

УДК 543.61: 621.372.88

СВЧ-метод и устройство аналитического экспресс-контроля качества авиационного топлива

Казьмин А.И.

*Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина,
ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия*

e-mail: alek-kazmin@ya.ru

Аннотация

Предложен новый СВЧ-метод и устройство оперативного высокоточного контроля авиационного топлива и специальных жидкостей в полевых условиях в составе передвижных лабораторий, а также в стационарных лабораторных условиях при совокупном анализе их физико-химических параметров.

Оригинальность и новизна предложенного метода заключаются в повышении точности и оперативности контроля параметров авиационного топлива путем применения в информативных целях изменения режима работы волноводной линии передачи, а также эффектов взаимодействия полей бегущих электромагнитных волн СВЧ диапазона с жидкими диэлектриками и магнитодиэлектриками.

Ключевые слова: авиационное топливо, СВЧ-метод, волновод, электрофизические параметры.

1. Введение. Постановка задачи

В настоящее время безопасность полетов основной показатель успешной деятельности авиации. Обеспечение безопасности полетов всех видов авиации является основной и приоритетной задачей всех предприятий, организаций и специалистов гражданской, военной и государственной авиации.

Одной из важнейших составляющих в структуре обеспечения безопасности полетов является качество авиационных жидкостей, в том числе авиационного топлива. Наличие в авиационном топливе взвешенной или растворённой влаги, а также твердых примесей различного химического состава может привести к отказу топливной системы. В результате в полете у воздушного судна (ВС) могут забиться топливные фильтры из-за замерзания в них влаги и скопления посторонних примесей твердой фазы.

На рис. 1. представлен анализ статистики авиационных катастроф самолетов оперативно-тактической авиации по материалам зарубежной печати с выделением их причин, причины авиационных катастроф из-за отказов агрегатов авиационных двигателей рассматриваемых самолетов. Из приведенных диаграмм видно, что немалый процент катастроф определяет отказ двигателей в целом и неполадки в масляной и топливной системах [1].

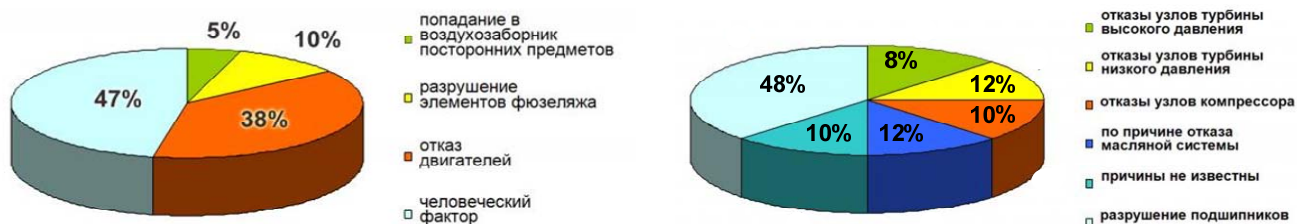


Рис. 1. Анализ статистики авиационных катастроф самолетов

Как правило, наиболее жесткий контроль качества авиационного топлива осуществляется на этапе его разработки и производства. Контроль же качества на этапе применения практически не проводят, так как производитель должен гарантировать заданное качество нефтепродукта. Однако опыт свидетельствует, что качество авиационного топлива, поступающего к потребителю, часто отличается от стандартного в основном из-за нарушения условий транспортировки и хранения.

В этой связи возникает необходимость постоянного контроля качества авиационного топлива в местах их продажи, хранения и использования по назначению и возрастает значение анализа его физико-химических параметров «на месте».

К сожалению, в настоящее время, в РФ разработка средств контроля параметров авиационного топлива, применяемых в ВС, по общему уровню значительно отстает от зарубежных стран. 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 авиационного топлива.

В качестве примера приборов российского производства, можно привести следующие:

- 1). Анализатор СИМ-3 (АК-3), для оперативного контроля авиатоплива и масел в местах хранения и продажи в составе передвижных лабораторий.
- 2). Анализатор АК-4 предназначен для определения процентного содержания воды трансформаторных, моторных масел и дизтоплива.

3). Анализатор АК-12 предназначен для определения массовой доли содержания механических примесей в различных видах ГСМ и трансформаторных масел.

4). Прибор ПОЗ-Т предназначен для определения свободной воды и механических примесей в топливе (авиационный бензин, авиационный керосин).

Недостатками приведенных приборов являются: низкая точность измерений, из-за наличия гальванического контакта с исследуемым материалом; невозможность измерения малых объёмов жидких сред; невозможность учёта частотной дисперсии диэлектрической проницаемости материалов, низкая точность измерений содержания воды в специальных жидкостях, низкая точность измерения массовой доли содержания механических примесей, сложность эксплуатации и высокая стоимость приборов.

Таким образом, задача разработки новых методов и приборов оценки качества авиационных жидкостей и авиационного топлива, заправляемых в воздушные суда, выступает одним из важнейших условий для эффективной деятельности воздушного транспорта Российской Федерации, обеспечения необходимого уровня безопасности полетов воздушных судов, безопасности жизни и здоровья граждан.

К контролю параметров авиационных жидкостей предъявляются следующие требования [2]:

- 1) бесконтактность измерений;
- 3) локальность и инвариантность положения первичного измерительного преобразователя (ПИП) относительно объекта контроля (ОК);
- 4) высокая оперативность и точность измерений;
- 5) малая стоимость ПИП и минимум элементов измерительного тракта.

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 [2, 3].

Общая классификация микроволновых методов приведена на рис. 2.



Рис. 2 – Общая классификация микроволновых волноводно-антенных методов

2. Обоснование и разработка СВЧ-метода определения электрофизических параметров авиационного топлива (гетерогенных дисперсных жидких сред)

Круглый металлический волновод представляет собой полую металлическую трубу с внутренним радиусом a , бесконечно протяженную вдоль оси z . При описании поля в круглом волноводе удобно использовать цилиндрическую систему координат r, φ, z , так как стенки волновода совпадают с координатной поверхностью

$r=a$. Уравнения Максвелла для волновода в цилиндрической системе координат принимают следующий вид [4,5,6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial \dot{H}_\varphi}{\partial z} &= i\omega \varepsilon_a \dot{E}_r, & \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial \dot{E}_\varphi}{\partial z} &= -i\omega \mu_a \dot{H}_r, \\ \frac{\partial \dot{H}_r}{\partial z} - \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} &= i\omega \varepsilon_a \dot{E}_\varphi, & \frac{\partial \dot{E}_r}{\partial z} - \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial r} &= -i\omega \mu_a \dot{H}_\varphi, \\ \frac{\partial \dot{H}_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{H}_r}{\partial \varphi} &= i\omega \varepsilon_a \dot{E}_z, & \frac{\partial \dot{E}_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{E}_r}{\partial \varphi} &= -i\omega \mu_a \dot{H}_z. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Комплексные амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей запишутся в виде:

$$\dot{E}(r, \phi, z) = E_0(r, \phi) e^{-ihz}, \quad \dot{H}(r, \phi, z) = H_0(r, \phi) e^{-ihz}.$$

Уравнения связи поперечных с продольными компонентами поля для круглого волновода можно получить тем же способом, что и для прямоугольного:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_r &= \frac{-i}{g^2} \left(h \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial r} + \frac{\omega \mu_a}{r} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \varphi} \right), & \dot{H}_r &= \frac{i}{g^2} \left(\frac{\omega \varepsilon_a}{r} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \varphi} - h \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} \right), \\ \dot{E}_\varphi &= \frac{-i}{g^2} \left(\frac{h}{r} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial \varphi} - \omega \mu_a \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} \right), & \dot{H}_\varphi &= \frac{-i}{g^2} \left(\omega \varepsilon_a \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial r} + \frac{h}{r} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial \varphi} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Анализ уравнений (2) показывает возможность существования колебаний типов E и H в отдельности. Для их исследования необходимо решить уравнения Гельмгольца для \dot{E}_z и \dot{H}_z :

$$\nabla^2 \dot{E}_z + g^2 \dot{E}_z = 0,$$

$$\nabla^2 \dot{H}_z + g^2 \dot{H}_z = 0,$$

которые в цилиндрической системе координат принимают вид:

$$\frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{E}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{E}_z}{\partial \varphi^2} + g^2 \dot{E}_z = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{H}_z}{\partial \varphi^2} + g^2 \dot{H}_z = 0. \quad (4)$$

Решение данных уравнений подробно рассмотрено в [4,5]. Полная система уравнений, описывающая составляющие Н-волн в круглом волноводе, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_r &= -iH_0 \omega \mu_a \frac{m}{r} \left(\frac{a}{\xi_{mn}} \right)^2 J_m \left(\frac{\xi_{mn}}{a} r \right) \sin(m\varphi) e^{-ihz}, \\ \dot{E}_\varphi &= -iH_0 \omega \mu_a \frac{a}{\xi_{mn}} J_m' \left(\frac{\xi_{mn}}{a} r \right) \cos(m\varphi) e^{-ihz}, \\ \dot{E}_z &= 0, \\ \dot{H}_r &= -ihH_0 \frac{a}{\xi_{mn}} J_m' \left(\frac{\xi_{mn}}{a} r \right) \cos(m\varphi) e^{-ihz}, \\ \dot{H}_\varphi &= -ihH_0 \frac{m}{r} \left(\frac{a}{\xi_{mn}} \right)^2 J_m \left(\frac{\xi_{mn}}{a} r \right) \sin(m\varphi) e^{-ihz}, \\ \dot{H}_z &= H_0 J_m \left(\frac{\xi_{mn}}{a} r \right) \cos(m\varphi) e^{-ihz}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Критические частота и длина Н-волны находятся на основании того же самого принципа, что и для Е-волн в круглом волноводе [4]. Распространение волны в волноводе происходит при положительных h : $h = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_a \mu_a - (\xi_{mn}/a)^2}$. Выражение для h может быть положительным при $\omega^2 \varepsilon_a \mu_a > (\xi_{mn}/a)^2$. При $h=0$, $\omega^2 \varepsilon_a \mu_a = (\xi_{mn}/a)^2$, отсюда можно определить минимальную частоту ЭМВ, распространяющейся в волноводе, то есть критическую частоту для Н-волн в круглом волноводе:

$$f_{кр} = \frac{1}{2\pi \sqrt{\varepsilon_a \mu_a}} \frac{\xi_{mn}}{a}. \quad (6)$$

Критическая длина волны определяется как

$$\lambda_{кр} = \frac{v\phi}{f_{кр}} = \frac{2\pi a}{\xi_{mn}}. \quad (7)$$

Из Н-волн простейшей (низшего типа) является волна H_{01} .

Однако из Н-волн волна H_{01} не имеет наименьшую критическую частоту или наибольшую критическую длину волны, следовательно она не является основной. Максимальную критическую длину волны в круглом волноводе имеет тип волны, у которого минимальное значение корня либо функции Бесселя, либо ее производной. Следовательно, основной волной в круглом волноводе является волна H_{11} . Для получения уравнений, описывающий ее структуру, в формулы (5) необходимо подставить $m=1$, $\xi_{11}=1,841$. Критическая длина волны H_{11} определяется по формуле:

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi a}{1,841} \approx 3,41a.$$

Условие распространения любой моды в круглом металлическом волноводе радиусом « a » [4,5] следующее:

$$\lambda_{г} < \lambda_{кр},$$

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

где X_{mn} и ξ_{mn} - n -й корень функции Бесселя или её производной соответственно для волн электрического (Е-волны) или магнитного (Н-волны) типа. В круглом металлическом волноводе основной волной является волна H_{11} . Для основной моды H_{11} :

$$\lambda_{кр}^{H_{11}} = 3,41a, \quad \text{а «ближайшей» моды } E_{01}: \lambda_{кр}^{E_{01}} = 2,61a.$$

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):

$$\lambda_{кр} = \frac{2\pi a}{X_{mn}} \sqrt{(\varepsilon'_{ср} \cdot \mu'_{ср})},$$

где $\varepsilon'_{ср}$ и $\mu'_{ср}$ - средние параметры по зоне взаимодействия, которые определяются методом эквивалентных реактивностей [2].

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

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

$$3,41a > \lambda_{Г} > 2,61a$$

или в общем случае:

$$3,41a > \frac{\lambda_{Г}}{\sqrt{\varepsilon'_{ср}\mu'_{ср}}} > 2,61a.$$

Известно, что затухания поля ЭМВ в металлическом волноводе, вызванные потерей энергии волны в диэлектрике, заполняющем волновод, пропорциональны омическим потерям $\gamma_{ом}$ [2,7], по величине которых можно определить мнимую часть диэлектрической проницаемости.

Таким образом, по значениям напряженностей электрического поля E_1 и E_2 на одной линии вдоль волновода можно вычислить значение коэффициента затухания поля вдоль волноводной линии передачи – α_Z :

$$\bar{\alpha}_Z = \frac{1}{\Delta Z} \cdot \ln \frac{E_1}{E_2}$$

и определить мнимую часть диэлектрической проницаемости ε'' из формулы:

$$\bar{\alpha}_Z \equiv k \cdot \gamma_{\text{ом}} \equiv \varepsilon'' = \gamma_{\text{ом}} \cdot \lambda_r,$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Условия отсутствия сквозной бегущей волны в волноводе следующие:

$$3,41a_1 > \lambda_r > 2,61a_1;$$

$$\frac{\lambda_r}{\sqrt{\varepsilon'_{\text{ср}} \mu'_{\text{ср}}}} \geq 3,41a_2,$$

где $a_1 = \frac{d_1}{2}$ - радиус крайней секции металлического волновода.

Действительная часть диэлектрической проницаемости ε' по формуле:

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

Сделаем расчёт зависимости эквивалентной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{экв}}$ волновода, заполненного средой, от соотношения радиуса волновода и трубопровода методами эквивалентных параметров [2,3].

Для основной волны в круглом волноводе H_{11} :

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

$$\dot{E}_\phi = j \frac{\omega \mu_0}{k_c} A J_1' \left(\frac{1,841}{a} r \right) \cos \phi.$$

- критическая длина волны $\lambda_{кр}^{H_{11}} = 3,41a$;

- $k_c = \frac{1,841}{a}$, a - радиус круглого волновода (рис. 3).

Базовая структура поля сохраняется (при $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$) в области $b(z) < r < a(z)$.

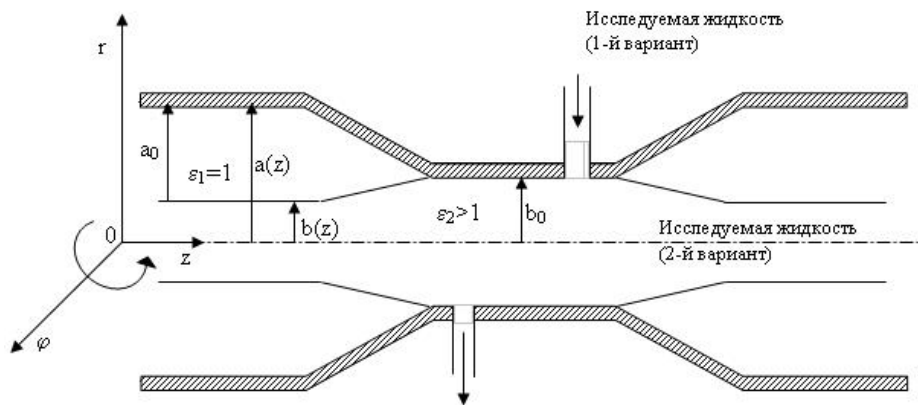


Рис. 3. Структурная схема критического волновода

Эквивалентная емкость $C_{\text{ЭКВ}}(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}) = C(\varepsilon_2 > 1; \varepsilon_1 = 1; a(z); b(z))$ – погонные емкости на длине $\Delta z = 1$, с учетом

$$C = \frac{|q|^2}{2W_3},$$

где q - заряд, W_3 - эквивалентная энергия.

а) $C_{\text{ЭКВ}}(\varepsilon_{\text{ЭКВ}}; a(z))$ – эквивалентная емкость волновода, заполненного средой с $\varepsilon_{\text{ЭКВ}}$, средней по объему взаимодействия (рис. 4);

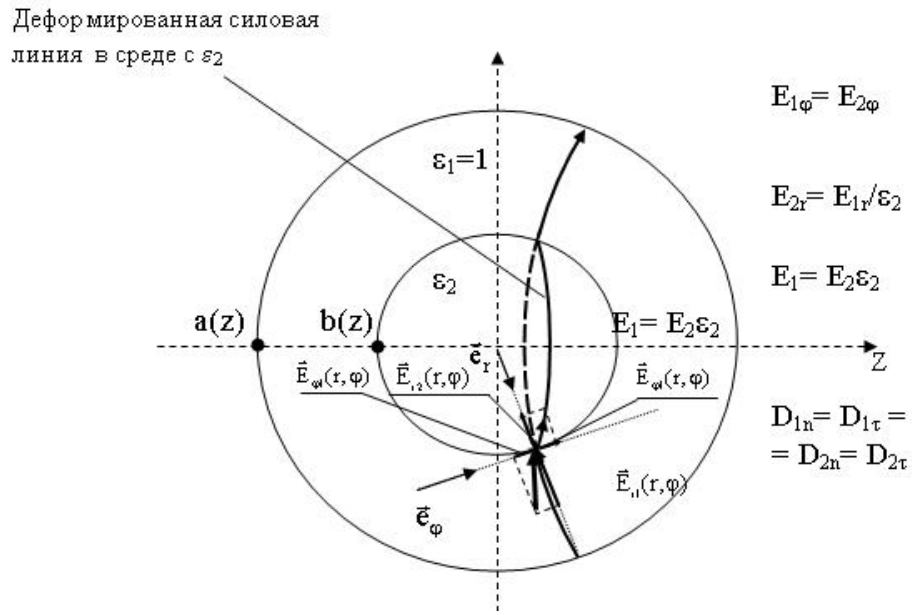


Рис. 4. К расчёту зависимости эквивалентной диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{экв}$ от соотношения радиуса волновода и трубопровода

б) емкость C – вычисляется с учетом деформации поля в зоне $0 < r < b(z)$;

в) величина эквивалентного заряда $q_3 = q$, так как поток силовых линий электрического поля \vec{E} через поверхность $r = a(z)$ не меняется, отсюда

$$\varepsilon_{cm} = f[\varepsilon_2 > 1, \varepsilon_1 = 1, a(z), b(z)]$$

получается из уравнения $W_3^3 = W_3$.

$$W_3^3 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_3}{2} \int_0^a \int_0^{2\pi} (E_r^2 + E_\phi^2) r dr d\phi.$$

$$E_r = \frac{\omega \mu_0 a^2}{(1,841)^2} A \cdot \frac{1}{r} J_1\left(\frac{1,841r}{a}\right) \sin \phi = A_1 \frac{1}{r} J_1\left(\frac{1,841r}{a}\right) \sin \phi,$$

$$E_\phi = \frac{\omega \mu_0 a}{(1,841)} A \cdot J_1'\left(\frac{1,841r}{a}\right) \cos \phi = A_2 J_1'\left(\frac{1,841r}{a}\right) \cos \phi,$$

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 \phi d\phi = \int_0^{2\pi} \cos^2 \phi d\phi = \pi,$$

Окончательно имеем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_s = & \left\{ (\varepsilon_2 - 1) \left[1,291 \left(\frac{b}{a} \right)^2 + 0,7429 \right] \right\} J_0^2 \left(1,841 \frac{b}{a} \right) + \\ & + \left[1,291 (\varepsilon_2 - 1) \left(\frac{b}{a} \right)^2 - 0,3714 \left(\frac{\varepsilon_2^2 + 1}{\varepsilon_2} \right) + 0,7429 \right] J_1^2 \left(1,841 \frac{b}{a} \right) + \\ & + \left[0,6837 \left(\frac{\varepsilon_2^2 + 1}{\varepsilon_2} \right) - 1,3679 \right] \frac{b}{a} - -0,7429 \varepsilon_2 + 1,7431 = \Phi \left(\frac{b}{a}, \varepsilon_2 \right). \end{aligned}$$

3. Обоснование и разработка СВЧ-устройства контроля электрофизических параметров авиационного топлива, реализующего разработанный метод

На рис. 5 показана схема СВЧ устройства определения электрофизических параметров гетерогенных дисперсных жидких сред (ГДЖС) [7,8]. Схема включает волноводную линию передачи, состоящую из 3-х секций круглого волновода различного диаметра 12,15,18, соединённых между собой плавными волноводными переходами 13,17, причём, крайние секции линии передачи имеют одинаковый диаметр d_1 , а средняя – меньшего диаметра d_2 , диэлектрический сосуд 16 с исследуемой ГДЖС с неизвестными диэлектрической ε и магнитной μ проницаемостями, устройства ввода 7 и вывода 14 ГДЖС; управляемый микропроцессорным устройством 1 перестраиваемый генератор СВЧ 11, устройство возбуждения электромагнитной волны - вибратор В1; устройство подмагничивания - соленоид 8, питаемый от управляемого источника тока (УИТ) 3; приёмный вибратор В2, расположенный в 1-й секции круглого волновода перед измерительной ячейкой и двух ортогонально расположенных вибраторов В3, В4 в 3-й секции после измерительной ячейки и В5 –

прямоугольной секции 20. Нагрузкой волноводной линии передачи является поглощающий ферритовый конус 21, обеспечивающий режим бегущих волн.

Работа устройства поясняется следующим образом.

В волноводной линии передачи возбуждается электромагнитная волна H_{11} с помощью устройства возбуждения электрического типа – вибратора В1 и устанавливаются режим бегущих волн. Частота генератора λ_2 выбирается из условия единственности существования основной волны H_{11} и отсутствия ближайшей моды E_{01} [4]:

$$3,41a_2 > \lambda_Г > 2,61a_2, \quad (8)$$

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

В секции волновода диаметром d_2 расположен диэлектрический сосуд с исследуемой жидкостью с диэлектрической проницаемостью ϵ и магнитной проницаемостью μ .

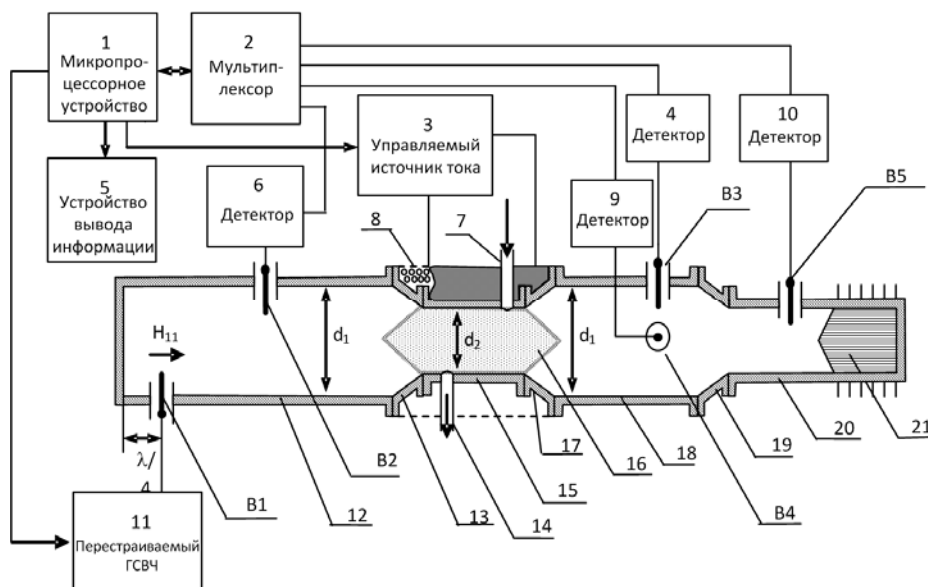


Рис. 5. СВЧ устройство определения электрофизических параметров ГДЖС

Толщина стенок Δ диэлектрического сосуда значительно меньше его радиуса и имеет постоянные значения, тогда становится практически не существенной отношение величины диэлектрической проницаемости жидкости ε к диэлектрической проницаемости диэлектрического материала ε_{∂} , из которого изготовлен трубопровод, — $\varepsilon/\varepsilon_{\partial}$. Сосуд изготавливается из радиопрозрачного материала ($\varepsilon_{\partial} \approx 1$), поэтому влиянием материала можно пренебречь.

Величина диэлектрической проницаемости жидкости практически лежит в пределах 2...15 для разных случаев. Для согласования с полем бегущей электромагнитной волны торцевые стенки диэлектрического сосуда имеют конусообразную форму.

Для распространения волны H_{11} в направлении нагрузки, электрический штырь расположен на расстоянии, равным $\lambda_{\partial}/4$ от торцевой металлической стенки круглой секции линии передачи.

С помощью приемных вибраторов B_2 и B_3 , расположенных в секциях круглом металлическом волноводе диаметром d_1 на расстоянии ΔZ перед диэлектрическим сосудом и после него, измеряют напряженности электрического поля в волноводной линии передачи перед волноводной вставкой с исследуемой жидкостью — E_1 и после неё — E_2 .

В волноводной линии передачи устанавливают режим бегущих волн.

Затем изменяют частоту генератора СВЧ до момента наступления отсечки, который определяют по отсутствию токов в вибраторах B_3 , B_4 .

Условия отсутствия сквозной бегущей волны в волноводе следующие:

$$3,41a_1 > \lambda_r > 2,61a_1 ;$$

$$\frac{\lambda_r}{\sqrt{\varepsilon'_{cp}\mu'_{cp}}} \geq 3,41a_2 ,$$

где $a_1 = d_1 / 2$ - радиус крайней секции металлического волновода.

Рассчитывают действительную часть диэлектрической проницаемости ε' по формуле:

$$\varepsilon' = \left(\frac{\lambda_2}{3,41d_2} \right). \quad (9)$$

Устанавливают начальную длину волны генератора λ_2 и устанавливают в волноводной линии передачи режим бегущих волн.

С помощью устройства намагничивания в виде соленоида, питаемого от УИТ 3, создаётся постоянное, нормальное направлению распространения волны H_{11} и нарастающее по величине магнитное поле H_0 . Поле подмагничивания стабилизируется по моменту равенства токов, наводимых в ортогонально расположенных приёмных вибраторах В3,В4 и определяется ток подмагничивания I_0 , соответствующий повороту плоскости поляризации бегущей волны на угол $\theta = 45^\circ$.

При распространении линейно поляризованной электромагнитной волны сквозь жидкость с ферромагнитными частицами (ФМЧ), намагниченной постоянным магнитным полем H_0 , совпадающим с направлением распространения электромагнитной волны, согласно [4,5] при H_0 в зоне А (рис. 6), наблюдается явление поворота плоскости поляризации (эффект Фарадея) электромагнитной волны.

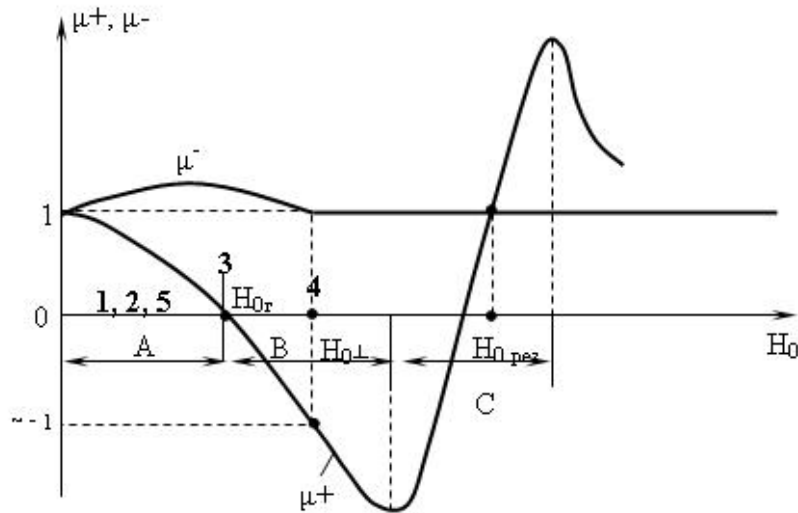


Рис. 6. Зависимости нормированных магнитных проницаемостей левополяризованной и правополяризованной волн μ^+ и μ^- от напряжённости постоянного магнитного поля H_0

Угол поворота плоскости поляризации по эффекту Фарадея [4]:

$$\theta = \frac{\beta_- - \beta_+}{2} \cdot l,$$

где β_- и β_+ - коэффициенты распространения электромагнитной волны левого и правого вращения:

$$\beta_- = \omega_2 \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu^-};$$

$$\beta_+ = \omega_2 \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot \mu^+}.$$

С учётом того, что в зоне А [2] $\mu^- \approx 1$:

$$\theta = (\pi / \lambda_2) \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot (1 - \sqrt{\mu^+}) \cdot l.$$

При постоянной длине диэлектрического сосуда (объёма взаимодействия) $l = const$ удобно величину длины измерительной ячейки выбрать конструктивно равной длине волны с отрицательной круговой поляризацией:

$$l = \lambda^- = (\lambda_2 / \sqrt{\varepsilon}).$$

Величина угла θ поворота плоскости поляризации зависит от концентрации ферромагнитных частиц в жидкости, длины пути излучения в жидкости, поля подмагничивания (тока подмагничивания) и магнитной восприимчивости:

$$\theta = \beta [\mu^+(H_0, C, \chi), \varepsilon] l, \quad (10)$$

где β - коэффициент распространения электромагнитной волны зависящий от величины μ и ε ; μ^+ - относительная магнитная проницаемости ферромагнитных частиц для право поляризованной волны; ε - относительная диэлектрическая проницаемость ферромагнитных частиц; H_0 - напряженность постоянного магнитного поля; C - относительная концентрация ферромагнитных частиц в жидкости; l - длина пути электромагнитной волны в жидкости с ферромагнитными частицами; χ - магнитная восприимчивость ферромагнитных частиц.

Относительная магнитная проницаемость смеси ферромагнитных частиц и жидкости-носителя имеет вид:

$$\mu_{см}^+ = \left(1 - \frac{\omega_0}{\omega - \omega_0}\right)^c,$$

где $\omega_H = k_D \cdot M_H$ - частота магнитного насыщения; $M_H = \chi \cdot H_{0рез}$ - намагниченность насыщения; χ - магнитная восприимчивость; $\omega = k_r \cdot H_{0рез}$ - частота ферромагнитного резонанса; $\omega_0 = k_r \cdot H_0$ - частота свободной прецессии вектора магнитного момента в постоянном магнитном поле, зависящая от величины H_0 ; $k_r = 2.21 \cdot 10^5 \text{ М / А} \cdot \text{с}$ - гиромагнитное отношение; $H_0 = k_l \cdot I_{подм.}$ - величина поля

подмагничивания, как функция параметров соленоида и тока подмагничивания; k_l - коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрических размеров соленоида подмагничивания и числа витков W на единицу длины.

Величина β является постоянной величиной и зависит от величины H_0 , т.е. от величины тока подмагничивания I . Тогда при фиксированной длине l угол поворота θ зависит от измеряемой величины тока соленоида, магнитной восприимчивости и величины C :

$$\theta = \Phi(I, \chi, C) .$$

При стабилизации оптимальной величины θ , ток подмагничивания есть мера концентрации ФМЧ в жидкости и их магнитной восприимчивости:

$$I = \Phi(C, \chi) . \quad (11)$$

Для исключения погрешности измерения концентрации ФМЧ в жидкости, обусловленной вариацией их магнитной восприимчивости χ , необходимо учитывать изменение χ . Для этого величина тока подмагничивания увеличивается до момента смены вида поляризации бегущей волны с линейной на круговую. Момент перехода поляризации определяется по нулевой разности токов на ортогональных приёмных вибраторах и отсутствии тока на приемном вибраторе В5 в середине прямоугольной секции 20.

Определяется величина граничного тока I_2 , прямо пропорциональная величине магнитной восприимчивости χ , не зависящей от концентрации и определяемой только химическим составом ФМЧ. По измеренной величине χ вносится поправка на измерение концентрации ФМЧ (примесей в топливе).

В ходе проводимых исследований разработан действующий макет, предложенного в проекте устройства под названием «Волновод». Внешний вид действующего макета приведен на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид действующего макета устройства

Опытный образец макета позволяет измерять следующие параметры авиатоплива и специальных жидкостей:

1. Действительную часть диэлектрической проницаемости по критической частоте измерительной волноводной секции.
2. Мнимую часть диэлектрической проницаемости по величине затухания поля вдоль измерительной секции.
3. Концентрацию ферромагнитных частиц по углу поворота плоскости поляризации ЭМВ.
4. Магнитную восприимчивость ферромагнитных частиц, характеризующих их химический состав, по моменту перехода линейной поляризации во вращающуюся при внешнем постоянном поле намагничивания.
5. Процентное содержание в топливе свободной влаги.

Основные технические и метрологические характеристики макета:

диапазон рабочих частот: 6,56...10,0 ГГц;

диапазон измерений:

- концентрации механических примесей от 0,05% до 10% (объёмных процентов);
- диэлектрической проницаемости: от 2 до 15 относительных единиц;

погрешность измерения концентрации:

- абсолютная - менее 0,005 %;
- относительная - менее 5% по диапазону измерения концентрации;

погрешность измерения диэлектрической проницаемости:

- абсолютная – менее 0.1 относительных единиц;
- относительная – менее 5 %

напряжение питания +27 В (220 В).

время подготовки и проведения измерений - менее 5 мин.

Заключение

Таким образом, рассмотренный метод и устройство по сравнению с существующими приборами имеют следующие достоинства:

- высокая точность и оперативность измерений, обусловленная малыми потерями и учетом частотной дисперсии измеряемых параметров;
- неразрушающий бесконтактный контроль электрофизических параметров малых объёмов жидких сред, в том числе и в полевых условиях;
- компактность, простота и малая стоимость устройства;

- возможность применения устройства при контроле параметров проточных жидких сред.

Ориентировочный годовой экономический эффект от использования разработки - около 300 тыс. руб. на одну передвижную лабораторию или 90 тыс. руб. на один переносной комплект.

Разработанное устройство при необходимости может быть использовано при контроле широкого класса нефтепродуктов и гетерогенных дисперсных жидких сред при его соответствующей калибровке, при контроле качества ферромагнитных жидкостей в нефтяной, химической и авиационной промышленности при производстве лакокрасочных материалов, ферромагнитных суспензий, защитных радиопоглощающих материалов и покрытий вооружения и военной техники.

Работа выполнена в Военном учебно-научном центре Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г. Воронеж). Автору хотелось бы выразить благодарность своему научному руководителю, начальнику кафедры, д.т.н., профессору Федюнину Павлу Александровичу за помощь и ценные замечания при подготовке материалов статьи.

Библиографический список

1. Gammon J. Aviation Fuel. Quality Control Procedures. ASTM International Standart Worldwide. 4th ed.

2. Федюнин П.А., Дмитриев Д.А. Волноводные методы неразрушающего контроля параметров и свойств материалов в прикладной электродинамике. Тамбов: ТВВАИУРЭ, 2006. 400 с.

3. Казьмин А.И., Федюнин П.А. Многофакторный анализ гетерогенных дисперсных магнитодиэлектрических и диэлектрических материалов с потерями как объектов контроля // Сборник научных статей по материалам XIV Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых и аспирантов и студентов «Научные исследования в области авиационных, космических и транспортных систем». Воронеж 9-11 октября 2013. Воронеж: ВГТУ. С. 40-46.

4. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. М.:Высшая школа, 1980. 399 с.

5. Фальковский О.И. Техническая электродинамика. М.:Связь, 1978. 432 с.

6. Вольман В.И., Пименов Ю.В. Техническая электродинамика. М.: Связь, 1971. 465 с.

7. Патент РФ № 2465571, МПК⁷ G01N22/00 СВЧ устройство для определения электрофизических параметров и концентрации ферромагнитных жидкостей / Федюнин П.А., Котов И.О., Казьмин А.И., Чернышев В.Н., Завражнов Е.А. (РФ). №2009106349/07; заявл. 24.02.09; опубл.27.10.2012, Бюл. №30.

8. Казьмин А.И., Марченко Э.В. Способ измерения влажности и теплофизических свойств авиационных материалов // Материалы 3 международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации», 16-17 мая 2013 года. Минск: ВА РБ. С. 51-53.