АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XV 1969 Вып. 1

УДК 534.232

# ИМПУЛЬСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*И. Н. Каневский*

Теоретически и экспериментально исследована зависимость амплитуды сигнала пьезоэлектрических преобразователей от длительности возбуждающего прямоугольного видеоимпульса. Показано, что при изменении длительности импульса амплитуда сигнала преобразователя имеет ряд чередующихся максимумов и минимумов, причем на достаточно высоких частотах у преобразователей с малым коэффициентом затухания минимумы могут достигать нуля. Полученные результаты справедливы при импульсном возбуждении любых колебательных систем, описываемых дифференциальным уравнением второго порядка.

В ультразвуковой технике — дефектоскопии, измерителях толщины, расхода, концентрации, скорости потоков жидкостей — электроакустические преобразователи, как правило, работают в импульсном режиме. При этом основное внимание уделяется крутизне фронтов импульсов и времени затухания свободных колебаний преобразователя, а при возбуждении радиоимпульсами — также совпадению частоты заполнения с резонансной частотой преобразователя. Увеличение крутизны фронтов и уменьшение времени затухания колебаний повышают точность работы ультразвуковой измерительной аппаратуры, а настройка в резонанс резко увеличивает эффективность преобразования, позволяя уменьшить мощность возбуждающего электронного генератора и коэффициент усиления приемного тракта.

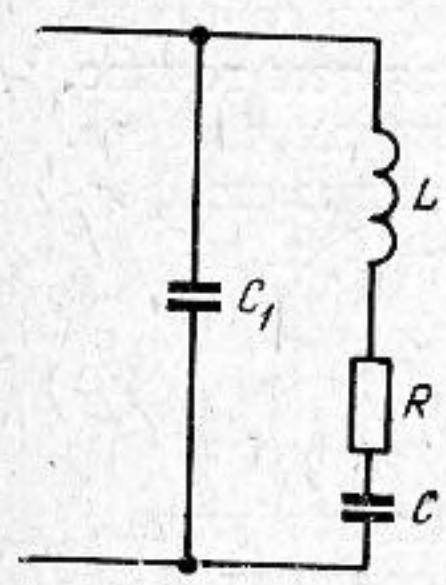
При возбуждении преобразователей видеоимпульсами длительность последних выбирают из условий отсутствия наложения сигналов в ультразвуковом измерительном тракте, и, как правило, не связывают с резонансной частотой преобразователя. Между тем, в ряде случаев, особенно при работе на высоких частотах и при возбуждении преобразователей короткими импульсами, амплитуда сигнала зависит от длительности импульса также остро, как от частоты заполнения при возбуждении преобразователей радиоимпульсами. Более того, существуют такие длительности видеоимпульсов, при которых амплитуда излучения резко падает и при определенных условиях достигает нуля.

В работе [1] рассмотрено создание ультразвукового импульса заданной формы. В настоящей работе рассмотрено возбуждение пьезоэлектрических преобразователей видеоимпульсами прямоугольной формы при работе преобразователей в режиме излучения в твердое тело и жидкую среду.

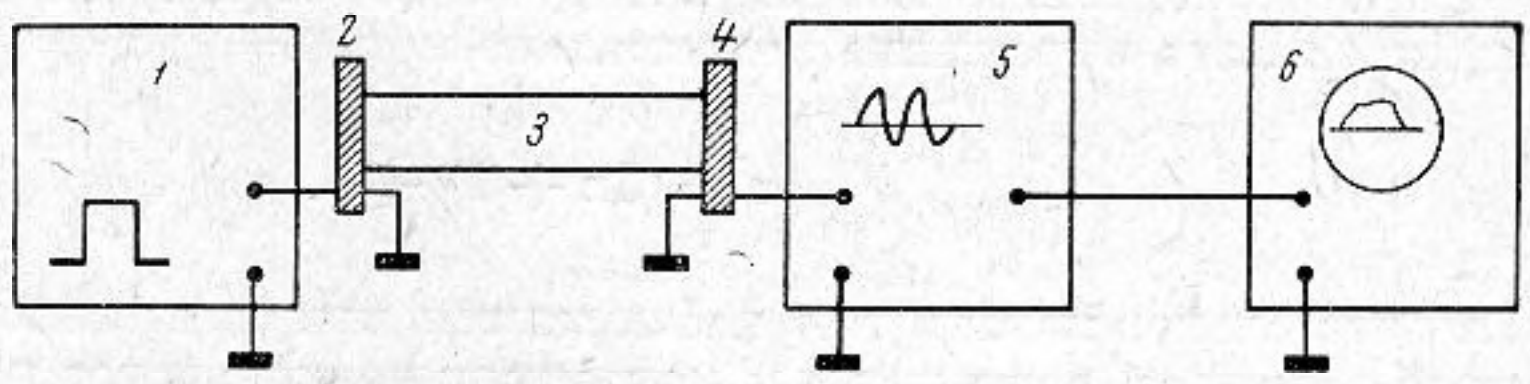
На фиг. 1 приведена эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя, справедливая для преобразователей как из пьезокварца, так и из пьезокерамики [2]. Величины $L$, $C$ и $R$ представляют, соответственно, эквивалентные индуктивность, емкость и сопротивление, которые легко выразить через механические параметры преобразователя — его массу $2M$ и коэффициенты трения $r$ и упругости $K$: $L = M / B^2$, $R = r / B^2$, $C = B^2 / K$. Величина $B$ равна отношению силы $F$, действующей на преобразователь, к электрическому напряжению $U$, возбуждаемому в преобра-

зователе под действием этой силы: $B = F / U$. Емкость $C$ представляет действительную электрическую емкость между обкладками преобразователя.

Рассмотренная эквивалентная схема справедлива только в области основного резонанса пьезопреобразователя. При возбуждении пьезопреобразователя на нечетных гармониках можно воспользоваться эквивалентной схемой, представляющей цепь из соединенных последовательно




Фиг. 1




Фиг. 2

параллельных колебательных контуров, резонансные частоты которых равны нечетным гармоникам пьезопреобразователя [3].

Рассмотрим колебательный процесс в правой ветви контура фиг. 1 под действием электрического напряжения $V(t)$. Уравнение колебаний в последовательном контуре имеет вид

$$\ddot{J} + 2\alpha\dot{J} + w_0^2 J = f(t),$$

где $\alpha = r / 2M$ — коэффициент затухания, $\omega_0 = \sqrt{K / M}$ — резонансная частота, $f(t) = F^2 V(t) / U^2 M$ — эквивалентная сила. Эквивалентный ток $J$ представляет смещение $x$ поверхности преобразователя из положения равновесия. Последняя величина пропорциональна электрическому напряжению, возбуждаемому в преобразователе, при работе в режиме приема. Если $f(t)$ представляет прямоугольный импульс длительности $\tau$, то уравнение движения принимает вид

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega_0^2 x = A\left[\sigma(t) - \sigma(t-\tau)\right], \tag{1}$$

где $\sigma(t)$ — ступенчатая функция или функция единичного скачка:

$$\sigma(t) = \begin{cases} 0 \text{ при } t < 0, \\ 1 \text{ при } t \geqslant 0, \end{cases}$$

$A = F^2 V_0 / U^2 M$, $V_0$ — амплитуда напряжения возбуждающего импульса.

Общее решение уравнения (1) приведено в работе [4]. Нас интересует только огибающая излученного ультразвукового импульса после прекращения действия прямоугольного видеоимпульса длительности $\tau$, возбуждающего преобразователь. Если коэффициент затухания $\alpha$ мал, а резонансная частота $\omega_0$ высока, так что величина $\varepsilon = \alpha / \omega_0 \ll 1$ и, кроме того, длительность импульса столь мала, что $\alpha\tau \ll 1$, то огибающую излученного импульса можно приближенно представить в следующем виде:

$$X(t, \tau) \approx \frac{2A \exp\{-\alpha t\}}{\omega_0^2} \sin\frac{\beta}{2}. \tag{2}$$

В этом выражении $\beta = \omega\tau$. Как и следовало ожидать, амплитуда излученного импульса пропорциональна амплитуде напряжения $V_0$ возбуждающего импульса, обратно пропорциональна квадрату собственной частоты колебаний преобразователя $\omega_0^2$ и экспоненциально зависит от коэффициента затухания $\alpha$ и времени $t$.

Рассмотрим теперь зависимость огибающей $X(t, \tau)$ от длительности $\tau$ возбуждающего импульса. Из выражения (2) непосредственно видно, что $X(t, \tau) = 0$ при $\beta = \omega_0\tau = 2n\pi$, где $n = 0, 1, 2\ldots$. Так как круговая резонансная частота $\omega_0 = 2\pi / T_0$ ($T_0$ — период собственных колебаний преобразователя), то получим, что огибающая обращается в нуль при

$$\tau = nT_0, \tag{3}$$

т. е. при длительности импульса, равной целому числу периодов собственных колебаний преобразователя. Выражение (3) выполняется тем точнее, чем меньше затухание преобразователя и выше его резонансная частота.

Определим теперь максимумы функции $|X(t, \tau)|$. Как видно из формулы (2), это выражение максимально при $\beta = \omega_0\tau = (2n + 1)\pi$, и

$$\tau = (2n + 1)\frac{T_0}{2}. \tag{4}$$

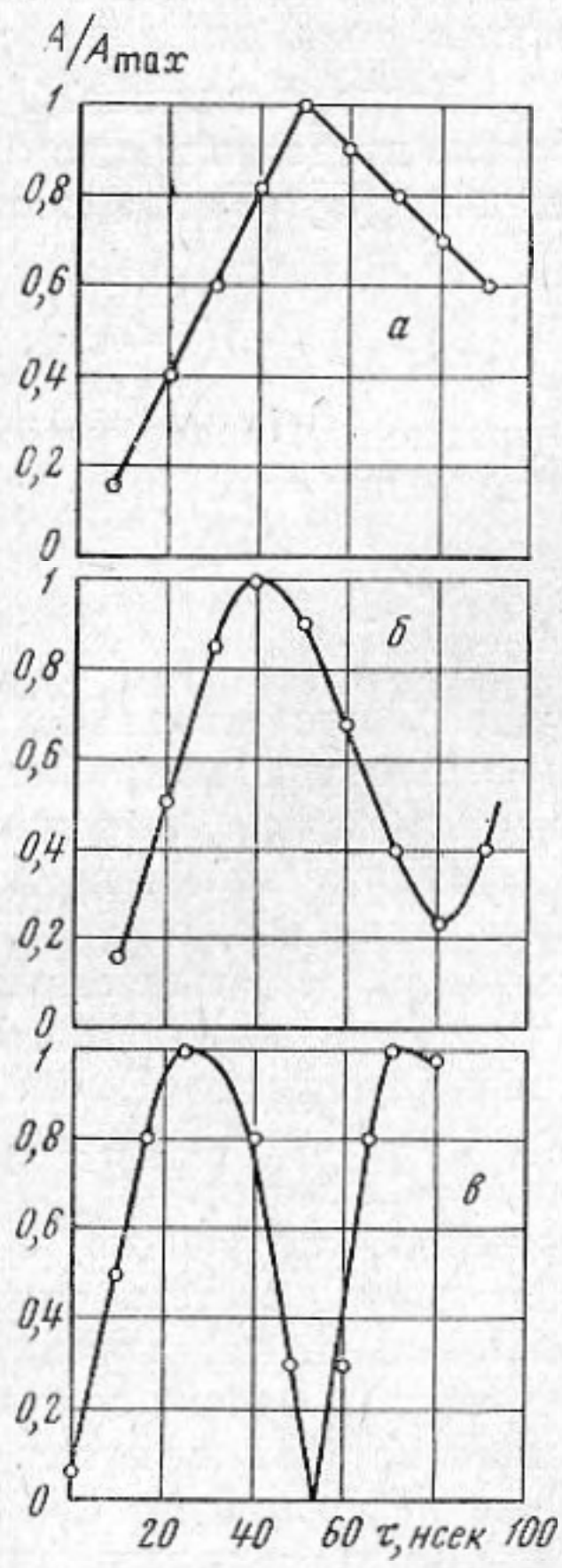
Следовательно, максимумы наблюдаются при длительностях возбуждающего импульса, равных нечетному числу полупериодов резонансных колебаний преобразователя.

Приведенные теоретические результаты были проверены экспериментально. При сопоставлении теории с экспериментом необходимо учитывать следующее обстоятельство. Прямоугольный импульс имеет бесконечный спектр частот [4], а эквивалентная схема пьезопреобразователя в виде одиночного колебательного контура или цепочки колебательных контуров справедлива в ограниченной области частот. Однако полученные выше теоретические результаты можно применить для исследования работы пьезопреобразователей в импульсном режиме, так как в спектре прямоугольного импульса спектральная плотность имеет существенное значение только в ограниченной области частот. Например, нулевой максимум спектральной функции (при нулевой частоте) равен 1, а последующие равны $2\pi / (2n + 3)$, где $n = 0, 1, 2, \ldots$, откуда следует, что при переходе от нулевого максимума к первому спектральная плотность убывает почти в 5 раз, при переходе от первого максимума ко второму — в 1,7 раза, и т. д.

Блок-схема установки показана на фиг. 2. К импульсному генератору *1* подключался пьезоэлектрический преобразователь *2*, с которого акустический сигнал подавался на волновод из плавленого кварца *3*; с помощью преобразователя *4*, имеющего такую же резонансную частоту, что и преобразователь *3*, импульс подавался на усилитель *5*, а затем — на регистрирующий прибор *6*, позволяющий измерять амплитуду импульса. В зависимости от требуемой длительности импульса в качестве генератора *1* использовался либо генератор наносекундных импульсов типа ГНИ-1 с диапазоном длительностей импульса от 10 до 100 *нсек*, либо генератор сдвинутых импульсов типа ГИС-2 с диапазоном длительностей от 0,1 до 2000 *мксек*. Амплитуда импульсов как первого, так и второго генераторов регулировалась от 0 до 70 *в*. В качестве регистрирующего прибора *6* использовались электронные осциллографы типа ЭО-58 и УО-1.

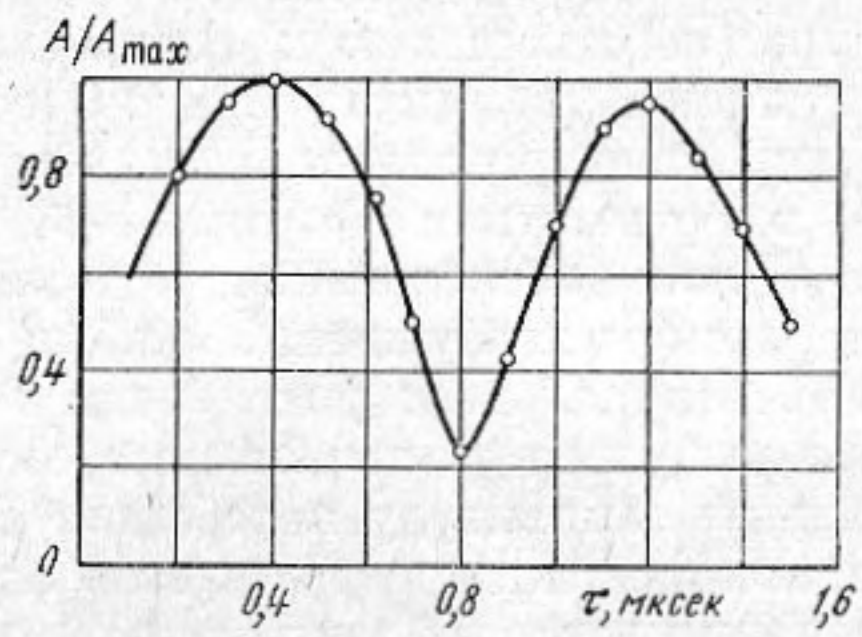
На фиг. 3 приведены зависимости относительной амплитуды электрического импульса $A / A_{max}$ на пьезокварцевых преобразователях от длительности возбуждающих импульсов при неизменной их амплитуде. Исследовались преобразователи с резонансными частотами $f_0$, равными 10 *Мгц* — фиг. 3, *а*, 15 *Мгц* — фиг. 3, *б* и 20 *Мгц* — фиг. 3, *в*. Для резонансной частоты 10 *Мгц* период $T_0 = 100$ *нсек*, и согласно выражению (4), первый максимум должен наблюдаться при длительности возбуждающего импульса $\tau = T_0 / 2 = 50$ *нсек*, что полностью соответствует графику на фиг. 3, *а*. Для преобразователя с резонансной частотой 15 *Мгц* $T_0 = 67$ *нсек*. Из формул (4) и (3) следует, что в этом случае первый максимум должен наблюдаться при длительности импульса $\tau_{max} = 34$ *нсек*,

а первый минимум — при $\tau_{min} = 67$ *нсек*. Из графика на фиг. 3, *б* следует, что экспериментальные значения соответственно равны $\tau_{max} = 38$ *нсек* и и $\tau_{min} = 70$ *нсек*, т. е. на 4 и 3 *нсек* больше теоретического значения. Это превышение лежит в пределах ошибки измерений генератора ГНИ-1. На фиг. 3, *в* первый максимум наблюдается при длительности возбуждающего импульса, равной 25 *нсек*, второй максимум — при 70 *нсек*, а первый минимум — при 55 *нсек*. Теоретические значения этих величин для собственной частоты 20 *Мгц*, вычисленные по формулам (4) и (3), равны соответственно 25, 75 и 50 *нсек*. Таким образом, для частоты 20 *Мгц* отличие теоретических значений от экспериментальных не превосходит 5 *нсек* и составляет не более 10%.




Фиг. 3

С понижением резонансной частоты преобразователей расхождение между теорией и экспериментом, как правило, увеличивается. Это прежде всего относится к глубине минимумов, которые на низких частотах не достигают нуля, а также к положению максимумов и минимумов. Такая закономерность объясняется тем, что формулы (3) и (4) выполняются более точно при усилении неравенства $\varepsilon = \alpha / \omega_0 \ll 1$.




Фиг. 4

Помимо исследования преобразователей при работе в режиме излучения в плавленый кварц были проведены аналогичные эксперименты при работе преобразователей в режиме излучения в воду и четыреххлористый углерод. Для этого два одинаковых преобразователя укреплялись при помощи фланцев с держателями с двух сторон метровой металлической трубы, наполненной дегазированной водой или четыреххлористым углеродом. Один из преобразователей возбуждался блокинг-генератором, вырабатывающим импульс с амплитудой до 200 *в*, длительность которого можно было регулировать. Сигнал со второго, приемного преобразователя поступал на широкополосный усилитель, а затем — на электронный осциллограф. При изменении длительности импульса блокинг-генератора четко наблюдались максимумы и минимумы излучения преобразователя, положение которых с достаточной для практики степенью точности можно было определить по формулам (3) и (4).

Собственная емкость преобразователя $C_1$, показанная на эквивалентной схеме фиг. 1, шунтирует генератор. Для компенсации реактивной нагрузки параллельно емкости $C_1$ подключают индуктивность $L_1$, выбранную таким образом, чтобы резонансная частота контура $L_1C_1$ совпадала с ре-

зонансной частотой $f_0$ механических колебаний преобразователя. Рассмотрим возбуждение колебательного контура из параллельно соединенных индуктивности $L_1$ и емкости $C_1$ прямоугольным импульсом тока заданной амплитуды. Напряжение $V$ на емкости контура описывается уравнением

$$\ddot{V} + 2\alpha\dot{V} + \omega^2 V = 2\alpha C_1 J_0(t) + C_1 \dot{J}_0(t),$$

в котором $\alpha = R / 2L_1$, $R$ — сопротивление в индуктивной ветви контура. Если $J_0(t)$ представляет прямоугольный импульс тока длительности $\tau$ с амплитудой $D$, то $J_0(t) = D[\sigma(t) - \sigma(t-\tau)]$. Тогда величина $\dot{J}_0(t) = D[\delta(t) - \delta(t-\tau)]$, где $\delta(t)$ — дельта-функция, представляющая бесконечно короткий импульс с единичной площадью [2]. Тогда последнее уравнение можно представить в виде

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega_0^2 x = A[\sigma(t) - \sigma(t-\tau)] + B[\delta(t) - \delta(t-\tau)],$$

где $x = V$, $A = 2\alpha C_1 D$, $B = C_1 D$. Решая это уравнение, пренебрегая членами порядка $\alpha / \omega$, $\alpha^2 / \omega^2$, $\alpha\tau$ и находя огибающую, получим

$$X(t, \tau) = 2C_1 D \exp\{-\alpha t\} \sin\frac{\beta}{2}.$$

Это выражение с точностью до амплитудного множителя совпадает с формулой (2). Следовательно, зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе колебательного контура будет описываться выражениями (3) и (4). Этот вывод был подтвержден экспериментально при помощи параллельного колебательного контура с резонансной частотой 1,25 *Мгц*. На фиг. 4 приведена зависимость относительной амплитуды напряжения на контуре (по отношению к максимальному напряжению) от длительности возбуждающего импульса. В соответствии с формулой (4), максимумы наблюдаются при длительностях импульса $\tau = 0{,}4$ и 1,2 *мксек*, а минимум — в соответствии с формулой (3) — при $\tau = 0{,}8$ *мксек*.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы. При импульсном возбуждении любых колебательных систем, описываемых дифференциальным уравнением второго порядка, регулировка длительности импульса позволяет настроить систему в резонанс и получить максимальную амплитуду колебаний. Временна́я настройка путем изменения длительности видеоимпульсов аналогична частотной настройке путем изменения частоты заполнения радиоимпульсов, если длительность видеоимпульса изменяется в области одного максимума.

Временна́я настройка одиночного колебательного контура при изменении длительности импульса в широком диапазоне принципиально отлична от частотной настройки, так как в первом случае наблюдается несколько максимумов, чередующихся с глубокими минимумами, а во втором случае наблюдается только один максимум, который сначала резко, а затем плавно спадает как при увеличении, так и при понижении частоты.

Временна́я настройка системы, эквивалентная схема которой может быть представлена одиночным колебательным контуром, аналогична частотной настройке системы, эквивалентная схема которой может быть представлена связанными контурами, так как в последней системе при изменении частоты наблюдаются максимумы, чередующиеся с минимумами, глубокими при сильной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Л. Газарян. О создании звукового импульса заданной формы при помощи пьезоэлектрической пластинки. Акуст. ж., 1958, 4, 1, 33—36.
2. Л. Бергман. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., ИЛ, 1957.
3. Е. Скучик. Основы акустики, т. 1, гл. 18. М., ИЛ., 1958.
4. А. А. Харкевич. Спектры и анализ. М., ГТТИ, 1953.

Государственный н-и. и проектный
институт редкометаллической промышленности
Москва

Поступила в редакцию
4 октября 1967 г.