

УДК 621.317  
Ж 86

# ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА СПЕКТРА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ В ПОЛИМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ю. Д. Жуков, проф., д-р техн. наук;  
Б. Н. Гордеев, доц., канд. техн. наук;  
А. В. Зивенко, мл. науч. сотр.

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Аннотация.** Изложен алгоритм обработки полиметрического сигнала (рефлектограммы) для оперативного получения диэлектрического спектра контролируемой среды.

**Ключевые слова:** полиметрия, рефлектограмма, диэлектрический спектр.

**Анотація.** Викладено алгоритм обробки поліметричного сигналу (рефлектограми) для оперативного отримання діелектричного спектра контрольованого середовища.

**Ключові слова:** поліметрія, рефлектограма; діелектричний спектр.

**Abstract.** Algorithm of processing polymeric signal (reflectogram) for just-in-time obtaining dielectric spectrum of the controllable medium is described.

**Keywords:** polyometry, reflectogram, dielectric spectrum

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В полиметрических измерениях информация о спектре диэлектрической проницаемости (д. п.) используется для получения характеристик исследуемых сред (например, октанового или цетанового числа). В связи с этим необходимо знание ряда спектров диэлектрической проницаемости исследуемых сред.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известны различные способы получения спектров д. п. [1-4], однако все они требуют специального дорогого высокочастотного оборудования или непригодны для оперативного контроля спектров в широком диапазоне частот из-за значительных временных и ресурсных затрат. Так, в области сверхвысоких частот ( $f = 108 \dots 1012$  Гц)

диэлектрические измерения основаны на использовании объемных резонаторов и радиоволноводов [1, 3, 6, 7], а также на закономерностях распространения электромагнитных волн в свободном пространстве. Информацию о значениях д. п. в диапазоне частот можно получить путем измерений во временной области [2, 8] с помощью рефлектометрических систем.

Оперативная оценка спектра д. п. указанными способами без отбора проб исследуемого продукта и использования специальных ячеек представляет собой достаточно сложную и нерешенную до конца проблему. Поэтому актуально оперативное получение спектра д. п. среды в производственных условиях.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — исследование возможности оперативного получения спектров диэлектрической проницаемости в полиметрических системах.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Рассмотрим принцип работы рефлектометрической системы. Представленная на рис.1 система содержит в своем составе генератор (приемник) импульсов и двухпроводную линию (чувствительный элемент). Слой 0 — воздушная прослойка толщиной  $L_0$ , слой 1 — исследуемая среда толщиной  $L_1$ ; 1 — зондирующий импульс; 2 — отражение от слоя 1; 3 — отражение от конца линии;  $U$  — напряжение;  $t$  — время.

Генератор (приемник) импульсов, осуществляет генерацию зондирующих импульсов 1 и прием отраженных сигналов (2, 3).

При прохождении через продукт зондирующий сигнал, как показано на рис. 1, отражается от продукта и, в зависимости от частотных свойств среды его распространения, искажает свою форму.

Анализ и учет факторов, приводящих к искажению формы зондирующего импульса, может расширить сферы применения рефлектометрических систем. Алгоритм измерения спектра диэлектрической проницаемости среды представлен ниже.

Принимается, что магнитная проницаемость среды  $\mu = 1$ .

Фурье-образ рефлектограммы можно представить как суперпозицию трех мод:

$$R(\omega) = U(\omega) + S(\omega) + E(\omega) \quad (1)$$

где  $U(\omega)$  — зондирующий импульс;  $S(\omega)$  — спектр отражения от границы раздела сред,

$$S(\omega) = U(\omega)k_0^2(\omega)K_{00}(\omega), \quad (2)$$

$E(\omega)$  — спектр отражения от конца линии,

$$E(\omega) = U(\omega)k_0^2(\omega)K_{01}(\omega)k_1^2(\omega)K_{10}(\omega), \quad (3)$$

$K_{00}(\omega) = \frac{\sqrt{\epsilon_0(\omega)} - \sqrt{\epsilon_1(\omega)}}{\sqrt{\epsilon_0(\omega)} + \sqrt{\epsilon_1(\omega)}}$  — коэффициент отражения зондирующего импульса от

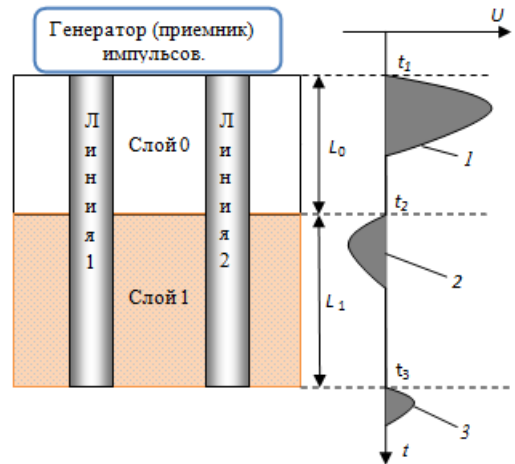


Рис. 1. Пояснение принципа работы рефлектометрической системы

границы раздела сред;  $K_{01}(\omega)$ ,  $K_{10}(\omega)$  — коэффициенты передачи зондирующего импульса через границу раздела сред в прямом и обратном направлении, соответственно

$$k_0(\omega) = \exp\left(\frac{-jP_q(\omega)\omega\sqrt{\epsilon_0(\omega)}L_0}{c}\right),$$

$$k_1(\omega) = \exp\left(\frac{-jP_q(\omega)\omega\sqrt{\epsilon_1(\omega)}L_1}{c}\right) \quad \text{— ко-}$$

эффициенты передачи сигнала через слой воздуха толщиной  $L_0$  и через слой продукта толщиной  $L_1$ .

В выражениях использованы следующие обозначения:  $\omega$  — частота измерения параметра;  $c$  — скорость света в вакууме;  $\epsilon_1(\omega)$  — спектр д.п. продукта;  $\epsilon_0(\omega)$  — спектр д.п. воздуха;  $L_0$  — расстояние от блока генератора/приемника до продукта;  $L_1$  — толщина слоя продукта.

Принимая во внимание, что  $K_{01}(\omega) = 1 - K_{00}(\omega)$  и  $K_{10}(\omega) = 1 + K_{00}(\omega)$ , выражения (2) и (3) можно представить в виде

$$S(\omega) = U(\omega) \exp\left(\frac{-jP_q(\omega)\omega 2L_0}{c}\right) \frac{1 - \sqrt{\epsilon_1(\omega)}}{1 + \sqrt{\epsilon_1(\omega)}}; \quad (4)$$

$$E(\omega) = U(\omega)k_0^2(\omega)[1 - K_{00}^2(\omega)]k_1^2(\omega) = 4S(\omega) \frac{\sqrt{\epsilon_1(\omega)}}{1 - \sqrt{\epsilon_1(\omega)}} \cdot \exp\left(\frac{-2jL_1P_q(\omega)\omega\sqrt{\epsilon_1(\omega)}}{c}\right). \quad (5)$$

Формула (5) описывает взаимосвязь спектров отраженных импульсов и электрофизических параметров среды (в данном случае — со спектром комплексной диэлектрической проницаемости). Функция  $P_q(\omega)$

характеризует технические параметры рефлектометрической системы и определяется в процессе ее настройки.

Преобразуя выражение (5) и используя соотношения (2)-(4), получим

$$E(\omega) = 4S(\omega) \frac{\sqrt{\varepsilon_1(\omega)}}{1 - \sqrt{\varepsilon_1(\omega)}} \cdot \exp\left(\frac{-2jL_1 P_q(\omega)\omega\sqrt{\varepsilon_1(\omega)}}{c}\right). \quad (6)$$

Таким образом, для оценки электрофизических параметров среды необходимо решить задачу, обратную выражению (6), по известным значениям  $E(\omega)$ ,  $P_q(\omega)$  и  $S(\omega)$  найти  $\varepsilon_1(\omega)$ . Это можно сделать численными методами прикладной математики.

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{\varepsilon_m(\omega)}{\varepsilon_r(\omega)}.$$

Ниже приведены результаты моделирования спектра д. п. по справочным данным, полученная рефлектограмма (рис. 2) и результаты ее обработки с целью получения спектра д. п. (рис. 3).

С помощью обратного преобразования Фурье выражения (1) можно моделировать результаты рефлектометрических измерений во временной области, а с помощью формулы (6) решается обратная задача — по моделируемому или полученному при рефлектометрических измерениях рефлектограммам оцениваются электрофизические параметры среды.

Для проверки работоспособности алгоритма был проведен ряд экспериментов с жидкостями, имеющими известные характеристики. Так, полученные для воды результаты приведены на рис. 4.

Для сравнения со справочными данными параметры среды удобно представлять с помощью модуля диэлектрической проницаемости (или реальной  $\varepsilon_r$  и мнимой части  $\varepsilon_m$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}(\delta)$ :

Из рисунка видно, что спектры, полученные с помощью модели Дебая (1) и разработанного алгоритма (2), отличаются незначительно. Отличие в несколько единиц можно объяснить наличием помех и несоответствием показателей воды, используемых для модели Дебая, и экспериментальных материалов.

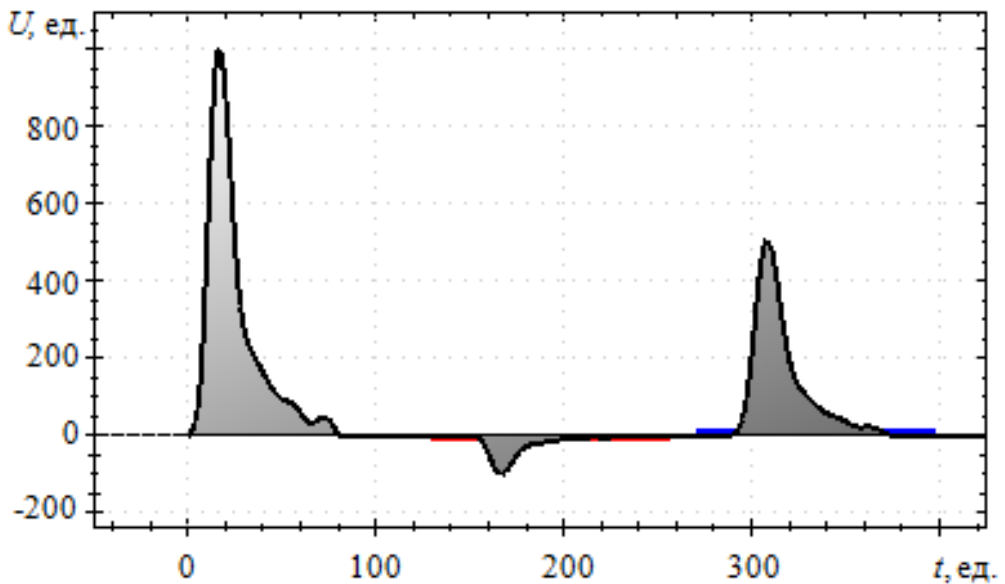
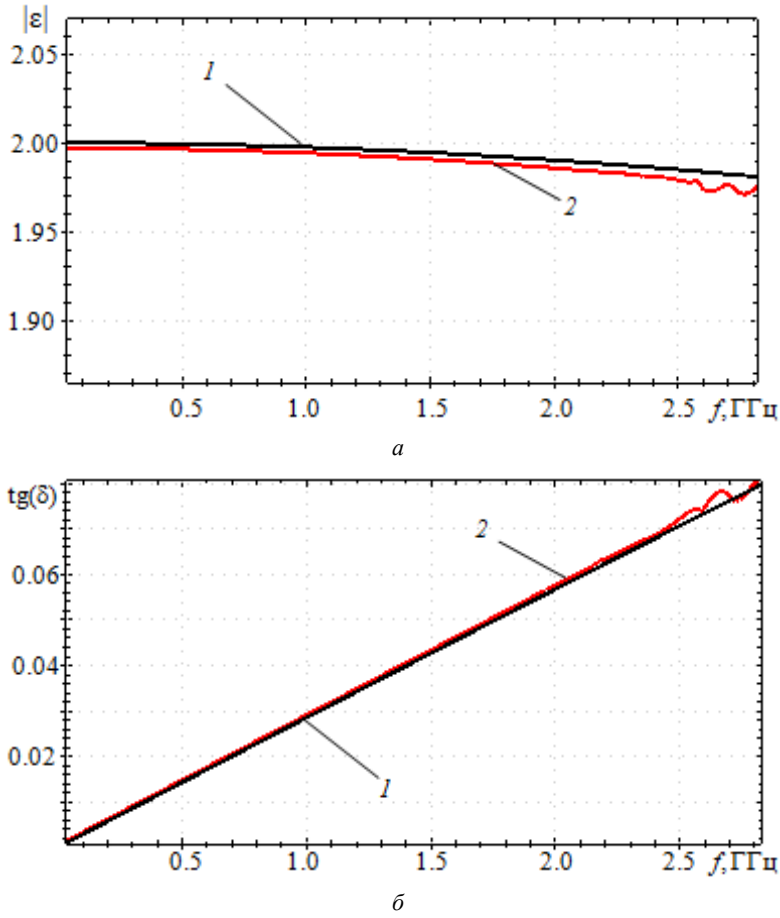
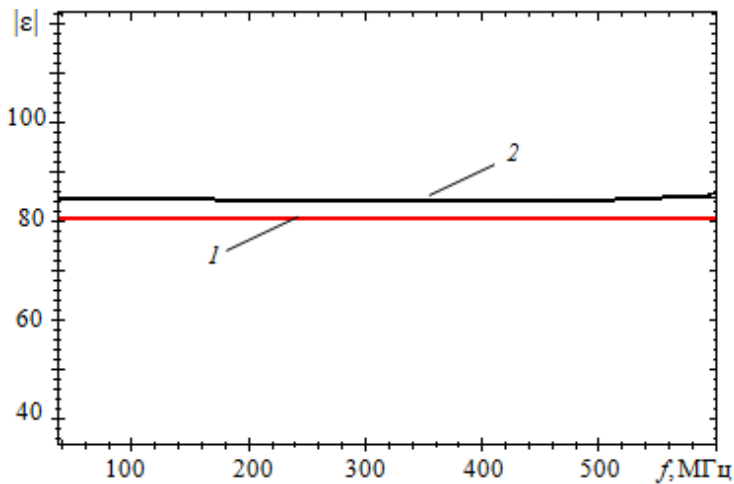


Рис. 2. Результат моделирования — полученная рефлектограмма



**Рис. 3.** Спектр модуля д. п. (а) и спектр тангенса угла диэлектрических потерь (б): 1 — моделируемый спектр (входные данные для моделирования рефлектограмм) 2 — спектр, полученный в результате обработки рефлектограммы рис. 2



**Рис. 4.** Спектр модуля д. п.  
1 — модуль диэлектрической проницаемости (вода, модель Дебая), 2 — спектр, полученный в ходе эксперимента с дистиллированной водой

## ВЫВОДЫ

1. С помощью разработанного алгоритма была получена зависимость диэлектрической проницаемости среды от частоты, которая хорошо согласуется с входными данными модели, и подтверждена рядом практических экспериментов.

2. Предложенный метод может использоваться для оперативной оценки спектра д. п. на производстве. Перспективным направлением исследования является применение полученных спектров для оперативного анализа контролируемых сред в полиметрических системах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] *Введенский Б. А., Аренберг А. Г.* Радиоволноводы. — М.; Л.: Гостехиздат, 1946. — Ч. 1. — 190 с.
- [2] Исследование объектов с помощью пикосекундных импульсов / Г.В. Глебович, А.В. Андриянов, Ю.В. Введенский и др.; Под ред. Г.В. Глебовича. — М.: Радио и связь, 1984. — 256 с.
- [3] *Карлинер М.М.* Электродинамика СВЧ. — Новосибирск: НГУ, 1999. — 267 с.
- [4] *Надь Ш. Б.* Диэлектрометрия. — М.: Энергия, 1976. — 200 с.
- [5] *Roussy G., Chaabane H., Esteban H.* Permittivity and permeability measurement of microwave packaging materials // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. — Mar. 2004. — Vol. 52, nr 3. — P. 903-907.
- [6] *Afsar M. N., J. Chamberlain, G. W. Chantry* High precision dielectric measurements on liquids and solids at millimeter and submillimeter wavelength // IEEE Trans. Instrum. Meas. — Dec. 1976. — Vol. 25, nr 4. — P. 290–294.
- [7] *Y. Wang, M.N. Afsar* Measurement of complex permittivity of liquid dielectrics // IEEE Microwave and optical technology letters. — Aug. 2002. — Vol. 34, nr 4. — P. 240-243.
- [8] *P. Savi, I.A. Maio* Sensitivity study for dielectric permittivity estimation via TDR measurements // Proceedings of Mediterranean Microwave Symposium. Genova, Sept. 2006. — P. 447-450.