

УДК 534-08, 620.19

АНАЛИЗ ОТРАЖЁННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ МНОГОКРАТНЫМ ЗЕРКАЛЬНО-ТЕНЕВЫМ МЕТОДОМ*

О. В. Муравьева, В. В. Муравьев, М. А. Габбасова,
И. В. Булдакова, М. Ю. Соков

*Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,
426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7
E-mail: vmuraviev@mail.ru*

Представлены результаты корреляционного, спектрального и вероятностно-статистического анализов сигналов при реализации многократного зеркально-теневого метода контроля дефектности цилиндрических образцов, и обоснованы новые информативные параметры в целях их комплексного использования для повышения достоверности результатов неразрушающего контроля.

Ключевые слова: корреляционный, спектральный, вероятностно-статистический анализ сигналов, многократный зеркально-теневого метод контроля, цилиндрический образец.

DOI: 10.15372/AUT20160408

Введение. Большинство ультразвуковых (УЗ) методов неразрушающего контроля (эхометод, зеркально-теневого и ряд других) при дефектоскопии цилиндрических объектов в качестве информативного параметра используют амплитудный признак. Ввиду того, что амплитуда принятого сигнала в существенной мере зависит от стабильности акустического контакта, определяемого качеством контролируемой поверхности, его ухудшение может приводить как к недобраковке при применении эхометодов, так и к перебраковке при использовании амплитудных теневых методов. Предложенный в [1, 2] зеркально-теневого метод контроля стальных прутков, основанный на регистрации серии многократных отражений и реализованный с помощью бесконтактного электромагнитно-акустического (ЭМА) способа приёма и возбуждения акустических волн, позволяет отстроиться от качества акустического контакта и тем самым повысить достоверность и воспроизводимость результатов контроля.

При реализации УЗ-методов наряду с амплитудным в качестве информативных признаков сигналов также используют временные параметры (при определении координат дефектов), спектральные характеристики, индикатрисы рассеяния (при оценке формы дефекта) [3], пространственные и временные огибающие сигнала (при нахождении условных размеров дефекта), методы восстановления формы дефекта с применением компьютерной томографии [4]. Для анализа акустических сигналов в системах вибродиагностики используются методы, основанные на алгоритмах вычисления взаимокорреляционных функций сигналов [5], методы спектрального анализа сигналов [6, 7] и статистической обработки данных акустической эмиссии [8].

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00051).

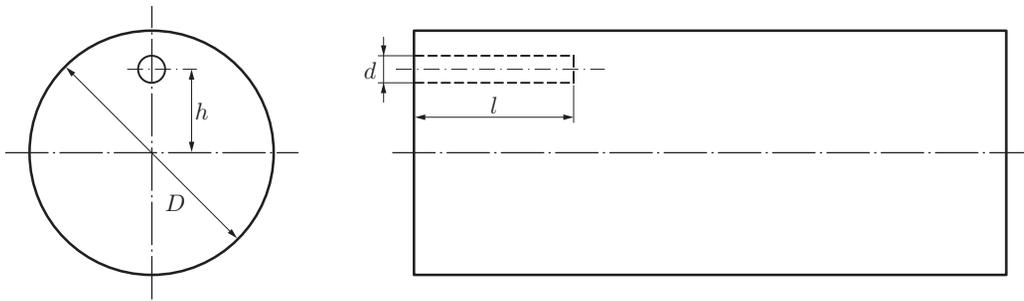


Рис. 1. Схема образца с боковым цилиндрическим сверлением

Цель данной работы — поиск и обоснование новых информативных признаков, базирующихся на исследовании отражённых сигналов методами корреляционного, спектрального и вероятностно-статистического анализов, для повышения достоверности результатов контроля цилиндрических объектов многократным зеркально-теневым ЭМА-методом.

Используемые подходы. Зеркально-теневой метод контроля цилиндрических образцов на многократных отражениях реализован с помощью специализированного ЭМА-преобразователя проходного типа, содержащего соосный с образцом цилиндрический высокочастотный индуктор с импульсным током и источник поля подмагничивания. Излучение поперечной волны с осевой поляризацией во всех радиальных направлениях происходит вследствие ориентации поля подмагничивания в радиальных направлениях в приповерхностной области объекта по отношению к направлению вихревых токов за счёт электродинамического механизма [9]. Измерения проводились с помощью специализированной экспериментальной установки, обеспечивающей возбуждение, приём, регистрацию и сохранение сигналов во временной области с частотой дискретизации 500 МГц при 8-битной разрядности АЦП. Дальнейшая обработка сигналов производилась на базе программного обеспечения WinПОС Professional (ИД USB\VID_0A89&PID_0003&REV_0100), предназначенного для обработки измерительной информации с помощью стандартных математических и статистических алгоритмов, графического представления данных и документирования.

Исследованы сигналы, полученные на цилиндрических образцах из стали 03X14H7Б диаметром $D = 22$ мм и длиной 100 мм: бездефектный образец и образцы прутков с боковым цилиндрическим сверлением диаметром $d = 2$ мм, протяжённостью вдоль оси $l = 20$ мм на различном расстоянии h от центра образца (0,5, 2, 5, 8 мм) (рис. 1). В качестве примера на рис. 2 представлены зарегистрированные сигналы для бездефектного образца (рис. 2, а) и образца с боковым цилиндрическим сверлением на глубине $h = 0,5$ мм (рис. 2, б). На эхограммах первым наблюдается зондирующий импульс, за которым следуют восстановление входного усилителя после наводки зондирующего импульса (около 15 мкс) и далее серия многократных переотражений по диаметру прутка. Наблюдаемые огибающие серии многократных отражений характеризуются сокращением времени реверберации для дефектных областей прутка, при этом каждое отражение по диаметру сопровождается изменением фазы колебаний на $\pi/2$. Ввиду того, что проходной ЭМА-преобразователь формирует акустические волны с фокусировкой по центру, степень ослабления отражённых сигналов зависит от положения дефекта относительно оси образца, увеличиваясь по мере приближения к оси.

Результаты корреляционного анализа. Корреляционный анализ основан на расчёте взаимной корреляционной функции

$$R_{fg}(\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \Delta t)g(x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x + \Delta t)dx, \quad (1)$$

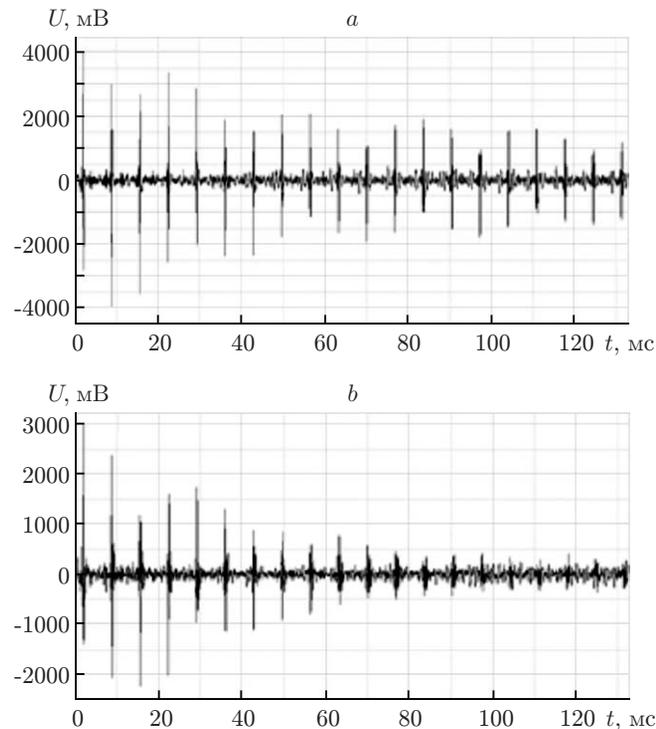


Рис. 2. Осциллограммы отражённых сигналов: *a* — бездефектного образца, *b* — образца с боковым цилиндрическим сверлением при $h = 0,5$ мм

где $f(x)$ и $g(x)$ — сравниваемые сигналы, Δt — временной сдвиг между сигналами.

Корреляционный анализ реализован в программной среде Mathcad и использован для определения скорости поперечной УЗ-волны C_t по временному сдвигу $\Delta t_{R_{\max}}$ между n -м и m -м отражёнными импульсами, соответствующему максимальному значению коэффициента корреляции R_{\max} :

$$C_t = \frac{D(m - n)}{(t_m - t_n) \pm \Delta t_{R_{\max}}}. \quad (2)$$

Здесь t_m, t_n — начальные времена анализируемых участков с соответствующими отражёнными импульсами.

Ввиду наличия фазового сдвига при каждом переотражении на $\pi/2$ при анализе рассматривались импульсы с номерами n и m , кратными 4, начиная с третьего импульса, как наиболее различимого после восстановления входного тракта усилителя при воздействии зондирующего импульса. Следует отметить, что использование алгоритмов определения временной задержки методами перехода через нуль, абсолютного максимума, по уровню срабатывания может приводить к значительным погрешностям, связанным с искажением формы сигнала, особенно при наличии фазовых сдвигов сигналов при каждом отражении и низком отношении сигнал/шум, что усложняет компьютерную реализацию алгоритмов по всей выборке данных.

Предлагаемый корреляционный метод измерения временного сдвига $\Delta t_{R_{\max}}$ по степени схожести сигналов обеспечивает высокую точность определения скорости УЗ-волны. Так, рассчитанное значение скорости поперечной волны в исследуемых образцах составило 3249 м/с при погрешности измерений $\Delta C = 1$ м/с или 0,04 % (точность измерения

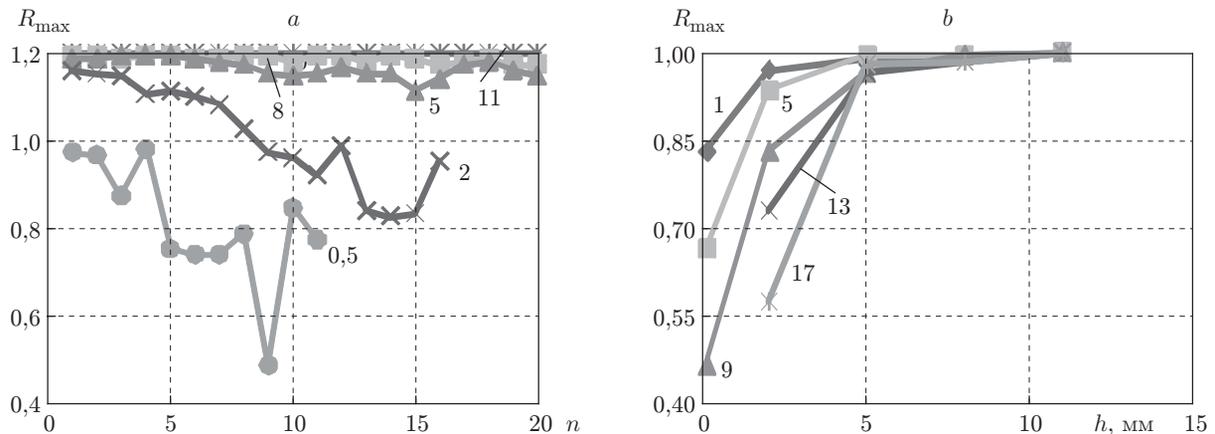


Рис. 3. Зависимости коэффициентов корреляции R_{\max} : *a* — от номера отражения n для образцов с дефектами на различной глубине h ; *b* — от глубины залегания дефекта для номеров отражений n , кратных 4

диаметра образца 50 мкм). Отметим, что при использовании для измерения диаметра лазерных оптических методов [10] точность определения скорости акустической волны будет задаваться преимущественно максимальной частотой дискретизации АЦП и улучшится на порядок (до 0,1 м/с). Разработанный метод оценки скорости УЗ-волны с высокой точностью позволяет применять его в качестве тонкого инструмента измерения структурно-чувствительного параметра материала [11].

Исследованы максимальные значения коэффициентов корреляции при сравнении эхограмм сигналов бездефектного образца и образцов с модельными отражателями на различной глубине. Коэффициенты корреляции R_{\max} в зависимости от номера отражения n для бездефектного образца ($R_{\max} = 1$) и образцов с искусственными дефектами на различной глубине h иллюстрирует рис. 3, *a*. С увеличением номера отражения неравномерность в поведении коэффициента корреляции усиливается, при этом чем глубже дефект, тем меньше значение взаимной корреляционной функции и тем больше её разброс. Последний обусловлен появлением искажений в форме отражённых сигналов, вызванных отклонениями от прямолинейности пути УЗ-волны при наличии дефекта. Чем ближе к центру (зоне фокуса) дефект, тем больше отклонений наблюдается в распространении волны при отражениях. Зависимости коэффициента корреляции от глубины залегания дефекта h для различных значений номера отражения n , кратных 4 (1, 5, 9, 13, 17), представлены на рис. 3, *b*. Анализ кривых показывает, что дальние отражения обеспечивают более крутую зависимость от глубины h , что может служить косвенным признаком глубины залегания дефекта при реализации зеркально-теневого метода контроля. В практике УЗ-контроля считается, что традиционный зеркально-теневого метод не позволяет определять координату дефекта.

Результаты спектрального анализа. Спектральный анализ полученных осциллограмм проводился с помощью специализированного программного обеспечения WinПос Professional на массиве данных x_n с количеством отсчётов $N = 148400$. Во избежание влияния на результаты анализа зондирующего импульса интервал времени 0–15,7 мкс (в количестве 7850 отсчётов) удалялся из массива данных. На рис. 4 изображены найденные методом быстрого преобразования Фурье спектральные характеристики осциллограмм исследуемых объектов. Спектры имеют линейчатый вид явно выраженных отдельных гармо-

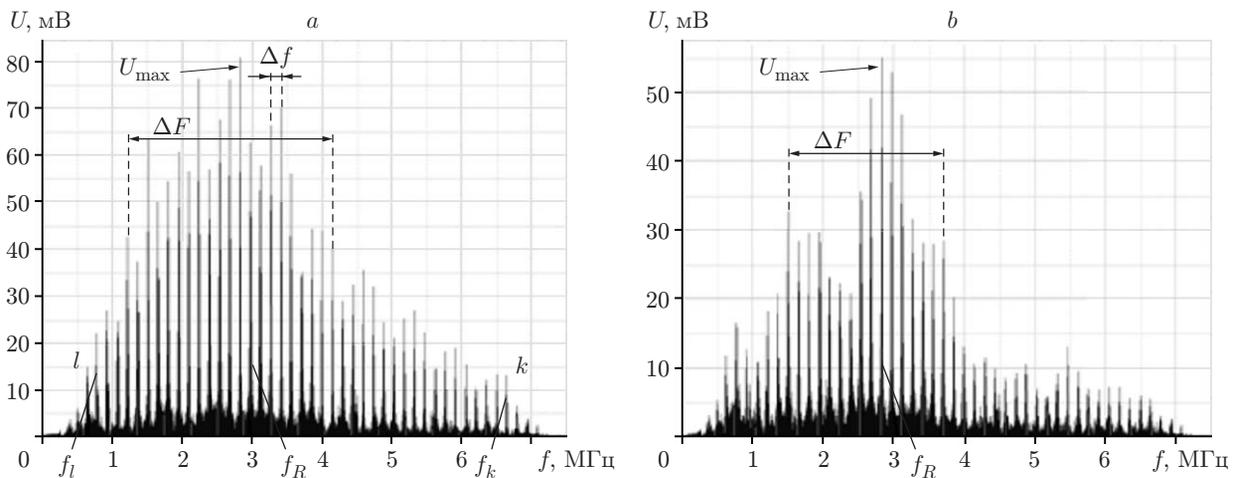


Рис. 4. Спектральные характеристики осциллограмм многократных отражений: *a* — для бездефектного образца, *b* — для образца с боковым цилиндрическим сверлением при $h = 0,5$ мм

ник, следующих с определённой периодичностью Δf , связанной со скоростью УЗ-волны C_t формулой

$$C_t = D\Delta f = \frac{D(f_k - f_l)}{k - l}, \quad (3)$$

где $\Delta f = f_k - f_l$ — разница частот k -й и l -й линий в спектре.

Частота, соответствующая спектральной гармонике с максимальной амплитудой, определяется основной резонансной частотой УЗ-импульса $f_R = 3$ МГц. Бездефектный образец характеризуется высокой амплитудой спектральной составляющей для основной резонансной частоты $U_{\max} = 82$ мВ, достаточно равномерным распределением по амплитуде отдельных спектральных составляющих и широкой полосой спектра $\Delta F = 2,9$ МГц (по уровню 6 дБ). Для образцов с дефектами наблюдаются уменьшение спектральной составляющей на основной резонансной частоте ($U_{\max} = 66$ мВ), большая неравномерность в распределении амплитуд отдельных спектральных составляющих и сужение полосы спектра $\Delta F = 2,2$ МГц (по уровню 6 дБ). Возможно несущественное отклонение основной резонансной частоты УЗ-импульса. Указанные закономерности выражены тем больше, чем глубже дефект (чем быстрее во времени затухают импульсы многократных отражений).

В целях уменьшения влияния на результаты анализа уровня шумов и помех в условиях низкой эффективности ЭМА-преобразования применена операция возведения массива данных исходного сигнала в квадрат, что позволило увеличить отношение сигнал/шум в области отсутствия отражённых сигналов. Сигнал, возведённый в квадрат, и соответствующий ему спектр представлены на рис. 5. Видно, что в области малых сигналов, например на десятом отражении для образца с дефектом, отношение сигнал/шум увеличилось с 5 (см. рис. 2, *b*) до 25 раз (рис. 5, *a*). Спектр сигнала, возведённого в квадрат, значительно изменяется, при этом частота следования линий в спектре сохраняется, наблюдаются два максимума в огибающей спектра: низкочастотный, соответствующий частоте модуляции сигнала, и высокочастотный, соответствующий двукратной резонансной частоте сигнала.

Результаты вероятностно-статистического анализа. Вероятностно-статистический анализ проведён для массива данных x_n исходных сигналов, полученных при регистрации, сигналов, возведённых в квадрат, и их спектров на базе программного обеспечения WinПос Professional. Анализу подлежали следующие вероятностные характеристики: плотность распределения вероятностей $P(x_n)$ по методу ядерных оценок; математическое

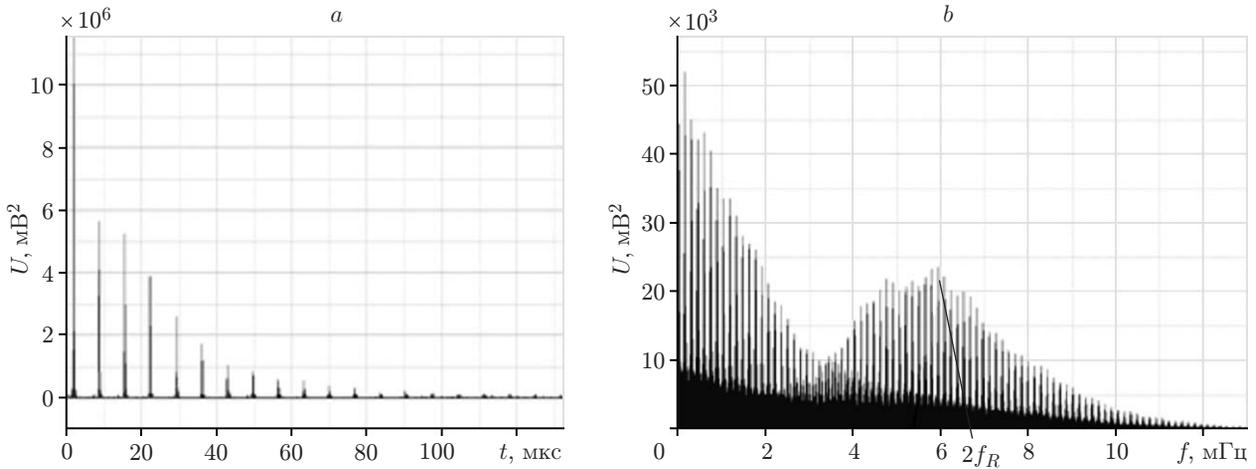


Рис. 5. Характеристики сигналов, возведённых в квадрат, для образца с боковым цилиндрическим сверлением при $h = 0,5$ мм: a — временная, b — спектральная

ожидание m_x , вокруг которого сосредоточены значения анализируемого массива; дисперсия D_x , характеризующая рассеивание значений относительно математического ожидания; среднеквадратическое отклонение σ_x ; асимметрия S_x ; эксцесс E_x . Показатели эксцесса и асимметрии определяют неоднородность совокупности данных, асимметричность распределения и близость его к нормальному закону.

В качестве примера на рис. 6, a представлена плотность распределения вероятностей $P(x_n)$ для исходного сигнала. Анализ кривых показывает, что наблюдается существенное различие как максимальных значений плотности вероятностей, так и интервала значений сигналов с ненулевой вероятностью, т. е. параметра среднеквадратического отклонения. Максимальное значение плотности вероятностей и минимальное значение отклонения наблюдаются для образца с максимальной дефектностью (искусственный отражатель близок к центру цилиндра). Следует отметить, что имеет место незначительная асимметрия кривых относительно нуля. Плотности вероятностей исходных сигналов и их спектров носят

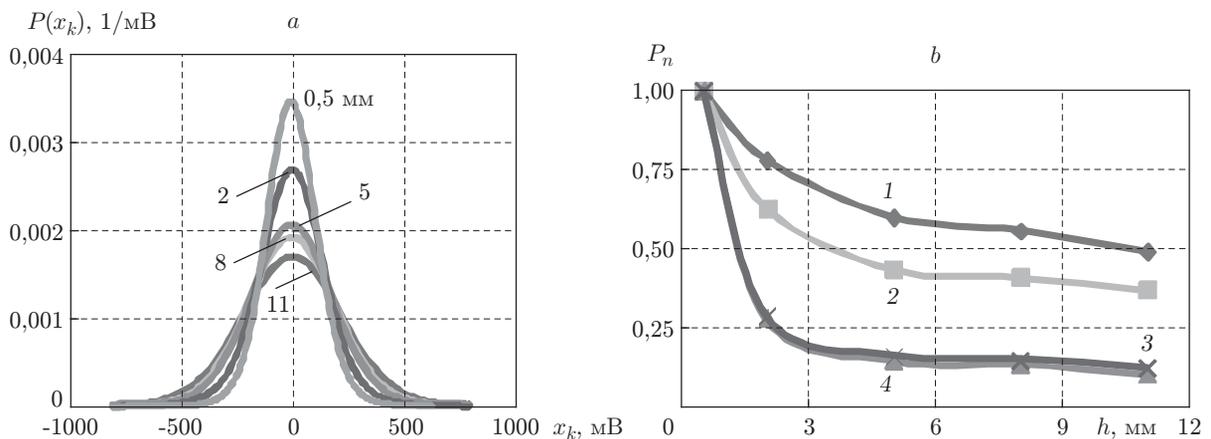


Рис. 6. Плотность распределения вероятностей: a — исходного сигнала; b — зависимость нормированного максимума плотности распределения сигнала от глубины залегания искусственного отражателя исходного сигнала (кривая 1), сигнала, возведённого в квадрат (кривая 4), и их спектров (кривые 2 и 3)

аналогичный характер, при этом зависимость максимума плотности вероятности от глубины залегания дефекта для спектра сигнала более крутая. Плотность вероятности для сигнала, возведённого в квадрат, и его спектра имеет асимметричный характер и находится в области положительных значений. При этом различие кривых для бездефектного образца и образцов с дефектами на разной глубине выражено наиболее ярко. Обобщающие зависимости нормированного максимума плотности распределения вероятностей от глубины залегания искусственного отражателя для исходного сигнала, сигнала, возведённого в квадрат, и их спектров представлены на рис. 6, *b*.

Анализ случайных погрешностей вероятностных характеристик анализируемых сигналов показал, что наиболее устойчивыми являются характеристики для сигнала, возведённого в квадрат (случайные погрешности для бездефектного образца не превышают 2 %) [12]. Отметим, что у сигналов, полученных для дефектных образцов (с низким отношением сигнал/шум), погрешности вероятностных характеристик несколько выше (достигают 5 %). Влияние глубины залегания дефекта на основные вероятностные характеристики сигнала, возведённого в квадрат, иллюстрируют зависимости на рис. 7. Все вероятностные характеристики дефектных образцов C_d пронормированы относительно бездефектного образца C_0 (приняты равными 1):

$$C_n = C_d/C_0, \quad (4)$$

где C_n — нормированное значение вероятностных характеристик.

Для сигнала, возведённого в квадрат, и его спектра все исследуемые характеристики имеют однозначное поведение в зависимости от степени дефектности объекта. Для сигнала, возведённого в квадрат, наибольшей дефектности образца (дефект, близкий к центру) соответствуют минимальные значения математического ожидания, дисперсии и среднеквадратического отклонения и максимальные значения асимметрии и эксцесса (рис. 7, *a*). В частности, для бездефектного образца математическое ожидание больше в 8 раз, дисперсия в 84 раза, асимметрия меньше в 1,9 раза, эксцесс в 3,7 раза, чем для образца с дефектом на глубине $h = 0,5$ мм. Исследования показали, что в отличие от вероятностных характеристик сигнала, возведённого в квадрат, все вероятностные характеристики его спектра имеют обратно пропорциональную зависимость от глубины залегания дефекта (рис. 7, *b*). Так, для бездефектного образца математическое ожидание больше в 7 раз, дисперсия в 124 раза, асимметрия в 1,8 раза, эксцесс в 1,9 раза, чем для образца с дефектом на глубине $h = 0,5$ мм.

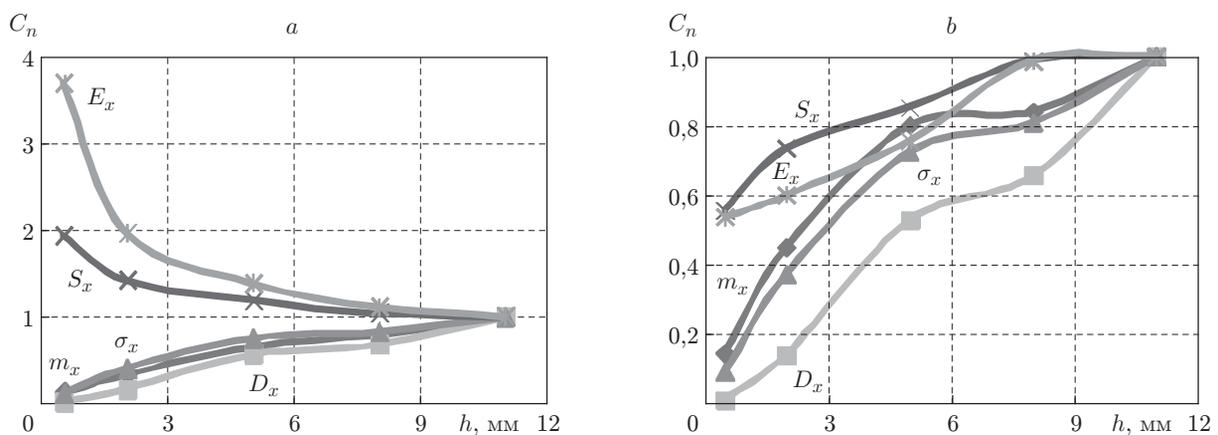


Рис. 7. Зависимости влияния глубины залегания дефекта h на основные вероятностные характеристики: *a* — сигнал, возведённый в квадрат, *b* — его спектр

Заключение. Предложенные подходы к численной обработке осциллограмм многократных отражений, основанные на методах корреляционного, спектрального и вероятностно-статистического анализов, позволили обосновать дополнительные информативные параметры при реализации электромагнитно-акустического зеркально-теневого контроля цилиндрических объектов. Показана возможность оценки степени дефектности объекта и глубины залегания дефекта по анализу разброса коэффициентов корреляции отражённых импульсов в сравнении с бездефектным образцом (более чем в 2 раза); по анализу параметров спектральной характеристики дефектного образца в сравнении с нормированным опорным спектром бездефектного образца (сужение полосы частот на 25 %, увеличение неравномерности спектра, уменьшение на 20 % амплитуды на основной частоте спектра); по анализу вероятностных характеристик сигнала, возведённого в квадрат (увеличение приблизительно в 8 раз математического ожидания и порядка 80 раз дисперсии, уменьшение почти в 2 раза асимметрии и в 4 раза эксцесса по сравнению с дефектным образцом на глубине $h = 0,5$ мм).

Предложены высокоточные (до 0,1 м/с) способы определения скорости распространения УЗ-волны как структурно-чувствительного параметра материала объекта контроля с использованием корреляционного и спектрального анализов.

Данные подходы могут применяться при формировании комплексных браковочных критериев для повышения достоверности результатов контроля цилиндрических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Муравьев В. В., Муравьева О. В., Стрижак В. А. и др.** Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей // Дефектоскопия. 2014. № 8. С. 3–12.
2. **Муравьева О. В., Петров К. В., Соков М. Ю., Габбасова М. А.** Моделирование и исследование процесса распространения акустических волн, излучаемых проходным электромагнитно-акустическим преобразователем, по эллиптическому сечению прутка // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 17–23.
3. **Немытова О. В., Ринкевич А. Б., Перов Д. В.** Сравнительная классификация дефектов с использованием методов ультразвуковой томографии и оценки мгновенной частоты эхосигнала // Дефектоскопия. 2013. № 6. С. 3–12.
4. **Базулин Е. Г., Базулин А. Е., Коколев С. А., Гурьева Т. М.** Использование ультразвукового дефектоскопа с фазированной антенной решеткой для регистрации эхосигналов с целью восстановления изображения отражателей методом проекции в спектральном пространстве // Дефектоскопия. 2014. № 6. С. 3–15.
5. **Леньков С. В.** Повышение точности оценки корреляционных функций реализаций дискретных сигналов // Автометрия. 2009. 45, № 5. С. 27–33.
6. **Леньков С. В.** Восстановление сигналов по результатам динамических измерений цифровыми регистраторами // Автометрия. 2005. 41, № 5. С. 51–57.
7. **Пономарев В. А., Пономарева О. В., Пономарев А. В.** Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье // Автометрия. 2014. 50, № 2. С. 31–38.
8. **Панин С. В., Бяков А. В., Гренке В. В. и др.** Разработка и испытание лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии // Автометрия. 2011. 47, № 1. С. 115–128.
9. **Муравьева О. В., Муравьев В. В., Кокорина Е. Н. и др.** Оптимизация систем подмагничивания проходных электромагнитно-акустических преобразователей объёмных волн для неразрушающего контроля пруткового проката // Датчики и системы. 2013. № 2. С. 2–9.

10. **Чугуй Ю. В.** Трёхмерные оптико-электронные измерительные системы и лазерные технологии для научных и промышленных применений // Автометрия. 2015. **51**, № 4. С. 76–91.
11. **Муравьев В. В., Муравьева О. В., Кокорина Е. Н.** Акустическая структуроскопия и дефектоскопия прутков из стали 60С2А при производстве пружин с наноразмерной структурой // Изв. вузов. Черная металлургия. 2013. **56**, № 4. С. 66–70.
12. **Муравьева О. В., Муравьев В. В., Габбасова М. А.** Вероятностно-статистические параметры сигнала при контроле цилиндрических объектов зеркально-теневым методом многократных отражений // Дефектоскопия. 2015. № 12. С. 11–19.

Поступила в редакцию 14 января 2016 г.
