



К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ДЕФЕКТОСКОПА

В. И. ГОРДЕЛИЙ, В. Е. ЧАБАНОВ

Приведено математическое моделирование генераторов, применяемых в дефектоскопах, и анализируются их сравнительные качества. Показан характер воздействия электроакустического тракта и пьезопреобразователей на временные и спектральные характеристики излучаемых акустических сигналов.

Mathematical simulation of generators, used in flaw detection, is given, and their comparative qualities are analyzed. Shown is the nature of the impact of electroacoustic circuit and piezotransducers on the time and spectral characteristics of the emitted acoustic signals.

При анализе работы ультразвуковых (УЗ) дефектоскопов основное внимание уделяется трем его узлам, а именно: электрическому тракту возбуждения пьезопреобразователя, самому пьезопреобразователю, а также тракту усиления и обработки информации. Причем, центральным и наиболее ответственным узлом по праву считается пьезопреобразователь, а все другие узлы в конечном итоге являются вспомогательными и служат для его возбуждения и приема, анализа получаемой с его помощью информации. Вместе с тем результат работы дефектоскопа, т. е. его чувствительность, разрешающая способность, объекты контроля и получаемая информация формируется всеми тремя указанными узлами. В настоящей работе рассмотрим первые из этих факторов.

Исследование тракта возбуждения дефектоскопа. Генераторы электрических импульсных сигналов, применяемых в УЗ дефектоскопах, бывают самых различных видов. Рассмотрим их сравнительные достоинства, недостатки, и на этом фоне оценим качества рассматриваемых приборов.

Одним из наиболее распространенных источников электрических сигналов дефектоскопов является генератор ударного возбуждения. Им формируется резко меняющаяся амплитуда напряжения, а все частотные свойства акустического сигнала устанавливаются параметрами самих преобразователей. Характеристики таких сигналов можно описать функцией:

$$F_1(\tau) = 1 - (1 - e^{-\eta(\tau - \tau_0)})U(\tau - \tau_0), \quad (1)$$

где τ_0 — момент срыва электрического сигнала; η — показатель его ослабления; $U(\tau - \tau_0)$ — единичная ступенчатая функция Хевисайда.

Причем, регулированием показателя добиваются увеличения спектральной плотности указанного импульса. Временные и спектральные характеристики таких сигналов показаны на рис. 1.

Несомненным достоинством таких генераторов являлась их простота. Но повышенная зависимость от электроакустического тракта делает такие дефектоскопы неустойчивыми к параметрам применяемых УЗ преобразователей и объектов контроля. К тому же их КПД в связи с высокой интенсивностью неиспользуемых низкочастотных сигналов оказывается чрезвычайно низким.

В других типах генераторов формируются обычные монохроматические сигналы, амплитуды которых модулируются по различным законам. В частности, один из таких типовых импульсов можно описать следующей функцией:

$$F(t) = \left[\Phi(\tau_0 - t) \frac{(1 - e^{-\eta_1 t})}{(1 - e^{-\eta_1 \tau_0})} + (1 - \Phi(\tau_0 - t)) e^{-\eta(t - \tau_0)} \right] \times \cos(\omega_0 t), \quad (2)$$

в которой параметр η_1 определяет длительность возрастающей части импульсного сигнала; η — убывающей; τ_0 — его временную ширину; ω_0 — круговую рабочую частоту. Типовые характеристики таких сигналов представлены на рис. 2.

Может применяться также и иная форма огибающих импульсов. Вместе с тем преимуществом таких генераторов является сравнительно простой способ управления рабочей частотой и спектральной шириной излучаемых сигналов, отсутствие в них низкочастотной составляющей. Однако большая длительность таких импульсов существенно понижает разрешающую способность контроля.

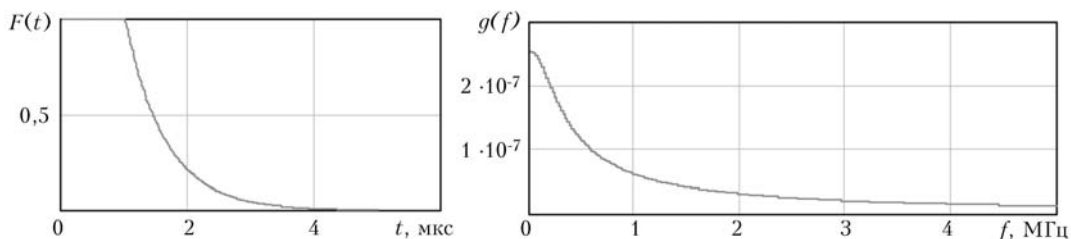


Рис. 1. Временные $F(t)$ и спектральные $g(f)$ характеристики типовых сигналов генератора ударного возбуждения преобразователей

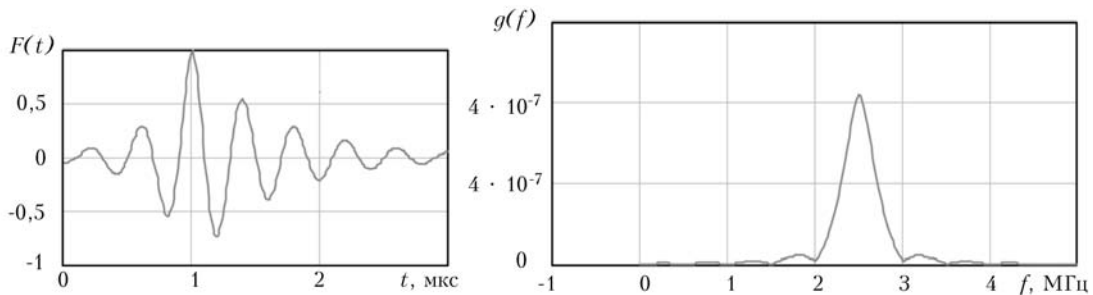


Рис. 2. Типовая временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики сигналов, описанных выражением (2)

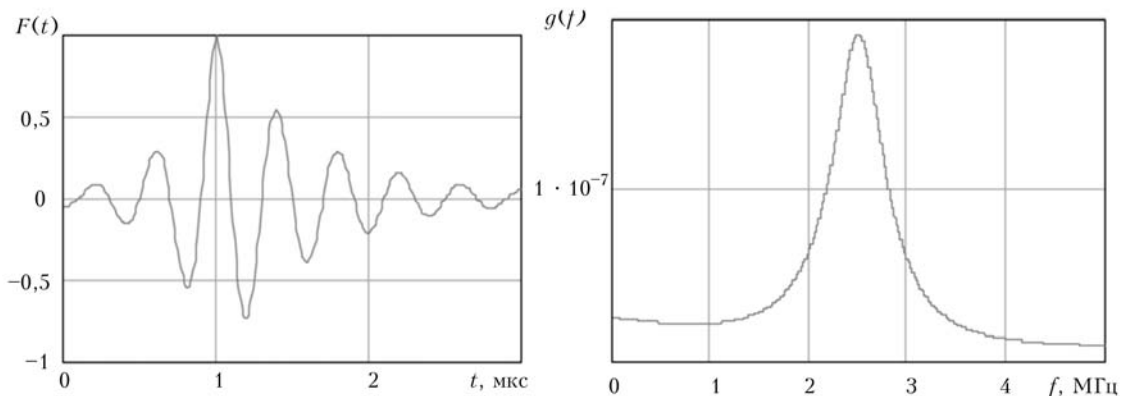


Рис. 3. Временные $F(t)$ и спектральные $g(f)$ характеристики типовых сигналов, часто применяемых в дефектоскопах

Другая модификация указанных импульсных сигналов может быть описана формулой

$$f(t) = \cos(\omega_0 t) [\exp(\eta_1 t)U(-t) + \exp(-\eta t)U(t)]. \quad (3)$$

Их временная и спектральная формы показана на рис. 3.

У таких генераторов достигается малая длительность импульсного сигнала и сравнительно широкая спектральная ширина, но они оказываются зависящими как от генератора, так и от преобразователя и всего электроакустического тракта.

В электрическом тракте возбуждения дефектоскопа может быть также предусмотрено периодическое воздействие электрического генератора, излучающего набор прямоугольных импульсных сигналов, амплитуды которых изменяются по определенному закону, а длительности и скважность устанавливаются рабочей частотой преобразователя. Таковым, в частности, является дефектоскоп ДЮ-562.

Импульсные сигналы указанного генератора можно описать следующей функцией:

$$F(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} E(n)f_n(\tau). \quad (4)$$

$$\text{Здесь } f_n(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{при } 2n\tau_0 < \tau < 2n\tau_0 + \tau_0, \\ 0 & \text{в других случаях;} \end{cases}$$

$E(n)$ — функция, описывающая закон изменения амплитуды возбуждающего преобразователь электрического сигнала; τ_0 — длительность каждого прямоугольного импульса или их скважности.

В частности, в исследуемом дефектоскопе функция $E(n)$ представляет собой вероятностную функцию Гаусса. Она может быть описана выражением

$$E(n) = \exp\left\{-\frac{[-n + (N + 1)/2]^2}{B^2}\right\},$$

в котором параметр B^2 — дисперсия; N — число прямоугольных импульсов в сигнале (рис. 4).

Как и раньше, временные функции здесь нормированы, время отсчитывается в секундах. Спектральные характеристики указанных функций описываются выражением и приведены на рис. 5:

$$f_1(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{n=0}^{N-1} E(n) e^{i\omega(2n+1/2)\tau_0} \frac{\sin(\omega\tau_0/2)}{\omega}. \quad (5)$$

Здесь частота измеряется в мегагерцах. Из анализа полученных характеристик видно, что чем больше импульсов в сигнале, т. е. чем он длиннее, тем меньшим оказывается спектральный фон в неработающей части частот, более добротной является его спектральная характеристика. Преимуществом таких генераторов является стабильность излучаемых им сигналов, слабая зависимость формируемых с его помощью акустических импульсов от частотных параметров преобразователей. Недостатком таких сигналов служит их большая длительность и наличие мощных низкочастотных сигналов, которые, если их не подавить соответствующими фильтрами, могут создавать помехи при неразрушающем контроле.

Ниже представлены характеристики при использовании другого, асимметричного закона на-

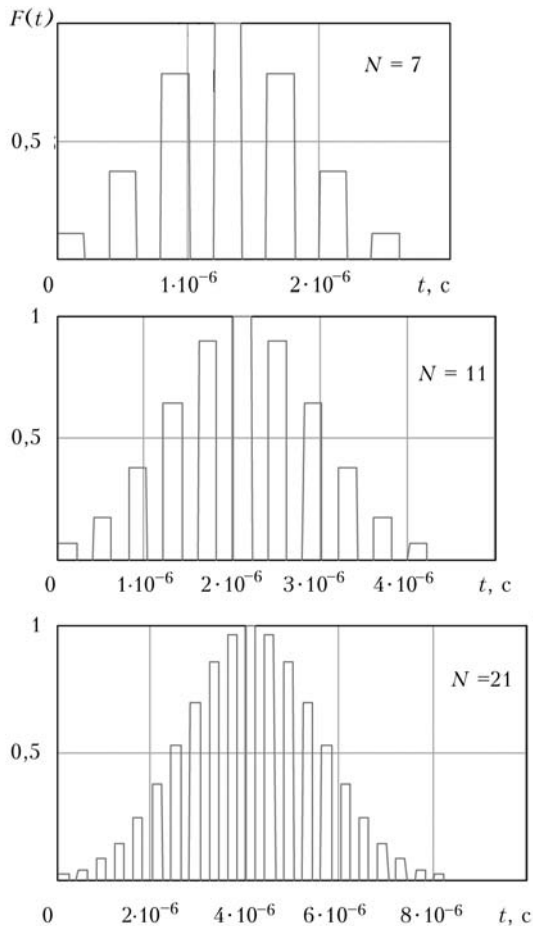


Рис. 4. Временные формы электрического импульсного сигнала, применяемого в дефектоскопе ДГО-562 для возбуждения пьезопреобразователей при различном числе импульсов N

растания и убывания амплитуд прямоугольных сигналов в импульсе, описываемого функцией:

$$E(n) = \left\{ \frac{e^{\eta_1 n}}{e^{\eta_1 (\lceil N/3 \rceil - n)}} U(\lceil N/3 \rceil - n) + \frac{e^{-\eta n}}{e^{-\eta (\lceil N/3 \rceil - n)}} U(n - \lceil N/3 \rceil) \right\}. \quad (6)$$

Здесь функция $\lceil Z \rceil$ обозначает целую часть числа Z , меньшую ее величины; $U(Z)$ — единичная ступенчатая функция Хевисайда; η_1 и μ — экспоненциальные множители, характеризующие нарастающую и убывающую части импульсного сигнала (рис. 6).

Из результата следует, что внесение асимметрии не оказывает существенного влияния на характеристики используемых для возбуждения преобразователей импульсных сигналов, но делает их менее длительными.

В случае, если низкочастотная составляющая импульсных сигналов отсекается соответствующими высокочастотными фильтрами, то временные и спектральные их характеристики имеют вид, представленный на рис. 7, 8.

Из сравнения приведенных рисунков видно, что для сигнала симметричного вида (рис. 4) применение высокочастотных фильтров существенно

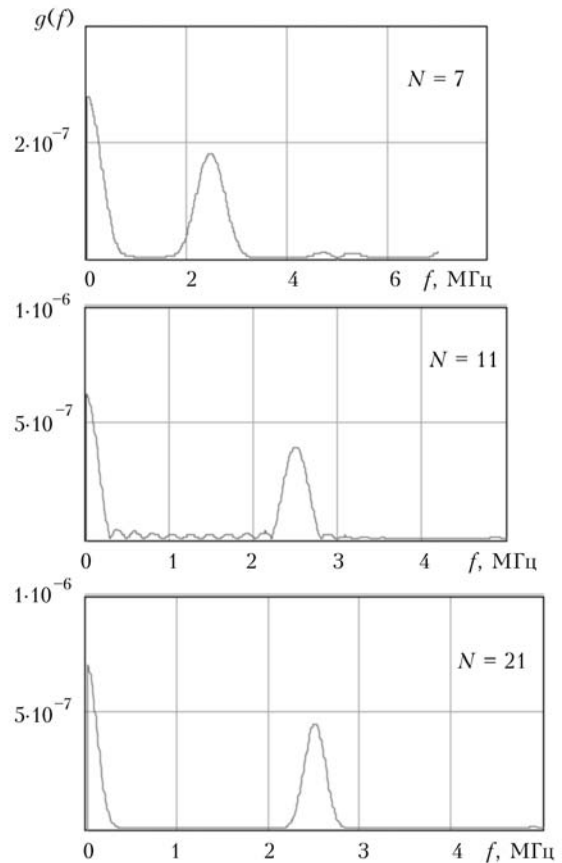


Рис. 5. Спектральные характеристики сигналов, представленных на рис. 4

приближает форму импульсного сигнала к модулированной синусоиде уже начиная с граничной частоты, равной $0,25\omega_0$ и не влияет на нее практически до резонансной частоты. Для асимметричного сигнала этого не происходит даже при частоте среза фильтра, равной $0,1\omega_0$. Однако такой вывод в полной мере справедлив только для идеального фильтра, который сам по себе обладает частотным спектром. Именно он и искажает форму импульсов на рис. 8. Вместе с тем у реальных фильтров этот эффект окажется в существенной мере сглаженным. И, тем не менее, данное обстоятельство позволяет утверждать, что применение сигналов, показанных на рис. 4, с ограничивающими частоту фильтрами весьма перспективно.

Влияние электроакустического тракта дефектоскопа на характеристики сигналов, излучаемых пьезопреобразователями. Как известно, работа пьезопластины преобразователя определяется не только особенностями генератора, свойствами соединения и системы электрического согласования их между собой, но и параметрами самой пластины, демпфера, протектора, импедансом контролируемого изделия. Детальный анализ воздействия всех этих факторов на зависимость между электрическими сигналами генератора и акустическими импульсами является достаточно сложной задачей. Однако для получения основных закономерностей здесь можно применять приближенные формулы. В частности, таковыми могут быть выражения, приведенные в работе [1]. Согласно

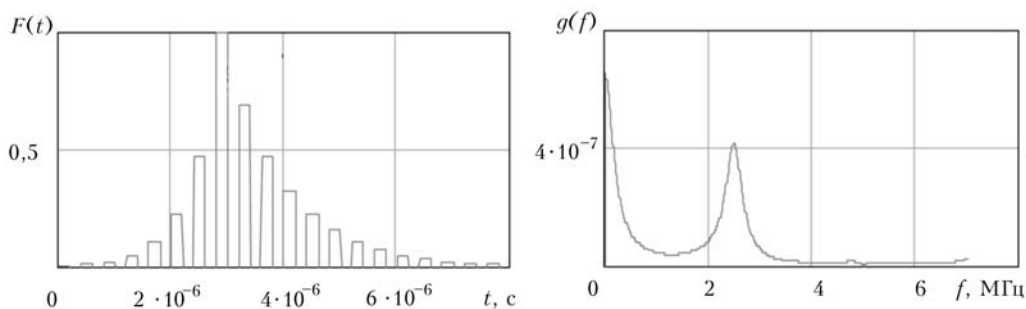


Рис. 6. Временная форма $F(t)$ и спектральная характеристика $g(f)$ асимметричного импульсного сигнала

данной монографии, комплексное сопротивление пьезопреобразователя может быть описано выражением:

$$Z_n = Z_c + Z_p = -\frac{1}{i\omega C} \left[1 - \frac{\beta^2 \operatorname{tg}(\pi\omega/2\omega_0)}{\pi\omega/2\omega_0} \right]. \quad (7)$$

Здесь $C = \epsilon_0 \epsilon S/h$, где $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ — диэлектрическая постоянная пьезопластины площадью S и толщиной h ; $\omega_0 = 2\pi c/h$, c — скорость звука; параметр $\beta = \sqrt{e^2/(\rho c^2 \epsilon \epsilon_0)}$ — коэффициент электромеханической связи; e — пьезоконстанта. В частности, для пьезокерамики ПКР-7М соответствующие величины равны $\beta \approx 0,49$; $\epsilon \approx 5000$; для ЦТС-19 соответственно 0,4 и 1725 ± 325 , для кварца X-среза — 0,095 и 4,5.

Акустическая нагрузка пьезопластины зависит от параметров демпфера и протектора с изделием. Вблизи рабочей частоты можно полагать, что их совместный обратный комплексный импеданс равен $1/Z_p = 1/R_p + (-iX_p)^{-1}$, в котором

$$R_p = \frac{\beta^2}{\omega C k h} \frac{4z_1}{z_0 + z_1};$$

$$X_p = 4 \frac{\beta^2}{\omega C} \frac{\operatorname{tg}(\pi\omega/2\omega_0)}{\pi\omega/2\omega_0} \left[\left(\frac{z - z_0}{z_1} \right)^2 - 4 \right]^{-1};$$

z , z_0 и z_1 — соответственно волновые сопротивления контролируемой среды, демпфера и пьезопластины.

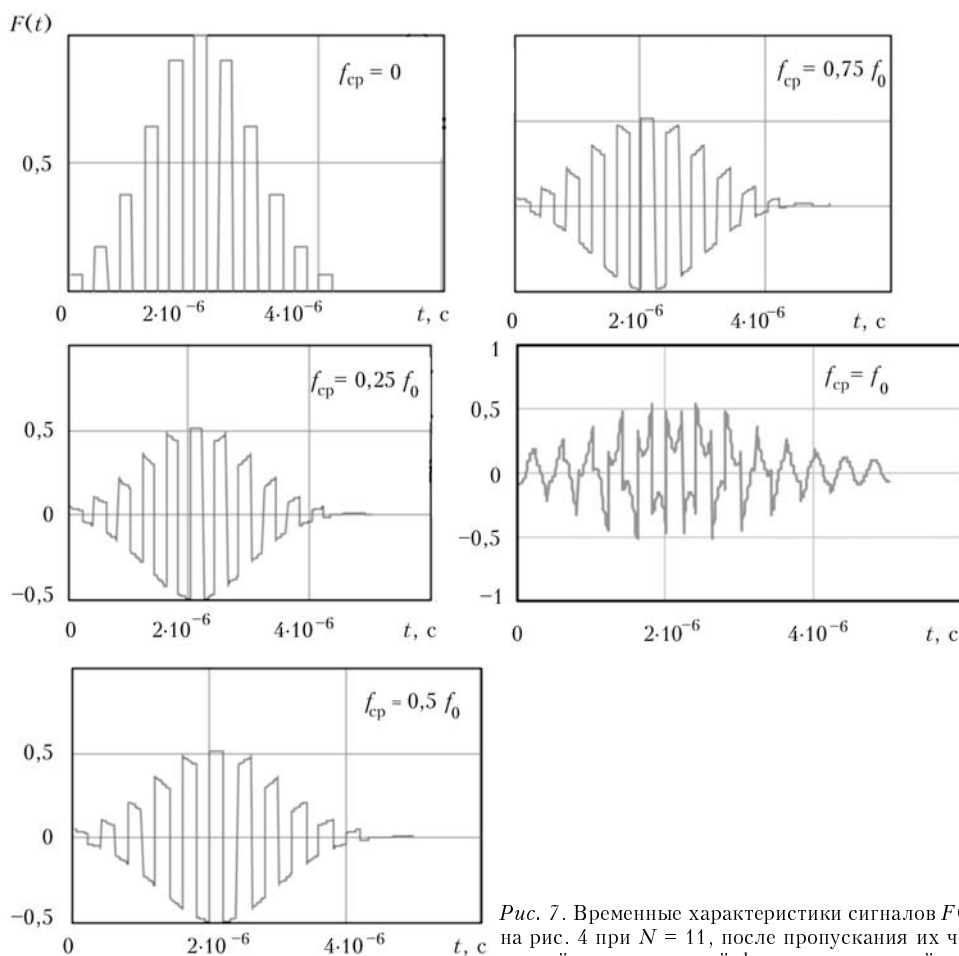


Рис. 7. Временные характеристики сигналов $F(t)$, показанных на рис. 4 при $N = 11$, после пропускания их через высокочастотный прямоугольный фильтр с указанной частотой среза f_{cp}

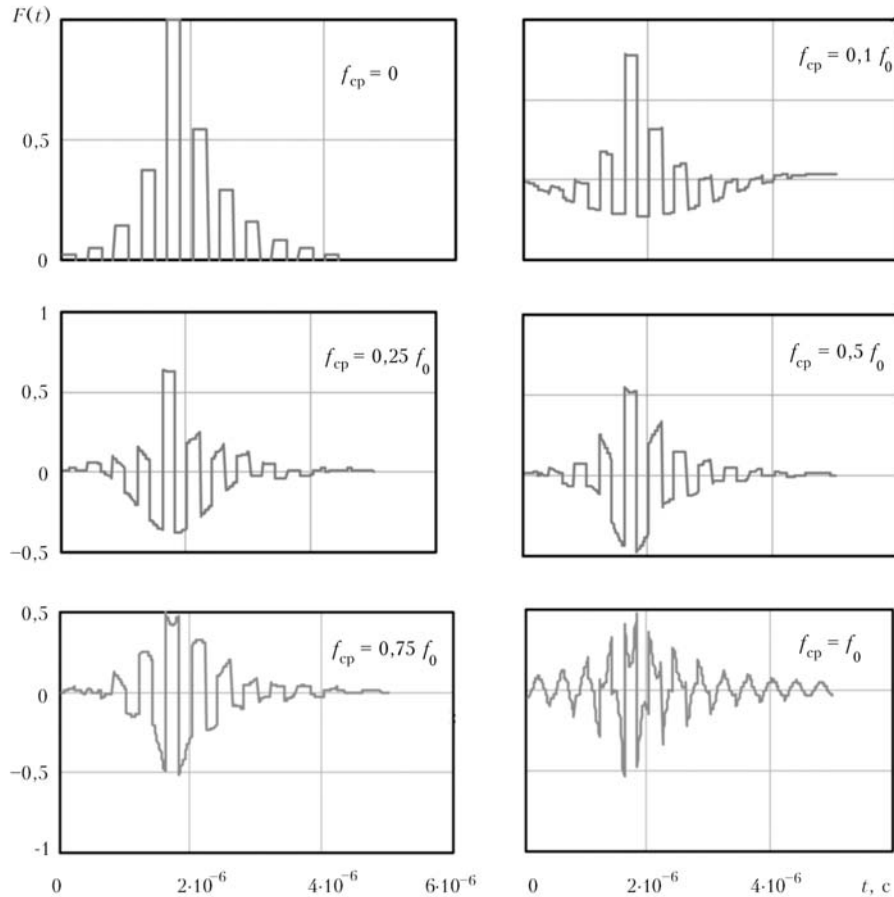


Рис. 8. То же для асимметричного сигнала, показанного на рис. 6

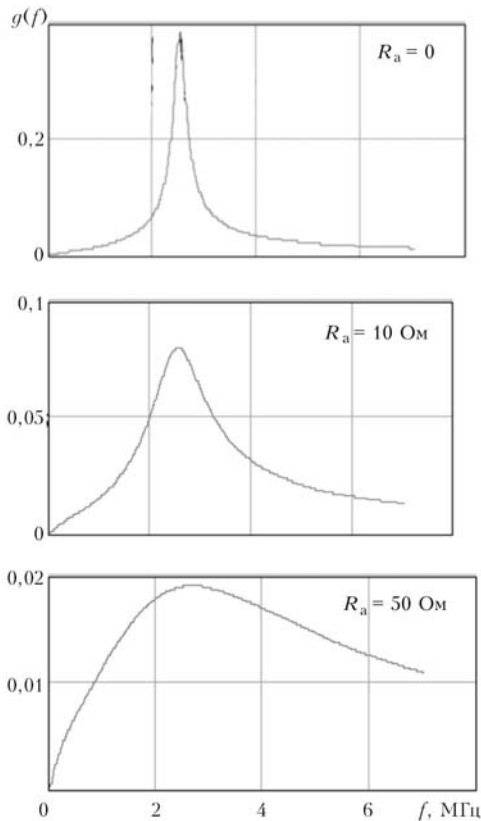


Рис. 9. Изменение импеданса электроакустического тракта пьезопреобразователя при различных сопротивлениях активной нагрузки R_a

Приведенные решения позволяют рассмотреть вопрос о достижении оптимальных условий согласования пьезопластины с генератором. При этом для компенсации реактивной составляющей емкостной нагрузки преобразователя последовательно с ним нередко подключают комплексное сопротивление, состоящее из индуктивности L_a и активного сопротивления R_a . Причем, индуктивность выбирают равной $L_a = 1/(\omega_0^2 C)$, а сопротивлением R_a добиваются расширения частотной характеристики электроакустического тракта до требуемой величины. Тогда суммарная электрическая нагрузка генератора будет

$$Z_{\Sigma} = Z_p + R_a + (-i\omega C)^{-1} - i\omega L_a = Z_p + R_a + \frac{i}{C} \left(\frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega\omega_0^2} \right) \quad (8)$$

Разумеется, приведенное решение является приближенным и не учитывает все особенности пьезопреобразователей. И, тем не менее, им можно пользоваться для выполнения качественных расчетов. Поэтому его и положим в основу выполняемого анализа.

На следующих ниже рисунках приведены расчеты соответствующих импедансов. При этом всюду применялись следующие данные: рабочая частота — 2,5 МГц, пьезопластина — ЦТС-19, скорость звука в ней принималась равной 3,3 км/с,

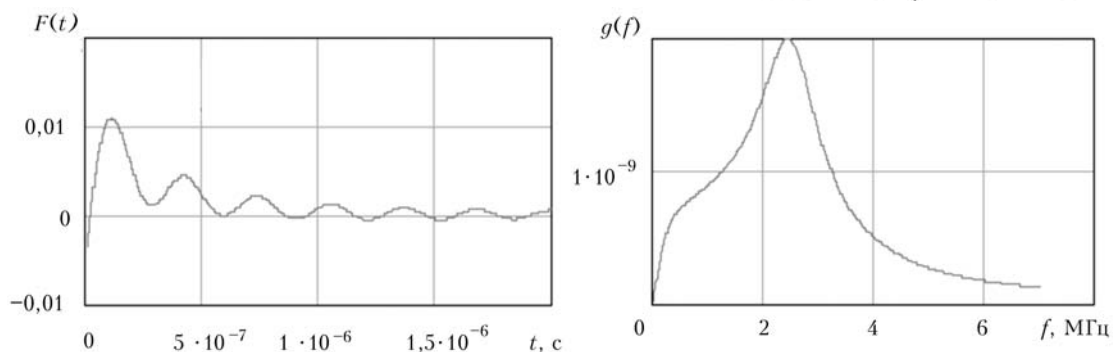


Рис. 10. Временные $F(t)$ и спектральные $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых пьезопреобразователями при использовании генератора ударного возбуждения и отсутствии фильтров

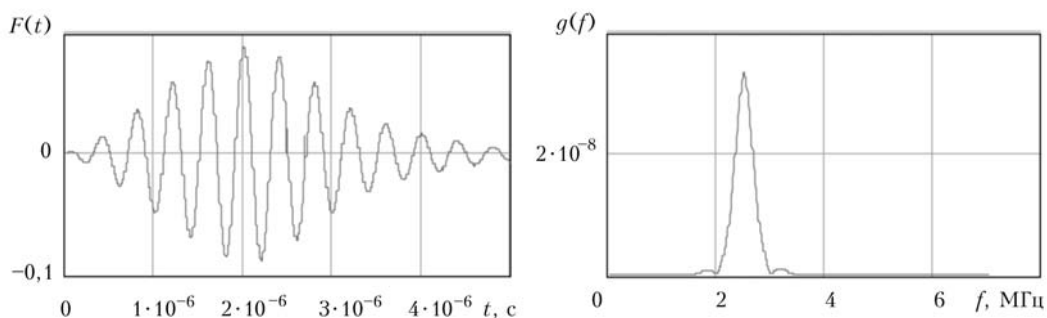


Рис. 11. Временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых пьезопреобразователями при возбуждении их импульсами модулированного гармонического сигнала, описываемого выражением (2)

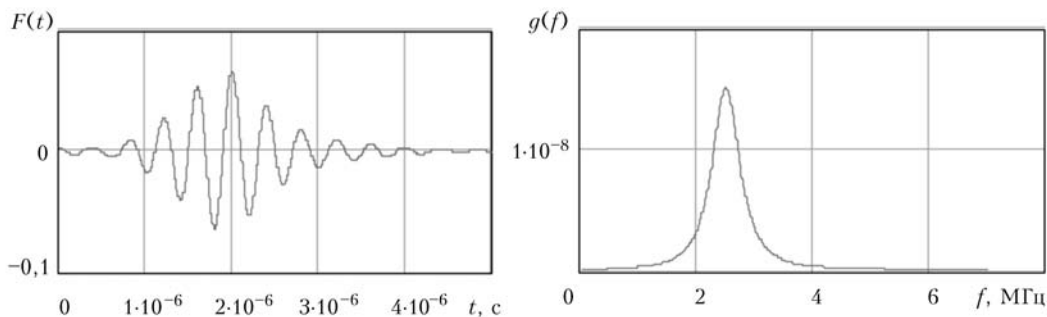


Рис. 12. Временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых пьезопреобразователями при возбуждении их сигналами, описываемыми выражением (3)

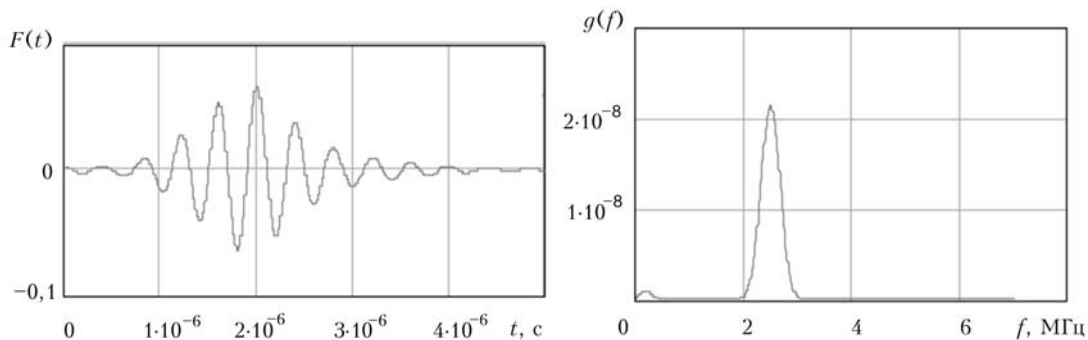


Рис. 13. Временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых дефектоскопами типа ДЮ-562 при возбуждении их сигналами, описываемыми выражением (4)

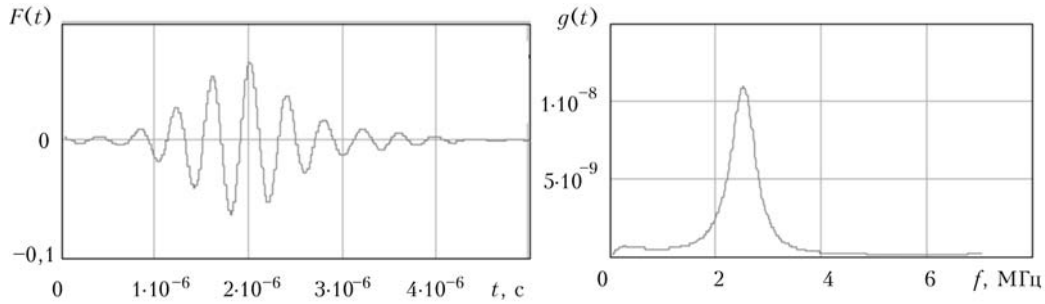


Рис. 14. Временная $F(t)$ и спектральная $g(f)$ характеристики акустических сигналов, излучаемых дефектоскопами при возбуждении их асимметричными сигналами, описываемыми выражением (6)

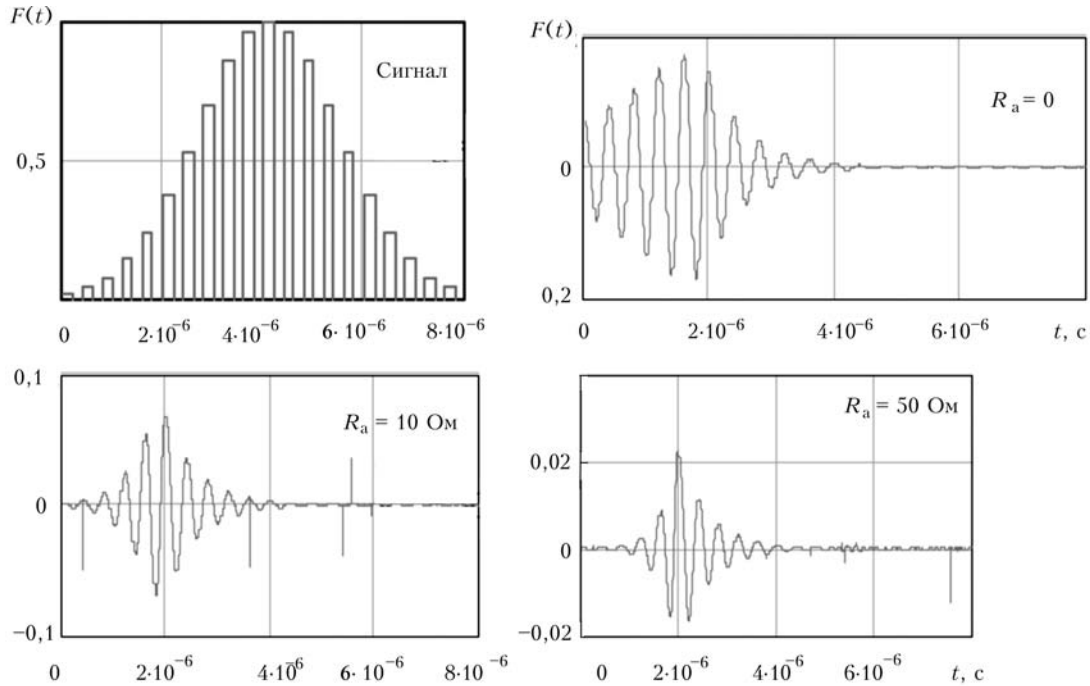


Рис. 15. Временные $F(t)$ характеристики акустических импульсов, излучаемых генераторами соответствующих сигналов при использовании различных активных сопротивлений нагрузки R_a

$\epsilon = 1525$, коэффициент электромеханической связи — $0,4$, импеданс — $23 \cdot 10^6$ Па с/м, импедансы демпфера — 10^7 Па с/м и среды (углеродистой стали) — $46,1 \cdot 10^6$ Па с/м. Площадь пьезопластины принимали равной 10^{-4} м². Результаты выполненных расчетов приведены на рис. 9.

Из результатов следует, что применение дополнительных сопротивлений действительно способствует расширению частотного диапазона тракта пьезопреобразователей, но при этом существенно увеличивает саму величину импеданса. В дальнейших расчетах будем использовать его величину, равную 10 Ом.

Оценим изменение спектральной и временной характеристик сигналов различных генераторов после прохождения ими электроакустического тракта, т. е. соответствующие параметры возбуждаемых ими акустических импульсов (рис. 10–12).

Здесь величина η принималась равной $0,2\omega_0$. Таким образом, в данном случае действительно формируется импульсный сигнал, временные параметры которого устанавливаются только свой-

ствами электроакустического тракта преобразователя.

Из сравнения полученных временных сигналов с первоначальными, показанными на рис. 2, можно сделать вывод, что акустический сигнал оказался более симметричным.

Здесь также наблюдается увеличение симметрии сигналов после прохождения ими электроакустического тракта дефектоскопа (рис. 13, 14).

Из сравнения временных форм сигналов, представленных на рис. 13 и 14, следует, что несмотря на различие сигналов генератора, излучаемые акустические сигналы оказываются в целом идентичными. Чтобы данное утверждение сделать еще более наглядным, увеличим количество импульсов в них. Такие расчеты показаны на рис. 15, 16. На рис. 15 показаны импульсные сигналы генераторов.

Из сравнения полученных импульсов следует, что характеристики акустических сигналов, излучаемых преобразователями, в целом определяются спектральными характеристиками сигналов используемого генератора. А поскольку временная

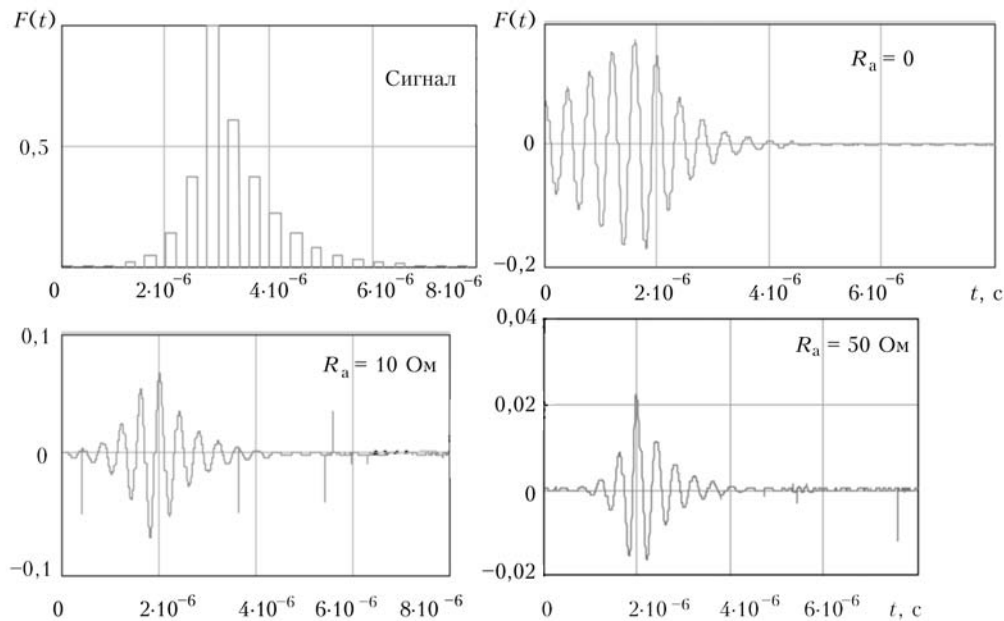


Рис. 16. Временные $F(t)$ характеристики акустических импульсов, излучаемых асимметричными генераторами соответствующих сигналов при различных активных сопротивлениях нагрузки

симметрия рассматриваемых сигналов не оказывает большого влияния на их спектр, временные характеристики рассматриваемых импульсов также различаются мало. И еще, чем шире оказывается спектральная характеристика электроакустического сигнала дефектоскопа, тем более коротким является излучаемый им импульсный сигнал. И это влияние при используемом генераторе дефектоскопа типа ДЮ-562 оказывается существенно более весомым, чем форма и длительность сигнала самого генератора.

Вывод

Применение генератора сигналов с указанной амплитудной модуляцией не приводит к существенно улучшению временных и спектральных характеристик дефектоскопов, но способствует стабилизации его рабочей частоты и меньшей зависимости сигналов от параметров преобразователей. Кроме того, специальные фильтры, формирующие спектральные характеристики сигналов, при использовании пьезопреобразователей не требуются.

1. *Физическая акустика* / Под ред. У. Мэзона. — Т.1. Методы и приборы УЗ исследований. — Ч.А. — Мир, 1966. — 592 с.

НПП «ВИГОР», Москва, РФ

Поступила в редакцию
27.03.2005

Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее: Сборник докладов VIII Украинской научно-технической конференции. — Часть 2. — Киев: Сталь, 2004. — 440 с.

С 18 по 22 октября 2004 г. в Киеве состоялась VIII Украинская научно-техническая конференции «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее», посвященная 60-летию образования ОАО «Украинский научно-исследовательский и проектный институт стальных конструкций имени В. Н. Шимановского» (тел.: (044) 543-93-87). Проведение конференции поддержано Госстроем Украины, Национальной академией наук Украины, Киевской городской госадминистрацией, Академией строительства Украины и другими государственными и общественными организациями.

На конференции представлено 172 доклада, подготовленных 290 учеными и специалистами из 10 стран. Тематика докладов охватывает вопросы расчета, проектирования, изготовления, монтажа, технической эксплуатации и ремонта зданий и сооружений, выполненных в металлических конструкциях.

Во вторую часть сборника включены доклады, посвященные вопросам совершенствования материалов, конструкций, технологий изготовления и монтажа (секция 3), оценке надежности, долговечности и остаточного ресурса металлоконструкций (секция 4), технической эксплуатации, усилению и реконструкции зданий и сооружений (секция 5), а также вопросам развития и совершенствования нормативной базы в области металлостроительства (секция 6).

