

Базулин А.Е. Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4. Часть II. Погрешности измерений // Контроль. Диагностика. – №3. – 2010. – сс. 8-20.
УДК 534.08

Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4. Часть II. Погрешности измерения основных параметров.

А.Е. Базулин

ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+»

123458, г. Москва, ул. Твардовского д. 8, Технопарк «Строгино»

E-mail: android@echoplus.ru

В статье исследованы погрешности измерения основных параметров пьезоэлектрических преобразователей системой калибровки АВГУР 5.4. Исследованы некоторые функции влияния. Экспериментально определена реальная погрешность измерения при испытаниях системы с оценкой прецизионности в терминах повторяемости и воспроизводимости. Показана приемлемость погрешности измерений основных параметров пьезоэлектрических преобразователей в соответствии с требованиями ГОСТ 23702-90. Показана достаточность нормируемых метрологических характеристик системы для обеспечения единства измерений.

Ключевые слова:

калибровка ПЭП, метрология, повторяемость, воспроизводимость

Введение

Важнейшей характеристикой любой измерительной системы является точность измерения значений физических величин, определяемая сравнением результата измерения с истинным или действительным (условно истинным) значением. Как известно [1] погрешности могут быть разделены на инструментальные погрешности, связанные с параметрами аппаратной части, такими как эффекты дискретизации аналоговых сигналов, погрешность усилителей сигналов и методические погрешности, определяемые методикой проведения измерений и субъективным фактором. Отдельно рассматриваются систематическая и случайная составляющие погрешности, основная и дополнительную погрешности средств измерений, считая, что дополнительная погрешность связана с функциями влияния влияющих величин относительно своих нормальных значений.

Терминология в области обеспечения точности методов и средств измерений в соответствии с международными стандартами приведена в стандартах серии ГОСТ Р ИСО 5725 [2, 3]. Показателем правильности, как степени близости измеренного значения к его истинному значению, обычно является значение систематической погрешности. В свою очередь прецизионность – степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных установленных условиях. Эта характеристика зависит только от случайных факторов и не связана с истинным или условно истинным значением измеряемой

величины. Мера прецизионности обычно вычисляется как стандартное (среднеквадратическое) отклонение результатов измерений, выполненных в определенных условиях. Экстремальные показатели прецизионности – повторяемость (repeatability) и воспроизводимость (reproducibility) регламентируют и в отечественных нормативных документах, в том числе в государственных стандартах на методы контроля (испытаний, измерений, анализа) [4].

Связи метрологических характеристик средств измерений и погрешности средств измерений посвящен ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» [5] и сопровождающие его методические пояснения [6]. В данном документе упомянута задача рационального сокращения числа нормируемых метрологических характеристик и уменьшения требований к метрологическим характеристикам во избежание повышенных затрат на метрологическое обеспечение измерений. В настоящей статье обосновывается достаточность метрологических характеристик системы, нормируемых по техническим условиям.

Предельные допустимые погрешности измерения параметров ПЭП приведены в ГОСТ 23702-90 «Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний» [7]. В том же стандарте приведено следующее примечание: «Допускается применять методы и средства измерений параметров ПЭП, отличные от указанных в стандарте, если это не увеличивает погрешность измерений».

Система калибровки пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4 предназначена для определения параметров контактных и иммерсионных пьезоэлектрических преобразователей. Описание системы и методики измерения параметров приведены в первой части настоящей работы [8]. Измерение параметров ПЭП в системе АВГУР 5.4 выполняется как прямым, так и косвенным (расчетом по другим параметрам) образом. Рассмотрим более подробно все типы погрешности определения параметров преобразователей и взаимное влияние погрешностей при определении основных параметров ПЭП. На Рис. 1 показана взаимосвязь некоторых метрологических характеристик системы и основных параметров ПЭП, стрелками показано влияние погрешности задания или измерения одних параметров на расчет других. На темном фоне показаны первичные погрешности, нормируемые техническими условиями на систему и некоторые функции влияния. Можно видеть, что в конце цепочки находятся такие параметры как АРД-диаграммы, мертвая зона и эффективные размеры пьезопластины, то есть погрешности расчета этих параметров суммируют погрешности измерения всех величин, от которых зависят.

Метрологические характеристики системы АВГУР 5.4 таковы:

- Длительность зондирующего сигнала ударного типа на активной нагрузке 50 Ом и максимальной амплитуде не превышает 100 нс, при этом длительность переднего фронта не должна превышать 10 нс.
- Максимальное значение эффективного выходного импеданса генератора зондирующего сигнала, измеренное при максимальной амплитуде, не превышает 5 Ом.
- Максимальное измеряемое Системой значение амплитуды входного сигнала (при минимальном значении коэффициента усиления) составляет $(10 \pm 0,1)$ В.

- Предел абсолютной погрешности установки коэффициента усиления приемного тракта составляет не более чем 0,5 дБ.
- Полоса пропускания приемного тракта Системы по уровню -3 дБ не уже, чем $0,5 \dots 15$ МГц при неравномерности коэффициента передачи в полосе пропускания не более ± 1 дБ.
- Эквивалентное среднеквадратичное значение напряжения шумов, приведенное ко входу усилителя Системы в полной полосе пропускания не превышает 80 мкВ.
- Минимальный шаг перемещения ПЭП должен составлять по координатам X и Y не более 0,02 мм. Предел допускаемой абсолютной погрешности перемещения ПЭП по координатам X и Y на апертуре 200 мм не превышает 1 мм.

Оценка инструментальных погрешностей и функций влияния

Измерение параметров сигнала

Случайная инструментальная погрешность измерения временных интервалов имеет величину порядка интервала дискретизации (± 25 нс) в отсутствие аддитивного шума. Более высокая точность измерения временных интервалов не требуется, если не ставится, например, задача прецизионного измерения скорости звука или толщины.

Инструментальная точность измерения амплитудных значений сигналов определяется частотой дискретизации и разрядностью используемого АЦП. В системе использован 12 разрядный АЦП и, если считать, что амплитуда теплового шума «съедает» в среднем порядка 2 отсчётов, то эффективно действуют 10 разрядов АЦП. Максимальная ошибка измерения амплитуды из-за погрешностей квантования [9] составит $\delta A_{\max}^q = 1/2^{10} \approx 0,1\%$, а среднеквадратическая ошибка квантования составит $S^q = 1/\sqrt{12} \cdot \delta A_{\max}^q \approx 0,03\%$.

Предельная относительная погрешность δA_{\max} измерений амплитуды синусоидального экосигнала в зависимости от его частоты f и дискретизации АЦП Δf достигается при сдвиге сетки измерения относительно максимума гармонического сигнала на величину равную половине частоты дискретизации. При вычислении инструментальной погрешности измерения использованы следующие положения. Для синусоидального процесса с частотой ω , заданного выражением $x(t) = \sin \omega t$ оценка текущей кривизны имеет вид $x''(t) = -\omega^2 \sin \omega t$ и её максимальное значение составляет

$$\max x''(t) = \omega^2 = (2\pi f)^2.$$

Максимальная погрешность при дискретизации и аппроксимации функции $x(t)$ параболой в пределах интервала дискретизации составляет:

$$\delta A = \omega^2 \frac{\Delta t^2}{8} = \frac{\pi f \Delta t}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi f}{\Delta f} \right)^2$$

При используемой частоте дискретизации 40 МГц для сигнала с эффективной частотой 10 МГц максимальная погрешность измерения амплитуды составит 30%, т.е. порядка 2 дБ, а среднеквадратическая ошибка 8,9% или менее 1 дБ. При повышении частоты дискретизации до 160 МГц (например, при использовании интерполяции) максимальная погрешность составит 1,93%, а среднеквадратическая ошибка всего 0,56% для сигнала с частотой 10 МГц и, соответственно 0,48 % и 0,14 % для сигнала с частотой 5 МГц.

В системе калибровки АВГУР 5.4 реализовано восстановление исходного сигнала с интерполяцией до частоты дискретизации 160 МГц. Предложено решение, состоящее в интерполяции эхосигнала путем прямого преобразования Фурье, увеличения длины спектра в четыре раза и обратного преобразования Фурье на сетку в четыре раза более точную, чем исходная. Данная интерполяция возможна в силу применимости теоремы Котельникова-Шеннона [10] о возможности восстановления непрерывной функции с максимальной частотой спектра F_{\max} по дискретным отсчетам с шагом не более $\Delta t = 1/2F_{\max}$. Среди прочих способов интерполяции, выбранный представляется наиболее простым в реализации.

Примем предельную погрешность измерения амплитуды при частоте сигнала 10 МГц и использовании интерполяции $\delta A_{\max}^d = 1,9\%$. Таким образом, предел погрешности измерения амплитуды, обусловленный дискретизацией и квантованием сигнала составит:

$$\delta A_{\max} = \delta A_{\max}^d + \delta A_{\max}^q \approx 2 \%$$

На Рис. 2 показан пример расчета – сплошными линиями показаны исходные эхосигналы с центральной частотой 10 МГц, смоделированные с частотой дискретизации 40 МГц при сдвиге сеток в половину периода частоты дискретизации (наихудший вариант для измерения амплитуды сигнала, наибольшая ошибка составляет 30%) и результат интерполяции на сетку с частотой дискретизации 80 МГц. Ошибка после интерполяции уменьшена до нуля (в силу выбора сетки интерполяции в два раза чаще чем исходная).

Расчеты, приведенные выше, служили для анализа погрешности измерения амплитуд радиосигнала, при этом погрешность измерения модуля огибающей эхосигнала составляет величину на порядок меньшую (на Рис. 2, справа).

Функция влияния скорости звука в стандартном образце

Наибольшая возможная погрешность скорость распространения продольной волны при температуре $(20 \pm 5)^\circ$ в стандартных образцах СО-2 и СО-3, которую необходимо принимать при отсутствии паспорта на образец составит 1,5%. Действительно, в соответствии с ГОСТ 14782-86 [11] скорость звука должна составлять по паспорту (5900 ± 59) м/с, то есть $\pm 1\%$ измеренную с погрешностью 0,5%. Скорость звука поперечной волны вовсе не паспортизируется. В соответствии с ГОСТ 18576-96 [12] скорость звука в образце СО-3Р должна составлять (5900 ± 118) м/с, то есть максимальная погрешность задания скорости звука составит 2-2,5%.

Вместе с тем погрешность измерения угла $\delta\alpha$ ввода зависит от погрешности задания скорости звука δc в стандартном образце и выражается функцией влияния, полученной из закона Снеллиуса:

$$\delta\alpha = \alpha - \arcsin\left(\sin\alpha \frac{c + \delta c}{c}\right)$$

На Рис. 3 показаны графики, отображающие функции влияния неизвестной скорости звука на угол ввода. Можно видеть, что правильное задание скорости звука в образце существенно влияет на систематическую погрешность определения угла ввода ПЭП, и для угла ввода 70° и погрешности 1,5% угол ввода будет определен с ошибкой 2° . Кроме того, неверно будет определено время задержки в призме, ширина диаграммы направленности, а значит и эффективные размеры пьезопластины.

Были проведены эксперименты с ПЭП типа П-121-2.5-70-Р. Угол ввода при задании поперечной скорости звука в СО-3 3,22 мм/мкс составил $68,2^\circ$ (с усреднением по пяти измерениям), и $67,7^\circ$ при задании поперечной скорости звука 3,20 мм/мкс. Разница в заданной скорости звука составила около 0,6%, что повлекло систематическую ошибку измерения угла ввода в $0,5^\circ$. При этом угол ввода, определенный вручную на этом же образце составил в среднем $68,0^\circ$.

По указанной причине образцы, используемые при калибровке ПЭП, должны быть снабжены паспортами, в которых приведены значения скоростей звука с точностью не хуже $\pm 0,5\%$ или же в программное обеспечение системы калибровки должна быть встроена функция измерения скоростей звука в стандартных образцах.

Функция влияния температуры

Влияние изменения температуры окружающей среды на результат измерения угла ввода и абсолютную чувствительность ПЭП зависит от свойств материала призмы и рассмотрено, например в [13]. Отметим, что температурный диапазон, в котором должна эксплуатироваться система АВГУР 5.4, в соответствии с техническими условиями, составляет $(10-35)^\circ\text{C}$. В случае необходимости в программное обеспечение системы калибровки может быть включен модуль, выполняющий пересчет диаграммы направленности для изменившейся температуры окружающей среды по заданным скоростям звука в объекте контроля и температурным коэффициентам для материала призмы.

Функция влияния затухания в образце

Затухание в образце искажает экспериментально определяемую по отверстию бокового сверления диаграмму направленности, однако для мелкозернистой стали, из которой изготавливаются образцы СО-2, СО-3 и глубин менее 60 мм затуханием обычно пренебрегают [13]. Программное обеспечение системы позволяет выполнить расчет диаграммы направленности с учётом или без учета затухания, указанного в параметрах материала. При определении

эффективной частоты иммерсионных ПЭП европейский стандарт EN 12668-2 [14] требует выполнять коррекцию затухания в воде, которая существенна для частот выше 5 МГц.

Функция влияния неизвестной скорости звука в призме

Погрешность задания скорости звука в призме влияет на рассчитанное значение угла наклона призмы, координат и эффективного размера пьезопластины, последняя в свою очередь используется для расчета площади пьезоэлемента при расчете АРД-диаграмм. Данная функция влияния в настоящей статье подробно не анализируется, однако отметим, что ошибка в задании скорости звука в призме 5% приводит к погрешности расчета эффективного размера пластины ПЭП поперечной пластины около 5% и для ПЭП продольной волны 1%.

Функция влияния погрешности измерения координаты ПЭП

В технических условиях на систему нормируется погрешность измерения координаты ПЭП в пределах ± 1 мм при перемещении на апертуре 200 мм, то есть относительная погрешность соблюдения элементарного шага перемещения у конкретного сканирующего устройства должна составлять в пределе $\delta_x = \pm 0,5\%$. Помимо вклада в погрешность измерения стрелы, данная функция влияния также существенна и для измерения диаграммы направленности. Рассмотрим систематическую погрешность параметров диаграммы направленности по пространственному спектру голограмм. Проекция волнового числа на ось x и его «возмущение» запишутся как [8]

$$k_x = 2\pi \frac{1}{A_x}, \quad \tilde{k}_x = 2\pi \frac{1}{(1 + \delta_x)A_x},$$

где A_x – номинально заданная апертура перемещения ПЭП. Относительная погрешность определения расстояния между отсчетами в спектре составит ту же величину $\delta k_x = \delta_x$. Погрешность измерения параметров диаграммы направленности определяется выражением:

$$\Delta\alpha = \alpha - \arcsin((1 + \delta_x) \sin \alpha)$$

На Рис. 4 показана функция влияния погрешности определения элементарного шага сканера на значение угла ввода при $\delta_x = \pm 0,5\%$. Можно видеть, что при указанном в технических условиях значении предельной погрешности измерения координат возможна значительная ошибка в определении угла ввода ($0,8^\circ$ для угла ввода 70°). Отметим, что в действительности применяемые в сканирующих устройствах шарико-винтовые пары гарантируют на порядок меньшую погрешность $\pm(0,05-0,1)\%$, что подтверждено экспериментально, и данная функция влияния может не рассматриваться.

Точность определения частоты

Спектральная характеристика рассчитывается с применением быстрого преобразования Фурье с длиной $N = 4096$, что при интервале дискретизации 0,025 мкс обеспечивает шаг при расчете спектра 0,01 МГц:

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t \cdot N} = \frac{1}{0,025 \cdot 4096} = 0,01$$

Таким образом, теоретически инструментальная случайная погрешность измерения частоты составляет $\pm 0,01$ МГц.

На спектральную характеристику в целом оказывает влияние отклонения от нормального угла падения на цилиндрическую поверхность при случайном азимутальном повороте ПЭП. Из-за более широкой диаграммы направленности на низких частотах энергия спектра эхосигнала смещается в сторону низких частот. Аналитические выражения для вычисления изменения спектра эхосигнала при отклонении угла падения на отражатель от акустической оси ПЭП приведены, например в [15]. Данный эффект в большей степени сказывается в пределах ближней зоны ПЭП, что и объясняет требование о нахождении отражателя в дальней зоне при определении импульсной характеристики ПЭП. Необходимо отметить, что применение полусферического образца для регистрации импульсной и спектральной характеристики освобождает методику калибровки от данной составляющей погрешности, однако как показали экспериментальные исследования, случайная погрешность измерения частоты на образце СО-3 не превосходит 0,02 МГц.

Погрешность при измерении абсолютной чувствительности

Систематическая инструментальная погрешность измерения абсолютной чувствительности при серийном производстве систем складывается из погрешностей характеристик составляющих элементов приемо-передающего тракта: максимальное измеряемое значение амплитуды входного сигнала (при минимальном значении коэффициента усиления) должно составлять $(10 \pm 1\%)$, импеданса выхода генератора, демпфирующего сопротивления ($\pm 1\%$) и других. При экспериментальном исследовании повторяемости и воспроизводимости было показано, что систематическая погрешность для конкретной системы незначительна в сравнении со случайной погрешностью измерений амплитуд эхосигналов, и при условии выполнения приемки систем в соответствии с техническими условиями систематической погрешностью можно пренебречь.

Отметим, что требование к значению амплитуды зондирующего импульса в пределах $\pm 10\%$ от номинала не существенно для измерения коэффициента двойного преобразования, а может быть существенно лишь для измерения абсолютных значений уровня шума и амплитуды отражателя.

Случайная инструментальная погрешность измерения амплитуды эхосигнала определяется разрядностью АЦП, частотой дискретизации, точностью установки коэффициента усиления. Последняя величина нормируется техническими условиями и составляет в пределе $\pm 0,5$ дБ или 6%. Погрешности дискретизации и квантования, как было показано выше, составляют не более 2%. Итак, суммарная предельная инструментальная погрешность измерения размаха амплитуд зондирующего импульса или эхосигнала не превышает $\pm 8\%$.

Методическая погрешность определяется субъективным фактором при ручной ориентации акустической оси контактного ПЭП для определения эхосигнала с максимальной амплитудой и

для обеспечения надлежащего качества акустического контакта¹. При условии, что оператор может отследить изменение огибающей эхосигнала на экране на величину не менее чем 5%, методическая составляющая погрешности принимается равной 5%. Суммарная инструментальная и методическая погрешность измерения амплитуды размаха эхосигнала составит 13%.

Погрешность автоматического измерения амплитуды зондирующего импульса имеет только инструментальную составляющую, но, поскольку при измерении не используется усилитель, остается погрешность дискретизации и квантования не превышающая 2%, таким образом, предел инструментальной и методической погрешности измерения импульсного коэффициента двойного преобразования составит $\pm 15\%$ или $\pm 1,2$ дБ.

Систематическая методическая погрешность измерения амплитуды может определяться также типом используемой контактной жидкости. Погрешность измерения амплитуды эхосигнала зависит и от режима регистрации эхосигнала – статического (при фиксации ПЭП в одном положении) и динамического (в процессе перемещении ПЭП). В динамическом режиме возрастает случайная погрешность, связанная с качеством акустического контакта и возможно появление систематической погрешности. Рекомендуется при калибровке использовать тот тип регистрации, тип и способ подачи контактной жидкости, при которых ПЭП будет впоследствии эксплуатироваться.

В монографии [16] отмечено, что при помещении ПЭП в раму с двумя взаимно перпендикулярными осями и обеспечении постоянного усилия на рамы 0,1-0,6 Н, выполнении притирания ПЭП при нескольких перемещениях, изменения амплитуды из-за акустического контакта при перемещении ПЭП составят не более чем 0,2 дБ. Усилие прижима сходной конструкции, реализованное в системе АВГУР 5.4 составляет 10 Н, но при этом погрешность изменения амплитуды, вызванная вариацией акустического контакта составляет более 0,5 дБ.

Точность определения стрелы

Инструментальная погрешность при условии конструктивно заданного положения стандартного образца относительно передней грани ПЭП определяется точностью срабатывания датчика Холла при достижении концевое положение кареткой (не более 0,01 мм) и люфтом механизма перемещения и прижима ПЭП.

В случае ручной привязки методическая составляющая погрешности определяется главным образом точностью задания привязки, которая при использовании линейки будет составлять величину порядка $\pm 0,5$ мм.

Специальное исследование погрешности гистерезиса при измерении стрелы не проводилось, однако рекомендуется проводить измерения при сканировании только в одном направлении во избежание влияния погрешности гистерезиса.

¹ Отметим, что полусферический образец СОП-СФ-55 позволяет исключить случайную методическую погрешность, связанную с точностью установки акустической оси контактного ПЭП и остается лишь требования на обеспечение качества акустического контакта при выполнении двумерного сканирования по поверхности образца.

Точность определения времени задержки в призме

Систематическая погрешность расчета времени задержки в призме определяется погрешностью задания скорости звука в образце и точностью соблюдения радиуса образца при изготовлении, поскольку определяется формулой

$$\tau_{np} = \frac{R}{c} - \frac{t_{\max}}{2}, \quad (1.1)$$

где R – радиус цилиндрической или полусферической поверхности образца (для СО-3 номинально 55 мм), c – скорость звука в образце, t_{\max} – время задержки по максимуму огибающей эхосигнала, имеющего максимальную амплитуду.

При допуске $\pm 0,1$ мм на линейные размеры образцов и погрешности задании скорости звука в образце с точностью 1%, то есть $3,22 \pm 0,032$ мм/мкс систематическая погрешность $\delta\tau_{np}$ составит $\pm 0,18$ мкс, при скорости звука $5,92 \pm 0,059$ мм/мкс погрешность $\delta\tau_{np}$ составит $\pm 0,1$ мкс. При этом основной вклад вносит погрешность задания скорости звука в объекте, поэтому ее необходимо знать с точностью 0,5%, тогда систематическая погрешность $\delta\tau_{np}$ составит $\pm 0,09$ мкс для поперечных волн и $\pm 0,05$ мкс для продольных волн.

Случайная составляющая погрешности определяется погрешностью, связанной с поиском эхосигнала, имеющего максимальную амплитуду и с поиском максимума огибающей выбранного эхосигнала. На Рис. 5 показан характерный вид огибающей В-скана, полученного от цилиндрической поверхности СО-3, а на Рис. 6 функция распределения измеренного времени задержки в призме при многократном повторении измерений. Область, определяющая погрешность измерения времени прихода эхосигнала приблизительно показана прямоугольником. Наклон главной оси вписанного эллипса приблизительно соответствует углу максимума диаграммы направленности. Погрешность измерения времени прихода определяется пологостью функции нарастания амплитуды и фронтальный размер δr по уровню 90% от максимума составляет в зависимости от ширины пластины ПЭП не менее $\pm 0,75$ мм с распределением, близким к нормальному.

При этом погрешность определения времени прихода, определяемая наклоном эллипса составит:

$$\delta t_{\max} = \frac{\delta r \sin \alpha}{c}$$

С увеличением угла ввода погрешность увеличивается, а для продольной волны погрешность составляет приблизительно 0,55 от погрешности для поперечной волны. В соответствии с формулой (1.1) случайная погрешность измерения времени задержки в призме составляет половину от погрешности определения времени прихода, $\delta\tau_{np} = \delta t_{\max} / 2$. Для ПЭП, П-121-2,5-50 (Рис. 6) предельная погрешность получилась равной 0,06 мкс.

Экспериментальные результаты измерения параметров ПЭП

В рамках ведомственных испытаний системы АВГУР 5.4 был выполнен ряд экспериментов с целью оценки правильности и точности измерений параметров ПЭП. Далее приведены результаты экспериментальных исследований измерения угла ввода ПЭП по методике, реализованной в системе и по стандартной ручной методике. Для экспериментов были отобраны три ПЭП с углом ввода 65° по два ПЭП с углами ввода 40° , 42° , 58° , 70° и по одному ПЭП с углами ввода 50° и 55° , общее количество составило тринадцать ПЭП.

На Рис. 7 приведен график, на котором представлены результаты определения угла ввода при ручном измерении на образце СО-2 для глубины отверстия 15 мм (ПЭП с углом ввода 70°) или 44 мм (в остальных случаях), и при расчете угла ввода на образце СО-3 с расчетным получением эхосигналов соответствующих расположению отверстия бокового сверления на глубине 15 мм (ПЭП с углом ввода 70°) или 44 мм (в остальных случаях). Данные усреднены по пяти измерениям.

Сопоставление результатов полученных с ручным алгоритмом определения угла ввода на СО-2 и автоматическим алгоритмом измерения угла ввода на СО-3 показало среднее систематическое отклонение средних результатов не более $0,1^\circ$, что позволяет считать результаты измерений угла ввода системой АВГУР 5.4 правильными в смысле соответствия результатам измерений по ГОСТ 23702-90.

Далее проанализируем показатели точности измерения угла ввода по предложенной методике. Среднее значение разброса при определении угла ввода составило $0,7^\circ$. Среднеквадратическая погрешность измерения угла ввода составляет $S = 0,31^\circ$ в предположении о нормальности распределения или $S = 0,28^\circ$ в предположении о равномерном распределении погрешности в диапазоне $\pm 0,5^\circ$. Доверительный интервал по уровню 95% при измерении угла ввода составляет в предположении нормального распределения погрешности величину $2,57 \cdot S = 0,8^\circ$ (по таблице коэффициентов Стьюдента для числа измерения равного пяти).

При раздельном анализе погрешности измерения угла ввода для ПЭП с углами ввода менее 60° и свыше 60° , получено, что среднеквадратическая погрешность измерения угла ввода составляет соответственно $0,27^\circ$ и $0,37^\circ$ в предположении о нормальности распределения, а предел погрешности измерений соответственно $0,7^\circ$ и $0,95^\circ$. Данное обстоятельство отвечает предположению об увеличении погрешности измерения параметров диаграммы направленности с увеличением угла. Цена деления шкалы при расчете параметров диаграммы направленности была выбрана равной $0,5^\circ$.

Отметим, что при измерении угла ввода вручную на СО-2 в данной серии экспериментов разброс составил $1,14^\circ$, а среднеквадратичная погрешность составила $0,55^\circ$, что говорит о более высокой точности автоматизированных измерений.

Усредненное среднеквадратичное отклонение измерений стрелы по ПЭП по оси X для тех же тринадцати ПЭП при ручном измерении стрелы равно $0,38$ мм и при автоматизированном измерении равно $0,37$ мм, то есть разброс измерений в ручном и автоматизированном режимах

практически одинаков, а значение предельной погрешности измерения значения стрелы принято равным ± 1 мм.

Экспериментально измеренное значение среднеквадратической погрешности измерения размаха амплитуд эхосигналов для тех же тринадцати ПЭП составило 0,7 дБ или 8%. В предположении о нормальном распределении ошибки, предел погрешности измерения размаха амплитуд эхосигналов с учетом инструментальной, методической погрешностей и погрешности, связанной с качеством акустического контакта погрешностей составит 20% или 1,6 дБ.

Проанализирована также точность расчетного определения опорного усиления от отверстия в СО-2 на глубине 44 мм. Пересчет из амплитуды донного сигнала от СО-3 в амплитуду эхосигнала от отверстия бокового сверления выполнялся по формулам акустического тракта [17]:

$$K = \sqrt{\frac{\lambda}{S} \frac{4}{rd} \left(\frac{h}{\cos \alpha} \right)^3}, \quad (1.2)$$

где r – расстояние до полуцилиндрической донной поверхности (55 мм), h, d – глубина и диаметр отверстия бокового сверления, α – угол ввода, S – площадь пьезоэлемента (мнимого), λ – длина волны.

Выводы по оценке погрешности расчета опорного уровня таковы: усредненное по двенадцати ПЭП отклонение средних значений экспериментально определенного и расчетного опорного уровня от отверстия в СО-2 составляет 1,0 дБ, а систематическая погрешность, вычисляемая с учетом знака, составляет +0,2 дБ.

Таким образом, расчетный параметр, находящийся в самом конце цепочки погрешностей (Рис. 1) и суммирующий погрешности измерения всех входящих в формулу (1.2) величин не имеет значительной систематической погрешности.

Эксперимент по оценке повторяемости и воспроизводимости

При выпуске серии систем АВГУР 5.4 в рамках приемо-сдаточных испытаний были проведены исследования по оценке прецизионности измерения параметров ПЭП в соответствии с ИСО 5725-2 [3]. В измерениях участвовали $p = 10$ систем, для каждой из которых была выполнена многократная калибровка одного ПЭП типа П-121-2,5-70 в количестве $n = 9$ раз. Системы при проведении испытаний были в полной индивидуальной комплектации, включая стандартные образцы СО-3Р.

В базовые ячейки в соответствии с ИСО 5725-2 заносились коэффициент двойного преобразования, частота, угол ввода, ширина диаграммы направленности, уровень шума, длительность импульса, время задержки в призме.

Полученные данные были подвергнуты проверке на совместимость и наличие выбросов по ИСО 5725-2. Графическое построение (см. Рис. 8, Рис. 9, по оси абсцисс отложен номер системы) показало наличие выброса в значениях коэффициента двойного преобразования 44 дБ системы № 7 при среднем значении в ячейке 40,3 дБ. Данная точка была исключена из

дальнейшего анализа. Применение критерия Граббса [3] к значениям внутри базовых ячеек позволило выявить следующие выбросы:

- значение эффективной частоты 2,57 МГц для системы № 10 является выбросом, поскольку все остальные значения составили 2,58 МГц, однако значение было оставлено в базовой ячейке;
- значение уровня шума 14,7 мВ для системы № 1 является выбросом при среднем значении уровня шума 12,9 мВ, значение было исключено из анализа;
- для системы № 5 квазивыбросом является значение стрелы 9,2 мм при среднем значении 10,16 мм, значение было исключено из анализа;
- значение длительности импульса 2,4 мкс является выбросом для системы № 7, при среднем значении в базовой ячейке 2,54 мкс, данное значение воспроизвелось единственный раз среди всех 90 измерений и было исключено из анализа;
- для времени задержки в призме наблюдается два квазивыброса (3,38 для системы № 4 при среднем значении 3,08 мкс и 3,6 мкс для системы № 4 при среднем значении 3,26 мкс) и один выброс 3,69 мкс для системы № 9 при среднем значении 3,2 мкс, все эти значения были исключены из анализа.

В свою очередь применение критерия Граббса к средним значениям в базовых ячейках не показало наличия выбросов, это означает, что при оценке пределов воспроизводимости нужно учитывать результаты измерений на всех десяти системах.

Далее были вычислены стандартное отклонение повторяемости S_r и стандартное отклонение воспроизводимости S_R для каждого из параметров ПЭП. Пределы повторяемости r и воспроизводимости R в 95% доверительном интервале вычислялись как $r = 4 \cdot S_r$, $R = 4 \cdot S_R$. В Таблице 1 указаны полученные показатели прецизионности.

При анализе данной таблицы можно сделать следующие выводы:

- Пределы погрешностей измерения ширины диаграммы направленности примерно в два раза превышают те же величины для угла ввода.
- Равенство показателей воспроизводимости и повторяемости коэффициента двойного преобразования говорит об идентичности приемо-передающих трактов испытанных систем.
- Наибольшая разница стандартных отклонений воспроизводимости и повторяемости наблюдается для времени задержки в призме и для стрелы, то есть для этих параметров начинает играть роль систематическая погрешность, связанная с отклонениями скорости звука и точностью изготовления стандартных образцов и точностью изготовления и сборки сканирующих устройств. Также на Рис. 8, Рис. 9 хорошо видна зависимость среднего значения данных параметров от номера системы. Далее показано, что эта систематическая погрешность связана с метрологическими характеристиками образцов.

Была проанализирована зависимость погрешности измерений параметров ПЭП от параметров стандартного образца. На одной из систем была проведена калибровка ПЭП на трех образцах СО-ЗР, и полученные значения параметров ПЭП сопоставлены со значениями, полученными при проведении основного эксперимента по оценке повторяемости и воспроизводимости. Установлено что:

- Угол ввода и ширина диаграммы направленности зависят от номера стандартного образца.
- Подтверждено что высокая погрешность воспроизводимости времени задержки в призме и стрелы связана с разбросом метрологических характеристик стандартного образца.

Таблица 1 Оценка показателей воспроизводимости и повторяемости

Показатель прецизионности Измеренный параметр	Стандартное отклонение повторяемости S_r	Стандартное отклонение воспроизводимости S_R	Предел воспроизводимости r	Предел повторяемости R
Длительность эхоимпульса, t_{\max} мкс	0,05	0,06	$\pm 0,1$	$\pm 0,11$
Импульсный коэффициент двойного преобразования, K_{UV}^H дБ	0,92	0,97	$\pm 1,8$	$\pm 1,9$
Эффективная частота, $f_{\text{Э}}$ МГц	0,005	0,006	$\pm 0,01$	$\pm 0,01$
Стрела, l мм	0,39	0,55	$\pm 0,8$	$\pm 1,1$
Угол ввода, α °	0,33	0,40	$\pm 0,66$	$\pm 0,8$
Ширина диаграммы направленности, θ_1 °	0,51	0,88	$\pm 1,02$	$\pm 1,76$
Время задержки в призме, τ_{np} мкс	0,09	0,14	$\pm 0,17$	$\pm 0,27$
Уровень шума в диапазоне 10-100 мкс, $A_{\Delta\tau}$ мВ	1,03	1,26	2,06	2,52

Проверка выполнения требований ГОСТ 23702-90

В ГОСТ 23702-90 указана формула для вычисления пределов допустимых погрешностей применяемого средства измерений по формуле:

$$\delta = \pm \sqrt{\delta_a^2 + \delta_m^2},$$

где δ_m^2 – составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностями методов и средств измерения, δ_a^2 – составляющая, обусловленная вариацией акустического контакта. По ГОСТ 23702-90 нормируется только величина δ_m^2 , однако, при экспериментальном определении пределов погрешности измерений затруднительно оценить только одну составляющую. Для уменьшения влияния δ_a^2 рекомендуется выполнять многократные измерения с последующей статистической обработкой результатов.

В Таблице 2 приведены значения пределов погрешностей измерения для ПЭП класса А (то есть с повышенным уровнем требований к точности) в соответствии с ГОСТ 23702-90 установления характеристик и значения погрешностей измерения, реализуемые системой АВГУР 5.4. Все пределы погрешностей не превышают указанных в ГОСТ 23702-90 кроме стрелы. Вообще говоря, ГОСТ 23702-90 нормирует погрешность измерения не стрелы, а отклонения точки ввода Δl , которое системой в автоматическом режиме не измеряется, а в ручном режиме с механизированным перемещением ПЭП погрешность измерения Δl не может быть больше чем при чисто ручной методике

Таблица 2 Пределы погрешности измерения параметров ПЭП

Измеренный параметр	Предел погрешности измерений параметров	
	В соответствии с ГОСТ 23702-90	Система АВГУР 5.4
Длительность эхоимпульса, t_{\max}	$\pm 7 \%$	$\pm 4 \%^2$
Импульсный коэффициент двойного преобразования, K_{UU}^H	$\pm 15 \%$	$\pm 15 \%^3$
Эффективная частота, f_3	$\pm 5 \%$	$\pm 0,5 \%^4$
Полоса пропускания, Δf_{UU}	$\pm 4 \%$	$\pm 1 \%^5$
Стрела, l	$\pm 0,5$ мм	$\pm 1,0$ мм
Угол ввода, α		
до 60°	$\pm 0,75^\circ$	$\pm 0,7^\circ$
свыше 60°	$\pm 1,0^\circ$	$\pm 1,0^\circ$

² Для номинальной длительности импульса 2,5 мкс.

³ Не учитывая изменение качества акустического контакта и без учета затухания в образце.

⁴ Для номинальной частоты 5 МГц.

⁵ Для номинальной частоты 5 МГц.

Время задержки в призме, $\tau_{пр}$	$\pm 10 \%$	$\pm 5 \%$ ⁶
--------------------------------------	-------------	-------------------------

Заключение

В статье проанализированы показатели точности системы калибровки пьезоэлектрических преобразователей, исследованы некоторые функции влияния, построена диаграмма, показывающая взаимозависимость параметров ПЭП.

Показано, что результаты измерения таких параметров как угол ввода и время задержки в призме требуют знания скорости звука в стандартном образце с точностью не менее $\pm 0,5^\circ$, при этом экспериментально обнаружена значительная систематическая погрешность при калибровке на серии из 10 стандартных образцов СО-ЗР.

Показано, что перечень нормируемых метрологических характеристик системы достаточен для обеспечения воспроизводимости, близкой к повторяемости, то есть для идентичности результатов измерений при серийном производстве систем.

Пределы погрешностей измерений параметров ПЭП не превышают указанных в ГОСТ 23702-90 кроме стрелы. Можно рекомендовать измерение привязки ПЭП к центру образца каждый раз перед выполнением регистрации эхосигналов и использовать усреднение по трем измерениям. Кроме того, целесообразно ввести в методику измерений сопоставление значений стрелы, измеренных при ручном и автоматическом поиске максимума пространственной огибающей.

Погрешность измерения коэффициента двойного преобразования определенная экспериментально достигает ± 2 дБ, что хорошо согласуется с общеизвестным допуском на измерение амплитуд в практике ультразвуковой дефектоскопии. Необходимо отметить, что ГОСТ 23702-90 допускает погрешность измерения $\pm 15\%$ без учета вариации акустического контакта.

Наибольшее количество выбросов наблюдается в результатах измерения времени задержки в призме – величины, измеряемой при ручном выборе эхосигнала с максимальной амплитудой. Методика измерения времени задержки в призме может быть изменена с целью уменьшения случайной погрешности измерений. Например, можно сопоставлять время задержки, измеренное при ручном и автоматическом поиске максимума пространственной огибающей.

Принято решение о том, как следует представлять результаты измерения при выводе в паспорт ПЭП; так значения стрелы следует округлять до 0,5 мм, коэффициента двойного преобразования до 1 дБ, времени задержки в призме до 0,1 мкс, угла ввода до $0,5^\circ$.

При возникновении необходимости уменьшения случайной погрешности измерений целесообразно реализовать методику с автоматизированным многократным измерением параметров ПЭП и усреднением результатов.

Базулин Андрей Евгеньевич

01 октября 2009 года

⁶ Для номинального времени задержки в призме 3,4 мкс, исключая систематическую погрешность, связанную с параметрами образца.

Рисунки и подписи

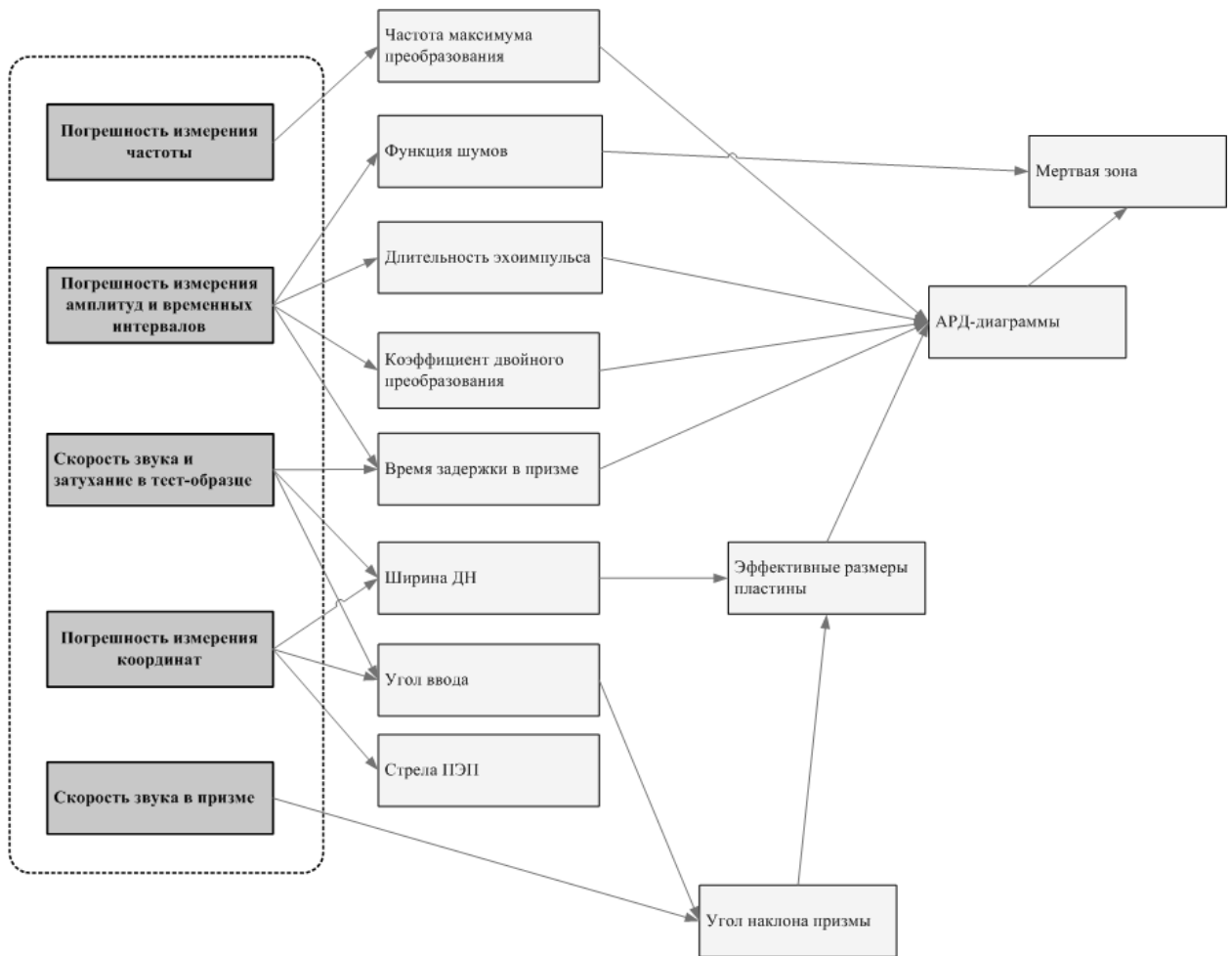


Рис. 1. Цепочка погрешностей при измерении параметров ПЭП.

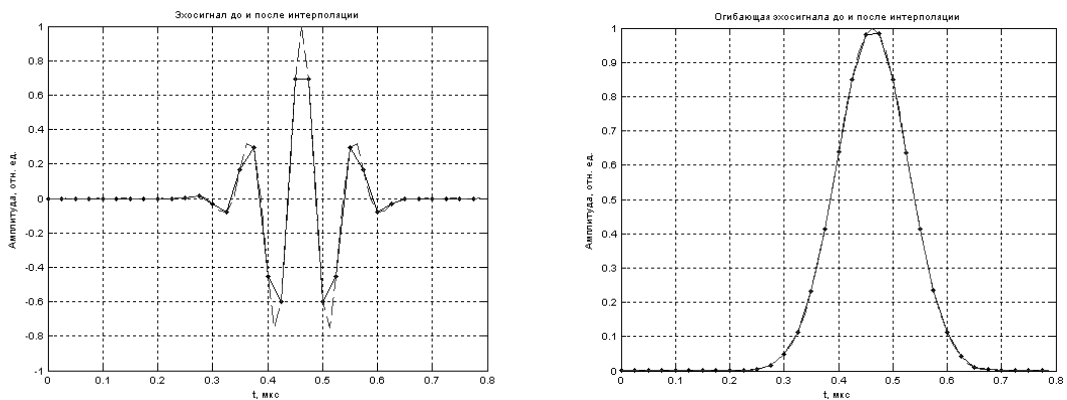


Рис. 2. Слева сплошной линией с точками показаны исходные эхосигналы с центральной частотой 10 МГц, смоделированные с частотой дискретизации 40 МГц и сплошными линиями результат интерполяции на сетку с частотой дискретизации 80 МГц. Справа те же данные, но показаны огибающие эхосигналов.

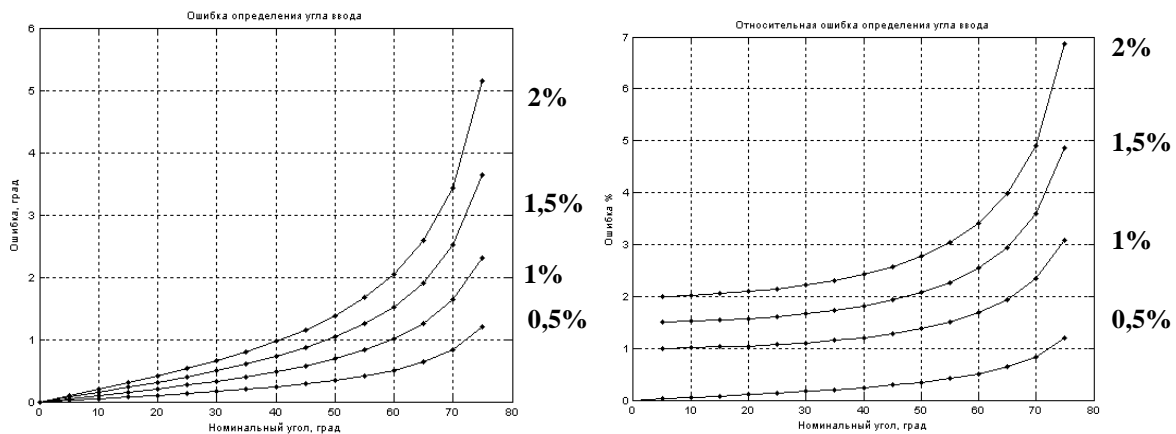


Рис. 3. Показана абсолютная и относительная погрешность при измерении угла ввода, в зависимости от ошибки в задании продольной скорости звука в стандартном образце. Кривые соответствуют относительным погрешностям задания скорости звука 0,5, 1%, 1,5% и 2%.

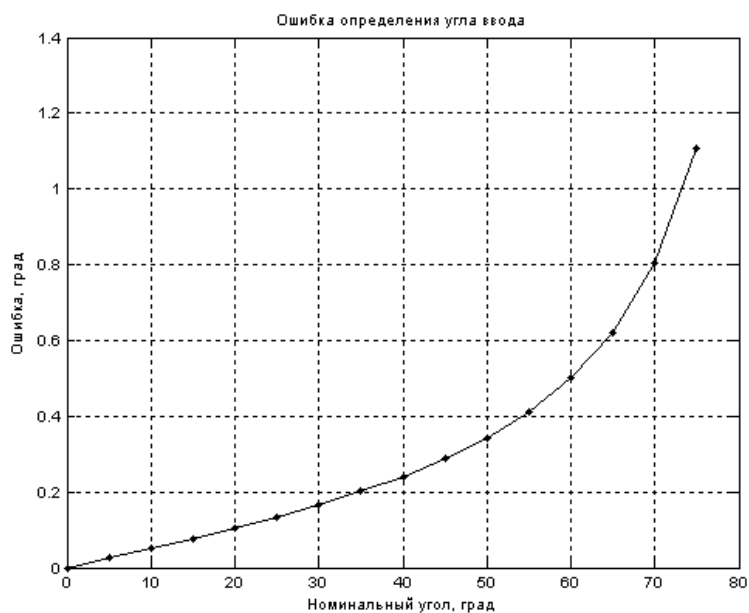


Рис. 4. Показана абсолютная систематическая погрешность измерения угла ввода для погрешности определения элементарного шага сканера $\delta_x = 0,5\%$

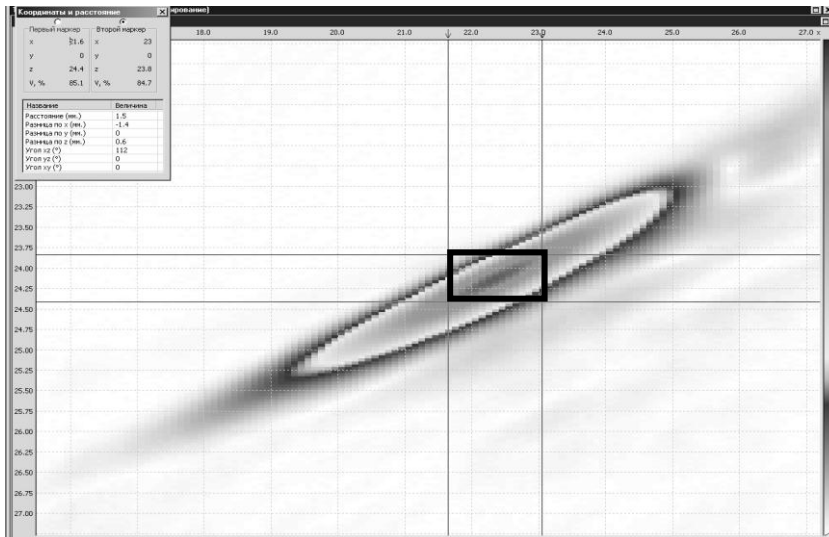


Рис. 5. Показан характерный вид В-скана, полученного от цилиндрической поверхности СО-3 (вычислена огибающая и модуль кодирован цветом), ПЭП П-121-2.5-50 ($2a=12$ мм), Длина пятна «фокусировки» составляет 1,5 мм, что соответствует погрешности определения времени прихода $\delta t_x = \pm 0,2$ мкс.

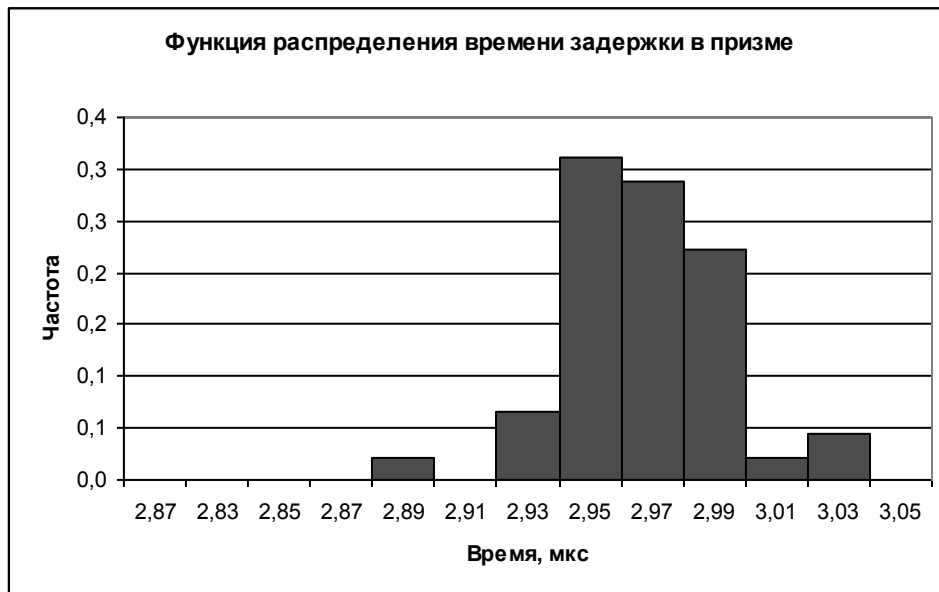


Рис. 6. Показана функция распределения измеренного времени задержки в призме ПЭП типа П-121-2,5-50, $2a=12$ мм. Для построения гистограммы взяты 45 точек. Среднее значение времени задержки составило 2,96 мкс, при среднеквадратическом отклонении $S = 0,03$ мкс. В предположении о нормальном распределении ошибки доверительный интервал по уровню 95% составит $\delta \tau_{np} = \pm 0,06$ мкс.

Номинальные и измеренные значения углов ввода

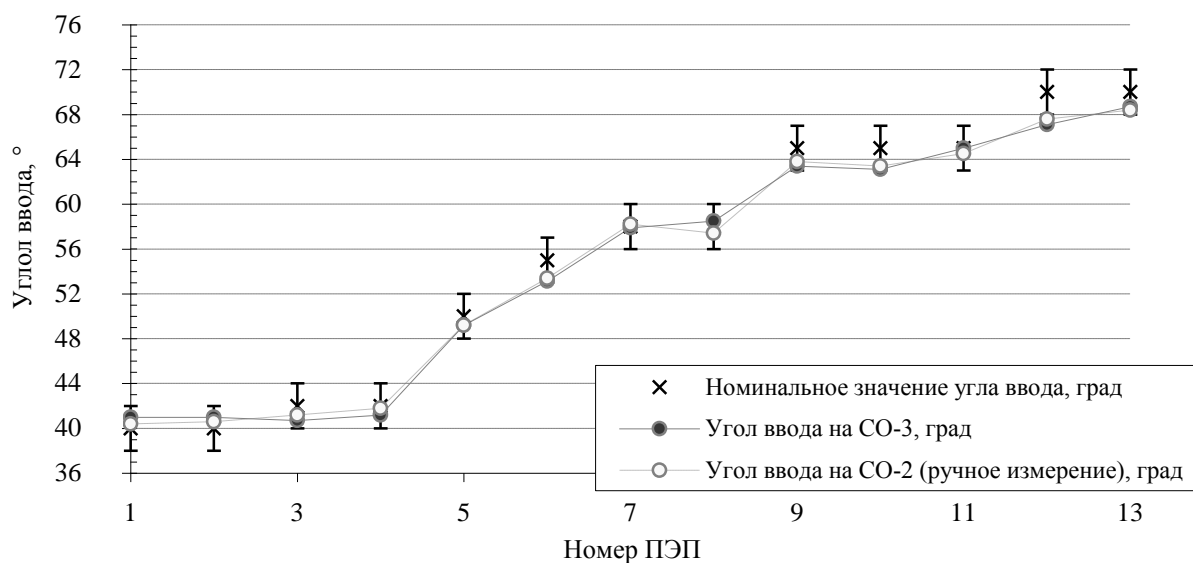


Рис. 7. Сводный график с номинальными и измеренными двумя способами углами ввода 13 ПЭП. По оси абсцисс отложен номер ПЭП, при упорядочивании по возрастанию угла ввода.

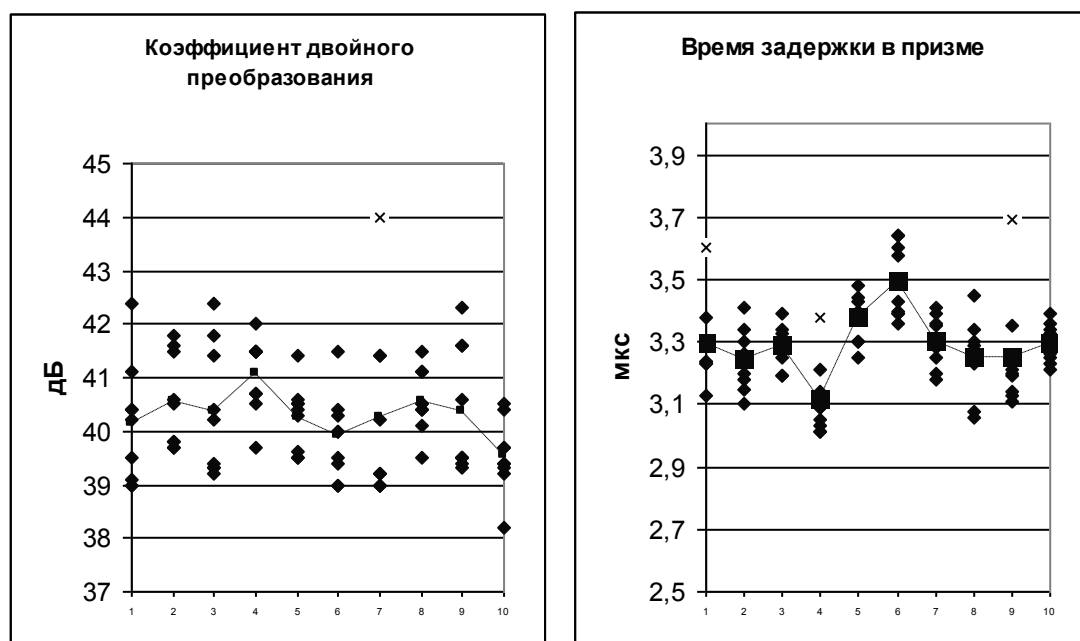


Рис. 8. Значения коэффициента двойного преобразования и времени задержки в призме для 9 измерений 10 системами. По оси абсцисс отложен номер системы. Крестиками помечены выбросы. Пунктирной линией соединены средние значения, полученной каждой из систем.

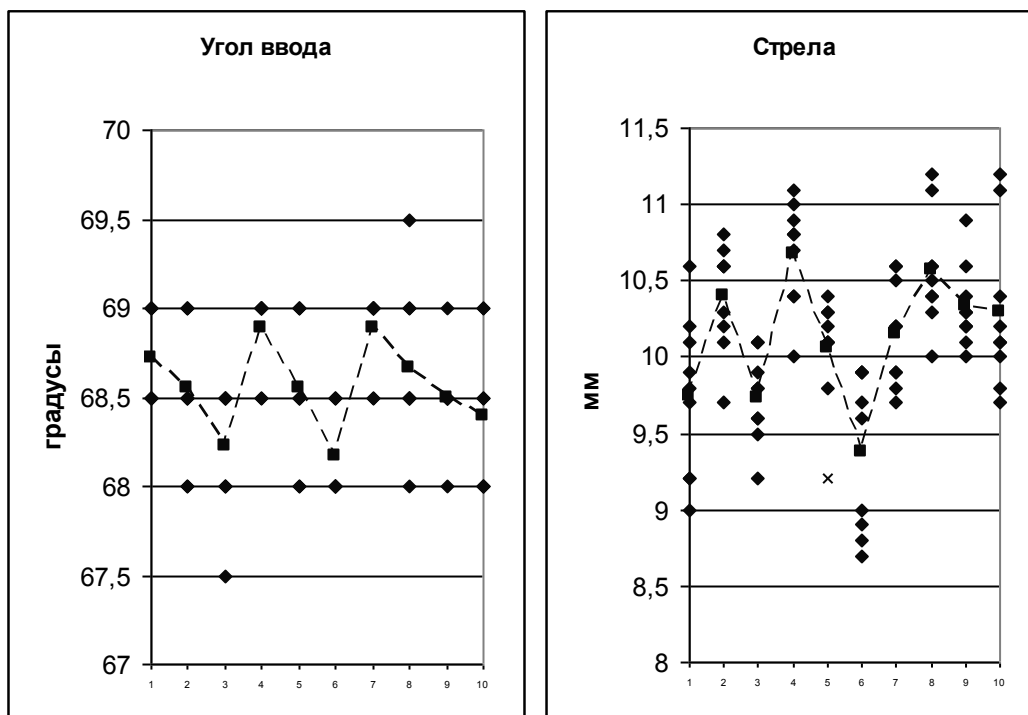


Рис. 9 Значения угла ввода и стрелы для 9 измерений 10 системами. По оси абсцисс отложен номер системы. Крестиками помечены выбросы. Пунктирной линией соединены средние значения, полученной каждой из систем.

Список литературы

- [1] РМГ 29-99. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения
- [2] ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения
- [3] ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод оценки показателей прецизионности
- [4] Коншина В.Н., Дымкин Г.Я. Современные подходы к аттестации методик ультразвукового контроля. Дефектоскопия. №2, 2008, с. 3-14.
- [5] ГОСТ 8.009-84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений
- [6] Методический материал по применению ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений»
- [7] ГОСТ 23702-90. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний
- [8] Базулин А.Е., Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С. Система калибровки ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей АВГУР 5.4. Часть I. Описание системы и методики калибровки. Контроль. Диагностика. №9, 2009. с. 8-18.

-
- [9] *Рабинер Л, Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов // Пер. с англ.; Под ред. Ю. И. Александрова. - М.: Мир, 1978.
- [10] *Гоноровский И. С.* Радиотехнические цепи и сигналы // М.: Радио и связь. 1986.
- [11] ГОСТ 14782-86. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые
- [12] ГОСТ 18576-96. Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные
- [13] *Гурвич А.К., Кузьмина Л.Г., Николаев С.В.* Осторожно! Угол ввода луча $\alpha=70^\circ$. В Мире НК, №4 (34), 2006, с. 48-50.
- [14] ЕВРОПЕЙСКИЙ СТАНДАРТ. EN 12668-2:2001. Неразрушающий контроль. Характеристика и проверка ультразвукового оборудования. Часть 2. Преобразователи.
- [15] *M. Jastrzebski, T. Dusatko, J. Fortin, F. Farzbod, A.N. Sinclair,* "Enhancement of synthetic aperture focusing technique (SAFT) by advanced signal processing". Proc. of 16th WCNDT, Montreal, 2004
- [16] Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля. *Под общ. ред. И.Н. Ермолова.* – М.: Машиностроение, 1986, 280 с.
- [17] Неразрушающий контроль: Справочник в 7 т. под общ. Ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль/*И.Н.Ермолов, Ю.В. Ланге.* М.: Машиностроение, 2004. 864 с.