале и генерация дополнительного широкополосного шума во входных каскадах формирователей.

Из выхода импульсных фильтров 5 и 6 отфильтрованные сигналы подают на входы формирователя фазовых интервалов 7, предназначенного для формирования четырех фазовых интервалов, представляющих собой импульсы положительной полярности, скважность которых пропорциональна измеряемому фазовому сдвигу, а частота – равна половине частоты входного сигнала.

Кроме этого, в 7 формируются два интервала коррекции, представляющие собой импульсы положительной полярности, длительность которых пропорциональна времени задержки сигналов в 5 и 6, а частота – равна удвоенной частоте сигнала.

Из выходов 7 четыре фазовых интервала и два интервала коррекции подаются на вход блока квантования 8, где заполняются квантуемыми импульсами, то есть формируется шесть импульсных последовательностей и корректирующих интервалов.

Общее количество импульсов всех последовательностей, поступающих на входы элемента динамического суммирования 9 за цикл измерения, является пропорциональным фазовому сдвигу между информативным и опорным сигналом, то есть описывается следующим уравнением превращения: $N = S_\varphi \cdot \Delta\varphi$.

В элементе динамического суммирования 9 осуществляется объединение шести импульсных последовательностей фазовых и корректирующих интервалов в одну импульсную последовательность с сохранением общего количества импульсов.

Из выхода элемента динамического суммирования 9 сигнал подается на двоичный счетчик 10, где осуществляется их последовательный подсчет за один цикл измерения. После чего

полученный двоичный код из выхода счетчика 10 поступает на вход числового преобразователя 11, где по уравнению превращения $N = S_{\phi} \cdot (a_1 + a_2 \cdot W + a_3 \cdot W^2)$ получаем измеренное значение влажности.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что построение измерительных преобразователей в частотном диапазоне 250 – 400 МГц возможно лишь на основе превращения влажности в разницу фаз, потому что превращение влажности в напряжение характеризуется недопустимо низкой чувствительностью для ее практической реализации.

2. Показано, что зависимость разницы фаз от влажности имеет монотонно растущий нелинейный характер.

3. Доказано, что для построения первичного измерительного преобразователя необходимо выбирать частоту информационной волны 300 МГц, поскольку на данной частоте наблюдается не только монотонный рост разницы фаз при росте влажности образца, но и имеет место минимальная сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от определенного по методу наименьших квадратов полинома второго порядка.

4. Как один из примеров практической реализации средства измерения влажности, в основу которого положен метод превращения влажности в разницу фаз электромагнитной волны, предложен цифровой полосовой измеритель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинер М. А. Измерение влажности. Изд. 2-е, переработанное и дополненное / М. А. Берлинер. – М.: Энергия, 1973. – 420 с.
2. Кухарчук В. В. Аналіз методів неруйнівного контролю гетерогенних дисперсних діелектриків / В. В. Кухарчук, В. В. Богачук, І. К. Говор, В. Ф. Граняк // Вісник ВПІ. – 2009. – № 5. – С. 7 – 14.
3. Богачук В. В. Методи та засоби вимірювального контролю порошкоподібних матеріалів. Монографія / В. В. Богачук, Б. І. Мокін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 141 с.
4. Изюмова Т. И. Волноводы, коаксиальные и полосковые линии / Т. И. Изюмова, В. Т. Свиридов. – М.: Энергия, 1975. – 112 с.
5. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Учебное пособие для вузов. В 5 т. Т. VI. / Д. В. Сивухин. – М.: Физматлит, 2005. – 795 с.
6. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. Перевод с английского / В. Фуско. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

Кухарчук Василий Васильевич – заведующий кафедрой теоретической электротехники и электрических измерений.

Богачук Владимир Васильевич – доцент кафедры возобновляемой энергетики и электрических транспортных систем и комплексов.

Граняк Валерий Фёдорович – магистрант первого года обучения института магистратуры, аспирантуры и докторантуры.

Винницкий национальный технический университет.