

УДК 620.179.16

О. В. Недзвецкая, доктор технических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

ФИЛЬТРАЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОГРАММ ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОБРАЩЕНИЯ СВЕРТКИ СИГНАЛОВ

Представлены результаты использования метода обращения свертки сигнала для фильтрации акустических дефектограмм протяженных объектов. Показаны возможности существенного улучшения параметров контроля: разрешающей способности, мертвой зоны, предельной чувствительности метода, а также адекватной оценки размеров протяженных дефектов по амплитуде эхо-сигналов.

Введение

Как известно, ряд основных параметров ультразвукового (УЗ) эхо-метода и аппаратуры контроля определяются длительностью реверберационно-шумовой характеристики акустического преобразователя. По ГОСТ 23667-85 к ним относятся: условная разрешающая способность по дальности, мертвая зона, предельная чувствительность по эффективному параметру отражателя. Стремление разработчиков УЗ дефектоскопической аппаратуры к постоянному совершенствованию ее параметров вызывает необходимость создания менее добротных (высокодемпфированных) пьезопреобразователей, способных излучать короткий акустический импульс. В последние годы в связи с применением в УЗ-дефектоскопах микропроцессорной техники появились дополнительные возможности построения алгоритмов цифровой обработки сигналов с целью улучшения параметров аппаратуры. Один из наиболее перспективных методов обработки основан на использовании метода обращения свертки эхо-сигналов и позволяет уменьшить влияние реверберационно-шумовой характеристики преобразователя посредством исключения из результирующего сигнала интерференционных составляющих от близко расположенных отражателей. В частности, в работе [1] показаны возможности существенного улучшения лучевой разрешающей способности УЗ эхо-метода контроля в области высоких частот с использованием метода обращения свертки.

Разработанная на кафедре «Приборы и методы контроля качества» Ижевского государственного технического университета новая технология акустического контроля протяженных объектов [2] реализована с использованием низкочастотного ультразвукового диапазона (десятки кГц), что приводит к существенному ограничению указанных параметров контроля. В статье представлены возможности использования метода обращения свертки сигнала при фильтрации дефектограмм протяженных объектов. В разработке программного обеспечения и в исследованиях принимали участие студенты ИжГТУ В. В. Бывальцев и А. Л. Гродецкий в рамках УНИР и дипломного проектирования.

Алгоритм обращения свертки сигналов и исследование основных параметров фильтрации при его реализации

Введем понятие функции отклика точечного источника $f(t)$ (ФОТИ). Теоретически это эхо-сигнал от бесконечно малого отражателя. При прозвучивании объекта

эхо-методом реальный эхо-сигнал $F(L)$, отраженный от несплошностей (неоднородностей) материала может быть представлен как результат сложения сигналов ФОТИ со сдвигом, характеризующим глубину залегания отражателя L . При этом амплитуда сигнала пропорциональна суммарному коэффициенту отражения на данной глубине. Подлежащую восстановлению истинную функцию распределения отражателей по дальности обозначим через $\rho(l)$. Тогда выражение для эхо-сигнала может быть представлено с помощью интеграла свертки [1]:

$$F(L) = \int_l f(L-l)\rho(l)dl. \quad (1)$$

Согласно формуле (1) фильтрация с использованием алгоритма свертки состоит в запоминании функции ФОТИ в исследуемом образце и последующей свертке обращенного спектра ФОТИ со спектром обрабатываемого сигнала $F(L)$. Процедура обращения свертки $F(L)$ или процедура восстановления функции $\rho(l)$ состоит из следующих этапов [1].

1. Получение ФОТИ $f(l)$. В практических применениях можно использовать эхо-сигнал от какого-либо малого отражателя конечных размеров, малых по сравнению с длиной излучаемой волны λ . Для получения ФОТИ в УЗ-контроле вполне подходит плоскодонный отражатель [3], а при акустическом контроле протяженных объектов – сегментный паз [4].

2. Расчет комплексного спектра ФОТИ $f(j\omega)$ с использованием прямого преобразования Фурье, где ω – пространственная круговая частота (рад/м).

3. Расчет комплексного спектра обращаемого фильтра $h(j\omega)$ и его фильтрация:

$$h(j\omega) = \frac{\exp(-j\omega l_3)}{f(j\omega)} \mathfrak{R}(j\omega), \quad (2)$$

где $\exp(-j\omega l_3)$ – временной сдвиг, эквивалентный задержке сигнала во времени l_3 ; $\mathfrak{R}(l)$ – минимальный отклик на сигнал ФОТИ.

4. Расчет функции $h(L)$ посредством обратного преобразования Фурье спектра функции $h(j\omega)$.

5. Получение эхо-сигналов $F(L)$ при прозвучивании изделия.

6. Восстановление истинной функции $\rho(l)$ посредством интеграла свертки:

$$\rho(l) = \int_L h(l-L)F(L)dL. \quad (3)$$

В качестве примера на рис. 1 представлены основные этапы численной реализации алгоритма свертки на примере искусственно синтезированного сигнала $F(L)$ с одиночным отражателем, двумя отражателями и распределенным отражателем.

При реализации алгоритма свертки имеется ряд проблем, касающихся выбора оптимальных параметров в части диапазона и уровня частотной фильтрации обращаемого фильтра и длительности минимального отклика $\mathfrak{R}(l)$. Рассмотрим их влияние на эффективность фильтрации сигнала методом свертки.

Известно, что спектр ФОТИ $f(j\omega)$ в реальных УЗ-дефектоскопах ограничен и сконцентрирован в некотором диапазоне частот $\omega_j \dots \omega_{j'}$, за пределами которого резко уменьшается (рис. 1). Синтез функции $h(j\omega)$ (формула (2)) приводит к тому,

что за пределами диапазона частот $\omega_j \dots \omega_{j_4}$ ее модуль будет стремиться к бесконечности. Кроме того истинный сигнал $F(L)$ всегда содержит небольшую шумовую составляющую, спектральные составляющие которой, выходящие за пределы частотного диапазона $\omega_j \dots \omega_{j_4}$, будут также несоразмерно усиливаться, что существенно ухудшает качество восстанавливаемого сигнала.

Рассмотрим, как влияет уровень частотной фильтрации на качество восстановленного сигнала $\rho(l)$ с точки зрения соотношения амплитуды полезного сигнала и уровня шума. Под уровнем частотной фильтрации A понимается процент от максимума спектра ФОТИ, с уровнем ниже которого частоты обнуляются. На рис. 2 приведены примеры сигналов $\rho(l)$ при различных уровнях фильтрации. С увеличением уровня фильтрации наблюдается рост отношения полезный сигнал/шум за счет снижения уровня шума на фоне результирующего сигнала. Результаты обобщающих исследований приведены на рис. 3, в соответствии с которым наиболее эффективным уровнем фильтрации является значение $A = 0,7-0,8$ % от максимума амплитуды спектра ФОТИ, когда амплитуда сигнала достигает своего максимального значения при минимальном уровне шумов.

При выборе функции $\mathfrak{R}(l)$ – минимального отклика на сигнал ФОТИ – следует руководствоваться условием короткого быстро затухающего сигнала (например, короткого прямоугольного импульса, треугольного импульса, гауссовской кривой) [1]. Единственное ограничение здесь – это условие одинакового частотного диапазона сигналов $f(l)$ и $\mathfrak{R}(l)$. Следует иметь в виду, что увеличение длительности сигнала $\mathfrak{R}(l)$ ведет к снижению разрешающей способности, точности определения координат дефектов и их количества. Исследования показывают, что оптимальным является минимальный отклик фильтра $\mathfrak{R}(l)$ длительностью не более 0,1–1 % от общего количества точек дискретизации.

Фильтрация экспериментальных дефектограмм протяженных объектов

Блок-схема экспериментальной установки

Блок-схема экспериментальной установки для получения реальных дефектограмм протяженных объектов $F(L)$ представлена на рис. 4. Генератор блока ГПУ вырабатывает электрический импульс, подаваемый на излучатель блока ЭАП, что приводит к возникновению акустического импульса, распространяющегося вдоль прутка со скоростью C_{s0} продольной стержневой моды ($C_{s0} = 5200$ м/с). Акустический импульс, отраженный от дефектов прутка типа нарушения сплошности, а также от его противоположного торца, принимается на том же торце приемником блока ЭАП и в виде электрического сигнала поступает на предусилитель блока ГПУ. Блок УКП обеспечивает управление, коммутацию и питание всех блоков системы. Электрический сигнал с выхода блока УКП поступает на вход аналого-цифрового преобразователя АЦП (12 разрядов, тактовая частота 40 МГц), и далее – в память персонального компьютера ПК. Программное обеспечение позволяет сохранять дефектограммы в численном виде с целью дальнейшей обработки. В качестве протяженных объектов для исследований использовались стальные прутки длиной 1500 мм и 2500 мм диаметрами $\varnothing 11,2$ мм и $\varnothing 19$ мм соответственно.

Оценка разрешающей способности по дальности

Разрешающая способность по дальности δ_r (лучевая разрешающая способность) – это минимальное расстояние между двумя одинаковыми дефектами, рас-

положенными в направлении акустической оси преобразователя, при котором эти дефекты регистрируются отдельно [3]. Актуальность решения задачи улучшения разрешающей способности объясняется существованием жестких норм контроля, действующих в различных отраслях. Именно правильно определенное количество дефектов, их размеры, местоположение и тип определяют возможность эксплуатации и ресурс работы объекта.

Достижение высокой лучевой разрешающей способности ограничивается теми же факторами, что и достижение минимальной мертвой зоны. Сигнал от дефекта, расположенного ближе к преобразователю, действует подобно зондирующему импульсу и мешает выявлению дефекта, импульс от которого приходит позднее. Влияние переходных процессов в преобразователе в этом случае гораздо меньше, поскольку амплитуда сигнала, вызывающая эти процессы, в сотни раз меньше зондирующего импульса, поэтому лучевая разрешающая способность зависит в основном от длительности импульса преобразователя и составляет $\delta_r = (1-2)\lambda$, где λ – длина волны, если импульс состоит из двух-четырех периодов колебаний [3].

Ввиду того что разработанная технология акустического контроля протяженных объектов реализуется на низких частотах (длина волны $\lambda = 200$ мм), разрешающая способность метода не высока: $\delta_r = \lambda \dots \lambda / 2 = 100-200$ мм, несмотря на достаточно короткий импульс блока ЭАП. Рассмотрим возможности улучшения разрешающей способности метода при фильтрации с использованием метода обращения свертки сигналов.

При исследовании разрешающей способности в качестве искусственных отражателей использовались магниты (шайба диаметром 10 мм, толщиной 7 мм, ниодим-железо-бор), изолированные от прямого соприкосновения с прутком изоляцией с целью устранения собственных резонансных частот магнита. Использование магнитов в качестве искусственных отражателей возможно, так как последние, подобно дефектам прутка, меняют его механический импеданс [5]. Это позволяет оперативно и наглядно оценить возможности улучшения параметров разрешающей способности с использованием метода обращения свертки сигналов посредством изменения количества отражателей и расстояния между ними без изготовления большого количества образцов с дефектами. В качестве экспериментального сигнала ФОТИ использовался эхо-импульс от одиночного магнита.

На рис. 5 представлен исходный сигнал $F(L)$ и восстановленный в ходе фильтрации сигнал $\rho(L)$ для различных расстояний между отражателями и их различным количестве. Видно, что неразличимые отражатели в исходном сигнале успешно разделяются после фильтрации. Расстояние между максимумами сигнала соответствует расстоянию между искусственными отражателями. Согласно проведенным исследованиям минимальное расстояние, при котором расположенные рядом дефекты, выявляются отдельно (различаются по амплитуде не менее чем на 6 дБ), составляет 20 мм, то есть разрешающая способность после фильтрации улучшилась в 5–10 раз и составила $\delta_r = \lambda / 10$.

Оценка чувствительности

Чувствительность метода дефектоскопии показывает его возможность обнаруживать малые дефекты на уровне шумов. Количественно ее определяют предельной чувствительностью по эффективному параметру отражателя S_n . Для эхо-метода это минимальная площадь искусственного дефекта, который уверенно обнаруживается при контроле [3]. Предельная чувствительность эхо-метода ограничивается

двумя главными факторами: чувствительностью аппаратуры (электронные шумы), затуханием и уровнем структурных (акустических) помех. Современные схемотехнические решения, как правило, позволяют реализовать малошумящий электронный тракт, поэтому структурные помехи и затухание являются основными, постоянно действующими факторами, ограничивающими чувствительность контроля. Структурные помехи и затухание связаны с рассеянием ультразвука на структурных неоднородностях, зернах материала. Импульсы, образовавшиеся в результате рассеяния на отдельных неоднородностях, в зависимости от случайного соотношения их фаз могут взаимно усиливать или ослаблять друг друга. В результате структурные помехи имеют вид отдельных близко расположенных пиков («травя»), на фоне которых затруднено наблюдение полезного сигнала.

При использовании новой технологии в области низких частот потери на затухание и рассеяние на границах зерен пренебрежимо малы. При этом чувствительность метода ограничивается акустическим шумом прутка, обусловленным рассеянием на неровностях, мелких волосовинах поверхности тела прутка, а также на внутренних включениях, ликвациях, флокенах и др. [5]. Экспериментальные исследования показывают, что средний уровень акустических шумов в прутках составляет $\sim 0,1$ % от амплитуды эхо-импульса от противоположного торца прутка [5].

Уровень акустического шума может быть уменьшен при фильтрации методом свертки за счет устранения интерференционных составляющих от отдельных структурных неоднородностей. На рис. 6 представлен результат обработки дефектограммы прутка диаметром $\varnothing 19$ мм с уровнем шума в 0,16 %. В качестве сигнала ФОТИ использован эхо-импульс от сегментного паза протяженностью 20 мм, стрелой 0,6 мм, перпендикулярного оси прутка. После фильтрации уровень структурных помех уменьшился до 0,096 %, (более чем в 1,5 раза), что говорит о возможности существенного улучшения предельной чувствительности метода при контроле протяженных объектов.

Оценка мертвой зоны

Минимальная глубина прозвучивания, или мертвая зона – минимальное расстояние от поверхности ввода до дефекта, надежно выявляемого при контроле [3]. Считается, что мертвая зона при контроле по совмещенной схеме ограничивается длительностью τ_z зондирующего импульса и длительностью τ_p реверберационных шумов преобразователя: $H_f = C(\tau_z + \tau_p)/2$, где C – скорость УЗ-волны. Для сокращения мертвой зоны можно повышать частоту ультразвуковых колебаний и применять широкополосные (высокодемпфированные) преобразователи, хотя чувствительность последних ниже.

При контроле протяженных объектов мертвая зона метода довольно большая и составляет 500–1000 мм в зависимости от степени демпфирования блока ЭАП и качества акустического контакта с торцом объекта.

На рис. 7 представлена область зондирующего импульса на уровне 0,5 % от амплитуды донного эхо-импульса, по которому рассчитывается величина мертвой зоны до и после фильтрации. Видно, что протяженность мертвой зоны, составляющая до фильтрации около 520 мм, после фильтрации уменьшилась более чем на 30 % и составила 350 мм.

Следует отметить, что вблизи противоположной поверхности изделия имеется также неконтролируемая мертвая зона на фоне интенсивного донного сигнала, величина которой существенно меньше (около 150 мм). Исследования показывают,

что при фильтрации удастся также добиться незначительного уменьшения мертвой зоны со стороны донного импульса примерно на 5 %.

Фильтрация дефектограмм прутков с естественными дефектами

Многие естественные дефекты пруткового проката могут рассматриваться как точечные отражатели с протяженностью малой по сравнению с длиной волны – вмятины, раковины, язвины от окалины, механические повреждения, расслоения, плены, для которых наблюдается прямо пропорциональная зависимость амплитуды отраженного сигнала от размера дефекта [5].

Наряду с ними ряд дефектов являются протяженными – трещины, волосовины, закаты, утяжины, протиры, задиры и др., имеющие в основном неправильную геометрию. Основной механизм взаимодействия акустических волн с протяженными дефектами прутков состоит в интерференции волн, отраженных от отдельных участков дефекта. Вследствие этого суммарный эхо-сигнал от протяженного дефекта не всегда адекватно описывает его размеры.

В качестве примера на рис. 8 представлена акустическая дефектограмма прутка диаметром 19 мм с искусственным сосредоточенным дефектом в виде сегментного паза, перпендикулярного оси прутка, протяженностью 20 мм, стрелой 0,6 мм и с естественным протяженным дефектом типа задира протяженностью 150 мм и неоднородным перепадом по диаметру от 0,5 мм до 0,8 мм. Видно, что несмотря на больший размер естественного дефекта, амплитуда эхо-сигнала от последнего ниже, чем от искусственного сосредоточенного дефекта почти в 2 раза. После фильтрации наблюдается объективная информация об амплитудах эхо-сигналов от дефектов, характеризующих их размеры, когда амплитуда эхо-сигнала от большего отражателя превышает амплитуду эхо-сигнала от меньшего примерно в 1,5 раза.

Заключение

Использование метода обращения свертки сигналов особенно эффективно при реализации низкочастотных методов акустического контроля, а также при использовании низкодempфированных (резонансных) преобразователей.

При реализации алгоритма свертки следует руководствоваться условием максимального соотношения сигнал/шум при выборе уровня частотной фильтрации, а также минимального значения длительности отклика фильтра.

Фильтрация акустических дефектограмм прутков с использованием метода обращения свертки сигналов позволяет существенно улучшить параметры метода контроля:

- улучшить разрешающую способность в 5–10 раз;
- уменьшить уровень структурных помех в 1,5 раза, а следовательно, повысить предельную чувствительность метода;
- сократить мертвую зону более чем на 30 %;
- адекватно оценивать размеры протяженных дефектов по амплитуде эхо-сигналов от них.

Возможно использование алгоритма свертки для фильтрации дефектограмм других протяженных объектов (труб, насосных штанг), новая технология контроля которых успешно реализуется на практике [3].

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (грант МД-1668.2005.58).

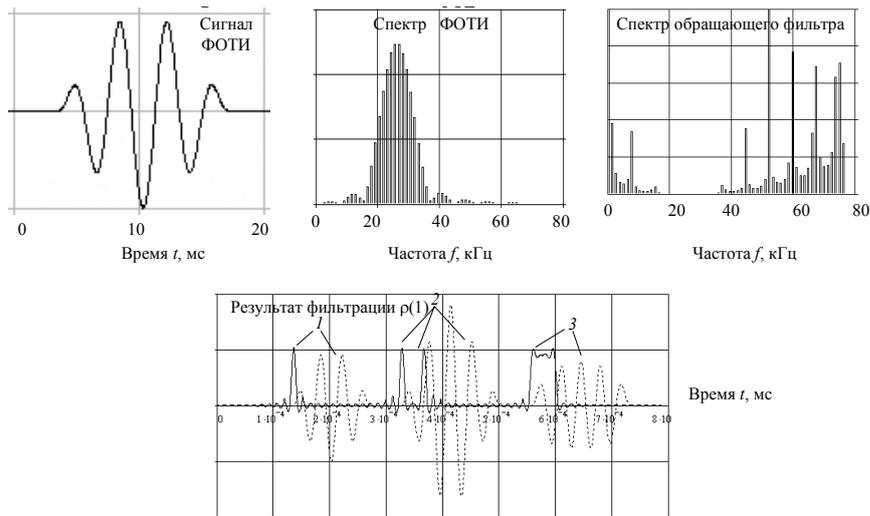


Рис. 1. Пример реализации алгоритма свертки:
 1 – ФОТИ; 2 – два близко расположенных отражателя; 3 – распределенный отрагатель }
 (--- исходный сигнал $F(L)$; — сигнал после фильтрации $\rho(l)$)

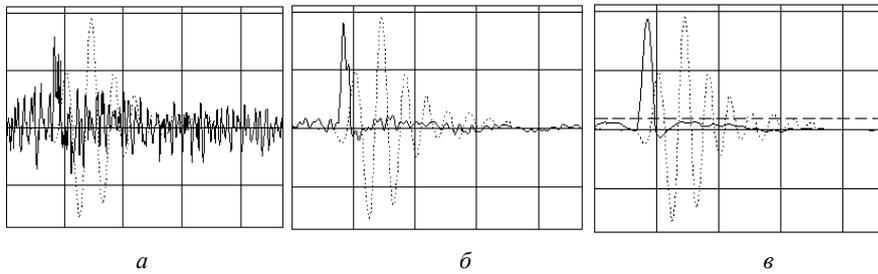


Рис. 2. Результаты фильтрации при различных уровнях A :
 а – 0%; б – 0,3%; в – 0,7%: (--- исходный сигнал $F(L)$; — сигнал после фильтрации $\rho(l)$)

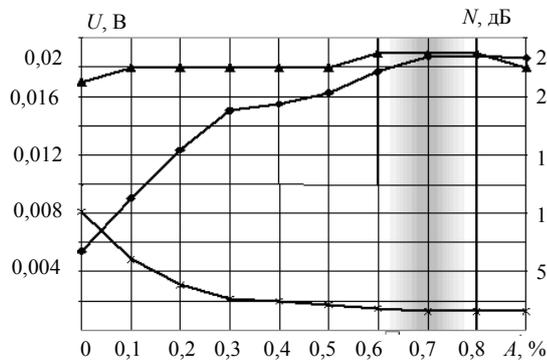


Рис. 3. Зависимость амплитуды полезного сигнала, $B(\blacktriangle)$, амплитуды шума, $B(\times)$, отношения полезный сигнал/шум, дБ (\blacksquare) от уровня фильтрации A , %

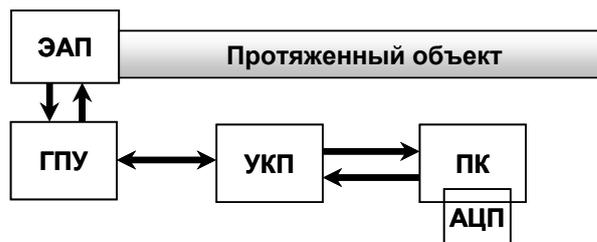


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки: ЭАП – электромагнито-акустический преобразователь; ГПУ – блок генератора и предварительного усилителя; УКП – блок управления, коммутации, питания и средств сопряжения с ПК; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПК – персональный компьютер

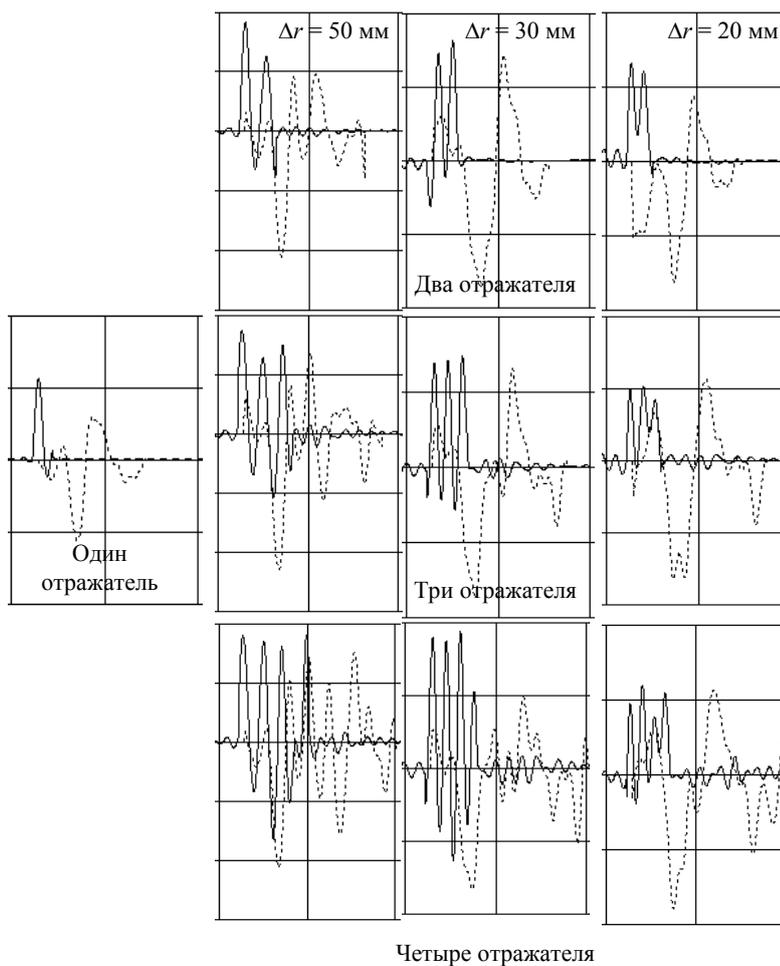


Рис. 5. Результат фильтрации $\rho(l)$ эхо-сигналов для различного количества отражателей на различных расстояниях Δr (--- исходный сигнал $F(L)$; — сигнал после фильтрации $\rho(l)$)

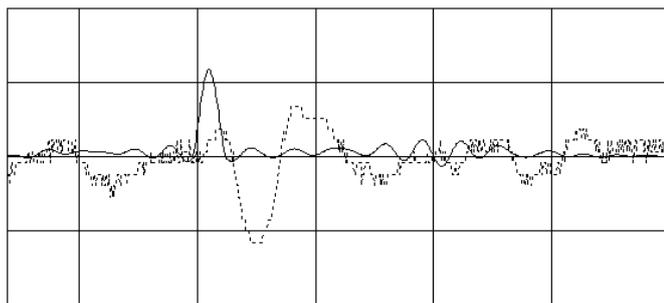


Рис. 6. Результаты фильтрации структурных шумов прутка:
(- - - исходный сигнал $F(L)$; — сигнал после фильтрации $\rho(l)$)

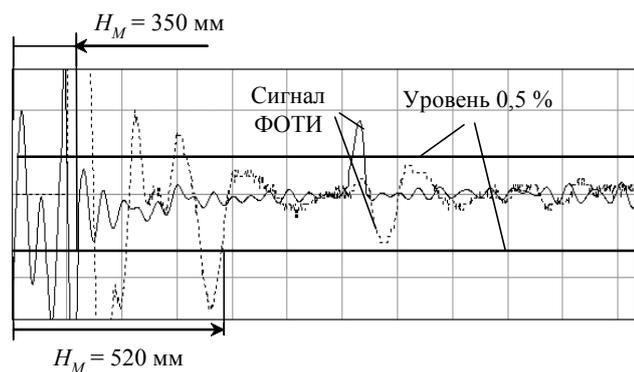


Рис. 7. Результат фильтрации эхо-сигналов вблизи мертвой зоны зондирующего импульса
(- - - исходный сигнал $F(L)$; — сигнал после фильтрации $\rho(l)$)



Рис. 8. Результаты фильтрации эхо-сигналов от искусственного и естественного дефектов
(- - - исходный сигнал $F(L)$; — сигнал после фильтрации $\rho(l)$)

Список литературы

1. Бархатов, В. А. Восстановление распределения отражателей по дальности. Обращение свертки эхосигналов // Дефектоскопия. – 2004. – № 6. – С. 10–17.
2. Буденков, Г. А. Новая прогрессивная технология дефектоскопии протяженных объектов металлургической и нефтедобывающей промышленности / Г. А. Буденков, О. В. Нездвецкая, Т. Н. Лебедева // Тяжелое машиностроение. – 2004. – № 11. – С. 18–23.

3. 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.
4. Буденков, Г. А. Стандартные образцы для акустической дефектоскопии прутков из инструментальной стали малых диаметров / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая, Т. Н. Лебедева // Дефектоскопия. – 2003. – № 11. – С. 25–29.
5. Буденков, Г. А. Основные закономерности взаимодействия волн Похгаммера с дефектами / Г. А. Буденков, О. В. Недзвецкая // Дефектоскопия. – 2004. – № 2. – С. 33–46.

УДК 336.711+336.77

А. Д. Воловник, кандидат экономических наук
ОАО «Фондсервисбанк»;

В. А. Тенев, доктор физико-математических наук, профессор
Ижевский государственный технический университет

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО КАПИТАЛА КРЕДИТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

На основе модели экономического роста сформулирована задача производства банковского продукта с учетом интеллектуального капитала. Предложена методика оценки величины интеллектуального капитала по результатам банковской отчетности.

Постановка задачи и уравнения

Интеллектуальный капитал основан на совокупности знаний и умений сотрудников банка. Реализация этих знаний в практической деятельности приводит к некоторому экономическому эффекту, являющемуся денежным эквивалентом интеллектуального капитала. Получение экономического эффекта, определяемого существующим уровнем знаний, происходит в результате управления системой – банком, который сам по себе также является составной частью интеллектуального капитала.

Специфика производства банковского продукта состоит в том, что в этом процессе не создаются какие-либо материальные ценности. Банковский продукт является комплексом услуг по финансовым операциям в результате деятельности и может представлять банковский счет, депозит, вексель, чек, процент по вкладу или за кредит. Особенность банковского продукта обусловлена основными его чертами: абстрактной или документарной формой, ограниченностью во времени, договорной формой, непостоянством качества услуг, неотделимостью услуг от квалификации людей. Если в обычном товарном производстве первостепенное значение имеют объемы производственных фондов (средства производства), то в производстве банковского продукта на первый план выступает человеческий капитал.

Воспользуемся для описания производственного процесса, в том числе и для процесса производства банковского продукта, аппаратом производственных функций. При использовании двухфакторной функции $F(K, L)$, зависящей от объема производственных фондов K и объема трудовых ресурсов L , существует понятие о предельной норме замены трудовых ресурсов основными фондами: