

# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК: 53.083

Д.М. Живоносная

аспирант

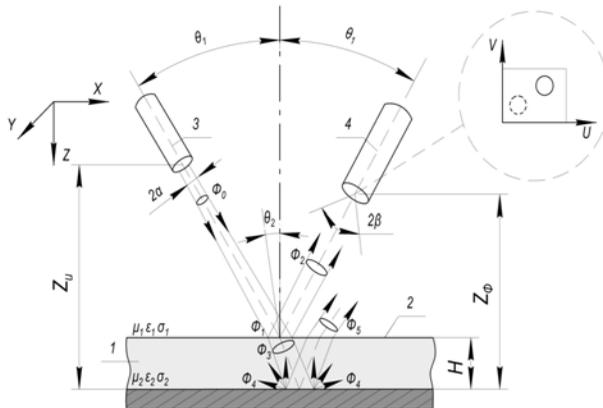
П.А. Живоносный

аспирант

Самарский национальный  
университет им. академика С.П. Королёва  
г. Самара, Россия

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОНКИХ ПЛЁНОК

В общем случае процедура измерения электромагнитных параметров материалов методом импульсного зондирования иллюстрируется рисунком.



$\mu, \epsilon, \sigma$  - электродинамические параметры соответствующей среды,  $\theta_1$  - угол падения,  $\theta_2$  - угол преломления,  $\Phi$  - электромагнитный поток в соответствующей среде,  $H$  - толщина материала;  $Z_u, Z_\Phi$  - конструктивные параметры,  $\alpha$  - пространственный угол диаграммы направленности излучателя,  $\beta$  - угол захвата приемника отражённого сигнала, 1 - контролируемая среда, 2 - граница раздела сред, 3 - излучатель, 4 - приёмник.

**Рис. Иллюстрация к математическому моделированию процедуры измерения уровня жидкости методом оптического сканирования**

Излучатель 3, находящийся в среде с известными электромагнитными параметрами  $\mu_1$ ,  $\sigma_1$ ,  $\epsilon_1$  (как правило это газовая среда), формирует электромагнитный сигнал  $\Phi_1$  с пространственным углом  $2\alpha$ , падающий на материал 1 с контролируруемыми электромагнитными параметрами  $\mu_x$ ,  $\sigma_x$ ,  $\epsilon_x$  под углом  $\theta_1$ . Отражённый от границы раздела и преломлённый под углом  $\theta_2$  энергетические потоки обозначены  $\Phi_2$  и  $\Phi_3$  соответственно, причём  $\theta_2 < \theta_1$ . Здесь и далее углы падения, отражения и преломления отсчитываются от оси распространяющегося пучка. Отражённый от поверхности электромагнитный сигнал  $\Phi_2$ , попадающий в приёмник 4 несёт в себе информацию об искомым электромагнитных параметрах  $\mu_x$ ,  $\sigma_x$ ,  $\epsilon_x$ . Кроме отражённого от поверхности сигнала  $\Phi_2$  в приёмник попадает также поток  $\Phi_5$ , являющийся частью потока  $\Phi_4$ , отражённого от нижней границы раздела. При этом сигнал  $\Phi_5$  создает помеху, которую необходимо учитывать или устранять в процессе измерения.

Непосредственно амплитудные спектры зондирующего и пришедшего в приёмник сигналов связаны

$$\theta_2 = \arcsin \left[ \sqrt{\frac{\mu_1(\varepsilon_1 \omega + \sqrt{\sigma_1^2 + \varepsilon_1^2 \omega^2})}{\mu_2(\varepsilon_2 \omega + \sqrt{\sigma_2^2 + \varepsilon_2^2 \omega^2})}} \sin \theta_1 \right] \quad (8)$$

В итоге получаем

$$G(j\omega) = \operatorname{Re}_G(\omega) + j \operatorname{Im}_G(\omega) = |G(j\omega)| e^{j\varphi_G(\omega)} \quad (9)$$

$$|G(j\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}_G^2(\omega) + \operatorname{Im}_G^2(\omega)} \quad (10)$$

$$|\varphi_G(\omega)| = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}_G(\omega)}{\operatorname{Re}_G(\omega)} \quad (11)$$

Здесь параметры  $\mu_1, \sigma_1, \varepsilon_1, \theta_1$  считаются известными.

В итоге выражения для модуля и фазы спектра отражённого импульса целиком и полностью зависят от электромагнитных параметров отражающей поверхности и могут быть записаны в виде

$$A(\omega) = |G(j\omega)| |S(0, j\omega)| e^{-k_i(\omega)R} = F_A(\omega, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) \quad (12)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_G(\omega) + \varphi_0(\omega) + k_1'(\omega)R = F_\varphi(\omega, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) \quad (13)$$

Выражения (12), (13) являются основой для вычисления электромагнитных параметров  $\mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2$  контролируемой среды по отсчетам спектрального состава отражённого импульса. Для этого можно использовать выражения (12), (13) как по отдельности, так и вместе. Например, при использовании данных только амплитудного спектра отражённого импульса нужно взять три отсчёта на разных частотах амплитудного спектра и составить систему из трёх нелинейных уравнений, которая будет иметь вид

$$\begin{cases} F_A(\omega_1, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = A(\omega_1) \\ F_A(\omega_2, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = A(\omega_2) \\ F_A(\omega_3, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = A(\omega_3) \end{cases} \quad (14)$$

В этой системе в правой части конкретные значения модуля амплитудного спектра отражённого импульса, измеряемого прибором. Решение этой системы даст конкретные значения измеряемых параметров  $\mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2$ .

Аналогичную систему можно составить по частотным отсчётам фазовой составляющей отражённого импульса, которая в этом случае примет вид.

$$\begin{cases} F_\varphi(\omega_1, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = \varphi(\omega_1) \\ F_\varphi(\omega_2, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = \varphi(\omega_2) \\ F_\varphi(\omega_3, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = \varphi(\omega_3) \end{cases} \quad (15)$$

При совместном использовании амплитудных и фазовых составляющих спектра отражённого импульса достаточно взять достаточно взять отсчеты на двух частотах. В этом случае система уравнений для определения искомых параметров примет вид.

$$\begin{cases} F_A(\omega_1, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = A(\omega_1) \\ F_A(\omega_2, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = A(\omega_2) \\ F_\varphi(\omega_1, \mu_2, \sigma_2, \varepsilon_2) = \varphi(\omega_1) \end{cases} \quad (16)$$

Решение указанных систем уравнений производится на основе стандартных программ решения нелинейных алгебраических уравнений математических пакетов MATCAD, MATLAB. Представленный материал составляет теоретические основы метода дистанционного контроля электромагнитных параметров наноматериалов.

**Список литературы**

1. Гинзбург, В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В.Л. Гинзбург // М.: Наука, 1967 - 684 с.
2. Бреховских, Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских // М.: Наука, 1973. - 344 с.

© **Д.М. Живоносная, П.А. Живоносный, 2018**

**УДК 6279**

**А.О. Кузнецов**

аспирант кафедры ПБС

**А.С. Яковишин**

аспирант кафедры ТМС

**К.С. Мищенко**

аспирант кафедры ТМС

СГТУ имени Гагарина Ю.А.

г. Саратов, Россия

**ДАТЧИК УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПОПЛАВКОВОГО ТИПА  
С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРУГОГО ПОДВЕСА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА**

Поплавковые датчики угловых скоростей (ДУС) нашли широкое применение в системах ориентации и навигации подвижных объектов. В конструкции подвеса поплавковых гироскопов, как правило, применяются прецизионные опоры скольжения [1]. Нижняя граница диапазона измеряемых угловых скоростей поплавковых ДУС в основном ограничивается моментами сил трения-скольжения и трения-качения, возникающими в опорах подвеса поплавкового гироскопа (ПГУ). Для снижения порога чувствительности в ДУС применяются опоры с упругим моментом сопротивления [2]. Такие опоры имеют диапазон  $\chi$  ссоо