

УДК 543.61:621.372.88

The Waveguide Device for Measurement Dielectric Constant of a Heterogeneous Dispersed Liquid Media

Aleksandr I. Kazmin* and Pavel A. Fedyunin

*Military Education and Research Centre of Military-Air Forces
«Military-Air Academy
Named After Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»
54a Starykh Bolshevikov Str., Voronezh, 394064, Russia*

Received 27.06.2016, received in revised form 21.09.2016, accepted 19.10.2016

In this paper a new waveguide device for control the dielectric permittivity of heterogeneous dispersed liquid media is presented. Device operation is based on the effect relay changing the operating mode of the waveguide transmission line in order to control a parameters of heterogeneous dispersed liquid media. It is spoken in detail CST Studio suit simulation device when measuring the dielectric constant of aviation fuel with a free moisture and mechanical impurity. Characteristics waveguide device allows to perform high precision measurement of the permittivity heterogeneous liquid media.

Keywords: waveguide device, dielectric permittivity, critical wavelength, heterogeneous dispersed liquid media.

Citation: Kazmin A.I., Fedyunin P.A. The waveguide device for measurement dielectric constant of a heterogeneous dispersed liquid media, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(8), 1183-1197. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-8-1183-1197.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: alek-kazmin@ya.ru

Волноводные устройства контроля диэлектрической проницаемости авиационных дисперсных гетерогенных жидких сред

А.И. Казьмин, П.А. Федюнин

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
Россия, 394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а*

В статье представлено новое волноводное устройство для измерения диэлектрической проницаемости гетерогенных дисперсных жидких сред. Работа устройства основана на использовании эффекта релейной смены режима работы волноводной линии передачи в целях контроля параметров гетерогенных дисперсных жидких сред. Подробно описывается моделирование устройства в CST Studio suit при измерении диэлектрической проницаемости авиационного керосина со свободной влагой и механическими примесями. Характеристики волноводного устройства позволяют проводить высокоточные измерения диэлектрической проницаемости гетерогенных жидких сред.

Ключевые слова: волноводное устройство, диэлектрическая проницаемость, критическая длина волны, гетерогенная дисперсная жидкая среда.

Введение. Постановка задачи

Технический прогресс в авиационных и космических технологиях определяется совершенствованием известных и созданием новых технологий. Одним из направлений развития и совершенствования воздушных судов (ВС) различного назначения выступает повышение надёжности гидравлических и топливных систем ВС и, как следствие, увеличение безопасности полетов, боеготовности и эффективности применения авиационного комплекса (АК) в целом.

Высокие требования предъявляются к качеству авиационных жидких сред (АЖС), в том числе авиационного топлива, на наличие посторонних фракций, например влаги и механических мелкодисперсных примесей различной физической природы, процентное содержание серы и удельной проводимости топлива. Особое внимание при этом должно уделяться безопасности контроля, а сам контроль должен быть оперативным и высокоточным.

Для различных АЖС, таких, например, как авиационное топливо и гидравлические жидкости, важнейшими параметрами служат диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость, степень загрязненности твердыми частицами данных жидкостей, а также наличие в них свободной влаги.

К сожалению, в настоящее время в Российской Федерации разработка средств контроля параметров АЖС, применяемых в ВС, по общему уровню значительно отстает от зарубежных стран. Например, отечественные лаборатории по контролю авиатоплива оборудуются в основном зарубежными приборами с очень высокой стоимостью; кроме того, существующие методики контроля не в полной мере удовлетворяют заданным требованиям по оценке качества контролируемого авиационного топлива.

Возникающее техническое противоречие между возможностями существующих методов, способов и средств контроля АЖС и всё возрастающими требованиями к уровню их качества, а значит, и надежности функционирования гидравлических и топливных систем, устраняется переходом к разработке высокоточных методов, способов и приборов аналитического контроля параметров авиационных жидких сред, базирующихся на эффектах различной физической природы.

К контролю параметров авиационных жидкостей предъявляются следующие требования: бесконтактность измерений; пожаровзрывобезопасность; локальность и инвариантность положения первичного измерительного преобразователя (ПИП) относительно объекта контроля (ОК); высокая оперативность и точность измерений; малая стоимость ПИП и минимум элементов измерительного тракта СВЧ.

Таким требованиям удовлетворяют микроволновые волноводно-антенные методы, суть которых заключается в том, что мера измеряемой величины есть результат оценки топологической деформации пространственно-временной структуры микроволнового излучения, взаимодействующего с объектом контроля.

Несмотря на обширное количество публикаций по данным методам, систематизированное их изложение в отечественной литературе ограничивалось идеями практической методологии, определяемой несколькими основными монографиями и обзорными работами [1-3]. За рубежом также было издано несколько монографий [4, 5] по данной проблеме.

В [6] нами произведен обзор и анализ волноводных методов и способов определения электрофизических параметров, таких как диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость, концентрация примесей в гомогенных и гетерогенных дисперсных жидких средах. В ходе анализа установлены основные недостатки, сужающие возможности представленных методов для контроля параметров АЖС:

- практически все современные реализации волноводных методов для достижения приемлемой точности измерения требуют в своем составе очень дорогостоящего векторного анализатора цепей [7, 8];
- одним из основных недостатков волноводных методов и устройств признано непосредственное помещение жидкости в полость волновода, что сопровождается трудностями ввода и вывода, наличием застойных явлений, а также электрофизического контакта с металлическими стенками волновода;
- малая точность и технологические трудности измерения величины диэлектрической проницаемости, а также невозможность исследования жидкостей с малыми потерями;
- высокая погрешность измерений из-за трудно учитываемого высокочастотного излучения через устройства ввода-вывода жидких сред;
- влияние на точность измерений воздушных зазоров.

Однако, как показали наши исследования, существует еще множество слабо изученных эффектов взаимодействия электромагнитных полей СВЧ-диапазона с жидкими и твердыми материалами, которые можно эффективно применить для измерения их электрофизических параметров, причем они значительно превосходят существующие методы контроля по точности и достоверности.

Одним из возможных направлений развития волноводных методов контроля является использование эффекта релейной смены режимов работы волноводной линии передачи в целях контроля параметров гетерогенных дисперсных жидких сред. Проведем обоснование и разработку волноводного устройства, измерительный принцип которого базируется на эффекте релейной смены режима работы волноводной линии передачи по критической длине волн.

1. Обоснование и разработка волноводного устройства

Любое волноводное устройство для исследования АЖС фактически представляет собой волноводный датчик, который подключается к управляющей системе.

В основе принципа действия разработанного волноводного датчика лежит зависимость критической частоты волноводной линии передачи (ВВЛП) для основного типа электромагнитной волны от геометрических параметров ВВЛП и электрофизических свойств среды, находящейся внутри волновода [6, 7]. Разработка подобных датчиков возможна на основе круглых, прямоугольных волноводов, а также на основе волноводов сложной формы. В качестве примера рассмотрим волноводный датчик на основе круглого волновода.

Структурная схема волноводного датчика показана на рис. 1.

Волноводный датчик представляет собой волноводную линию передачи 1, состоящую из последовательно соединённых с помощью плавных переходов 2 трех секций круглого металлического волновода различного диаметра, причем крайние секции волновода имеют одинаковый диаметр d_1 , а средняя – меньшего диаметра d_2 с расположенным в ней диэлектрическим сосудом 3 с исследуемой жидкостью с диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью $\mu=1$, устройств ввода 4 и вывода 5 жидкости, приемных вибраторов 6 B_1 и B_2 , расположенных вдоль волноводной линии передачи перед диэлектрическим сосудом с исследуемой жидкостью и после него.

Как известно, в круглом волноводе основной волной является волна H_{11} [9]. Исходя из этого, рабочая длина волны волноводного датчика выбирается из условия единственности существования основной волны H_{11} и отсутствия ближайшей моды E_{01} :

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

где $a_2 = \frac{d_2}{2}$ – радиус средней секции металлического волновода [6, 10].

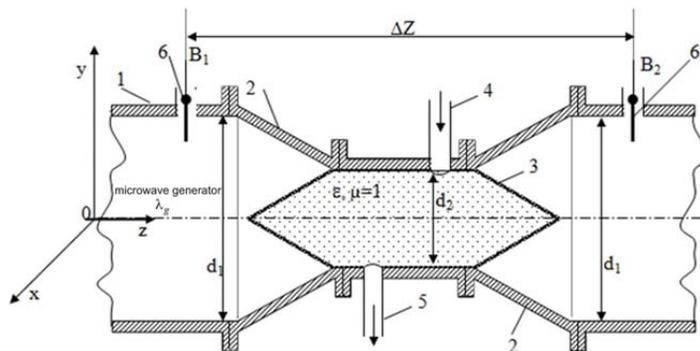


Рис. 1. Структурная схема датчика

Приемные вибраторы b V_1 и V_2 предназначены для измерения напряженности электрического поля в волноводной линии передачи перед диэлектрическим сосудом с исследуемой жидкостью – E_1 – и после него – E_2 .

Условие распространения любой моды в круглом металлическом волноводе радиусом a [6, 10] следующее:

$$\lambda_g < \lambda_{cr}, \quad (2)$$

$$\lambda_{cr} = \frac{2\pi a}{X_{mn}}, \text{ или } \lambda_{cr} = \frac{2\pi a}{\xi_{mn}}, \quad (3)$$

где X_{mn} и ξ_{mn} – n -й корень функции Бесселя или её производной, соответственно для волн электрического (E-волны) или магнитного (H-волны) типа.

Для основной моды H_{11} : $\lambda_{cr}^{H_{11}} = 3,41a$ и «ближайшей» моды E_{01} : $\lambda_{cr}^{E_{01}} = 2,61a$.

Очевидно, что для частично заполненного волновода критическая длина волны будет зависеть не только от геометрических параметров волноводной системы и порядка моды, но и от электрофизических свойств материала, заполняющего волновод, таких как диэлектрическая и магнитная проницаемости (их действительная часть):

$$\lambda_{cr} = \frac{2\pi a}{X_{mn}} \sqrt{(\varepsilon'_m \cdot \mu'_m)}, \quad (4)$$

где ε'_m и μ'_m – средние параметры по зоне взаимодействия, которые определяются методом эквивалентных емкостей [6].

Сделаем расчёт зависимости среднего значения диэлектрической проницаемости волновода ε'_m , заполненного средой, от соотношения радиуса волновода и трубопровода методами эквивалентных параметров [6].

Для основной волны в круглом волноводе H_{11} составляющие электромагнитного поля имеют следующий вид:

$$\dot{E}_r = j \frac{\omega \mu_0}{rk_c^2} AJ_1 \left(\frac{1,841}{a} r \right) \sin \phi; \quad (5)$$

$$\dot{E}_r = j \frac{\omega \mu_0}{rk_c^2} AJ_1 \left(\frac{1,841}{a} r \right) \sin \phi. \quad (6)$$

Волноводный датчик с исследуемой жидкостью в диэлектрическом сосуде представляет собой трёхслойный волновод, состоящий из воздуха, диэлектрической ячейки и исследуемой жидкости. Проведем замену трёхслойного волновода полностью заполненным волноводом так, чтобы его погонная ёмкость $C_{eq}(\varepsilon_{eq}; a(z))$ равнялась ёмкости многослойного частично заполненного волновода $C(\varepsilon_2 > 1; \varepsilon_1 = 1; a(z); b(z))$, вычисленной с учетом деформации силовых линий электрического поля. Расчетная схема трехслойного волновода приведена на рис. 2.

Для частично заполненного волновода значение погонной емкости может быть записано в виде

$$C = \frac{|q|^2}{2W_{eq}}, \quad (7)$$

где q – погонный заряд, W_{eq} – эквивалентная энергия [6].

Для полного заполнения эквивалентного волновода

$$C = \frac{|q_{eq}|^2}{2W_{eq}^e}, \tag{8}$$

где q_{eq} – погонный эквивалентный заряд; W_{eq}^e – мгновенное значение энергии электрического поля на единичном отрезке волноводного перехода.

Поскольку поток силовых линий индукции электрического поля через поверхность измерительной ячейки единичной длины $r = a(z)$ не меняется, то в соответствии с теоремой Остроградского–Гаусса величина эквивалентного заряда $q_{eq} = q$. В соответствии с методом эквивалентных емкостей $C = C_{eq}$, тогда из выражений (7) и (8) следует

$$W_{eq}^e = W_{eq}. \tag{9}$$

С учетом того, что на границе раздела двух сред тангенциальные составляющие векторов напряженности электрического поля E_φ непрерывны, а нормальные составляющие E_n претерпевают скачок, определяемый отношением диэлектрических проницаемостей двух сред

$$E_{\varphi 1} = E_{\varphi 2}; E_{n1} = \varepsilon_2 E_{n2}, \tag{10}$$

где $E_{\varphi 1}, E_{\varphi 2}$ – тангенциальные составляющие векторов напряженностей соответственно 1-й и 2-й сред; $E_{r1} = E_{r2}$ – нормальные составляющие векторов напряженностей соответственно двух сред.

Используя известные соотношения [11], получим погонные значения энергии, запасенной в емкостях C_{eq} и C , в виде

$$W_{eq}^e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_m'}{2} \int_0^b \int_0^{2\pi} \frac{E_r^2}{\varepsilon_r'^2} r dr d\varphi, \tag{11}$$

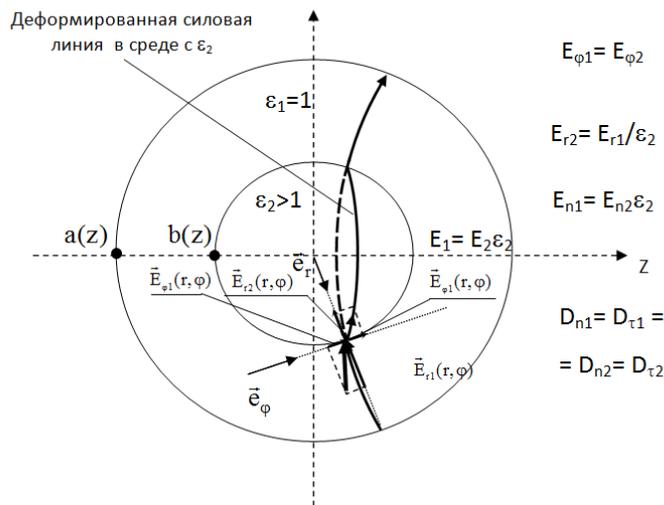


Рис. 2. К расчёту зависимости средней по зоне взаимодействия диэлектрической проницаемости ε_m от соотношения радиуса волновода и трубопровода

$$W_{eq}^e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2}{2} \int_0^{b-\Delta} \int_0^{2\pi} \left(\frac{E_r}{\varepsilon_2}\right)^2 r dr + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_2'}{2} \int_{b-\Delta}^b \int_0^{2\pi} \left(\frac{E_r}{\varepsilon_2'}\right)^2 r dr + \frac{\varepsilon_0}{2} \int_b^a \int_0^{2\pi} E_r r dr, \quad (12)$$

где W_{eq}^e – энергия конденсатора единичной длины для случая частичного заполнения; E_r – мгновенное значение радиальной составляющей напряжённости электрического поля в круглом волноводе, полученное из известных соотношений для волны H_{11} ; E_r / ε_2 – напряжённость радиальной составляющей электрического поля в исследуемой среде, полученная с учётом деформации из (10); E_r / ε_2' – напряжённость радиальной составляющей электрического поля внутри стенки диэлектрического, полученная с учётом деформации из (10); ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость исследуемой жидкости; ε_2' – относительная диэлектрическая проницаемость материала ячейки; Δ – толщина стенок ячейки.

Соотношения (11) и (12) получены без учёта касательной составляющей E_φ , так как по теореме Остроградского–Гаусса она не вносит вклад в заряд и энергию конденсатора.

Используя выражения (11) и (12) с учётом выражения (9), получаем окончательное выражение для относительной диэлектрической проницаемости «эквивалентного» волновода:

$$\varepsilon_m' = 0,562 / \left[\frac{1}{\varepsilon_2} - 0,439 + \left(\frac{1}{\varepsilon_2'} - \frac{1}{\varepsilon_2} \right) J_0^2(1,841 \frac{b-\Delta}{a}) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2'} - \frac{1}{\varepsilon_2} \right) J_1^2(1,841 \frac{b-\Delta}{a}) + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_2'} \right) J_0^2(1,841 \frac{b}{a}) + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_2'} \right) J_1^2(1,841 \frac{b}{a}) \right]. \quad (13)$$

Подставив выражение (13) в соотношение (4), решив полученное уравнение относительно ε_2 и учтя, что в большинстве случаев толщиной стенок диэлектрической ячейки можно пренебречь [6], получаем формулу для определения действительной части комплексной диэлектрической проницаемости исследуемой жидкости:

$$\varepsilon_m' = 0,562 / \left[\frac{1}{\varepsilon_2} - 0,439 + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_2'} \right) J_0^2(1,841 \frac{b}{a}) + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_2'} \right) J_1^2(1,841 \frac{b}{a}) \right]. \quad (14)$$

Таким образом, средняя по зоне взаимодействия диэлектрическая проницаемость ε_m' зависит от диэлектрической проницаемости исследуемой среды в диэлектрическом сосуде и геометрических параметров волновода.

Измерение диэлектрической проницаемости (действительной ее части) с помощью волноводного датчика производится следующим образом. Устанавливают режим бегущей волны. Волна типа H_{11} является рабочей, поэтому для реализации одномодового режима без высших мод необходимо выполнение условия единственности существования моды H_{11} по всей рабочей длине волноводной линии передачи:

$$\lambda_{cr}^{E_{01}} < \lambda_g < \lambda_{cr}^{H_{11}}, \quad (15)$$

где $\lambda_{cr}^{H_{11}}$ – критическая длина основной волны H_{11} ; $\lambda_{cr}^{E_{01}}$ – следующая по величине критическая длина волны E_{01} .

Затем увеличивают длину волны генератора до момента «отсечки», который определяется по отсутствию бегущей волны – смены режима работы волноводной линии передачи. Геометрические параметры секций волноводного тракта должны быть подобраны таким образом, чтобы длина волны, соответствующая этому моменту, определялась диэлектрической проницаемостью АЖС и геометрическими параметрами диэлектрической ячейки, т.е. критической длиной основной волны H_{11} средней секции:

$$\lambda_{cr}^{H_{11}} \approx 3,41 \cdot a_2 \sqrt{\varepsilon'_m \mu'_m}, \quad (16)$$

где a_2 – радиус средней секции волновода; ε'_m , μ'_m – действительные части средних по зоне взаимодействия комплексных относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей среды, заполняющей волновод (для немагнитной АЖС $\mu'_m \approx 1$).

Так как волна H_{11} является основной для круглого волновода, то при условии $\lambda_g \geq \lambda_{cr}^{H_{11}}$ (условие «отсечки») в волноводе отсутствует бегущая волна. По измеренному значению длины волны $\lambda_{cr}^{H_{11}}$, соответствующей «отсечке», из (14) можно определить действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости среды, заполняющей волновод. В случае полного заполнения исследуемой жидкостью диэлектрического сосуда диэлектрическую проницаемость можно определить по упрощенной формуле [6, 12, 13]:

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda_g}{3,41 a_2} \right)^2. \quad (17)$$

2. Моделирование работы волноводного датчика

Для исследования характеристик рассматриваемого волноводного датчика разработана его трехмерная электродинамическая модель в среде CST Studio suit, состоящая из последовательно соединённых с помощью плавных переходов трех секций круглого металлического волновода различного диаметра, причем крайние секции волновода имеют одинаковый диаметр d_1 , а средняя – меньшего диаметра d_2 с расположенным в ней диэлектрическим сосудом с исследуемой жидкостью с диэлектрической проницаемостью ε и магнитной проницаемостью $\mu=1$. На рис. 3а представлен общий вид модели, а на рис. 3б – более детально диэлектрический сосуд с исследуемой жидкостью, который расположен внутри средней секции волновода.

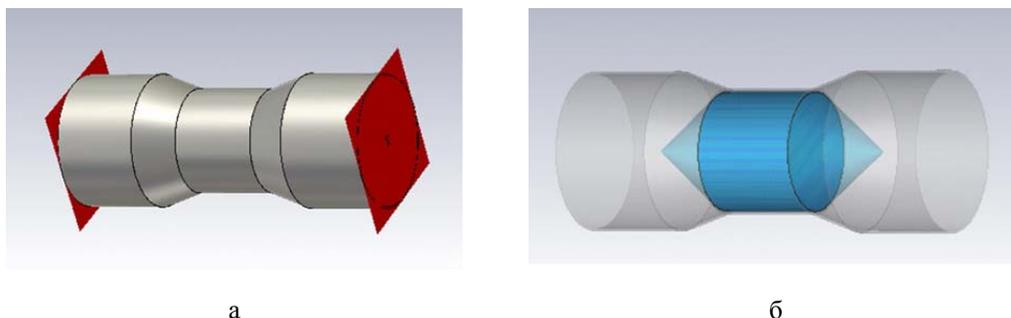


Рис. 3. Внешний модели волноводного датчика в среде CST Studio suit: а – общий вид модели; б – диэлектрический вид сосуд для исследуемой жидкости

Каждая из секций (рис. 3а) обладает своими собственными критическими длинами волн, и для построения адекватной электродинамической модели такой системы диаметры секций были выбраны таким образом, чтобы длина волны «отсечки» соответствовала критической длине волны средней секции во всём диапазоне измерений.

Толщина стенок Δ диэлектрического сосуда выбрана значительно меньше его радиуса и имеет постоянное значение, при этом становится практически несущественным отношение величины диэлектрической проницаемости жидкости ϵ к диэлектрической проницаемости диэлектрического материала, из которого изготовлен трубопровод. Сосуд изготавливается из радиопрозрачного материала ($\epsilon_c \approx 1$), поэтому влиянием материала можно пренебречь [6].

Волноводная система датчика в пакете CST Studio suit была представлена как четырехполюсник, имеющий два волноводных порта 1 и 2 (на тыловой и фронтальной сторонах структуры). Благодаря этому стал возможен расчет электродинамических характеристик волноводного датчика.

С помощью полученной электродинамической модели произведено моделирование работы датчика по измерению диэлектрической проницаемости. Для создания условий, соответствующих реальной практической ситуации, были оценены возможности датчика по измерению влагосодержания и механических примесей в авиационном керосине.

Определение малых примесей влаги в авиационном керосине возможно благодаря очень высокой относительной диэлектрической проницаемости воды 80, во много раз большей, чем у большинства исследуемых веществ.

Оценке жидких загрязняющих компонентов в виде микрокапель воды, характеризующих их попадание в авиационный керосин, оптимально соответствует эмпирическая зависимость Оделевского для хаотически расположенных частиц в смеси:

$$\epsilon_{kw} = A + \sqrt{A^2 + \frac{\epsilon_{kw}\epsilon_w}{2}}, \quad (18)$$

$$A = \frac{1}{4}[(3\nu_k - 1)\epsilon_k + (3\nu_w - 1)\epsilon_w], \quad (19)$$

где ϵ_{kw} – диэлектрическая проницаемость авиационного керосина с нерастворенной влагой; ϵ_k – диэлектрическая проницаемость авиационного керосина без влаги; ϵ_w – диэлектрическая проницаемость свободной влаги, $\epsilon_w = 81$; ν_k – объемная концентрация авиационного керосина; ν_w – объемная концентрация нерастворенной влаги, при этом выполняется условие $\nu_w + \nu_k = 1$ [14].

Диэлектрическая проницаемость авиационного керосина, измеренная на частотах до 10 ГГц, лежит в пределах $\epsilon_k = 1,3 - 1,958$ [1].

Таким образом, за начальное значение диэлектрической проницаемости керосина без влаги было принято $\epsilon_k = 1,958$. Исследовался диапазон влагосодержания W от 1 до 16 %. Диапазон изменения диэлектрической проницаемости авиационного керосина, вычисленной по формулам (18) и (19) и содержащей влагу, при этом таков: $\epsilon_{kw} = 1,958 - 3,445$.

По формуле (17) были вычислены теоретические критические частоты f_{cr} волноводного датчика, соответствующие исследуемому диапазону измерения диэлектрической проницаемости $\epsilon_{kw} = 1,958 - 3,445$.

Данные вычисления показали, что при изменении влагосодержания авиационного керосина на 1 % происходит уменьшение критической частоты волноводного датчика на 73 МГц. При увеличении влагосодержания до 16 % критическая частота уменьшается на 1289 МГц. Зависимость критической частоты отсечки от влагосодержания в керосине почти линейная.

Далее произведено моделирование измерения влагосодержания на электродинамической модели в пакете CST Studio suit. Моделирование осуществлялось следующим образом. Задавалось значение диэлектрической проницаемости керосина, соответствующей заданному влагосодержанию W . Диапазон рабочих частот для расчета электродинамической системы выбирали из условия единственности существования основной волны H_{11} и отсутствия ближайшей моды E_{01} , т.е

$$3,41a_2 > \lambda_g > 2,61a_2,$$

где $a_2 = \frac{d_2}{2}$ – радиус средней секции металлического волновода.

В реальном волноводном датчике на начальном этапе проведения измерений устанавливается режим бегущих волн и далее изменением частоты генератора СВЧ добиваются момента наступления отсечки, при этом полученная критическая частота фиксируется, потом вычисляется диэлектрическая проницаемость керосина по формуле (17).

Для примера на рис. 4 показано распределение напряженности электрического поля в волноводном датчике при измерении влагосодержания авиационного керосина в режиме бегущих волн на начальном этапе измерения.

Критическая частота (момент отсутствия в волноводной линии передачи бегущей волны) определяется по полученным характеристикам коэффициента отражения S_{11} от частоты, вычисленным в диапазоне от 2 до 10 ГГц. На рис. 5 изображена серия кривых коэффициента отражения датчика S_{11} : кривая 1 соответствует керосину без влаги, кривая 2 – при изменении влагосодержания на 1 % и кривая 3 – при изменении влагосодержания до 16 %. На рис. 6 приведено распределение напряженности электрического поля в момент измерения критической частоты.

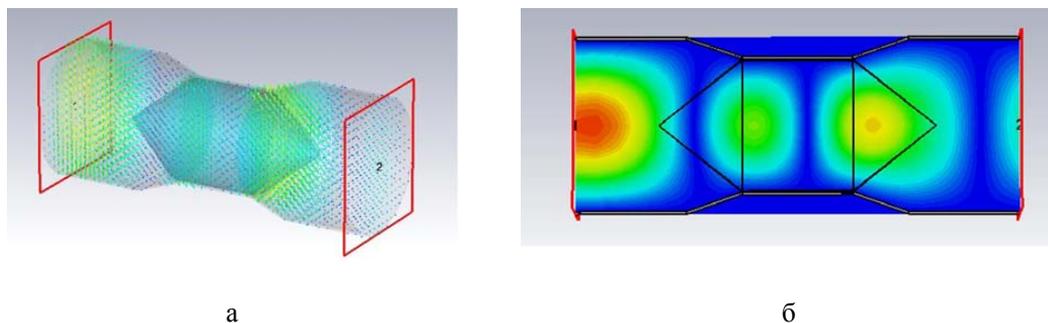


Рис. 4. Распределение напряженности электрического поля E в режиме бегущих волн при измерении влагосодержания в керосине с 1 % влаги: а – общая трехмерная картина распределения напряженности электрического поля; б – двумерная проекция распределения напряженности электрического поля в плоскости, проходящей через диэлектрический сосуд

Результаты моделирования в CST Studio suit практически совпадают с результатами, полученными по формуле (17). Анализ критических частот, определенных по графикам рис. 5, показывает почти те же самые результаты. При изменении влагосодержания авиационного керосина на 1 % происходит уменьшение критической частоты волноводного датчика на 74 МГц. При увеличении влагосодержания до 16 % критическая частота уменьшается на 1288 МГц.

На рис. 7 представлена теоретическая зависимость критической частоты волноводного датчика f_{cr} от влагосодержания в авиационном керосине, полученная с помощью электродинамического моделирования в среде CST Studio suit.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 7, показывает, что расхождение критических частот во всем исследуемом диапазоне составляет менее 0,18 %. Данное расхождение свидетельствует о том, что CST Studio suit вычисляет критическую частоту с учетом точного значения ди-

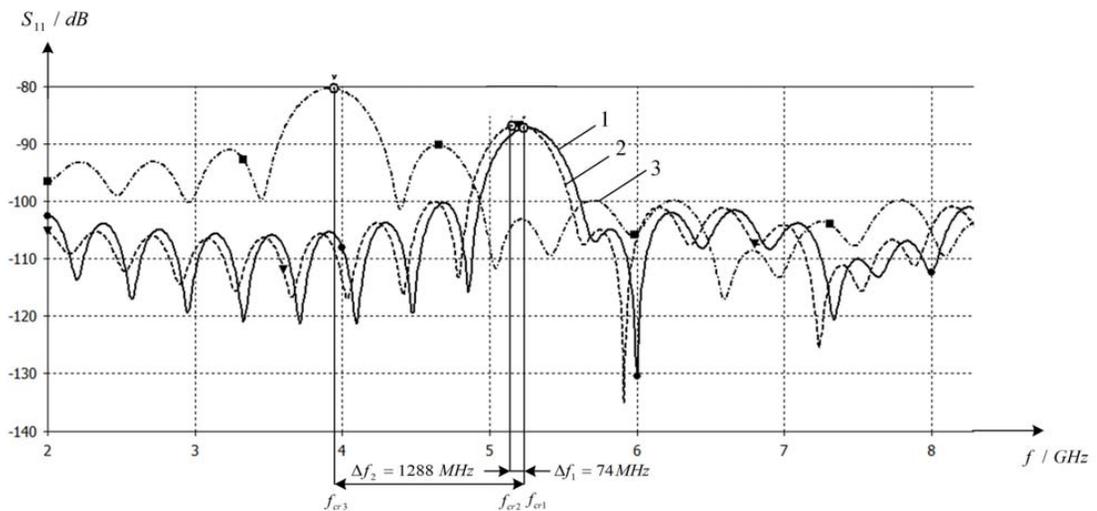


Рис. 5. Зависимость коэффициента S_{11} отражения волноводного датчика от частоты при моделировании измерения влаги в керосине

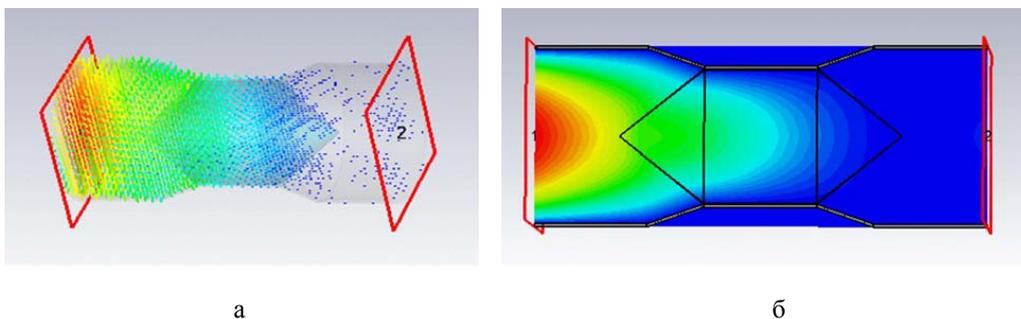


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля E в режиме «отсечки» при измерении влагосодержания в керосине с 1 % влаги: а – общая трехмерная картина распределения напряженности электрического поля; б – двумерная проекция распределения напряженности электрического поля в плоскости, проходящей через диэлектрический сосуд

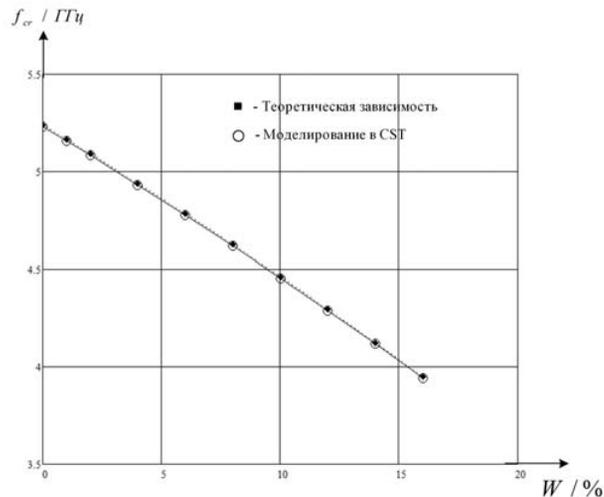


Рис. 7. Теоретическая зависимость критической частоты волноводного датчика от влагосодержания в авиационном керосине и полученная с помощью электродинамического моделирования в среде CST Studio suit

электрической проницаемости согласно формуле (14). Ввиду очень малого расхождения частот использование формулы (17) для определения диэлектрической проницаемости правомерно.

Произведено моделирование работы датчика при оценке загрязнения авиационного керосина продуктами абразивной пыли $\epsilon_d = 4,5 - 16$. Диэлектрическая проницаемость такой смеси может быть оценена на основе эмпирической зависимости Оделевского–Винера для матричного расположения частиц в смеси:

$$\epsilon_{kd} = \epsilon_k \left(1 + \frac{v_d}{\frac{1-v_d}{3} + \frac{v_d}{\epsilon_d - \epsilon_k}} \right), \quad (20)$$

где ϵ_{kd} – диэлектрическая проницаемость авиационного керосина с абразивной пылью; ϵ_k – диэлектрическая проницаемость авиационного керосина без пыли; ϵ_d – диэлектрическая проницаемость пыли, $\epsilon_d = 4,5 - 16$; v_d – объемная концентрация пыли, при этом выполняется условие $v_d + v_k = 1$ [14].

Диэлектрическая проницаемость авиационного керосина без примесей применяется равной $\epsilon_k = 1,958$ [1]. Исследовался диапазон объемной концентрации абразивной пыли v_d от 1 до 9 %. Диапазон изменения диэлектрической проницаемости авиационного керосина, вычисленный по формуле (20) и содержащий пыль, при этом таков: $\epsilon_{kd} = 1,958 - 3,445$.

Процесс моделирования оценки содержания абразивной пыли в керосине аналогичен процессу моделирования влагосодержания.

Согласно теоретическим значениям, вычисленным по формуле (17), при увеличении объемной концентрации пыли на 1 % происходит уменьшение критической частоты волноводного датчика на 77 МГц. При увеличении объемной концентрации пыли до 9 % критическая частота уменьшается на 689 МГц.

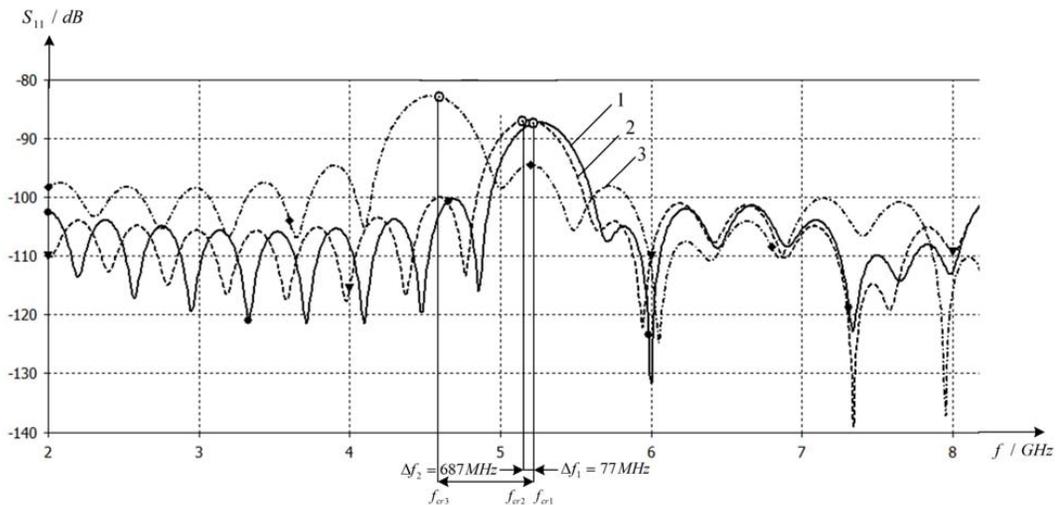


Рис. 8. Зависимость коэффициента S_{11} отражения волноводного датчика от частоты при моделировании измерения абразивной пыли в керосине

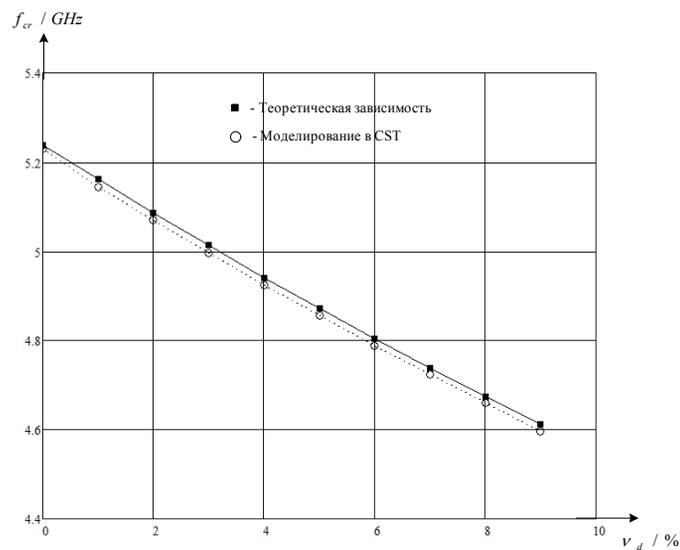


Рис. 9. Теоретическая зависимость критической частоты волноводного датчика от объемной концентрации пыли в авиационном керосине, полученная с помощью электродинамического моделирования в среде CST Studio suit

На рис. 8 показана серия кривых коэффициента отражения датчика S_{11} : кривая 1 соответствует керосину без пыли, кривая 2 при изменении объемной концентрации пыли на 1 % и кривая 3 при изменении объемной концентрации до 9 %.

На рис. 9 представлена теоретическая зависимость критической частоты волноводного датчика f_{cr} от объемной концентрации абразивной пыли в авиационном керосине, полученная с помощью электродинамического моделирования в среде CST Studio suit.

Таким образом, моделирование в CST Studio suit демонстрирует те же самые результаты, что были получены по формуле (17). Анализ критических частот, определенных по графикам рис. 9, дает идентичные результаты. При увеличении объемной концентрации пыли на 1 % происходит уменьшение критической частоты волноводного датчика на 77 МГц. При увеличении объемной концентрации пыли до 9 % критическая частота уменьшается на 687 МГц.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 9, показывает, что расхождение критических частот во всем исследуемом диапазоне составляет менее 0,2 %.

Заключение

В настоящее время перспективно использование СВЧ-устройств для контроля электрофизических параметров различных жидких материалов в авиационной и различных других отраслях промышленности. Несмотря на большое количество работ по данной тематике, существует еще множество неисследованных электродинамических эффектов, которые можно применить для измерения электрофизических параметров жидких материалов.

В статье представлен волноводный датчик контроля диэлектрической проницаемости авиационных жидких сред. Разработанный волноводный датчик дает возможность повысить оперативность и точность измерения диэлектрической проницаемости гетерогенных жидких сред по моменту изменения режима работы волноводной линии передачи. В нем полностью отсутствует гальванический контакт с измеряемой средой. Конструкция датчика позволяет решать конструктивно-оптимизационные задачи.

Исследованы возможности датчика по измерению диэлектрической проницаемости гетерогенных дисперсных жидких сред. Проведенное электродинамическое моделирование в среде CST Studio suit подтверждает принципиальную возможность практического применения волноводного датчика для измерения влагосодержания и наличия механических примесей в авиационном керосине.

Список литературы

- [1] Брандт А. А. *Исследование диэлектриков на СВЧ*. М.: ГИФМЛ, 1963. 360 с. [Brandt A. A. Investigation of dielectrics on microwave. Moskva, GIFML, 1963, 360 p. (in Russian)].
- [2] Физические методы органической химии / под ред. А. Вайсберга. Т. 3. М.: ИИЛ, 1954. 456 с. [Physical methods of organic chemistry. Edited by A. Vaisberg. T3. Moskva, IIL, 1954, 456 p. (in Russian)].
- [3] Ключев В.В., Соснин В.Н., Филинов В.Н. *Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник* / под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 1995. 408 с. [Klyuev V.V., Sosnin V.N., Filinov V.N. Nondestructive testing and diagnostics: Directory. Edited by corresponding member RAN, prof. V.V. Klyuev. Moskva, Mashinostroenie, 1955, 408 p. (in Russian)].
- [4] L. Chen *Microwave electronics: measurement and materials characterization*. New Jersey: John Wiley, 2004. 537 p.
- [5] Collier R.J., Skinner A.D. *Microwave measurements*. London: Institution of engineering and technology, 2007. 506 p.

[6] Казьмин А.И., Федюнин П.А., Черных Ю.Н. *Волноводные способы и устройства контроля состава и свойств авиационных жидких сред*. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. 208 с. [Kaz'min A.I., Fedyunin P.A., Chernykh Yu.N. Waveguide methods and monitoring devices for composition and properties of liquids aviation. Voronezh: VUNTs VVS «VVA», 1955, 408 p. (in Russian)].

[7] Gorriti A., Slob E. New tool for S-parameters measurements and permittivity reconstruction, *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol.43, No.8, 1727-1735.

[8] Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials Application Note, *Keysight Technologies*; <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-2589EN.pdf?id=670519>.

[9] Федоров Н.Н. *Основы электродинамики*. М.: Высшая школа, 1980. 399 с. [Fedorov N.N. Fundamentals of electrodynamics. Moskva: Vysshaya shkola, 1980, 399 p. (in Russian)].

[10] Казьмин А.И., Котов И.О., Завражных Е.А., Федюнин П.А. *Методические основы проектирования первичных измерительных преобразователей состава и свойств жидких сред на отрезках металлических волноводов*. Общая классификация. Депонированная рукопись. М.: ЦВНИ МО РФ, 2008. 32 с. [Kaz'min A.I., Kotov I.O., Zavrazhnov E.A., Fedyunin P.A. Methodical bases of designing primary measuring converters composition and properties of liquid media on the segments of metal waveguides. General classification. Moskva, TsVNI MO RF, 2008, 32 p. (in Russian)].

[11] Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. *Электродинамика и распространение радиоволн*. М.: Сов. Радио, 1979. 376 с. [Markov G.T., Petrov B.M., Grudinskaya G.P. Electrodynamics and wave propagation. Moskva, Sov. Radio, 1979, 376 p. (in Russian)].

[12] Казьмин А.И. СВЧ-метод и устройство аналитического экспресс-контроля качества авиационного топлива. *Электронный журнал Труды МАИ*, 2014, 74. [Kaz'min A.I. Computational Investigation of Flows in Tube Heat Exchangers, *Electronic journal Proceedings of the MAI*, 2014, 74 (in Russian)].

[13] Федюнин П.А., Котов И.О., Казьмин А.И., Чернышев В.Н., Завражных Е.А. СВЧ устройство для определения электрофизических параметров и концентрации ферромагнитных жидкостей. Patent RF № 2465571 (2012), заявл. 24.02.09. опублик. 27.10.2012, № 30 [Fedyunin P.A., Kotov I.O., Kaz'min A.I., Chernyshev V.N., Zavrazhnov E.A. Microwave device for determining the electrical parameters and the concentration of ferrofluid, *Пат. РФ № 2465571 (2012), stated 24.02.09. published 27.10.2012, №30* (in Russian)].

[14] Власов Ю.А., Удлер Э.И., Тищенко Н.Т., Земляной С.А., Таньков О.Ю. Метод диагностирования карьерных автосамосвалов по изменению диэлектрической проницаемости среды работающего масла. *Фундаментальные исследования*, 2013, 8(6), 13071311 [Vlasov Yu.A., Udler E.I., Tishchenko N.T., Zemlyanoi S.A., Tan'kov O.Yu. Method of diagnosing of career dump trucks on change of dielectric permeability of the environment of working oil, *Fundamental research*, 2013, 8(6), 13071311 (in Russian)].

[15] Скворцов Б.В., Силов Е.А. Исследование корреляционных зависимостей между октановым числом и электродинамическими параметрами углеводородных продуктов. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2009, 11(5), 6471 [Skvortsov B.V., Silov E.A. Method of diagnosing of career dump trucks on change of dielectric permeability of the environment of working oil, *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, 11(5), 64-71 (in Russian)].