

*И.О. Котов**

ОЦЕНКА И СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Ферромагнитные жидкости (ФМЖ) применяются при производстве различных изделий, таких как радиопоглощающие покрытия, жидкие уплотнительные устройства, смазочные материалы, оптические анализаторы и другие. Поэтому контроль состава и свойств ФМЖ является актуальной задачей.

Наиболее перспективными методами контроля ФМЖ являются методы и устройства, основанные на взаимодействии исследуемых ФМЖ с электромагнитными волнами (ЭМВ) СВЧ-диапазона. Кон-

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. ГОУ ВПО ТГТУ В.Н. Чернышова.

троль в диапазоне СВЧ волноводными методами обусловлен возможностью применения ряда информативных эффектов для измерения различных параметров ФМЖ [1], простотой конструкции и малыми размерами первичных измерительных преобразователей, оперативностью, а также высокой точностью результатов измерений за счет полного экранирования от внешних паразитных излучений.

Электрофизические параметры ФМЖ, определяющие их качество, в основном, зависят от комплексной диэлектрической проницаемости носителя и концентрации ферромагнитных частиц (ФМЧ) в ФМЖ, поэтому в настоящее время вопросам определения концентрации ФМЧ и анализа дисперсного состава жидких ферромагнитных сред уделено достаточно большое внимание.

Нами разработано волноводное СВЧ устройство [2], предназначенное для определения электрофизических параметров ФМЖ по критической частоте волноводной линии передачи. В основе используемого в устройстве метода лежат условие существования ЭМВ в предельном волноводе и эффект поворота плоскости поляризации ЭМВ, прошедшей через продольно намагниченную ФМЖ [1].

Очевидно, что метрологические характеристики предлагаемого устройства во многом будут определяться конструкцией волноводного тракта, поэтому основной целью проектирования СВЧ-устройства является оптимальный выбор геометрических размеров различных элементов волноводного тракта, обеспечивающих наиболее полное использование диапазона длин волн генератора СВЧ.

Для оценки диапазона измерений устройства контроля параметров ФМЖ необходимо выяснить, как геометрические параметры волноводного тракта влияют на данную метрологическую характеристику.

Волноводный тракт измерительного устройства состоит из последовательно соединенных с помощью плавных переходов трех секций круглого металлического волновода различного диаметра, где с помощью генератора СВЧ на длине волны генератора λ_r возбуждают основную волну H_{11} и устанавливают в линии передачи режим бегущей волны. В средней секции находится диэлектрический сосуд с ФМЖ.

В основе реализованного в данном устройстве метода лежит условие существования бегущей волны (БВ) в металлическом волноводе [1].

Измерение проводится следующим образом. Длина волны λ_r выбирается из условия единственности существования основной волны H_{11} и отсутствия ближайшей моды E_{01} [1]:

$$3,41a_2\sqrt{\epsilon'_{cp}} > \lambda_r > 2,61a_2\sqrt{\epsilon'_{cp}}, \quad (1)$$

где a_2 – радиус средней секции металлического волновода; ϵ'_{cp} – действительная часть средней по зоне взаимодействия относительной ди-

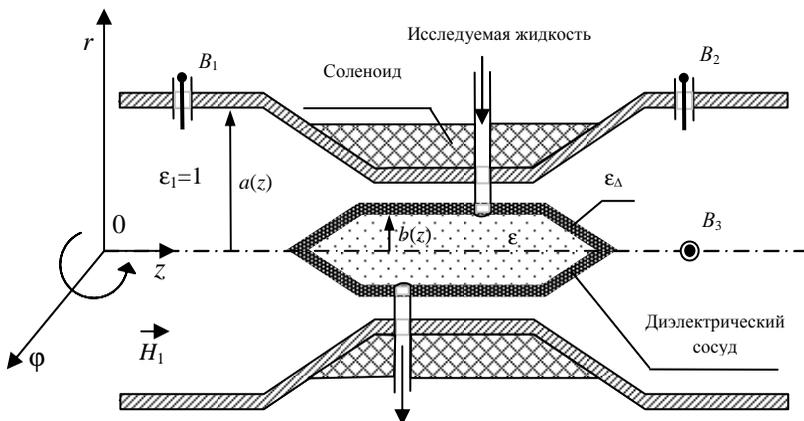


Рис. 1. Фрагмент измерительной ячейки устройства контроля параметров ферромагнитных жидкостей

электрической проницаемости, рассчитанная методом эквивалентных реактивностей [2].

Далее увеличивают длину волны генератора λ_r до момента отсутствия в волноводной линии передачи БВ и определяют критическую длину волны $\lambda_{кр}$, которая связана с электрофизическими параметрами среды, заполняющей волновод, следующим соотношением:

$$\lambda_{кр} \approx 3,41a_2\sqrt{\epsilon'_{cp}}, \quad (2)$$

что позволяет вычислить искомую диэлектрическую проницаемость ФМЖ.

Однако каждая секция волноводного тракта обладает своими критическими длинами волн, поэтому при проектировании всего волноводного тракта необходимо подобрать диаметры секций таким образом, чтобы длина волны «отсечки» соответствовала критической длине волны средней секции во всем диапазоне измерений. С учетом этого определим соотношение геометрических размеров секций необходимое для обеспечения максимального диапазона измерений.

Волноводные секции большего диаметра вследствие условия единственности существования основной волны H_{11} ограничивают рабочий диапазон длин волн генератора в пределах $2,61a_1 \dots 3,41a_1$. Следовательно, для проведения измерений методом «критического волновода» средняя секция с измеряемой ФМЖ должна иметь критическую длину волны в пределах $2,61a_1 \dots 3,41a_1$ во всем диапазоне из-

мерения диэлектрической проницаемости ФМЖ. Вычислим радиус средней секции, обеспечивающий максимальное использование рабочего диапазона генератора.

Из формулы (2) следует, что при увеличении диэлектрической проницаемости ФМЖ критическая длина волны средней секции также увеличивается, следовательно, для полного использования рабочего диапазона длин волн $2,61a_1 \dots 3,41a_1$ необходимо, чтобы критическая длина волны средней секции при минимальном значении диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{\text{cp min}}$ соответствовала наименьшей длине волны генератора, т.е.

$$3,41a_2 \sqrt{\epsilon'_{\text{cp min}}} = 2,61a_1. \quad (3)$$

С другой стороны, при максимальном значении диэлектрической проницаемости $\epsilon'_{\text{cp max}}$ критическая длина волны не должна превышать наибольшей длины волны генератора, т.е.

$$3,41a_2 \sqrt{\epsilon'_{\text{cp max}}} = 3,41a_1. \quad (4)$$

Поделив (4) на (3), получим отношение максимальной диэлектрической проницаемости к минимальной:

$$\sqrt{\frac{\epsilon'_{\text{cp max}}}{\epsilon'_{\text{cp min}}}} \approx 1,306; \quad \frac{\epsilon'_{\text{cp max}}}{\epsilon'_{\text{cp min}}} \approx 1,705. \quad (5)$$

Формула (5) позволяет вычислить пределы измерения средней по зоне взаимодействия диэлектрической проницаемости. Так, при $\epsilon'_{\text{cp min}} = 1$ максимально возможный верхний предел $\epsilon'_{\text{cp max}} \approx 1,705$.

Для расширения диапазона в волноводный тракт введен фильтр волны E_{01} , позволяющий расширить частотный диапазон однододового режима крайних секций по сравнению с предыдущим случаем. В этом случае рабочая длина волны генератора ограничена критическими длинами волн H_{10} , H_{11} и находится в пределах $1,64a_1 \dots 3,41a_1$.

Проводя аналогичные вычисления, получаем:

$$\frac{\epsilon'_{\text{cp max}}}{\epsilon'_{\text{cp min}}} \approx 4,322. \quad (6)$$

Так, при $\epsilon'_{\text{cp min}} = 1$ максимально возможный верхний предел $\epsilon'_{\text{cp max}} \approx 4,322$, что более чем в 2,5 раз больше, чем в предыдущем случае.

В результате вышеприведенного исследования показано, что добавление фильтра волны E_{01} внутрь волноводного тракта позволяет

увеличить диапазон измерений более чем в 2,5 раза без ухудшения остальных метрологических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электродинамика и распространение радиоволн / Г.Т. Марков и др. – М. : Сов. Радио, 1979.

2. Котов, И.О. СВЧ-метод и устройство определения электрофизических параметров ферромагнитных жидкостей на базе критичного волновода / И.О. Котов, В.Н. Чернышов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, вып. 2. – С. 303 – 313.

Кафедра «Информатизация правовой деятельности» ГОУ ВПО ТГТУ