

тів, порядку їх розробки, узгодження і виконання, що є предметом СТП і передбачає певний інформаційний супровід операцій ТОіР.

Система ТОіР прагне досягнення організаційної узгодженості операцій ТОіР, але без активного контролю факторів, що впливають на інтенсивність спрацювання і втрати працездатності обладнання, раціонального використання ресурсу, технологій і якості відновлення працездатності. Досить слабкою ланкою в системі ТОіР є операції ТО. Вони не забезпечують контроль за технічним станом обладнання у сенсі їх призначення (техогляд, діагностика, налаштування, регулювання, відновлення режимів змащення, контроль за інтенсивністю спрацювання, тощо). Відносини у трикутнику: виконавці операцій ТО, виробничий персонал, підрядні організації не узгоджені. Саме у цій сфері відбувається зародження обсягу експлуатаційних витрат і саме ця сфера повинна стати предметом вдосконалення системи ТОіР.

Список літератури

1. **Ченцов Н.А.** Модели экспертно-диагностической системы технического обслуживания оборудования / **Н.А.Ченцов, Г.В.Сопилкин, Е.В.Ошовская.** //Прогрессивные технологии и системы машиностроения “Международный сб. научных трудов” Донецк, ДонГУТУ, 1995. - Вып. 2. - С. 73 -82.
2. **Кіянновський М.В.** Діагностичне забезпечення технічного обслуговування та ремонту (ТОіР) гірничо-металургійного обладнання. Кривий Ріг, Видавництво КНУ, типографія «ОктянПринт», 2016. - 364 с.

Рукопис подано до редакції 17.03.16

УДК 534.6: 681.5.08: 004: 622

В.В. ДРИГА, канд. техн. наук, Криворожский национальный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СКВАЖИННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ГЛУБИНОМЕРА С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА ГЕРЦЕЛЯ

В статье приведены результаты исследований, проведенных при разработке скважинного акустического глубиномера, предназначенного для экспрессного определения глубины буровзрывных скважин в условиях карьеров и шахт. Принцип акустического метода заключается в излучении короткого звукового сигнала в устье скважины и измерении интервала времени, прошедшего от момента подачи до момента прихода эхо-сигнала, отраженного от дна скважины. В работе исследовано влияние *формы* зондирующего сигнала, его *частоты*, рассмотрены методы определения *временного интервала* между прямым и отраженным сигналом с точки зрения минимизации погрешности измерения. Предложен метод построения *огibaющей* сигнала на основе дискретного преобразования Фурье и *алгоритма Герцеля*. Разработан метод определения временного интервала и расстояния по пикам данной *огibaющей* с последующим уточнением результата путем дополнительного учета *фазы* сигнала. Предложенный метод позволил достичь требуемой достоверности и точности результата измерения в реальных условиях, где работающее буровое оборудование создает шум, присутствует ветер, происходит осыпание бурового шлама в скважину. Приведены результаты заключительных промышленных испытаний разработанного устройства в условиях карьеров Кривбасса с реализацией предложенных методов. На буровзрывных скважинах диаметром 250 мм и глубиной до 20 м среднеквадратическое отклонение показаний устройства от реальной глубины скважин составило 4,3 см.

Ключевые слова: скважина, расстояние, глубина, глубиномер, акустический, звук, синусоидальный, эхо, сигнал, импульс, время, микроконтроллер, алгоритм Герцеля, преобразование Фурье, измерение, точность.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Актуальность данной разработки обусловлена необходимостью экспрессного определения реальной глубины буровзрывных скважин в карьерах и шахтах при проведении взрывных работ в условиях карьеров и шахт. Измерение глубины ручным механическим методом - не оперативно и трудоемко, особенно при наклонных восходящих скважинах. Использование *акустического* метода позволяет получить результат измерения за несколько секунд, повысить эффективность горных работ и качество добываемого железорудного сырья [1-3].

Анализ исследований и публикаций. Общий принцип акустического метода заключается в излучении короткого звукового сигнала в устье скважины - и измерении интервала времени Δt , прошедшего от момента подачи до момента прихода отраженного от дна эхо-сигнала. Затем время Δt с учетом скорости распространения звука в воздухе ($v=331,5-343,1$ м/с при температуре 0-20 °С соответственно [4]) пересчитывается в пройденное расстояние S и искомую глубину скважины $L = S/2 = v \cdot \Delta t/2$. Основной вопрос при разработке данного устройства - как наибо-

лее точно и достоверно в автоматическом режиме определить интервал времени Δt между прямым и обратным сигналами. Анализ показал, что в основном используются следующие два подхода: 1) по переднему фронту сигнала («метод компаратора») и 2) по огибающей сигнала [1,2] (рис. 1).

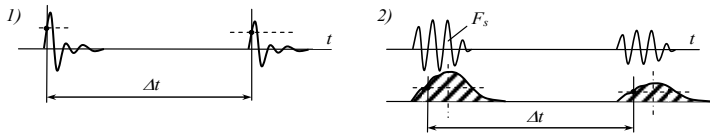


Рис. 1. Определение интервала времени между прямым и обратным сигналом: 1 – по переднему фронту; 2 – по огибающей сигнала

В первом случае принятый приемником сигнал подается на компаратор с некоторым заданным уровнем сравнения («среза»), и далее в качестве исходного параметра Δt принимают время от *переднего фронта* прямого – до *переднего фронта* отраженного сигнала. Во втором случае – аналогично, но в качестве сигнала для анализа используется не исходный сигнал с приемника, а его *огибающая*, предварительно получаемая с помощью *амплитудного детектора*. Исходный сигнал в этом случае представляет серию (пачку) из нескольких импульсов с некоторой несущей частотой сигнала F_s , значение которой выбирается от сотен герц до единиц килогерц в зависимости от диаметра скважин и других условий измерения.

Постановка задачи. Путем проведения исследований в лабораторных и промышленных условиях разработать принцип построения скважинного глубиномера, удовлетворяющего требованиям надежности, помехоустойчивости и точности измерений.

Изложение материала и результаты. Для проведения исследований разработано аппаратное и программное обеспечение экспериментального образца глубиномера, функциональная схема которого приведена на рис. 2. Устройство выполнено в виде USB-приставки к персональному компьютеру (ПК), и питается полностью от шины USB напряжением 5В. Основа аппаратной части нижнего уровня устройства – микроконтроллер фирмы Atmel ATmega128, который через COM-USB мост связан с ПК. Микроконтроллер по запросу выполняет формирование заданного по форме, частоте и длительности зондирующего сигнала и параллельно – регистрацию отраженного эхо-сигнала с помощью встроенного 10-битного аналого-цифрового преобразователя (ADC) с сохранением в оперативной памяти. Далее производится преобразование и передача полученной аудиограммы на верхний уровень (ПК), где выполняется ее анализ и определяется глубина.

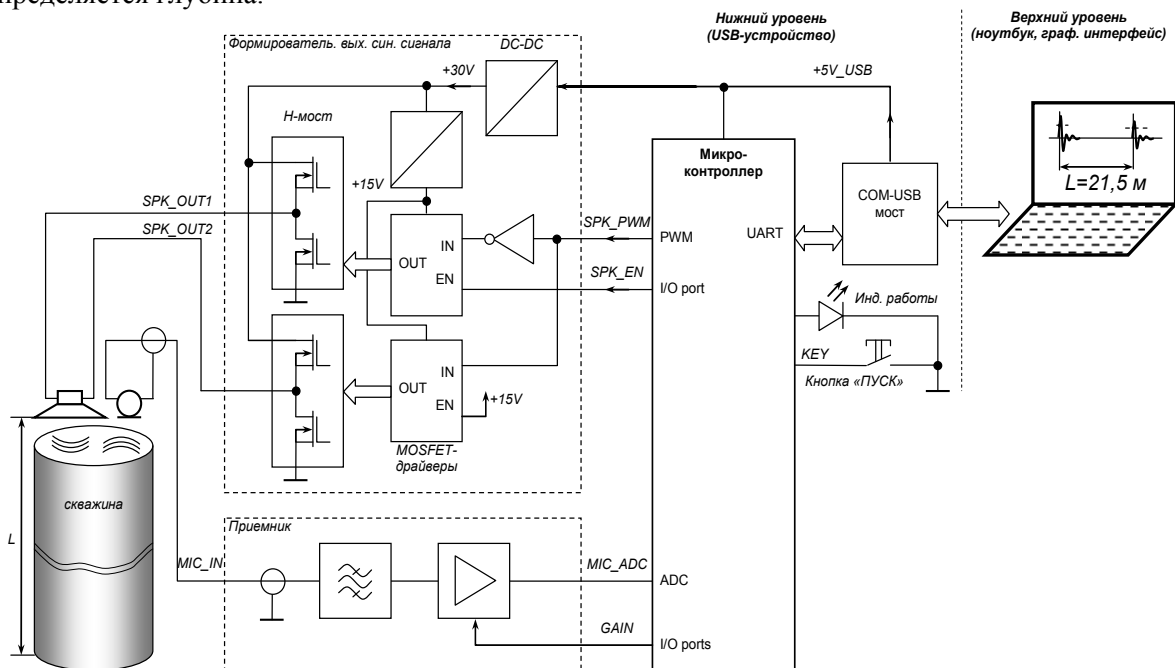


Рис. 2. Функциональная схема скважинного акустического глубиномера

Для формирования мощного выходного сигнала к выходу встроенного широтно-импульсный модулятора (PWM) микроконтроллера подключен блок, состоящий из двух драйверов нижнего и верхнего ключа, полный мост (H-мост) на 4 мощных полевых n-канальных

транзисторах (MOSFET) и повышающего преобразователя напряжения (DC-DC) из +5В в +30-40В. Частота ШИМ выбрана высокой (100 кГц), поэтому функцию сглаживающего дросселя выполняет индуктивность излучателя.

В качестве излучателя наилучшие результаты показала электродинамическая головка Pioneer TS-G1313I с активным сопротивлением обмотки 4 Ома, номинальной и максимальной мощностью 25 и 140 Вт соответственно, с оформлением в виде закрытой акустической системы (АС) объемом около 1,5 дм³ с синтепоновым заполнением части объема.

Для приема звукового сигнала использован электретный микрофон, расположенный рядом с излучателем. Схема приемника включает полосовой фильтр на входе с частотами среза около 100 и 2000 Гц и усилитель с переключаемым программно коэффициентом усиления.

Исследования проводились в лабораторных условиях на пластиковых трубах диаметром около 100 мм и длиной от 2 до 20 м и в реальных условиях на буровзрывных скважинах диаметром 250 мм и глубиной от 3 до 20 м в карьерах «Северный», «Карьер-2», «Карьер-3» Криворожского железорудного бассейна.

Во-первых следует отметить, что в самом начале разработки пришлось перейти от прямоугольной *формы* импульсов зондирующего сигнала – к синусоидальной. Прямоугольный сигнал приводил к паразитным резонансам: как самой АС, так и различных участков скважины и каверн, что сильно зашумляло и искажало звуковую картину, выделить полезный сигнал было достаточно сложно. Использование синусоидального сигнала, состоящего из двух периодов с плавно нарастающей и спадающей амплитудой позволило эффективно и без посторонних гармоник сначала «раскачать» диффузор головки АС до значительной амплитуды – а затем плавно и контролируемо свести амплитуду колебаний до нуля, не дав диффузору перейти в свободные колебания на резонансных частотах АС. В результате звуковая картина аудиограммы стала заметно чище (рис. 3).

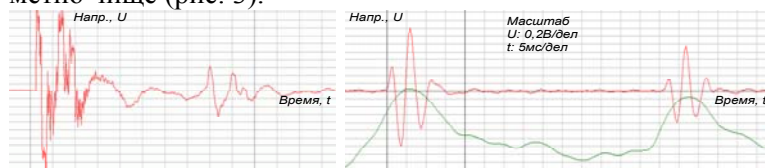


Рис. 3. Влияние формы сигнала: слева - прямоугольный сигнал, справа - синусоидальный. Реальные условия, глубина 10-15 м. $F_s = 200$ Гц

Далее рассмотрен вопрос выбора несущей *частоты* сигнала. Основным критерием являлось то, что звуковой сигнал должен хорошо распространяться вдоль скважины, огибать возможные неровности и искривления и давать как можно меньшее отражение от них. Для этого, как известно, длина волны должна быть больше габарита препятствия. В нашем случае препятствия - это неровности и каверны, которые могут быть размером до нескольких десятков сантиметров, а искривление скважины при глубине 10-20 м может достигать 0,5 м. Таким образом, для получения хорошего отклика именно со дна скважины для рассматриваемых условий теоретически длину волны целесообразно выбрать 0,5 м и более, т.е. несущая частота должна быть ниже $340/0,5 \approx 700$ Гц.

С другой стороны, для повышения точности частоту следует выбирать по возможности выше, что позволит получить меньшую дисперсию при определении положения прямого и отраженного сигналов при анализе аудиограмм, и соответственно меньшую ошибку.

С третьей стороны, сигнал выбранной частоты должен эффективно и точно (без резонансных явлений) воспроизводиться используемой АС. Для этого частота сигнала должна быть не ниже нижней резонансной частоты АС [5,6] и расположена вдали от других резонансных частот АС (в нашем случае частоты резонансов АС составляли 200 и 1000 Гц).

На рис. 4. показаны аудиограммы, полученные на частотах 200, 330, 500, 750 Гц в реальных условиях в одной из скважин, где видно, что с увеличением частоты амплитуда отраженного сигнала уменьшается. На частотах выше 1 кГц сигнал почти отсутствовал. По результатам испытаний ряда скважин построена обобщенная зависимость коэффициента отражения (прохождения) сигнала от частоты.

Коэффициент отражения рассчитывался как отношение амплитуд обратного и прямого сигналов. Зависимость описывается выражением $K = 10^{-7} F_s^2 - 0,0006 F_s + 0,57$, коэффициент детерминации $R^2=0,999$. Из графика видно, что для рассматриваемых условий следует использовать частоту не выше 500-600 Гц.

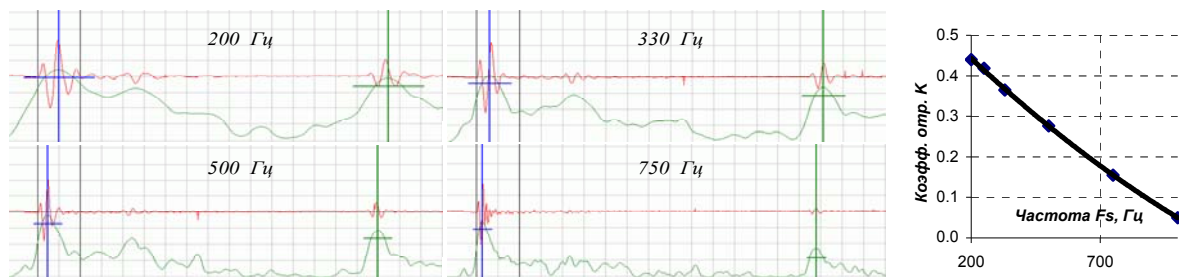


Рис. 4. Влияние значения несущей частоты F_s на прохождение зондирующего сигнала

После получения чистых аудиограмм с явно выраженным эхо-откликом решался основной вопрос определения *интервала времени* Δt между прямым и обратным сигналами. Опробованы несколько способов, рассмотрим их по порядку.

1. По переднему *фронту* прямого и отраженного сигналов. Наиболее простой подход. В нашем случае компаратор реализован программно. В лабораторных условиях данный подход показал достаточную точность измерений: при длине трубы 2–10 м абсолютная погрешность не превышала ± 5 см.

В литературе [1] указано, что в данном случае имеет место ошибка за счет т.н. «переформирования» переднего фронта импульса, который за счет многократного отражения и интерференции звуковой волны при прохождении дистанции может иметь различные амплитуду и наклон, что при некотором уровне «среза» сигнала компаратором приводит к неопределенности определения временного расположения сигнала и, соответственно, расстояния. И предложен метод с использованием двух компараторов с различным уровнем среза и последующей аппроксимацией момента начала импульса.

Но основная проблема, как показали промышленные испытания, уже не столько в дальнейшем повышении точности, сколько в обеспечении достоверности результата, полученного таким образом. Очевидно, что для получения корректного результата аудиограмма должна быть чистой, без помех. В реальных условиях работающее буровое оборудование создает шум, есть ветер, происходит осыпание бурового шлама в скважину, что иногда приводит к грубому промаху (рис. 6а). Поэтому необходимо увеличить мощность излучаемого сигнала, причем *именно первого* импульса, наличие других импульсов в пачке не имеет значения. Однако диффузор электродинамической головки сложно раскачать до максимальной амплитуды за один импульс, а если импульсов несколько – то первый импульс уже не будет максимальным в пачке, и возникает неопределенность: на каком же импульсе сработал компаратор (рис. 6б)?

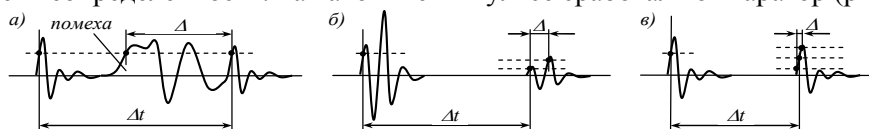


Рис. 6. Определение Δt по переднему фронту: а – влияние помех, б – ошибка при идентификации импульса в пачке, в – влияние уровня среза или амплитуды сигнала

При ошибке в один импульс абсолютная погрешность составляет один период несущей частоты F_s , например при $F_s=300$ Гц $\Delta=1/300 \cdot 1 \approx 3$ мс, что при определении глубины эквивалентно $3 \cdot 0,34/2 \approx 0,56$ м. Далее - необходим алгоритм автоподстройки уровня среза для отстройки от помех и выделения именно эхо-импульса, притом что различные скважины имеют различный коэффициент отражения (от 0,1 до 0,9). И последнее, самое незначительное - это влияние вариации уровня среза либо амплитуды эхо-импульса - на результат измерения (рис. 6в), о чем собственно, и говорилось в [1]. При этом абсолютная погрешность составляет четверть периода F_s : при $F_s=300$ Гц $\Delta=1/300 \cdot 1/4 \approx 0,8$ мс или $0,8 \cdot 0,34/2 \approx 0,14$ м.

2. Определение Δt по *максимумам* ($\max 1$, $\max 2$) прямого и обратного сигналов. Суть в том, что алгоритмически находятся максимальные отклонения сигнала аудиограммы от его среднего значения (нуля). Поиск ведется раздельно в двух зонах: прямого и обратного сигнала (рис. 7).

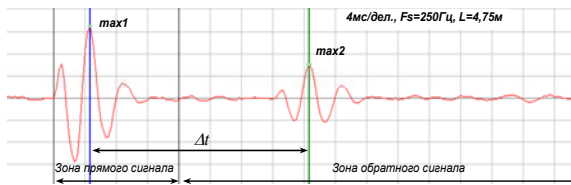


Рис. 7. Определение Δt по максимумам

Недостатки выявлены такие же, как и в первом случае: подверженность влиянию помех и вероятность ошибки при идентификации импульса. Здесь для надежной идентификации импульсы в пачке должны отчетливо отличаться по амплитуде, хотя и это не исключает ошибку при «переформировании» сигнала, когда форма прямого и обратного сигналов в точности уже не совпадает. Это можно видеть из рис. 7, где из двух отрицательных полувольт – в прямом сигнале – амплитуда первой больше, а в отраженном – амплитуда второй. Очевидно, что если бы точка $max1$ была найдена не на положительной полувольте, а на отрицательной, то алгоритм здесь выдал бы ошибку в один период F_s : $\Delta=1/250 \cdot 1 \approx 4$ мс или $4 \cdot 0,34/2 \approx 0,7$ м, что можно считать грубым промахом.

3. Определение Δt с использованием *огibaющей* сигнала. Сразу отметим, что данный подход в промышленных условиях показал значительно лучшие помехоустойчивость и достоверность обнаружения эхо-сигнала, чем предыдущие, хотя и меньшую точность. Повышение помехоустойчивости происходит благодаря использованию не одиночного импульса, а серии импульсов, за счет чего повышается мощность зондирующего сигнала, увеличивается отношение сигнал/шум и тем самым уменьшается вероятность регистрации помехи. Кроме того, для получения *огibaющей* вместо традиционного амплитудного детектирования сигнала (аппаратного – в приемнике, либо программного в микроконтроллере путем взятия модуля сигнала и дальнейшего сглаживания фильтром НЧ) - предложено использовать *алгоритм Герцеля*. Данный алгоритм [7,8,9] является частным случаем дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [10], применяется в цифровой обработке сигналов для детектирования DTMF-сигналов и позволяет в отличие от ДПФ эффективно вычислить только один (k -й) частотный компонент ДПФ без необходимости рассчитывать все компоненты. Общий алгоритм обработки полученной оцифрованной аудиограммы следующий:

А. *Расчет огibaющей*: в цикле «плавающим» окном проходим исходный массив $data$ значений оцифрованной аудиограммы, значения в окне обрабатываем по алгоритму Герцеля, по результату которого рассчитываем модуль комплексного числа, затем логарифмируем и записываем в другой параллельный массив $data2$ значений логарифмов амплитуд искомой частоты F_s в аудиограмме.

В. *Сглаживание огibaющей*: дважды (слева направо и справа налево) в цикле выполняем НЧ-фильтрацию массива $data2$ с помощью рекуррентной формулы

$$data2[i] = (data2[i-1] \cdot (N_{sm} - 1) + data2[i]) / N_{sm},$$

где N_{sm} - коэффициент сглаживания. Можно применить также «скользящее среднее».

С. *Поиск максимумов огibaющей* в зонах прямого и обратного сигналов.

Д. *Срез* каждого из двух пиков *огibaющей* на уровне -6дБ от его максимума, определение координат левой и правой точек среза, и расчет по ним координаты середины данного отрезка, т.е. медианы каждого пика. Таким образом, результатом работы алгоритма является расстояние (в отчетах частоты дискретизации F_d) между найденными медианами пиков прямого и отраженного сигналов. Пример результата работы алгоритма приведен на рис. 8.

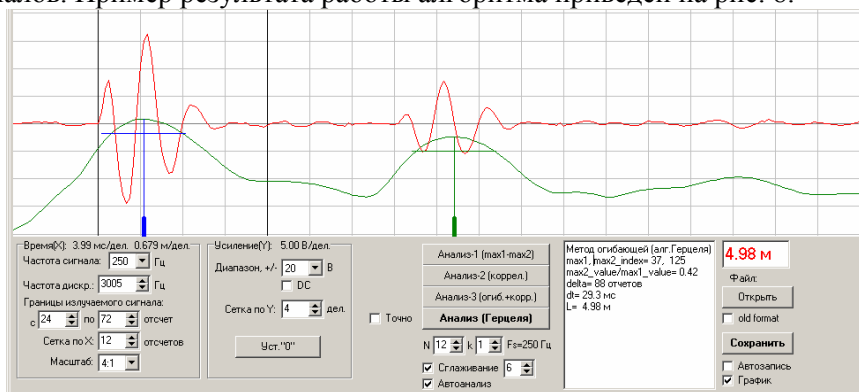


Рис. 8. Определение Δt по *огibaющей* (алгоритм Герцеля). Скважина 4,75 м

На графике видно основную аудиограмму, которая содержит прямой и обратный сигнал, а также амплитудную огибающую (в логарифмическом масштабе). Маркерами обозначены расчетные положения прямого и обратного сигналов. Очевидно, что огибающая пачки в несколько раз шире, исходного одиночного импульса, за счет чего растет дисперсия при определении Δt . Например, на графике специально приведен случай, где за счет «переформирования» обратного сигнала пик его огибающей сместился вправо относительно самого сигнала, вследствие чего алгоритм выдал результат с отклонением $\Delta = L_{расч} - L_{реал} = 4,98 - 4,75 = 0,23$ м. Однако, как показали испытания, в промышленных условиях следует использовать именно данный частотно-избирательный алгоритм выделения огибающей, что позволяет обеспечить помехозащищенность и достоверность результатов. Поэтому далее на этом принципе разработан окончательный подход, в котором синтезированы как помехоустойчивость, так и точность всех описанных выше способов:

4. Определение Δt по пикам огибающей с последующим их *уточнением по фазе* исходного сигнала. Данный способ отличается от предыдущего тем, что сначала (грубо) по пикам огибающей (алгоритм Герцеля) находятся положения прямого и обратного сигналов ($max1_index$, $max2_index$), и затем, уже отталкиваясь от них (более точно) находятся ближайшие совпадающие по фазе точки ($0-0^\circ$, либо $180-180^\circ$) перехода сигнала через ноль ($zero1_index$, $zero2_index$).

Производится это следующим образом (рис. 9). Вначале на расстоянии одного полупериода F_s от $max1_index$ (показано прямоугольником) находится точка ближайшего перехода через ноль $zero1_index$ (это может быть фаза 0° или 180° , в данном случае -0°) и запоминается расстояние между ними ($zero1_index - max1_index$). Затем точка $max2_index$ сдвигается в ту же сторону на величину этого расстояния (показано пунктиром). И далее от нее аналогично производится поиск аналогичного по фазе (в данном случае 0°) перехода через ноль - это будет $zero2_index$.

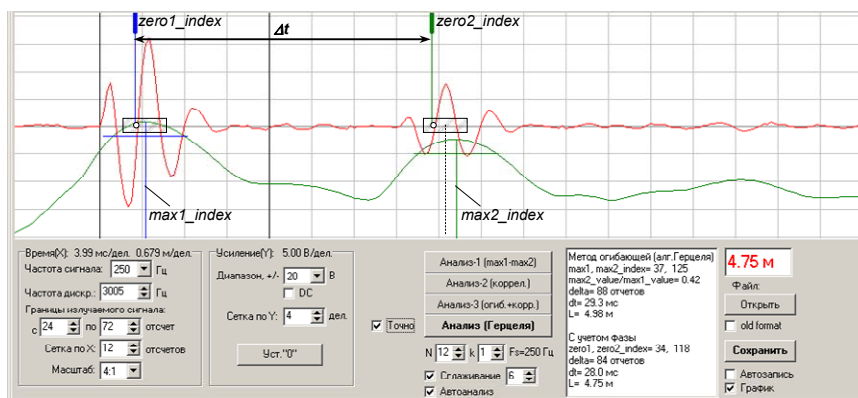


Рис. 9. Определение Δt по огибающей с последующим уточнением по фазе. Скважина 4,75 м

Таким образом, последовательно решаются две задачи: с помощью огибающей производится выделение прямого и отраженного сигналов в аудиограмме и достоверная идентификация соответствующей пары импульсов в исходном сигнале, а затем по их срезам на уровне нуля - точное определение временного интервала Δt .

При проведении последних промышленных испытаний устройство тестировалось с тремя описанными выше алгоритмами: по максимумам, по огибающей, и по огибающей с уточнением по фазе. Дополнительно варьировалась несущая частота. Реальная глубина скважины измерялась с помощью рулетки с грузом с абсолютной погрешностью около 5 см. Разница между показаниями глубиномера и реальной глубиной приведена в табл. 1.

По результатам видно, что первый алгоритм работает неустойчиво, дает грубые промахи (в табл. подчеркнуты), ошибаясь на один период несущей частоты. Если не учитывать промахи, то точность достаточна: среднеквадратическое отклонение (СКО) показаний устройства от реальных данных при этом составляет 3,8 см, а среднее отклонение - $(-0,2)$ см.

Второй алгоритм работает устойчиво, но точность хуже. СКО при этом составило 11,8 см, а среднее отклонение - 8,5 см, что говорит о том, что сам по себе данный подход дает некоторую систематическую ошибку, что следует учесть.

Абсолютная погрешность (в сантиметрах) глубиномера по трем методам и на различной частоте F_s

Номер скважины	Глубина, $L_{реал}$, м	1. Расчет по максимумам (max1, max2)								2. Расчет по огибающей (алг. Герцеля)								3. Расчет по огибающей с уточнением по фазе							
		$F_s=200$ Гц	223 Гц	250 Гц	286 Гц	334 Гц	400 Гц	500 Гц	667 Гц	200 Гц	223 Гц	250 Гц	286 Гц	334 Гц	400 Гц	500 Гц	667 Гц	200 Гц	223 Гц	250 Гц	286 Гц	334 Гц	400 Гц	500 Гц	667 Гц
c-01	4.85	-4	5	2	5	3	6	4	3	24	18	30	10	12	14	13	3	3	-1	2	5	3	3	7	9
c-02	4.95	-7	1	-3	0	2	4	0	1	14	8	8	10	14	11	11	10	-7	-5	-3	-5	2	0	0	4
c-03	4.85	-11	-8	-4	0	-5	-4	-4	-1	3	-1	7	10	16	6	4	-3	-11	-14	-4	-5	-5	-4	-1	1
c-04	8.35	-1	5	2	2	1	3	5	5	-8	-8	-3	7	9	7	11	1	-1	-1	2	2	1	3	5	5
c-05	4.80	-6	-3	-5	0	0	-3	1	-3	1	10	18	10	17	8	-2	-5	-6	-3	-5	0	0	1	1	2
c-06	3.95	1	0	-5	1	0	1	-2	0	15	0	7	1	0	1	7	0	-6	0	-5	1	0	1	1	0
c-07	5.00	-5	-4	-8	-5	1	-5	-2	-4	16	16	-8	15	5	-1	-5	-8	-5	-4	-2	-5	1	-1	-2	1
c-08	5.80	0	-1	-3	64	-3	0	-3	-3	7	12	8	14	18	18	6	-11	-7	-7	-3	-1	-3	0	0	-3
c-09	4.95	-7	-5	59	55	-7	-4	-3	-1	14	21	20	25	27	14	8	-1	-14	-5	-8	-5	-3	0	0	6
c-10	5.05	-4	1	61	59	-4	4	1	2	17	15	15	15	17	15	-2	-9	0	1	-7	0	0	1	4	8
c-11	6.45	-1	-2	0	-1	0	-1	0	2	13	4	6	8	9	2	3	2	-1	-2	0	4	0	2	0	0
c-12	7.15	-1	-2	-2	2	-1	-1	3	2	13	17	9	2	-1	-1	1	0	-8	-2	-2	2	-1	-1	1	2
c-13	11.15	-5	-1	-1	-1	5	6	5	7	9	12	11	9	14	13	11	14	-5	-1	-1	4	5	2	5	7
c-14	16.55	0	0	-3	3	4	3	3	4	14	6	8	3	0	7	5	-4	0	0	3	3	4	7	5	6
c-15	11.00	3	1	3	4	8	10	9	44	10	14	20	14	16	21	20	16	3	1	3	4	3	7	9	7

И наконец, третий вариант позволяет достичь одновременно и устойчивого и точного результата. Грубых промахов нет. СКО составляет 4,3 см, среднее - (-0,1) см.

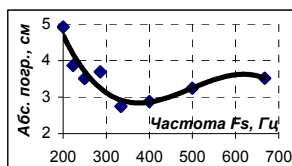


Рис. 10. Зависимость погрешности измерения от несущей частоты сигнала

И последнее, если рассчитать для третьего варианта СКО отдельно для каждой протестированной несущей частоты сигнала, то получится интересная картина, представленная на рис. 10. Зависимость описывается аналитическим выражением: $\sigma = 10^{-7}F_s^3 + 0,0002F_s^2 - 0,0775F_s + 14,455$, коэффициент детерминации $R^2=0,87$. Зависимость имеет минимум в области 300-500 Гц, что еще раз подтверждает целесообразность выбора данного частотного диапазона для работы в существующих условиях.

Выводы и направление для дальнейших исследований. В результате исследований установлено, что в реальных условиях необходимо использовать исключительно *синусоидальный сигнал* - во избежание зашумления скважины и устойчивого выделения полезного эхо-сигнала.

Установлен оптимальный диапазон *несущей частоты* сигнала, составляющий 300-500 Гц. С повышением частоты точность измерений возрастает, однако снижается достоверность за счет затухания амплитуды отраженного эхо-сигнала и влияния помех. На частотах более 1 кГц полезный сигнал практически полностью отсутствует.

Разработан метод определения расстояния по пикам огибающей, построенной с применением *алгоритма Герцеля*, с последующим уточнением положения пиков по фазе исходного сигнала, который позволяет достичь требуемой надежности и точности измерения в реальных условиях. При проведении промышленных испытаний в карьере на буровзрывных скважинах диаметром 250 мм и глубиной до 20 м при постоянной известной температуре СКО показаний устройства от реальной глубины скважин составило 4,3 см.

Список литературы

1. Солдатов А.И., Чиглинцева Ю.В. Теоретическое и экспериментальное исследование акустического тракта скважинного глубиномера / А.И. Солдатов, Ю.В. Чиглинцева // Известия Томского политехнического университета, 2009. – Вып. 4.
2. Шишаев В.А., Белоглазов М.И. Акустический глубиномер (АГМ) / Кольский Научный Центр Российской Академии Наук. – Режим доступа: http://www.kolasc.net.ru/russian/innovation_ksc/5.3.pdf.
3. Азарян А.А., Азарян В.А., Лисовой Г.Н. Состояние проблемы контроля качества при добыче и переработке железорудного сырья / А.А. Азарян, В.А. Азарян, Г.Н. Лисовой // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. пр. – Кривий Ріг, 2012. – Вип. 95.
4. Скорость звука в воздухе при различной температуре. От -150 до 1000 °С. [Электронный ресурс] / Инженерный справочник DPVA.info. – Режим доступа: <http://www.dpva.info/guide/guidephysics/sound/soundspeedairtemperature>.
5. Закрытый ящик: полвека истории и большое будущее [акустические системы закрытого типа] [Электронный ресурс] / Журнал АвтоЗвук - avtozvuk.com. – Режим доступа: <http://www.avtozvuk.com/az/2006/02/020-029.htm>.

6. Закрытый ящик. Как рассчитать и изготовить звуковые колонки [Электронный ресурс] / ptc73 | Акустические системы. – Режим доступа: http://www.ptc73.ru/ao_close.shtml.

7. **Оппенгейм А.В., Шафер Р.В.** Цифровая обработка сигналов [Пер. с англ, под ред. С. Я. Шаца.] / **А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер** — М.: Связь, 1979. — 416 с.

8. Алгоритм Герцеля (Goertzel algorithm). [Электронный ресурс] / dsplib.ru Теория и практика цифровой обработки сигналов. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/goertzel/goertzel.html>.

9. Динамический пересчет спектральных отсчетов на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля [Электронный ресурс] / dsplib.ru Теория и практика цифровой обработки сигналов. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>.

10. Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) [Электронный ресурс] / dsplib.ru Теория и практика цифровой обработки сигналов. – Режим доступа: <http://www.dsplib.ru/content/dft/dft.html>.

Рукопись поступила в редакцию 09.04.16

УДК 621.928.3-52:622.7

А. В. МИКОЛЕНКО, магистрант, Криворізький національний університет

АНАЛІЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ГІДРОЦИКЛОНОМ НА ЗБАГАЧУВАЛЬНІЙ ФАБРИЦІ

На сьогодні промисловість орієнтується, перш за все на продуктивність і кількість продукції, що випускається. Потрібно випускати все більше і більше кінцевого продукту, щоб покрити витрати на його виробництво і при цьому отримувати прибуток. Але якість виробленого продукту має не менш важливе значення, ніж його кількість. Випускаючи масштабну партію товару, але з низькою якістю, можна не витримати конкуренції на ринку, тому орієнтація лише на продуктивність найчастіше призводить до збитків. Отже, автоматичні системи керування повинні забезпечувати високу якість продукту без втрат продуктивності.

Розглянуто актуальні питання ефективності процесу класифікації залізородної пульпи в комплексі технологічний зумпф-гідроциклон. Обґрунтовано питання важливості якісного процесу класифікації вхідної сировини в гідроциклоні при зміні гранулометричного складу залізородної пульпи в процесі роботи гідроциклону. Розглянуто існуючі системи автоматичного керування гідроциклоном в комплексі з технологічним зумпфом, та способи компенсації збурень в системах автоматичного керування. На основі розглянутої інформації виділено основні переваги та недоліки представлених систем автоматичного керування. Виявлено, що способи та методи керування процесом класифікації залізородної пульпи вивчені не повною мірою та знаходяться на стадії дослідження. Таким чином, вказано напрямки подальших досліджень - розвиток автоматичних систем керування гідроциклоном в умовах зміни гранулометричного складу пульпи.

Ключові слова: гідроциклон, автоматична система керування, піскова насадка, густина, живлення гідроциклону.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Метою класифікації пульпи є отримання бажаних за крупністю зерен в зливні та пісках гідроциклону. Якість подальшого збагачення руди має велику залежність від гранулометричного складу залізородної сировини в зливні гідроциклону. Оскільки гранулометричний склад пульпи не лінійно змінюється протягом процесу сепарації (рис. 1), системи автоматичного керування процесом класифікації залізородної сировини повинні бути спроможні компенсувати збурення що спричинені цими змінами [1,2].

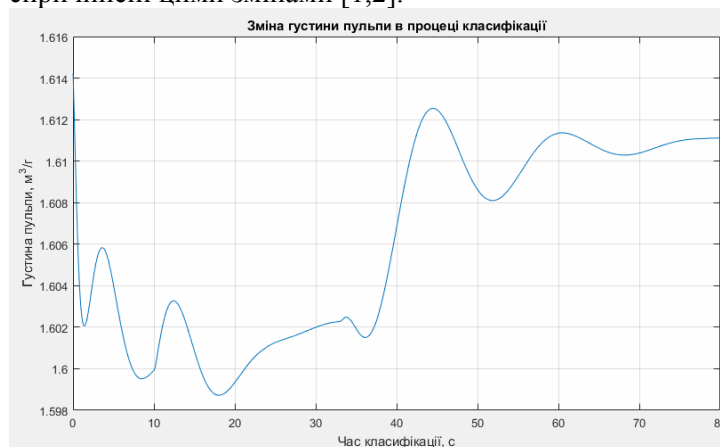


Рис. 1. Зміна щільності пульпи в процесі класифікації

Відомим способом регулювання є використання лінійних PID-регуляторів. Але при їх застосуванні залишається проблема синтезу оптимального керуючого впливу, так як коефіцієнти регулятора розраховуються на підставі відомих даних про об'єкт керування, що приводить до відхилення часу перехідного процесу та перерегулювання від бажаних значень при впливі невідомих збурюючих факторів[3-5].