

УДК 534.6.08

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОГИБАЮЩИХ ВТОРОГО И ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЭХО-ИМПУЛЬСА

А.И. Солдатов, С.А. Шестаков, С.В. Пономарев

Томский политехнический университет

E-mail: asoldatof@mail.ru

Проведен анализ акустического тракта ультразвукового уровнемера. Предложен метод огибающих второго и третьего порядков для определения момента прихода эхо-импульса, что позволяет повысить точность измерения уровня в 1,5...2 раза.

### Ключевые слова:

Ультразвук, уровнемер, компаратор, огибающая, аппроксимация, эхо-импульс, точность измерения.

### Key words:

Ultrasound, level meter, comparator, envelope, approximation, echo pulse, ranging accuracy.

Измерение скорости или времени распространения упругих колебаний в среде позволяет получить информацию о дальности до какого-либо объекта, об уровне жидкости или сыпучего материала в резервуарах или водоёмах, о физико-химических или механических свойствах среды и т. д.

Методы измерения времени естественным образом делятся на импульсные методы и методы, использующие непрерывные волны. Преимуществом импульсных методов является возможность освобождения от стоячих волн, а также отделения сигнала от наводок благодаря разделению их во времени [1].

Погрешность измерения ультразвуковых время-импульсных приборов является одной из основных технических характеристик. Определение уровня или скорости распространения связано с необходимостью измерения времени запаздывания эхо-сигнала относительно зондирующего излучения.

$$h = c \frac{t_3}{2}, \quad (1)$$

где  $h$  — уровень;  $c$  — скорость распространения ультразвуковых импульсов;  $t_3$  — время запаздывания эхо-сигнала относительно зондирующего излучения.

Погрешность  $\Delta h$  косвенных измерений зависит от погрешностей каждого из прямых измерений величин, входящих в формулу (1) [2]:

$$\Delta h = \frac{dh}{dc} \Delta c + \frac{dh}{dt_3} \Delta t_3 = \frac{h}{c_{cp}} \Delta c + c_{cp} \Delta t_3, \quad (2)$$

где  $c_{cp}$  — средняя скорость распространения ультразвуковых импульсов.

Погрешность состоит из суммы систематической и случайной составляющих, входящих в выражение (2):

$$\Delta h = \Delta h_{cm} + \Delta h_{cl}.$$

Систематическую составляющую погрешности можно компенсировать введением поправки при калибровке аппаратуры. Случайную составляющую погрешности компенсировать нельзя, поэтому она определяет и ограничивает точность измерения. Случайная составляющая погрешности измерения уровня ультразвуковых уровнемеров об-

условлена неточностью определения прихода ультразвукового импульса.

Момент прихода ультразвукового эхо-импульса обычно определяют с помощью компаратора [3]. Этот метод основывается на использовании порогового элемента (компаратора), формирующего импульс, длительность которого соответствует времени прохождения ультразвукового импульса от излучателя до приёмника. Начало импульса устанавливается по переднему фронту возбуждающего импульса, окончание определяется компаратором, на вход которого поступает эхо-импульс.

При прохождении через стенки сосуда и измеряемую среду ультразвуковой импульс теряет много энергии, и его амплитуда уменьшается. В результате компаратор пропускает несколько периодов колебаний ультразвукового импульса, амплитуда которых меньше его порога срабатывания (рис. 1), и время срабатывания компаратора не совпадает с началом импульса.

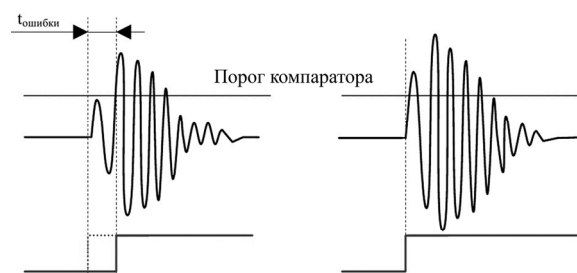


Рис. 1. Погрешность, обусловленная недостаточным уровнем эхо-импульса

Форма и амплитуда эхо-импульса имеет нестационарный характер и зависит от многих параметров. Она меняется в зависимости от расстояния от излучателя до приёмника. Чем меньше амплитуда эхо-импульса, тем больше периодов колебаний будет пропущено компаратором. Это приводит к тому, что погрешность метода компаратора меняется в зависимости от измеряемого уровня, и эту погрешность невозможно учесть.

Огибающая переднего фронта ультразвукового импульса обычно представляет собой монотонно возрастающую функцию. Это даёт возможность

аппроксимировать огибающую переднего фронта кривой, описываемой полиномом второй степени

$$s = at^2 + bt + c,$$

где  $s$  — амплитуда огибающей;  $t$  — время;  $a, b, c$  — коэффициенты полинома.

Так как форма эхо-импульса несимметрична относительно оси  $t$ , то для аппроксимации фронта используются две кривые. Одна кривая огибает импульс по положительным значениям, другая — по отрицательным значениям (рис. 2). Эти кривые имеют две общие точки, одна из которых принимается за начало исследуемого эхо-импульса.

Для нахождения коэффициентов  $a, b, c$  берутся значения амплитуды ультразвукового импульса в трёх точках, соответствующих вершинам синусоидального сигнала (экстремумах) в трёх соседних периодах. Используя эти данные, составляется система уравнений:

$$\begin{cases} s_1 = at_1^2 + bt_1 + c \\ s_2 = at_2^2 + bt_2 + c, \\ s_3 = at_3^2 + bt_3 + c \end{cases} \quad (3)$$

где  $s_1, s_2, s_3$  — значения амплитуды ультразвукового импульса в точках экстремумов в моменты времени  $t_1, t_2, t_3$ .

Из системы уравнений (3) находятся коэффициенты  $a, b, c$ .

По такому же принципу можно аппроксимировать форму переднего фронта импульса кривой, описываемой полиномом третьей степени:

$$s = at^3 + bt^2 + ct + d.$$

Полином третьей степени в некоторых случаях аппроксимирует огибающую переднего фронта эхо-импульса с большей точностью, что даёт лучший результат. Для нахождения коэффициентов  $a, b, c, d$  составляется система из четырёх уравнений:

$$\begin{cases} s_1 = at_1^3 + bt_1^2 + ct_1 + d \\ s_2 = at_2^3 + bt_2^2 + ct_2 + d \\ s_3 = at_3^3 + bt_3^2 + ct_3 + d \\ s_4 = at_4^3 + bt_4^2 + ct_4 + d \end{cases} \quad (4)$$

Решения систем уравнений (3) и (4) находятся с помощью метода Крамера [4]. Огибающие могут не пересекаться, поэтому в качестве начала эхо-импульса принимается точка наименьшего расстояния между огибающими.

В отличие от метода определения момента прихода эхо-импульса с помощью компаратора с фиксированным порогом срабатывания, погрешность методов огибающих второго и третьего порядков не зависит от амплитуды эхо-импульса, но зависит от его формы.

В реальных условиях на форму эхо-импульса существенно влияют помехи и шумы, которые приводят к ошибкам при расчёте уравнений огибающих. Чтобы уменьшить влияние помех и шумов на расчёт, для нахождения коэффициентов уравнения кривых был использован метод наименьших квадратов. Этот метод отличается тем, что в

расчёт берётся количество точек, превышающее количество неизвестных переменных, и строится усреднённая огибающая по этим точкам. В общем случае метод наименьших квадратов используется для оценки неизвестных величин по результатам измерений, содержащим случайные ошибки [5].

Коэффициенты аппроксимации находятся путём решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n t_i^2 s_i = a \sum_{i=1}^n t_i^4 + b \sum_{i=1}^n t_i^3 + c \sum_{i=1}^n t_i^2 \\ \sum_{i=1}^n t s_i = a \sum_{i=1}^n t_i^3 + b \sum_{i=1}^n t_i^2 + c \sum_{i=1}^n t_i, \\ \sum_{i=1}^n s_i = a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i + cn \end{cases}$$

где  $n$  — количество точек экстремумов, выбранных для полиномиальной аппроксимации; индекс  $i$  — текущий номер экспериментальной точки.

Для практической проверки предложенных методов для эхо-импульса были построены огибающие второго и третьего порядков (рис. 2).

Построение огибающих осуществлялось по следующему алгоритму: с помощью цифрового запоминающего осциллографа сохранялась осциллограмма принятого эхо-импульса, на которой выбирался определённый отрезок времени для поиска экстремумов. Положение этого отрезка времени определялось моментом срабатывания компаратора с фиксированным порогом. Для расчёта отбиралось пять периодов до момента его срабатывания и десять периодов после срабатывания компаратора. Для того чтобы исключить из расчёта точки с амплитудой, не превышающей уровень шумов (в случае, когда начало отрезка находится раньше начала эхо-импульса), на выбранном отрезке определялся максимум с наибольшей амплитудой, а точки с амплитудой меньше 5 % от максимума в расчёте не учитывались.

На рис. 2 изображён ультразвуковой эхо-импульс, форма которого аппроксимировалась огибающей второго (рис. 2, а) и третьего порядков (рис. 2, б). Вертикальной чертой обозначено расчётное время начала ультразвукового импульса.

Для оценки точности рассматриваемых методов была получена экспериментальная зависимость погрешности измерения уровня методами компаратора, огибающих второго и третьего порядка (рис. 3) от расстояния  $L$  между излучателем и приёмником. В эксперименте использовался круглый металлический волновод диаметром 52 мм. В качестве излучателя и приёмника использовались ультразвуковые преобразователи МА40В диаметром 8 мм. Они располагались по центру волновода. Частота ультразвуковых колебаний равна 40 кГц, удельная импульсная мощность излучения — 20 Вт/м<sup>2</sup>. Порог срабатывания компаратора равен 0,45 В и не изменялся в процессе расчёта.

Из рис. 3 видно, что систематическая погрешность уменьшилась более чем в 2 раза, а случайная — более чем в 1,5 раза. Погрешности измерения дальности при использовании методов огибающих

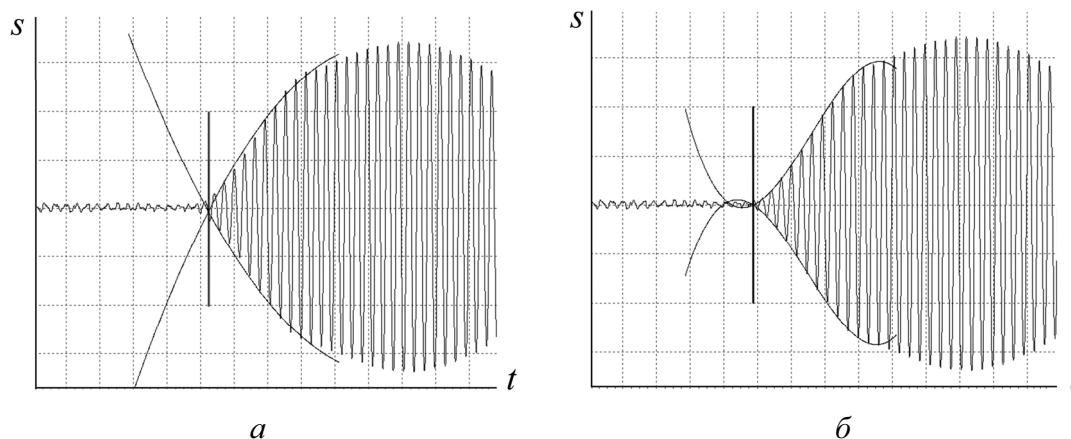


Рис. 2. Аппроксимация фронта ультразвукового импульса огибающей а) второго и б) третьего порядков

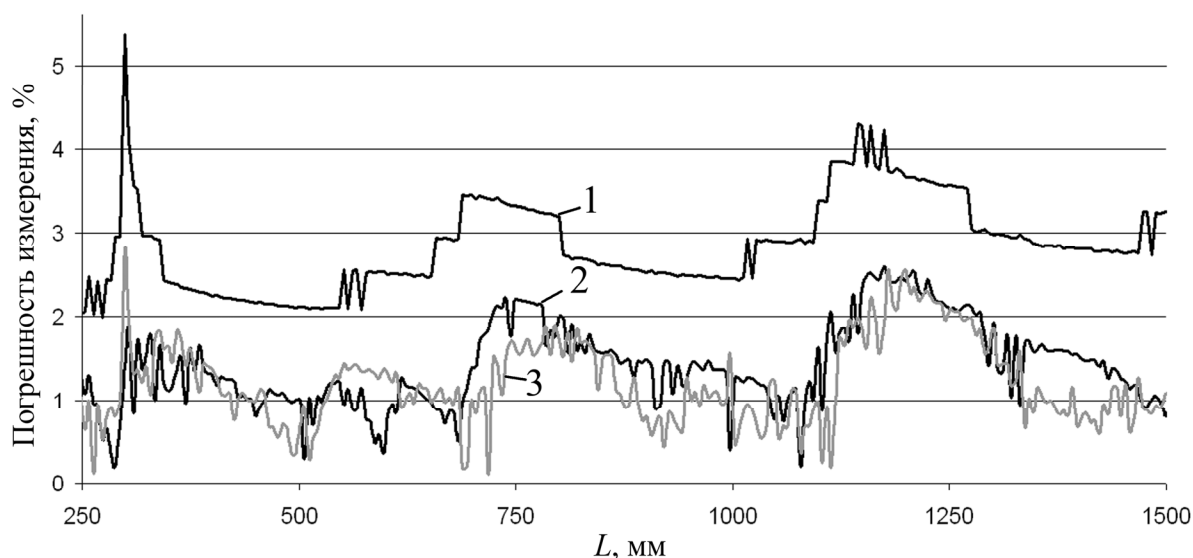


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения уровня методами: 1) компаратора, 2, 3) огибающих 2 и 3 порядка от расстояния  $L$  между излучателем и приёмником

второго и третьего порядков практически не отличаются, однако трудоёмкость расчёта временного положения эхо-импульса значительно выше при использовании огибающей третьего порядка.

Дальнейшие перспективы развития метода состоят в определении минимальной частоты оцифровки эхо-сигнала, не приводящей к снижению точности измерения, что позволит снизить стоимость реализации метода огибающих второго и третьего порядков.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бражников Н.И. Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов. – М.: Теплотехник, 2008. – 256 с.
2. Яковлев А.Н., Каблов Г.П. Гидролокаторы ближнего действия. – Л.: Судостроение, 1983. – 200 с.
3. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

#### Выводы

1. Предложены методы огибающих второго и третьего порядков для определения момента прихода эхо-импульса акустического тракта ультразвукового уровнемера, которые позволяют повысить точность измерения в 1,5...2 раза.
2. Для определения начала эхо-импульса достаточно использовать огибающую второго порядка, которая аппроксимирует фронт с точностью не хуже, чем огибающая третьего порядка.

4. Гусак А.А. Справочник по высшей математике. – Минск: ТетраСистемс, 2000. – 640 с.
5. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука; Физматлит, 1998. – 608 с.

Поступила 17.02.2010 г.