

СВЧ-МЕТОД И УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА БАЗЕ КРИТИЧНОГО ВОЛНОВОДА

И.О. Котов, В.Н. Чернышов

*Кафедра «Криминалистика и информатизация правовой деятельности»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»; for_kotov@mail.ru;*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: комплексная диэлектрическая проницаемость; концентрация частиц; критическая длина волны; круглый волновод; магнитная проницаемость; эффект Фарадея.

Аннотация: Рассмотрены СВЧ-метод и волноводное устройство, позволяющие произвести контроль электрофизических параметров и концентрацию ферромагнитных частиц в гетерогенных жидких средах – ферромагнитных жидкостях. Разработанный метод и реализующее его устройство позволяют повысить точность измерения комплексной диэлектрической проницаемости и концентрации ферромагнитных частиц за счет учета потерь электромагнитной волны в волноводной линии передачи и изменения магнитной восприимчивости ферромагнитных частиц.

При производстве изделий из ферромагнитных материалов, важной задачей является контроль электрофизических параметров дисперсных сред и концентрации ферромагнитных частиц (ФМЧ) в жидкостях.

В настоящее время вопросам определения концентрации и анализа дисперсионного состава жидких сред уделено достаточно большое внимание [1]. Принцип действия практически всех устройств анализа состава и свойств дисперсных сред основан на измерении их физических либо физико-химических параметров, а при выборе преобразователя руководствуются обычно степенью различия параметров жидкости – носителя и наполнителя. Однако для определения дисперсионного состава ферромагнитных жидкостей (ФМЖ), в силу зависимости их магнитных характеристик от концентрации в присутствии внешнего подмагничивания, пригодны не все методы.

Контроль электрофизических параметров гомогенных и гетерогенных дисперсных жидких сред именно в диапазоне СВЧ обусловлен следующим:

- возможностью учета дисперсии диэлектрической проницаемости и удельной проводимости дисперсных сред;
- проявлением гиромантных свойств дисперсных жидких сред в СВЧ-диапазоне в присутствии внешнего поля подмагничивания;

– возможностью управления диэлектрической проницаемостью смеси внешним магнитным полем при намагниченности выше насыщения из-за псевдокристаллической структуры ориентации твердых частиц жидкости;

– первичные измерительные преобразователи (ПИП) на отрезках волноводов (ВВ) обладают минимальными потерями, высокой чувствительностью своих интегральных параметров (резонансной частоты, добротности, набега фазы и так далее) к изменению электрофизических параметров жидких сред;

– малыми размерами ПИП СВЧ-диапазона, работающих в одномодовых режимах, простотой конструкции, максимальной электромагнитной безопасностью и электромагнитной совместимостью, а также отсутствием гальванического контакта с исследуемой средой.

Кроме того, волноводные методы измерения электрофизических параметров и концентрации ФМЖ, использующие свойства магнитоанизотропии (гироманнитные свойства в присутствии постоянного поля подмагничивания H_0), имеют свои особенности, обусловленные тем, что:

а) в отличие от резонаторных более чувствительны, когда измеряются параметры ФМЖ с большой величиной удельной проводимости, например ферритографитовые жидкие смеси;

б) без постоянного поля подмагничивания обладают большей точностью измерений по сравнению с резонаторными в случае, когда диэлектрическая проницаемость частиц сильно отличается от диэлектрической проницаемости жидкости-носителя;

в) в присутствии поля подмагничивания H_0 при измерении параметров ФМЖ инвариантны к вариации удельной проводимости.

Тензорный характер зависимостей магнитных свойств ФМЖ, как гиромангнетиков, обуславливает наличие целого комплекса эффектов взаимодействия электромагнитных волн с намагниченной ФМЖ, применение которых, в целях аналитического контроля дисперсных сред, предопределяет разработку методических основ проектирования ПИП состава и свойств дисперсных сред [2].

Таким образом, необходимость исследования и разработки ВВ методов и устройств измерения электрофизических параметров жидких гетерогенных дисперсных сред в режиме бегущей волны (БВ), позволяющих применять эффекты взаимодействия бегущих волн с намагниченными ФМЖ, является актуальной задачей.

Большинство известных СВЧ-методов и устройств измерения электрофизических параметров жидких сред обладают следующими типичными недостатками: низкой точностью измерений из-за наличия больших потерь электромагнитной энергии в поверхностном слое металлических стенок измерительной камеры по причине наличия гальванического контакта с исследуемым материалом; невозможностью измерения электрофизических параметров малых объемов жидких и твердых сред; сложностью учета частотной дисперсии диэлектрической проницаемости материалов; громоздкостью и сложностью конструкции; высокой стоимостью реализующего устройства.

Нами разработан СВЧ-метод и устройство определения электрофизических параметров ФМЖ на базе критичного волновода. В основе разработанного метода лежит условие «отсечки» электромагнитной волны (ЭМВ) в предельном волноводе и эффект поворота плоскости поляризации ЭМВ, прошедшей через продольно намагниченный феррит [3].

Сущность разработанного СВЧ-метода определения электрофизических параметров ферромагнитных жидкостей поясняется следующим образом.

Показана схема СВЧ-устройства определения электрофизических параметров и концентрации ФМЖ, реализующая предложенный метод (рис. 1). Схема включает волноводную линию передачи, состоящую из трех отрезков круглого

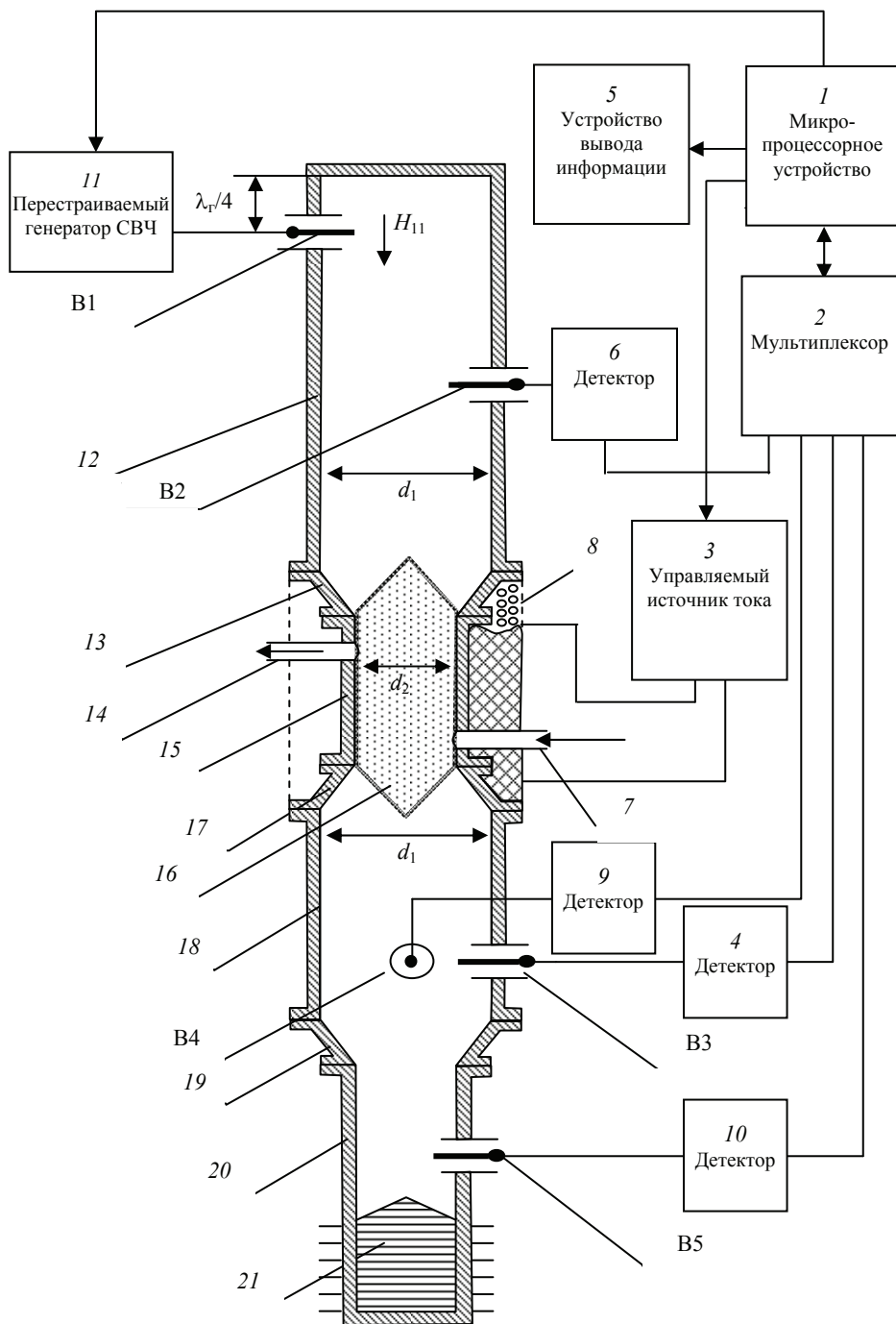


Рис. 1. СВЧ-устройство определения электрофизических параметров и концентрации ферромагнитных жидкостей

волновода различного диаметра 12, 15, 18 и одного отрезка прямоугольного волновода 20, соединенных между собой плавными волноводными переходами 13, 17, 19, причем, секции 12 и 18 волноводной линии передачи имеют одинаковый диаметр d_1 , а секция 15 – меньшего диаметра d_2 ; диэлектрический сосуд 16 с

устройствами ввода 7 и вывода 14 ФМЖ с неизвестными электрофизическими параметрами и имеющий конусообразные торцевые поверхности; управляемый микропроцессорным устройством (МПУ) 1 перестраиваемый генератор СВЧ 11, устройство возбуждения электромагнитной волны типа H_{11} – вибратор В1; устройство подмагничивания – соленоид 8, питаемый от управляемого МПУ источника тока (УИТ) 3, причем соленоид подмагничивания расположен на отрезке круглого волновода 15 меньшего диаметра; приемные вибраторы В2, В3, В4 и В5, подключенные к амплитудным детекторам 6, 9, 4, 10 соответственно, мультиплексор 2, посредством которого микропроцессорным устройством осуществляется электронная коммутация приемных вибраторов и устройство вывода информации 5. На торцевой поверхности отрезка прямоугольного волновода 20 установлена согласующая нагрузка 21 в виде поглощающего конуса, обеспечивающая в волноводной линии передачи режим бегущих волн, причем отрезок прямоугольного волновода в месте расположения согласующей нагрузки имеет радиатор теплоотвода.

Разработанное измерительное устройство работает следующим образом.

В волноводной линии передачи с помощью устройства возбуждения электрического типа – вибратора В1, возбуждается волна магнитного типа H_{11} и устанавливается режим БВ. Для обеспечения распространения волны H_{11} в направлении согласующей нагрузки 21, электрический штырь В1 расположен на расстоянии равным $\lambda_r/4$ от торцевой металлической стенки отрезка круглого волновода 12 линии передачи.

Частота управляемого МПУ 1 перестраиваемого генератора СВЧ 11 выбирается из условия единственности существования основной волны H_{11} длиной λ и отсутствия ближайшей моды волны электрического типа E_{01} [4]

$$3,41a_2 > \lambda > 2,61a_2, \quad (1)$$

где $a_2 = \frac{d_2}{2}$ – радиус средней секции 15 волноводной линии передачи.

Электромагнитная волна любого типа может распространяться в круглом металлическом волноводе радиусом a только в том случае, если ее длина волны λ не будет превышать критическую длину волны $\lambda_{кр}$ [5]:

$$\lambda < \lambda_{кр},$$

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi a}{X_{mn}} \text{ или } \lambda_{кр} = \frac{2\pi a}{\xi_{mn}},$$

где X_{mn} и ξ_{mn} – n -й корень функции Бесселя m -го порядка или ее производной, соответственно, для волн электрического (E -волны) или магнитного (H -волны) типов в круглом волноводе. В круглом металлическом волноводе основной волной является волна H_{11} , для которой справедливо $\lambda_{кр}^{H_{11}} = 3,41a$. Для ближайшей моды

$$E_{01} - \lambda_{кр}^{E_{01}} = 2,61a.$$

Для основной моды волны H_{11} выбор радиуса a круглого волновода для реализации одномодового режима без высших мод («ближайшей» высшей модой является мода E_{01}), например, при $\epsilon'_{ср} = \mu'_{ср} = 1$, возможен из условия:

$$\lambda_{кр}^{H_{11}} > \lambda > \lambda_{кр}^{E_{01}};$$

$$3,41a > \lambda > 2,61a$$

или в общем случае

$$3,41a_2 > \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon'_{\text{ср}} \mu'_{\text{ср}}}} > 2,61a_2. \quad (2)$$

В средней секции волноводной линии передачи 15 диаметром d_2 расположен диэлектрический сосуд 16, наполненным исследуемой жидкостью с неизвестными диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостями и концентрацией ФМЧ.

Сосуд изготавливается из радиопрозрачного материала с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_d \approx 1$. Толщина стенок Δ диэлектрического сосуда 16 значительно меньше его радиуса $\Delta \ll a_2$ и имеет постоянные значения. В этом случае становится практически не существенной отношение величины диэлектрической проницаемости жидкости к диэлектрической проницаемости диэлектрического материала, из которого изготовлен трубопровод, поэтому влиянием материала трубопровода можно пренебречь [1]. Величина диэлектрической проницаемости жидкости лежит в пределах 2...15 для разных случаев. Для обеспечения согласования с полем бегущей электромагнитной волны торцевые стенки диэлектрического сосуда имеют конусообразную форму [6].

Жидкость в диэлектрический сосуд 16 вводится с помощью устройства ввода жидкости 7 и выводится с помощью устройства вывода жидкости 14.

МПУ 1 посредством мультиплексора 2 подключает приемные вибраторы В2 и В3. На приемных вибраторах В2 и В3, расположенных в отрезках круглого металлического волновода 12 и 16 по одной линии на расстоянии ΔZ друг от друга, под действием электромагнитного поля бегущей волны H_{11} наводятся ЭДС, которые поступают на амплитудные детекторы 6 и 4. Полученные значения напряженности электрического поля перед диэлектрическим сосудом с исследуемой ФМЖ – E_1 и после него – E_2 с амплитудных детекторов 6 и 4 через мультиплексор 2 поступают на МПУ 1.

Известно, что затухания электромагнитного поля в металлическом волноводе, вызванные потерей энергии волны в диэлектрике, заполняющем волновод, пропорциональны омическим потерям $\gamma_{\text{ом}}$ [7]. По величине затухания поля волны вдоль волновода можно определить мнимую часть диэлектрической проницаемости.

Таким образом, по значениям напряженностей электрического поля E_1 и E_2 в МПУ 1 вычисляется значение коэффициента затухания поля вдоль волноводной линии передачи – α_z

$$\alpha_z = \frac{1}{\Delta Z} \ln \frac{E_1}{E_2}, \quad (3)$$

и определяется мнимая часть диэлектрической проницаемости ϵ'' по известным формулам [14]:

$$\alpha_z \equiv k\gamma_{\text{ом}}; \quad (4)$$

$$\epsilon'' = \gamma_{\text{ом}}\lambda_T, \quad (5)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Далее МПУ 1 посредством мультиплексора 2 подключает приемные вибраторы В3, В4 и отключает вибратор В2. С помощью управляемого МПУ 1 пере-страиваемого генератора СВЧ 11 изменяют частоту электромагнитной волны до

момента наступления «отсечки», который определяют по отсутствию токов в вибраторах В3, В4 и определяют значение частоты «отсечки».

Условие отсутствия сквозной бегущей волны в волноводной линии следует из выражения (2)

$$\frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon'_{\text{ср}} \mu'_{\text{ср}}}} \geq 3,41a_2. \quad (6)$$

В МПУ 1 по значениям частоты «отсечки» рассчитываются соответствующая ей длина волны λ и действительная часть диэлектрической проницаемости ε' по формуле

$$\varepsilon' = \frac{\lambda}{3,41d_2}. \quad (7)$$

Далее по команде с МПУ 1 перестраивается генератор СВЧ 11 и устанавливается в волноводной линии режим бегущих волн.

С помощью устройства намагничивания в виде соленоида 8, питаемого от УИТ 3, по команде с МПУ 1, создается постоянное, нормальное направлению распространения волны H_{11} и нарастающее по величине, магнитное поле H_0 .

Электромагнитная волна H_{11} , распространяясь вдоль отрезка 15 волноводной линии передачи, взаимодействует с ФМЧ в жидкости, протекающей через диэлектрическую камеру 16.

Взаимодействие линейно поляризованной ЭМВ с ФМЧ в жидкости происходит в присутствии постоянного магнитного поля, направление вектора, напряженности которого совпадает с направлением распространения ЭМВ. В результате такого взаимодействия при H_0 в зоне А (рис. 2) наблюдается явление поворота плоскости поляризации (эффект Фарадея) электромагнитной волны. Величина угла θ поворота плоскости поляризации зависит от концентрации ФМЧ в жидкости, длины пути излучения в жидкости, поля подмагничивания (тока подмагничивания) и магнитной восприимчивости [8]

$$\theta = \beta [\mu^+(H_0, C, \chi), \varepsilon] l, \quad (8)$$

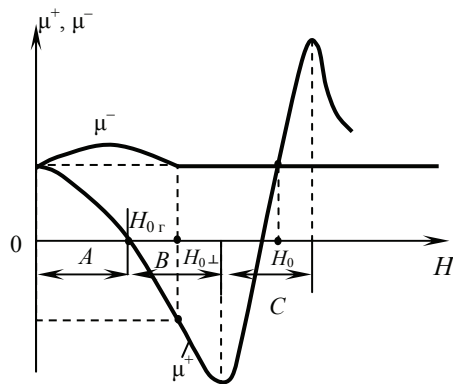


Рис. 2. Зависимости нормированных магнитных проницаемостей левополяризованной и правополяризованной волн μ^+ и μ^- от напряженности постоянного магнитного поля H_0

где β – коэффициент распространения электромагнитной волны зависящий от величины μ и ε ; μ^+ – относительная магнитная проницаемость ФМЧ для правополяризованной волны; ε – относительная диэлектрическая проницаемость ФМЧ; H_0 – напряженность постоянного магнитного поля; C – относительная концентрация ферромагнитных частиц в жидкости; l – длина пути электромагнитной волны в жидкости с ФМЧ.

При постоянных ε и l угол поворота θ зависит от измеряемой величины тока соленоида, магнитной восприимчивости и величины C :

$$\theta = \Phi(I_0, \chi, C). \quad (9)$$

На приемных взаимно ортогональных вибраторах В3 и В4 под действием электромагнитного поля линейно поляризованной волны H_{11} наводятся ЭДС, величины которых пропорциональны проекциям вектора электромагнитного поля волны на эти вибраторы. ЭДС, наводимые в этих вибраторах, поступают на амплитудные детекторы 4 и 9. Полученные значения напряженности электрического поля с амплитудных детекторов 4 и 9 через мультиплексор 2 поступают на МПУ 1.

По моменту равенства токов, наводимых в приемных вибраторах В3, В4 с МПУ 1 на УИТ 3, поступает команда на остановку изменения тока подмагничивания, стабилизируется поле подмагничивания H_0 , и определяется ток подмагничивания I_0 , соответствующий повороту плоскости поляризации бегущей волны на угол $\theta = 45^\circ$.

При стабилизации величины угла θ ток подмагничивания является мерой концентрации ферромагнитных частиц в жидкости и их магнитной восприимчивости

$$I_0 = \Phi(C, \theta). \quad (10)$$

В МПУ 1 по величине тока подмагничивания I_0 по (10) определяется относительная концентрация ФМЧ в жидкости.

Из выражения (8) видно, что изменение величины магнитной восприимчивости χ , характеризующей химический состав ФМЧ в жидкости, является основным источником погрешности определения относительной концентрации ФМЧ в жидкости.

Коррекцию измерения концентрации на вариацию магнитной восприимчивости ФМЧ производят следующим образом [9].

По командам с МПУ 1 подключаются приемные вибраторы В3, В4 и В5, а также посредством УИТ 3 увеличивают ток подмагничивания, а, следовательно, и напряженность постоянного магнитного поля H_0 , создаваемое соленоидом подмагничивания δ до граничной величины $H_{0г}$ – момента изменения поляризации выходной волны от линейной к вращающейся. Для случая, когда радиусы волновода и диэлектрического трубопровода равны $a = b$, существует круговая вращающаяся поляризация.

При увеличении величины H_0 до граничного значения $H_0 = H_{0г}$ произойдет процесс изменения поляризации выходной волны от линейной к круговой, так как при $H_{0г}$ относительная магнитная проницаемость смеси ФМЧ и жидкости-носителя для правополяризованной волны $\mu_{см}^+$ равна нулю и правополяризованная волна вытесняется из объема ФМЖ, быстро ослабляясь или поглощаясь в поверхностном слое. Через ФМЖ проходит левополяризованная волна с вращающейся поляризацией с относительной магнитной проницаемостью смеси $\mu_{см}^- = 1$.

Момент перехода поляризации индицируется по отсутствию сигнала с выхода амплитудного детектора 10, так как в прямоугольном волноводе электромагнитная волна с вращающейся поляризацией не распространяется, и ЭДС, наводимая на вибраторе В5, равна нулю.

В МПУ 1 определяется величина граничного тока $I_г$, прямо пропорциональная величине χ , не зависящей от концентрации и определяемой только химическим составом (видом) ФМЧ. Рассчитывается величина χ , и вносится коррекция на изменение магнитной восприимчивости в измерение концентрации ФМЧ.

На рис. 3 представлен макет реализующего СВЧ-устройства определения диэлектрической проницаемости жидких сред по методу «критичного волновода».

На рис. 4 и 5 представлены экспериментальные зависимости тока прямой $I_{пр}$ и отраженной $I_{отр}$ волн от частоты генератора, а также зависимость погонного коэффициента затухания электромагнитного поля от проводимости смеси ФМЧ.

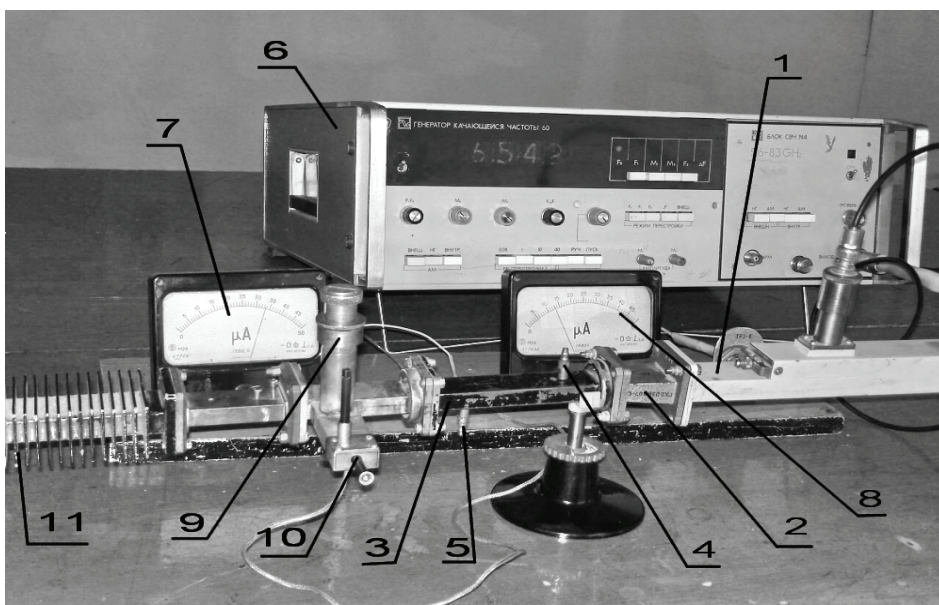


Рис. 3. Макет СВЧ-устройства определения диэлектрической проницаемости жидких сред по методу «критичного волновода»: 1 – волновод диапазона 4 см; 2 – плавный переход; 3 – волновод диапазона 2 см с расположенной в нем измерительной камерой; 4, 5 – устройства ввода и вывода ФМЖ соответственно; 6 – генератор качающейся частоты ГКЧ-61; 7, 8 – микроамперметры детекторных секций проходящей и отраженной ЭМВ; 10 – короткозамыкатель подвижный для обеспечения настройки приемной СВЧ-секции; 11 – согласующая нагрузка

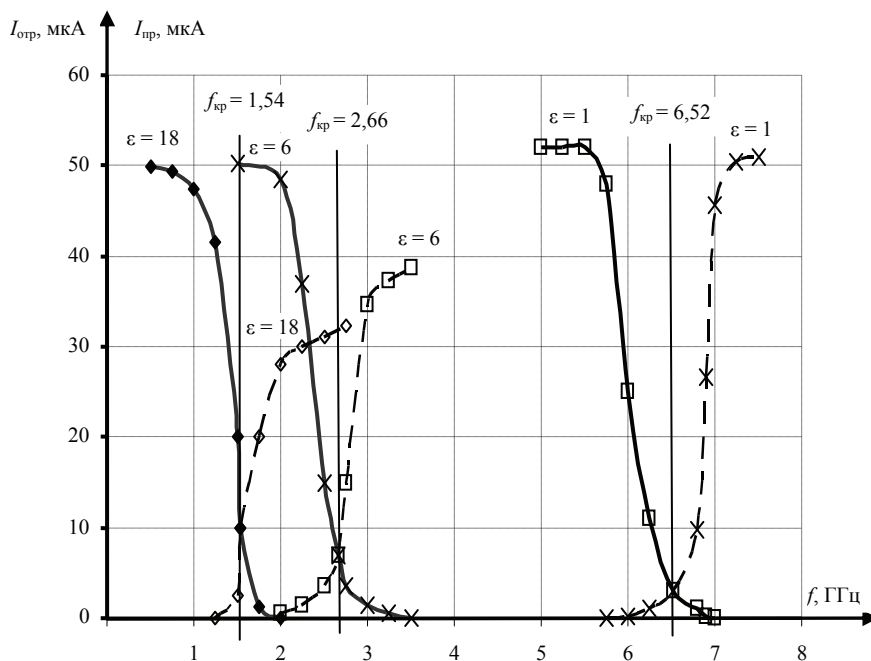


Рис. 4. Графики зависимостей $I_{пр}$ (—) и $I_{отр}$ (---) от частоты ЭМВ для ФМЖ с различными диэлектрическими проницаемостями при концентрации ФМЖ $C_v = 0,15$

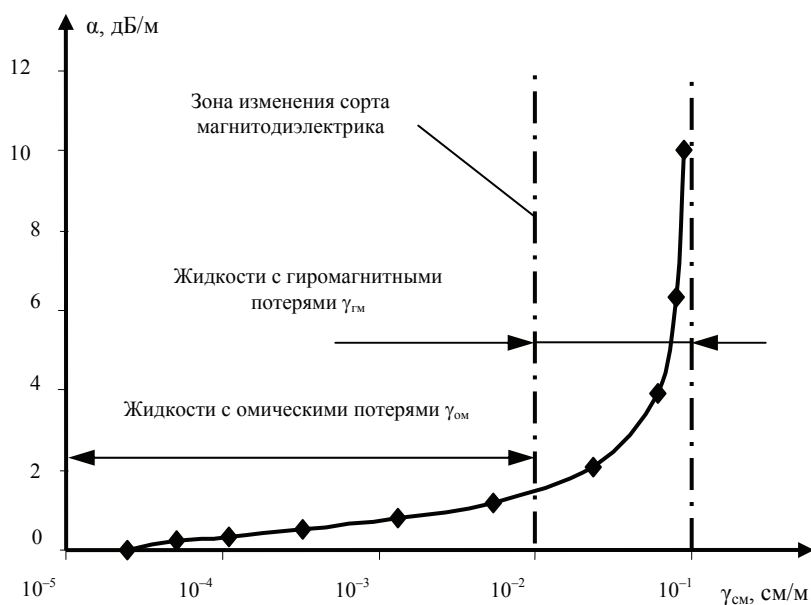


Рис. 5. Экспериментальная зависимость погонного коэффициента затухания от проводимости смеси ФМЧ

Приведенные зависимости позволяют определить действительное и мнимое значения комплексной диэлектрической проницаемости ФМЖ по формулам (7) и (5) соответственно.

Как показали экспериментальные исследования, предложенные метод и реализующее устройство позволяют повысить точность определения диэлектрической проницаемости ФМЖ 15–20 % и концентрации ФМЧ 16–21 % за счет учета в измерениях мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости ФМЖ, вариации магнитной восприимчивости ФМЧ, характеризующей их химический состав.

Метод может быть использован для контроля качества пожаро-взрывоопасных и агрессивных жидких сред в процессе их производства и эксплуатации в авиационной, химической и других областях промышленности.

Список литературы

1. Федюнин, П.А. Волноводные методы неразрушающего контроля параметров и свойств материалов в прикладной электродинамике : монография / П.А. Федюнин, Д.А. Дмитриев. – Тамбов : Изд-во Тамб. высш. воен. авиац. инженер. уч-ща радиоэлектроники (воен. ин-т), 2006. – 406 с.
2. Методические основы проектирования первичных измерительных преобразователей состава и свойств жидких сред на отрезках металлических волноводов. Общая классификация / И.О. Котов [и др.]. – М. : Деп. в ЦСИФ МО РФ 17.11.2008, № В6943.
3. Котов, И.О. Измерение диэлектрической проницаемости жидких сред по критической длине волны / И.О. Котов // Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В.И. Вернадского : сб. мат. 3-й междунар. конф. Тамбов, 2008. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2008. – С. 193–195.

4. Петров, Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн / Б.М. Петров. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 558 с.

5. Электродинамика и распространение радиоволн / Г.Т. Марков [и др.]. – М. : Сов. радио, 1979. – 376 с.

6. Пат. 2331871 Российская Федерация, МПК⁷ G01N15/06, G01R27/26. Волноводный СВЧ-способ измерения диэлектрической проницаемости жидких сред по критической длине волны / Федюнин П.А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2006103298/09 ; заявл. 28.02.2006 ; опубл. 20.08.2008, Бюл. № 23. – 3 с.

7. Федоров, Н.Н. Основы электродинамики / Н.Н. Федоров. – М. : Высшая школа, 1980. – 399 с.

8. Пат. 2090860 Российская Федерация, МПК⁶ G01N15/06. Устройство для измерения концентрации ферромагнитных частиц в жидкости / Дмитриев Д.А., Суслин М.А., Степаненко И.Т., Федюнин П.А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 94007037/25 ; заявл. 02.24.1994 ; опубл. 09.20.1997, Бюл. № 12. – 3 с.

9. Пат. 2247967 Российская Федерация, МПК⁷ G01N15/06. СВЧ-способ определения концентрации ферромагнитных частиц в жидком носителе / Федюнин П.А., Макаров В.С. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003106527/28 ; заявл. 03.07.2003 ; опубл. 10.03.2005, Бюл. № 7. – 2 с.

Microwave Method and Device for Measuring Electro-Physical Parameters of Ferromagnetic Liquids Based on Sensitive Waveguide

I.O. Kotov, V.N. Chernyshov

*Department "Criminal Law and Computerization of Legal Activity",
TSTU; for_kotov@mail.ru*

Key words and phrases: complex dielectric constant; particles concentration; critical wavelength; round waveguide; magnetic permeability; Faraday effect.

Abstract: The paper examines microwave technique and waveguide device enabling to control electro-physical parameters and concentration of ferromagnetic particles in heterogeneous liquid media – ferromagnetic liquids. The developed technique and the implementing device enable to increase the accuracy of measuring complex dielectric permeability and concentration of ferromagnetic particles on account of electromagnetic wave loss in waveguide line of transmission and alteration of magnetic sensitivity of ferromagnetic particles.

SHF-Methode und die Einrichtung der Bestimmung der elektrophysikalischen Parameter der ferromagnetischen Flüssigkeiten auf Grund des kritischen Wellenleiter

Zusammenfassung: Es sind die SHF-Methode und die Wellenleitereinrichtung, die die Kontrolle der elektrophysikalischen Parameter und die Konzentration der ferromagnetischen Teilchen in den heterogenen flüssigen Medien – in den

ferromagnetischen Flüssigkeiten zu verwirklichen erlauben, betrachtet. Die erarbeitete Methode und die sie realisierende Einrichtung erlauben, die Genauigkeit der Messung der komplexen dielektrischen Durchdringbarkeit und der Konzentration der ferromagnetischen Teilchen auf Rechnung der Verlusten der elektromagnetischen Welle in der wellenleitenden Übertragungsleitung und der Veränderung der Empfänglichkeit der ferromagnetischen Teilchen zu erhöhen.

**Méthode de micro-ondes et dispositif de la définition
des paramètres électrophysiques des liquides ferromagnétiques
à la base du conduit d'ondes critique**

Résumé: Sont examinés la méthode de micro-ondes et le dispositif du conduit d'ondes permettant de réaliser le contrôle des paramètres électrophysiques et la concentration des particules ferromagnétiques dans les milieux liquides hétérogènes – liquides ferromagnétiques. La méthode élaborée et le dispositif la réalisant permettent d'augmenter la précision de la mesure de perméabilité diélectrique complexe et de la concentration des particules ferromagnétiques pour le compte du calcul des pertes de l'onde électromagnétique (**OEM**) dans une ligne de transfert du conduit d'ondes et du changement de la réceptivité des particules ferromagnétiques.

Авторы: *Котов Илья Олегович* – аспирант кафедры «Криминалистика и информатизация правовой деятельности»; *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Криминалистика и информатизация правовой деятельности», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектронные средства бытового назначения», ГОУ ВПО «ТГТУ».
