

## **ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ В ПОЛИМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*Рассматривается способ повышения точности определения временных интервалов между характерными точками полиметрического сигнала.*

***Ключевые слова:** рефлектограмма, повышение точности, согласованная фильтрация, режекция импульсов, полиметрические системы.*

*Розглядається спосіб підвищення точності визначення інтервалів часу між характерними точками поліметричного сигналу.*

***Ключові слова:** рефлектограма, підвищення точності, узгоджена фільтрація, режекція імпульсів, поліметричні системи.*

*The way of increasing the accuracy of determining temporary intervals between characteristic points of polymetric signal is considered.*

***Key words:** reflectogram, increasing the accuracy, matched filtering, pulse rejection, polymetric systems.*

### **АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Полиметрические системы обеспечивают оценку количественных и качественных параметров жидких сред с помощью анализа полиметрического сигнала – рефлектограммы [1]. Расстояния между границами несмешиваемых сред оценивают по отраженным от них сигналам. Одной из наиболее актуальных задач является повышение точности определения задержки между моментами прихода отраженных сигналов. Это имеет большое значение при анализе свойств отдельных, близкорасположенных фракций продукта.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

При помехе типа «белый шум» задача определения разности задержек между неперекрывающимися импульсами, традиционная для рефлектотрических систем, решается оптимально, с помощью согласованной фильтрации [2]. Однако, в реальных условиях, импульсы, отраженные от разных фракций продукта, как правило, перекрываются. Поэтому приходится использовать методы обработки сигналов, представляющие компромиссное решение для удовлетворения требований ослабления помех вида «белый шум» и мешающего отражения. В связи с тем, что искажения формы отраженных импульсов сильно зависят от вида продукта, весовую функцию измерительного фильтра приходится оптимизировать индивидуально для каждого типа производства. Критерии и рекомендации выбора весовой функции измерительной системы приведены в данной работе.

### **ЦЕЛЬ РАБОТЫ**

Разработка методов повышения точности измерения задержки между импульсами полиметрического сигнала для оценки толщины слоев близкорасположенных несмешиваемых фракций продукта.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Как известно [2], оптимальное измерение задержки сигнала на фоне помехи типа «белый шум» связано с определением нуля производной свертки рефлектограммы с опорным импульсом, отсчеты которого соответствуют зондирующему сигналу или, что эквивалентно, определением нуля свертки рефлектограммы с производной зондирующего импульса. Однако, реальная форма зондирующего импульса, как это видно на рисунках 1 и 2, имеет производную, достаточно протяженную по времени, что затрудняет режекцию мешающих отражений.

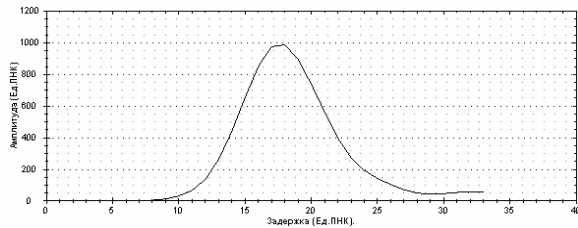


Рис. 1. Зондирующий сигнал (ЗС)

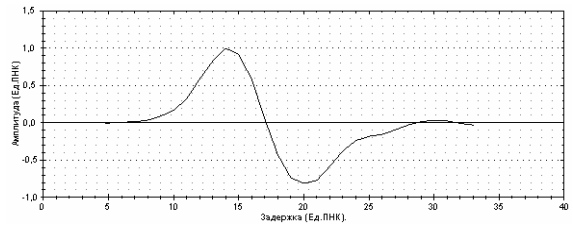


Рис. 2. Производная ЗС

Это приводит к искажениям результатов измерений при определении задержки. Например, при измерении задержки отражений от близкорасположенных границ раздела сред (ГРС), как показано на рисунке 3, может возникнуть ошибка.

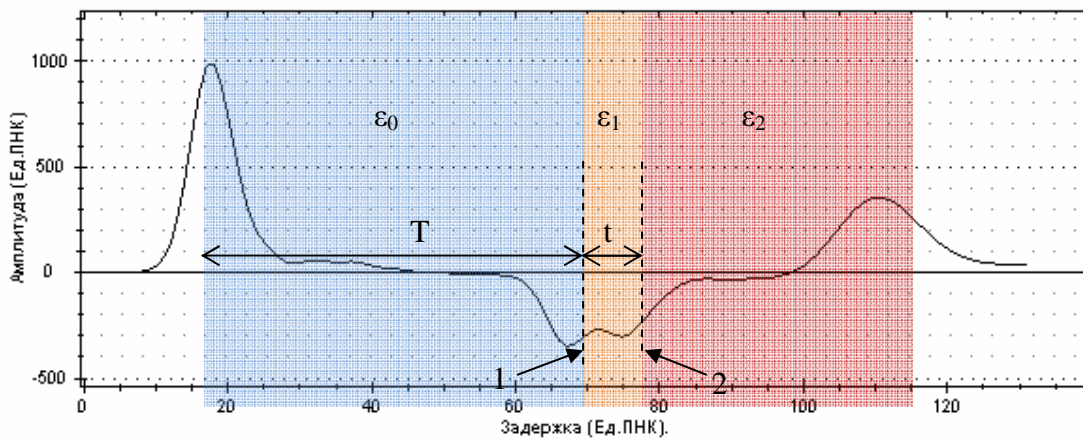


Рис. 3. Рефлектограмма с отражением от двух близкорасположенных ГРС:  
1 и 2 – границы разделов сред (ГРС),  $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость слоев исследуемых сред

Ошибка измерения задержки  $t$  возникает вследствие взаимного наложения отражений от ГРС – рис. 4.

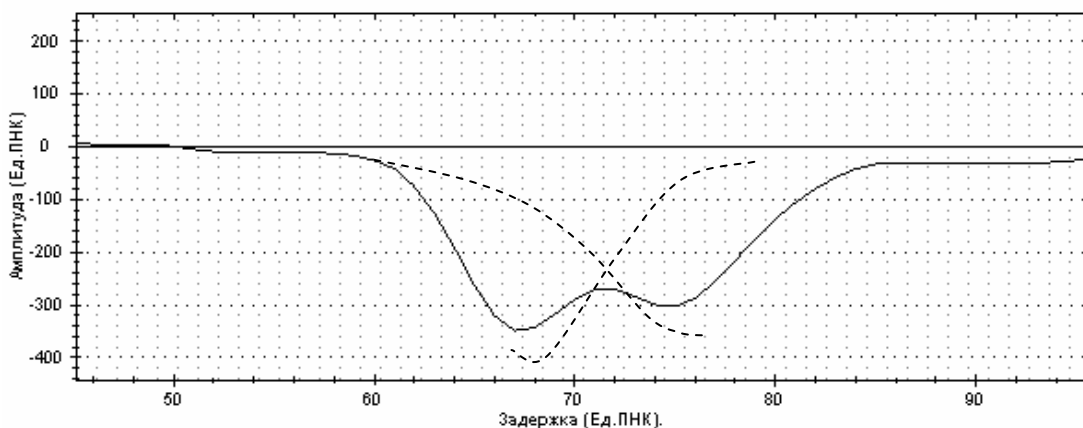
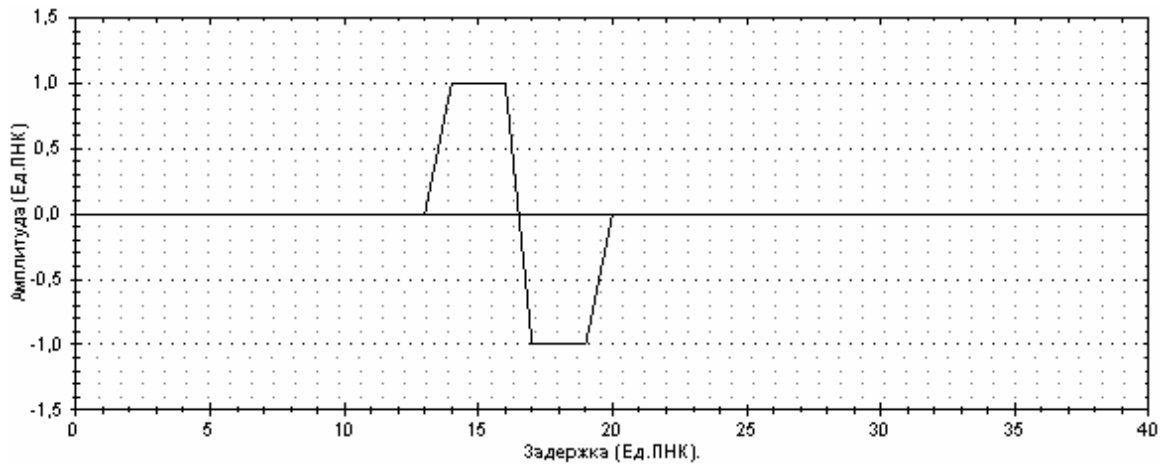


Рис. 4. Взаимное наложение импульсов, отраженных от близкорасположенных ГРС

Одним из возможных способов снижения влияния мешающих отражений на результаты измерений является использование менее протяженного по времени опорного импульса. Удобно, например, использовать метод, используемый в радиолокации для сопровождения целей по дальности с расщепленным стробом [2].



**Рис. 5.** Опорный импульс устройства измерения задержки  $h(t)$   
(по оси X отложен номер дискрета времени, по оси Y – вес)

Работа такого измерителя заключается в том, что вместо опорного сигнала, соответствующего производной зондирующего импульса, для свертки с рефлектометрическим сигналом используется короткий опорный импульс, изображенный на рис. 5.

Путем выбора длительности весовой функции  $h(t)$  можно добиться приемлемого компромисса между погрешностями измерения вносимыми как помехой типа «белый шум», так и влиянием мешающих отражений.

Аналогично [3], оценим влияние импульсной характеристики устройства обработки и формы зондирующего импульса на дисперсию оценки задержки  $\tau$ .

$$q(\tau) = S(\tau) + H(\tau), \quad (1)$$

где  $S(\tau)$  и  $H(\tau)$  – соответственно сигнальная и шумовая функции измеряемого параметра  $\tau$ .

Приравняв нулю производную от  $q(\tau)$  получаем:

$$S'(\tau) + H'(\tau) = 0, \quad (2)$$

где

$$S'(\tau) = \frac{d}{d\tau} S(\tau), \quad H'(\tau) = \frac{d}{d\tau} H(\tau). \quad (3)$$

Разлагая  $S(\tau)$  в ряд Тейлора в окрестности  $\tau_0$ , найдем:

$$S(\tau) = S(\tau_0) + (\tau - \tau_0)S'(\tau_0) + \frac{(\tau - \tau_0)^2}{2} S''(\tau_0) + \dots \quad (4)$$

Первое слагаемое есть постоянная величина, второе – вследствие четности  $S(\tau)$  равно нулю. Дифференцируя левую и правую части найденного выражения и пренебрегая членами ряда выше третьего, получим:

$$(\tau - \tau_0)S''(\tau_0) + H'(\tau) = 0. \quad (5)$$

При отношении мощности сигнала к мощности помехи  $R \gg 1$  значение  $\tau$  близко к истинному значению  $\tau_0$ .

Поэтому, если во второе слагаемое полученного тождества вместо  $\tau$  подставить  $\tau_0$ , то статистическая характеристика случайной функции  $H'(\tau)$  практически не изменится,  $H'(\tau) \approx H'(\tau_0)$ .

Откуда:

$$(\tau - \tau_0) = -\frac{H'(\tau_0)}{S''(\tau_0)}. \quad (6)$$

Так как  $S''(\tau_0)$  величина не случайная, то дисперсия:

$$D(\tau - \tau_0) = \sigma^2(\tau) = -\frac{\sigma^2[H'(\tau_0)]}{|S''(\tau_0)|^2}, \quad (7)$$

где:

$\sigma^2[H'(\tau_0)]$  – дисперсия производной шумовой функции измеряемого параметра.

Представим  $H(\tau_0)$  в виде:

$$H(\tau_0) = H_0(\tau_0) \times \sqrt{R}, \quad (8)$$

где  $H_0(\tau_0)$  – нормированный случайный процесс со среднеквадратическим значением равным единице,  $R$  – отношение сигнал/шум.

Откуда:

$$\sigma^2(\tau) = R \frac{\sigma^2[H_0'(\tau_0)]}{|S''(\tau_0)|^2}, \quad (9)$$

где  $\sigma^2[H_0'(\tau_0)]$  – дисперсия производной нормированного нормального случайного процесса.

В [4] показано, что она равна модулю второй производной от корреляционной функции этого процесса, при нулевом значении аргумента.

Нормированная автокорреляционная функция выходного шума совпадает с автокорреляционной функцией импульсной характеристики устройства обработки. Поэтому:

$$\sigma^2[H_0'(\tau_0)] = |K_{FF}''(0)|, \quad (10)$$

где:  $K_{FF}(0)$  – автокорреляционная функция импульсной характеристики устройства обработки.

Учитывая, что

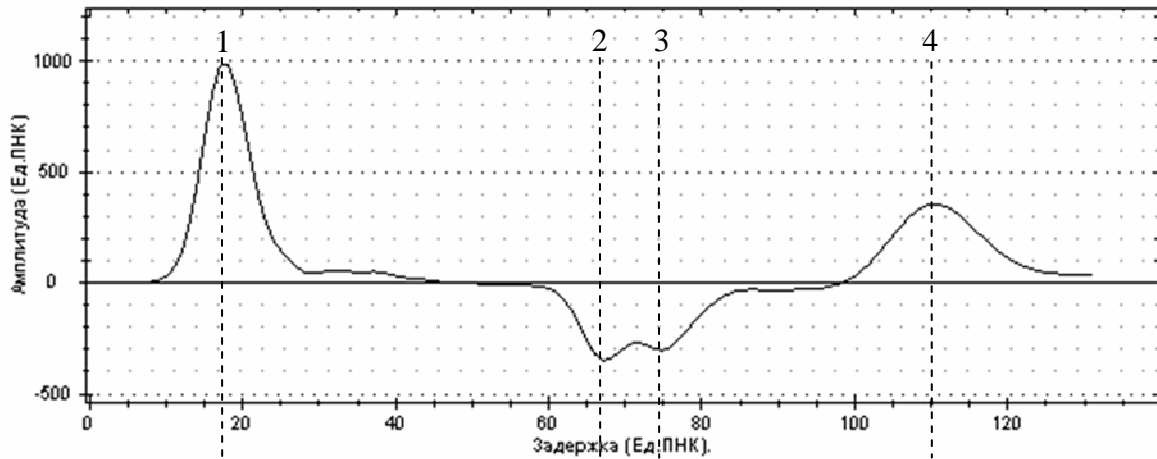
$$|S''(\tau_0)|^2 = R^2 |K_{SF}''(0)|^2, \quad (11)$$

где  $K_{SF}$  – функция взаимной корреляции импульсной характеристики устройства обработки и зондирующего импульса, получим:

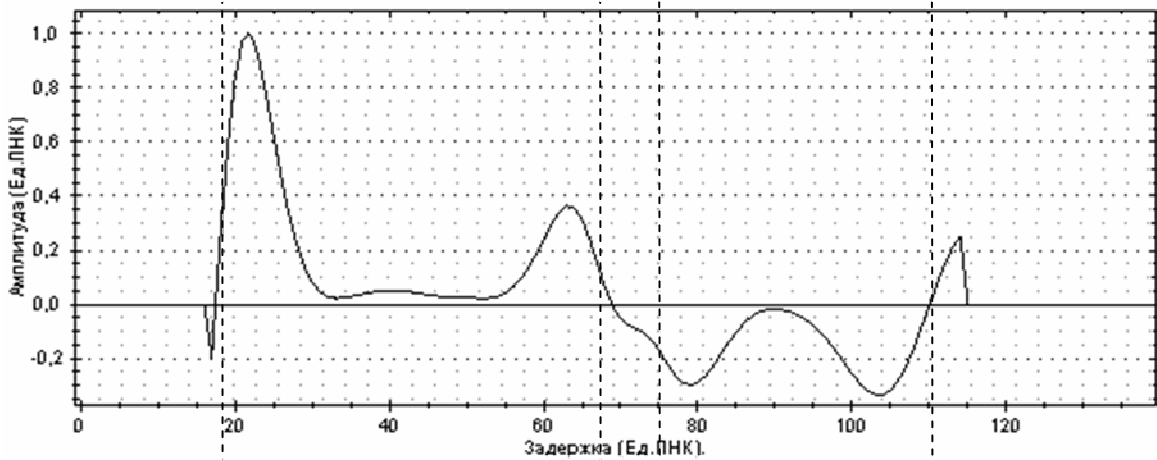
$$\sigma^2(\tau) = \frac{|K_{FF}''(0)|}{R |K_{SF}''(0)|^2}. \quad (12)$$

На рис. 6, 7 и 8 показаны результаты определения задержки импульса, отраженного от границы раздела сред. Исходные данные представляли собой последовательность рефлектограмм, одна из которых представлена, для примера на рис. 6 а). На рис. 7 и 8 по оси X отложен порядковый номер рефлектограммы, а по оси Y – значение задержки импульса, обозначенного на рис. 6 а) цифрой 3.

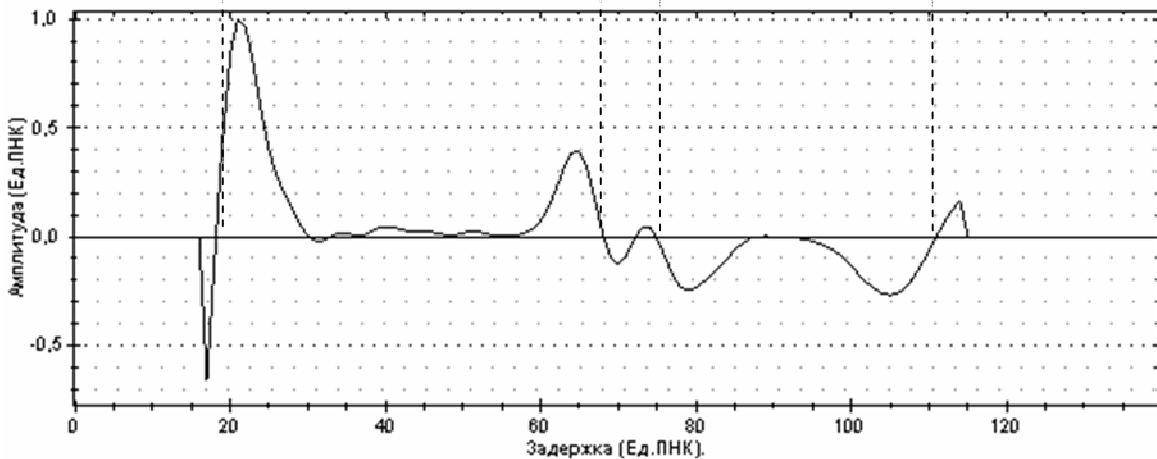
Одни и те же данные были обработаны традиционным способом и предлагаемым методом – рис. 6 а), б). Длина весовой была подобрана так, чтобы значение дисперсии результатов измерений, рассчитанное по формуле (12), не превышало дисперсию, полученную с помощью оптимального фильтра более чем на 3 дБ.



а) – исходная рефлектограмма



б) – результаты обработки рефлектограммы фильтром, импульсная характеристика которого представляет собой производную зонда



в) – результаты обработки рефлектограммы фильтром, импульсная характеристика которого представляет собой предлагаемый опорный сигнал

**Рис. 6.** Рефлектограмма и сравнение результатов ее обработки:

- 1 – местоположение максимума зондирующего импульса
- 2 – местоположение максимума импульса, отраженного от первой границы раздела сред,
- 3 – местоположение максимума импульса, отраженного от второй границы раздела сред,
- 4 – местоположение максимума импульса, отраженного от конца датчика

В процессе измерений, под влиянием внешних условий работы аппаратуры, форма зондирующего импульса менялась. Этим объясняется дисперсия результатов измерения приведенных на рисунках 7 и 8. Однако, низкочастотный дрейф результатов, полученных предлагаемым методом существенно меньше.

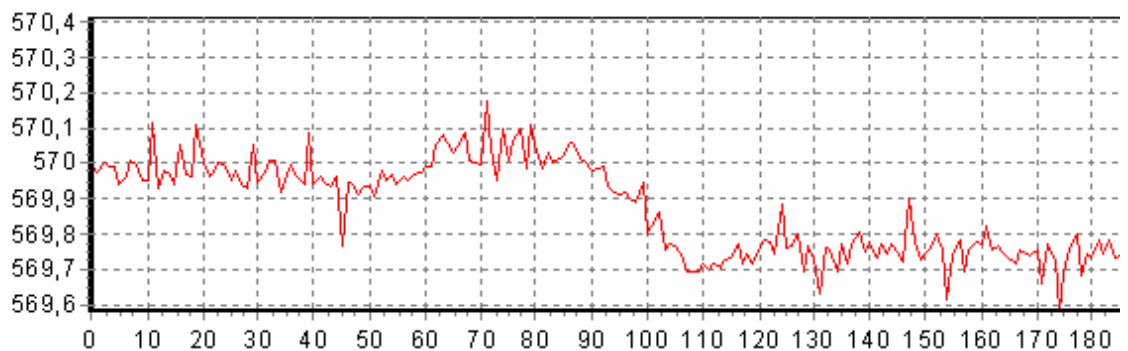


Рис. 7. Результаты определения задержки импульса традиционным методом

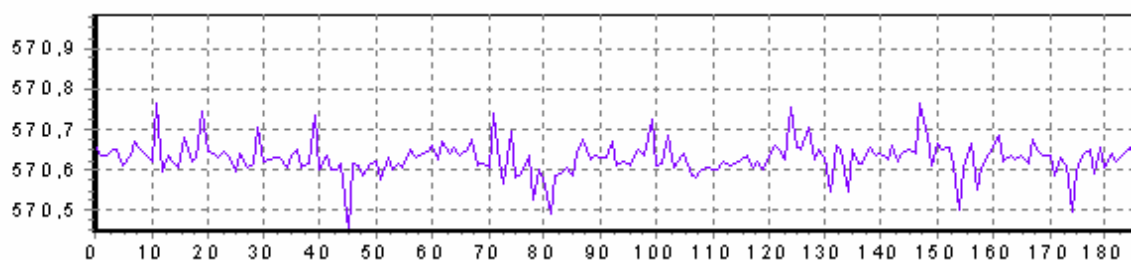


Рис. 8. Результаты определения задержки импульса предлагаемым методом

## ВЫВОДЫ

Предложенные методы обработки измерительной информации позволяют более точно определять время задержки импульсных сигналов, значительно уменьшить дисперсию результатов измерений и тем самым повысить достоверность оценки количественных характеристик несмешиваемых жидких сред.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гордеев Б.Н. Оперативный контроль количественных и качественных характеристик углеводородных топлив // Научно-методический журнал. – Т. 77. Вып. 64. – Николаев: Вид-во МДТУ им. Петра Могили, 2008. – С. 32-37.
2. Бартон Д. и Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям. Пер. с англ. М.М. Вейсбейна. – М.: «Сов. Радио», 1976. – 392с.
3. Левин Б.Р. « Теоретические основы статистической радиотехники». Книга вторая. – М.: «Сов. радио», 1968. – 503с.
4. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники. Под ред. Б. Х. Кривицкого. В 2-х т. Т. 2. – М.: «Энергия», 1977. – 472 с.

Рецензенты: д.т.н., профессор Жуков Ю.Д.;  
к.т.н., доцент Жук Д.О.

© Гордеев Б.Н., Образцов А.Ю.  
Зивенко А.В., 2010

Статья поступила в редколлегию 02.04.2010 г.