

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Разработана математическая модель полиметрических измерений параметров жидких сред.

Ключевые слова: математическая модель, полиметрические измерения, парметры.

Розроблено математичну модель поліметричних вимірювань параметрів рідких середовищ.

Ключові слова: математична модель, поліметричні вимірювання, параметри.

The Mathematical Model of Polymetric measuring of liquid media parameters is developed.

Keywords: mathematical model, polymetric measuring, parameters.

Актуальность темы. Измерение количественных и качественных (физико-химических) характеристик жидких сред – одна из основных операций современных технологических процессов. Это достаточно сложная и трудоемкая задача, т.к. необходимо контролировать ряд различных параметров, которые являются функцией материала контролируемой среды, частоты, температуры. Поэтому для ее решения требуется большое количество измерительных преобразователей различных принципов действия. Минимизировать их количество позволяет использование методов полиметрических измерений. Полиметрические измерения обеспечивают комплексную оценку состояния контролируемой среды – ее количественных и качественных характеристик одним измерительным преобразователем. Поэтому развитие и совершенствование подобных методов измерений важная и актуальная задача. Развитию этих методов будет служить так же и построение их математической модели

Цель работы. Разработка математической модели, адекватно отображающей физические и алгоритмические особенности реализации методов полиметрических измерений.

Основная часть. Полиметрические измерения базируются на контактном зондировании исследуемой среды короткими электромагнитными импульсами с помощью полиметрических измерительных преобразователей различных конструкций и взаимосвязи физико-химических свойств контролируемой среды с ее электрофизическими параметрами [2]. Этот метод, по сути, объединяет прямые и косвенные измерения, т. е. исследуемые параметры определяются как непосредственными измерениями, так и по результатам прямых измерений других физических величин, функционально связанными с искомыми параметрами.

Комплексное определение физико-химических характеристик вещества на основе методов полиметрических измерений требует выбора модели процессов взаимодействия коротких электромагнитных импульсов с веществом в измерительном преобразователе, решения обратной задачи – определение электрофизических параметров этого вещества и далее по ним – нахождения искоемых характеристик. Поэтому модель должна отображать: получение результатов прямых измерений, определение электрофизических характеристик, оценку

функциональной зависимости искомых параметров от этих характеристик, определение количественных и качественных параметров исследуемой среды по найденной функциональной зависимости.

В общем случае схематически процесс распространения и взаимодействия электромагнитного импульса со средой показан на рис.1. Полиметрическая измерительная система упрощенно представлена в виде генератора-приемника (ГП), чувствительного элемента – волноводной линии «а» и контролируемой среды «б».

ГП посылает короткий зондирующий импульс 1 в линию «а» и, принимает отраженные сигналы 2 от границы раздела сред, 3 от конца линии без контролируемой среды или 4 с контролируемой средой [3].

Так как зондирующий импульс содержит широкий спектр частот от единиц герц до десятков гигагерц, то он вызывает возбуждение практически всех возможных типов колебаний контролируемой среды, что обеспечивает необходимую информативность измерений.

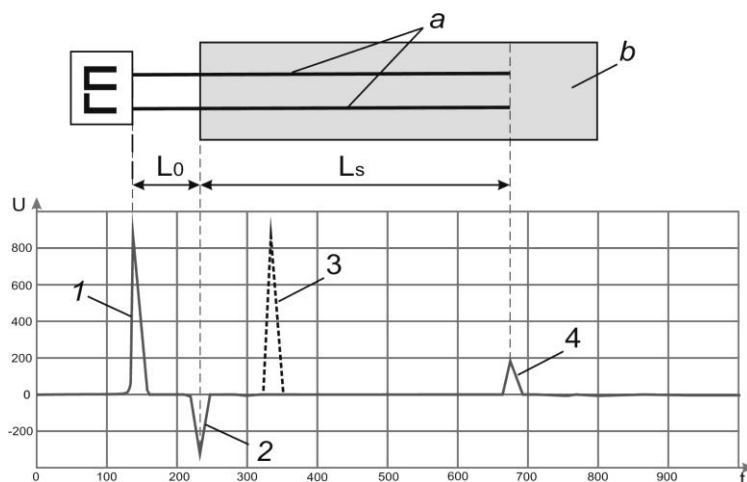


Рис. 1. Распространение электромагнитного импульса в среде

При анализе процессов взаимодействия зондирующего импульса со средой принимаем следующие допущения:

1. Скорость изменения электрических параметров среды намного меньше скорости изменения электромагнитных сигналов.
2. Скорость механического движения компонентов среды много меньше скорости распространения электромагнитных сигналов.
3. Среда линейна с точки зрения электромагнитных свойств.
4. Длина волн спектральных составляющих зондирующего сигнала значительно больше размеров молекул вещества контролируемой среды.

При таких условиях электромагнитные процессы описываются телеграфными уравнениями, где функционально связаны параметры зондирующего и отраженных импульсов, волновое сопротивление длинной линии, электрофизические и количественные параметры контролируемой среды. Информация о свойствах среды определяется амплитудой, формой отраженных импульсов 2, 3, 4 и временными интервалами между ними. Исходя из этого, для построения модели необходимо сформировать среду с определенными электрофизическими параметрами, задать спектр зондирующего импульса и получить спектры отраженных импульсов функционально связанными с количественными и качественными характеристиками этой среды. Электрофизические параметры контролируемой среды – это спектры диэлектрической $\epsilon(\omega)$ и магнитной $\mu(\omega)$ проницаемости, удельной электрической проводимости $\gamma(\omega)$.

Для рассматриваемых жидкостей (без специальных ферромагнитных добавок) магнитная проницаемость обычно равна 1, поэтому далее считаем, что электрофизические параметры полностью определяются комплексными спектрами диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r(\omega) + j\varepsilon_m(\omega)$$

где, согласно формуле Дебая [1] :

$$\varepsilon_r(\omega) = 1 + \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \text{ – реальная часть диэлектрической проницаемости на частоте } \omega,$$

$$\varepsilon_m(\omega) = \omega \tau \frac{\varepsilon_z - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \text{ – мнимая часть диэлектрической проницаемости на частоте } \omega,$$

τ – постоянная времени релаксации,

ε_z – вещественная величина статической компоненты диэлектрической проницаемости,

ε_∞ – вещественная величина диэлектрической проницаемости на бесконечной частоте.

Для удобства анализа комплексная диэлектрическая проницаемость задается модулем и тангенсом угла диэлектрических потерь:

$$|\varepsilon(\omega)| = \sqrt{\varepsilon_r^2(\omega) + \varepsilon_m^2(\omega)} \text{ – модуль диэлектрической проницаемости на частоте } \omega,$$

$$\text{tg}(\varphi(\omega)) = \frac{\varepsilon_m(\omega)}{\varepsilon_r(\omega)} \text{ – тангенс угла диэлектрических потерь на частоте } \omega.$$

Диапазон частот, в котором оценивается диэлектрическая проницаемость, определяется шириной спектра зондирующего импульса Δ (рис. 1).

В реальных условиях длительность зондирующего импульса порядка 0,5 нс, эффективная ширина его спектра ~ 2 ГГц, поэтому будем анализировать параметры среды на этом, наиболее достоверном, частотном интервале измерений.

На рисунках 2 и 3 показаны модуль и тангенс угла диэлектрических потерь спектра диэлектрической проницаемости для среды с постоянной времени релаксации $\tau = 10^{-11}$ с, статической компоненте диэлектрической проницаемости $\varepsilon_z = 2$.

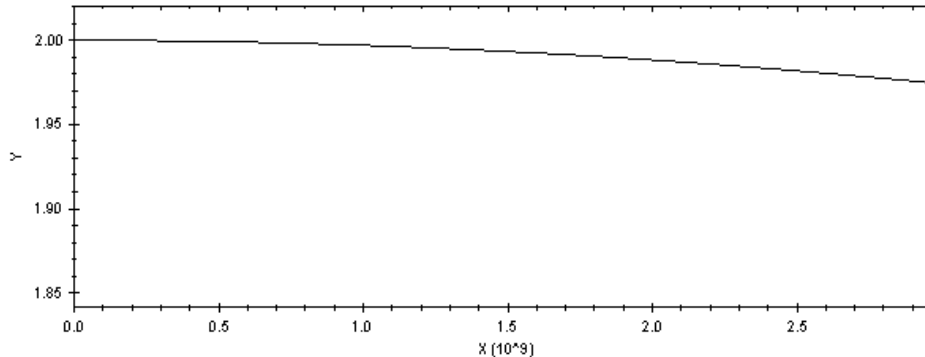


Рис. 2. Модуль спектра диэлектрической проницаемости

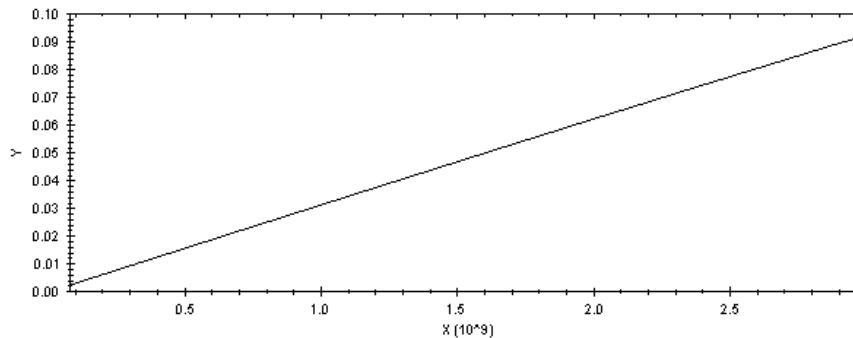


Рис. 3. Тангенс угла потерь спектра диэлектрической проницаемости

Следующий этап моделирования – это формирование зондирующего импульса и получение отраженных импульсов для среды с вышеуказанными электрофизическими параметрами.

На рис. 4 показана рефлектограмма, полученная моделированием режима измерений для таких условий.

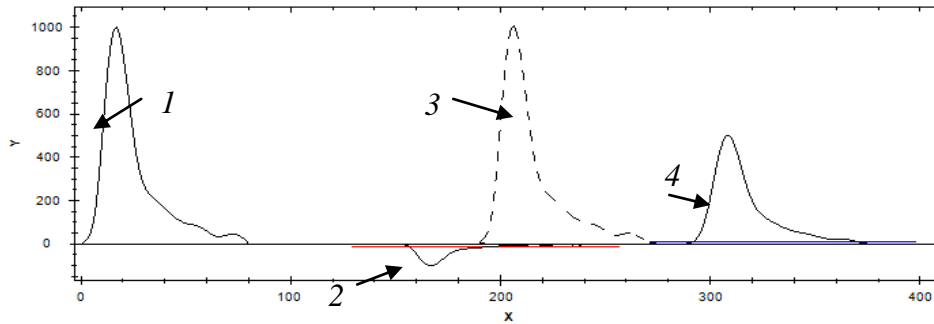


Рис. 4. Рефлектограмма, полученная путем моделирования

По этой рефлектограмме будут определяться электрофизические параметры контролируемой среды.

В спектральном виде рефлектограмма, изображенная на рисунке 4, может быть представлена как суперпозиция 3-х мод:

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

где:

$U(\omega)$ – спектр зондирующего импульса,

$S(\omega)$ – спектр сигнала, отраженного от границы раздела сред,

$$S(\omega) = U(\omega) K_0^2 A_{00}(\omega) \quad (2)$$

$E(\omega)$ – спектр сигнала, отраженного от конца датчика,

$$E(\omega) = U(\omega) K_0^2(\omega) A_{01}(\omega) K_s^2(\omega) A_{10}(\omega) \quad (3)$$

$$A_{00}(\omega) = \frac{1 - \sqrt{\epsilon(\omega)}}{1 + \sqrt{\epsilon(\omega)}} \text{ – коэффициент отражения от границы раздела сред,}$$

$A_{01}(\omega)$ – коэффициент передачи через границу раздела сред в прямом направлении,

$A_{10}(\omega)$ – коэффициент передачи через границу раздела сред в обратном направлении,

$K_0(\omega) = \exp(-j\omega L_0 / c)$ – коэффициент передачи через слой воздуха,

$K_s(\omega) = \exp(-j\omega \sqrt{\epsilon(\omega)} L_s / c)$ – коэффициент передачи сигнала через контролируемую среду.

В выражениях выше использованы следующие обозначения:

ω – частота спектральных составляющих,

c – скорость света в воздухе,

$\epsilon(\omega)$ – спектр диэлектрической проницаемости среды,

L_0 – расстояние от ГП до контролируемой среды.

L_s – длина линии погруженной в контролируемую среду.

Принимая во внимание, что

$A_{01}(\omega) = 1 - A_{00}(\omega)$ и $A_{10}(\omega) = 1 + A_{00}(\omega)$, выражения (2) и (3) можно представить в виде:

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

$$E(\omega) = U(\omega) K_0^2(\omega) (1 - A_{00}^2(\omega)) K_s^2(\omega) = 4S(\omega) \frac{\sqrt{\epsilon(\omega)}}{1 - \sqrt{\epsilon(\omega)}} \exp\left(-j\frac{2}{c} L_s \omega \sqrt{\epsilon(\omega)}\right) \quad (5)$$

Формула (5) описывает взаимосвязь спектров отраженных импульсов со спектром комплексной диэлектрической проницаемости.

$$E(\omega) = 4S(\omega) \frac{\sqrt{\varepsilon(\omega)}}{1 - \sqrt{\varepsilon(\omega)}} \exp\left(-j \frac{2}{c} L_s \omega \sqrt{\varepsilon(\omega)}\right) \quad (6)$$

Таким образом, для оценки электрофизических параметров среды необходимо решить задачу обратную выражению (6) и, по известным значениям $E(\omega)$ и $S(\omega)$ найти $\varepsilon(\omega)$.

Для проверки работы модели задаем электрофизические параметры среды с помощью комплексного спектра диэлектрической проницаемости, представленного на рисунках 2 и 3. После этого, в соответствии с вышеизложенным, получаем результаты измерений, показанные на рисунках 5 и 6.

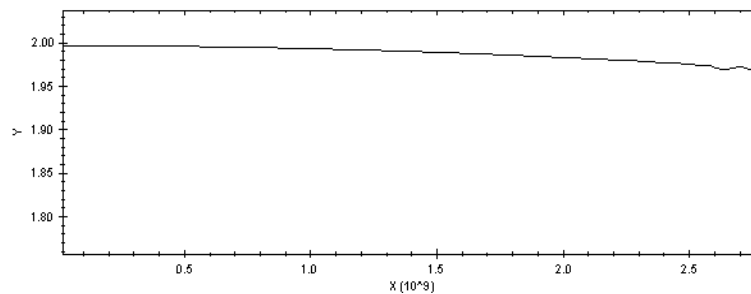


Рис. 5. Модуль спектра диэлектрической проницаемости, полученный по результатам моделирования

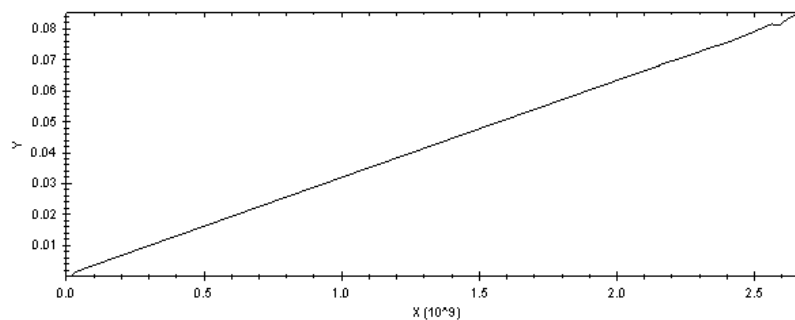


Рис. 6. Тангенс угла потерь спектра диэлектрической проницаемости, рассчитанный по модели

Методическая погрешность оценки параметров спектра диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 0-2 ГГц составляет доли процента, что достаточно для практического применения этих методик.

К информативным параметрам относится и время распространения электромагнитного импульса t в контролируемой среде, так как оно зависит от ее свойств и определяется групповой скоростью V распространения зондирующего импульса, функционально связанной с диэлектрической проницаемостью следующим соотношением:

$$V = C/\varepsilon^{1/2}.$$

Т.о. в результате моделирования будут определены следующие характеристики контролируемой среды, связанные с ее свойствами: уровень, комплексные спектры диэлектрической проницаемости, отношение амплитуд зондирующего и отраженных импульсов, скорость распространения зондирующего импульса [4].

Искомая физико-химическая характеристика среды Q_n связана с этими параметрами обобщенной функциональной зависимостью

$$Q_n = F(q_1, q_2, \dots, q_n),$$

Где: q_k – совокупность оперативно измеренных и рассчитанных электрофизических параметров.

В общем случае функция F неизвестна. Ее определение – главная задача данного измерительного процесса, основная составная часть которого – калибровка. Сущность калибровки состоит в том, что у образцовых сред с известными физико-химическими свойствами измеряются и рассчитываются все вышеуказанные параметры, выделяются наиболее информативные характеристики этих параметров, и эти характерные признаки ставятся им в соответствие и запоминаются как образцовые.

Чем больше будет использоваться при калибровке измеренных и рассчитанных параметров образцовой среды и чем обширнее база образцовых сред, тем надежнее и достовернее будут результаты полиметрических измерений.

На рис. 7 приведена укрупненная блок-схема алгоритма моделирования полиметрических измерений [2].

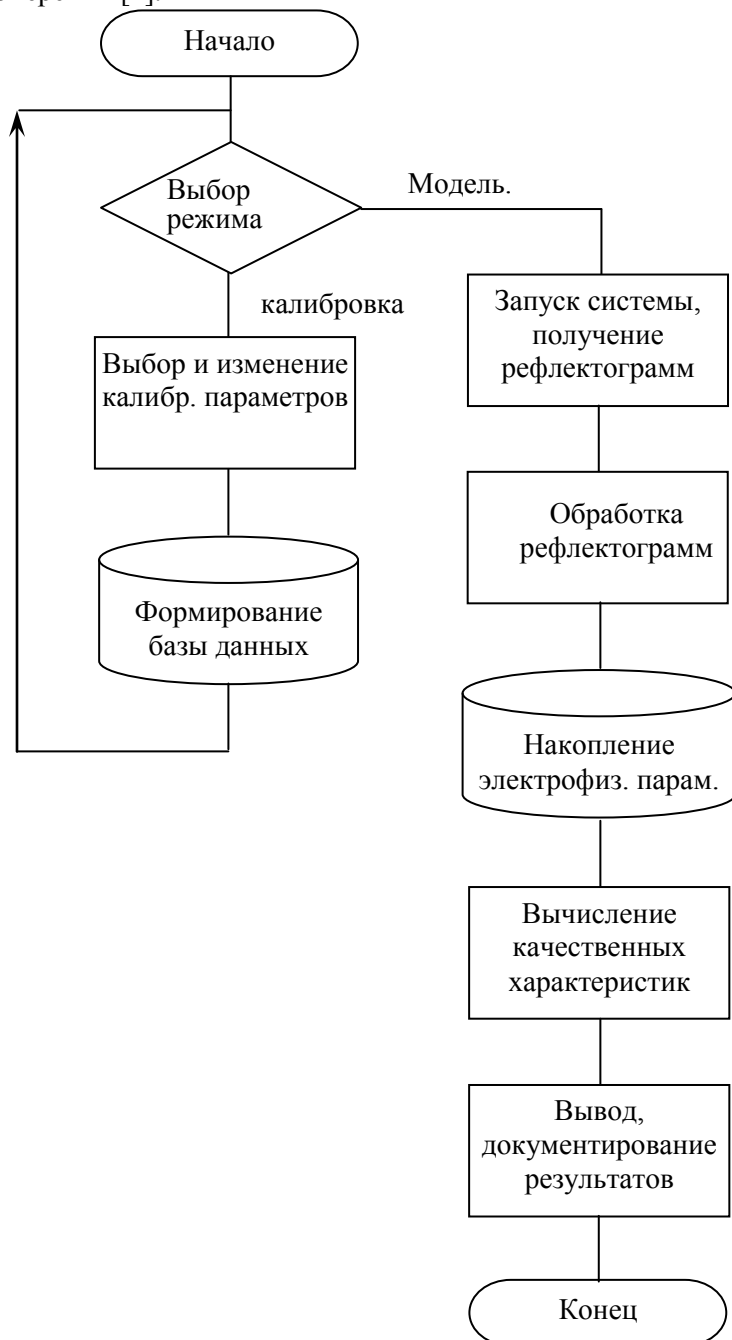


Рис. 7. Блок-схема обобщенного алгоритма моделирования полиметрических измерений

Алгоритм построения модели будет обеспечивать:

- формирование параметров исследуемой среды;
- формирование зондирующего и отраженных импульсов;
- измерение временных параметров;
- расчет комплексных спектров диэлектрической проницаемости – $\epsilon(j\omega)$;
- калибровку по образцовым средам,
- формирование базы данных по видам образцовых сред,
- поиск и отбраковку случайных совпадений;
- оценку результатов библиотечного поиска;
- выдачу заключения по результатам моделирования.

Алгоритм моделирования полиметрических измерений разработан и апробирован в НПО АМИСО (www.amiso.ua).

Выводы: 1. Разработана математическая модель полиметрических измерения количественных и качественных характеристик жидких сред. 2. Построение математической модели полиметрических измерений – это развитие и усовершенствование методов подобных измерений. 3. Использование результатов моделирования позволит упростить и формализовать построение информационно-измерительных систем для оперативной оценки параметров жидких сред.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов: Справочник. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1977. – 400 с.
2. Гордеев Б.Н. Оперативный контроль количественных и качественных характеристик углеводородных топлив // Зб. наук. праць МДГУ ім. Петра Могили. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – 64 (77). – С. 37-41.
3. Жуков Ю.Д., Гордеев Б.Н. Зимина О.А. метрологическое обеспечение полиметрических систем в рабочих условиях топлив // Зб. наук. праць МДГУ ім. Петра Могили. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – 72 (85). – С. 60-63.
4. Пат. 80166С2 Украина. Способ определения показателей качества углеводородных топлив / Б.Н. Гордеев, Ю.Д. Жуков (Украина) – Заявлено 06.06.05; Опубл. 27.08.07. Бюл. № 13207.

Рецензенти: д.т.н., професор Дихта Л.М.,
к.т.н., професор Димо Б.В.

© Гордеев Б.Н., 2009

Стаття надійшла до редколегії 23.05.09