

## Лекция 11

### Методы расширения полосы пропускания преобразователей

Одной из важнейших характеристик преобразователя является ширина полосы рабочей частоты преобразователя.

Чем шире эта полоса, тем выше чувствительность и разрешающая способность УЗ-приборов, шире диапазон и меньше погрешность измерения контролируемых параметров, а также лучше другие основные показатели аппаратуры.

Каждый преобразователь характеризуется своей амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), основными параметрами которой являются

– рабочая частота —  $f_p$ ;

– полоса пропускания —  $\Delta f / f_p = |f_2 - f_1| / f_p$ .

В качестве краевых частот  $f_1$  и  $f_2$  принимают частоты, на которых амплитуда сигнала уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз от максимального значения.

В настоящее время сформировались три группы способов создания широкополосных пьезопреобразователей для УЗ-дефектоскопов:

1. Расширение полосы пропускания пьезоэлементов за счет их механического демпфирования, оптимального акустического согласования их со средой, в которую излучаются УЗ-волны; электрического демпфирования; применения корректирующих  $R$ ,  $L$  и  $C$ -цепей.

2. Применение специальных электронных схем возбуждения полуволновых пьезоэлементов и схем включения их в режим приема УЗ-колебаний, например, компенсация свободных колебаний пьезоэлементов; компенсация реактивной составляющей их входного импеданса и др.

3. Применение пьезоэлементов специальной формы — клиновидных, сферически вогнутых и т.д.; специальных составов пьезокерамики, например, высокопористой керамики; специальной технологии обработки пьезоэлементов.

В большинстве современных отечественных и зарубежных дефектоскопах в целях расширения полосы пропускания применяют *механическое демпфирование*. Для этого пьезопластину приклеивают к демпферу.

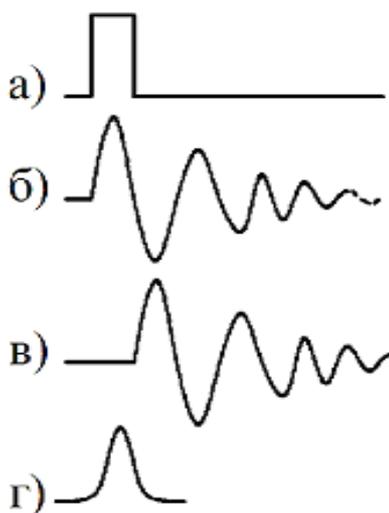
*Электрическое демпфирование* состоит в том, что при некоторых значениях активного сопротивления, шунтирующего пьезоэлемент, значительно расширяется его АЧХ. Это да-

ет возможность отказаться от механического демпфирования, что существенно упрощает конструкцию преобразователей.

Известны методы коррекции АЧХ пьезоэлемента за счет возбуждения его импульсами, частотный спектр которых компенсирует неравномерность характеристики пьезоэлемента.

Для формирования предельно коротких УЗ-импульсов с помощью полуволновых резонансных пьезоэлементов в режиме излучения и исключения их затягивания в режиме приема весьма эффективным оказался метод *электрической компенсации* свободных колебаний пьезоэлементов. Сущность метода состоит в следующем.

На полуволновой резонансный пьезоэлемент, не демпфированный ни механически, ни электрически, подается импульс электрического напряжения в виде ступеньки с крутым фронтом, возбуждающий в нем синусоидальные колебания с собственной частотой пьезоэлемента, затухающие по экспоненциальному закону. Затем через время, равное половине периода колебания, на пьезоэлемент подается еще один такой импульс — а), возбуждающий собственные колебания, сдвинутые по фазе на  $180^\circ$  — в). Суперпозиция этих колебаний приводит к их взаимной компенсации за исключением первой полуволны, синусоиды — г). В результате будет сформирован высокоамплитудный короткий импульс.

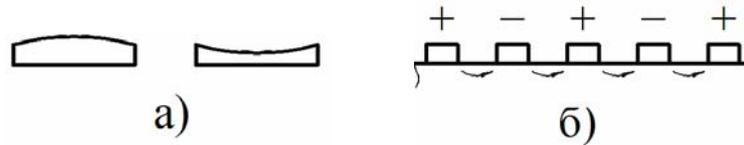


Преимущество этого метода — возможность получения коротких импульсов с частотой до 10...20 МГц, то есть импульсов длительностью 50...100 нс, что обеспечивает разрешающую способность по глубине 0,1...0,3 мм.

С целью расширения полосы пропускания применяют преобразователи с *неоднородным электрическим полем*, физические свойства пьезоэлементов которых изменяются по толщине.

**Неоднородность пьезоэлектрических свойств** можно обеспечить несколькими способами:

- созданием переменного профиля одной из поверхностей  $d = d(r)$ ;
- изменением пьезоконстанты  $h$  путем подбора размещения электродов на пьезоэлементе;
- частичной деполяризацией пьезоэлемента за счет нагрева одной из его торцевых поверхностей.



а – пластину можно рассчитать как набор отдельных пьезоэлементов разной толщины, что позволяет перекрыть большой диапазон частот;

б – расширение полосы за счет изменение пьезоконстант по толщине и неоднородности электрического поля

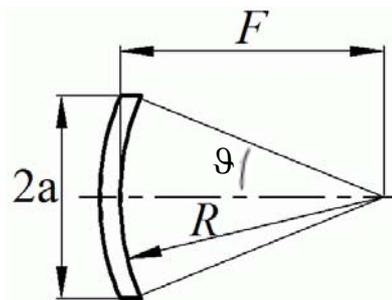
Основной **недостаток** использования преобразователей с неоднородными пьезоэлектрическими свойствами состоит в сложности изготовления таких элементов. Деполяризуют приблизительно  $1/3$  толщины преобразователя за счет кратковременного нагрева до  $T = 450 - 500^\circ C$ .

С целью повышения разрешающей способности, чувствительности и точности определения координат, а также размеров дефектов применяют фокусирующие преобразователи.

Существуют четыре основных типа фокусирующих систем:

а). **Активные концентраторы.**

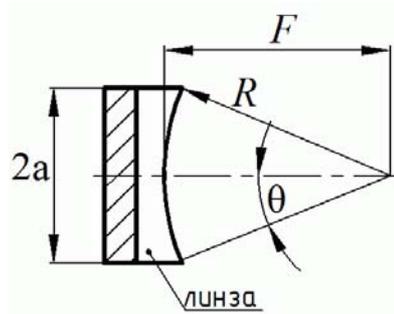
$$F = R; \vartheta = \arcsin(a/F).$$



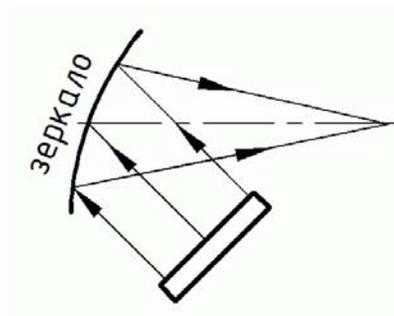
б). **Рефракторы** – линзы, преобразующие плоскую волну в сходящуюся.

$$F = R/(1 - n),$$

$$n = c_c / c_{\text{линзы}}.$$



в). **Рефлекторы** – отражатели, преобразующие плоскую волну в сходящуюся.



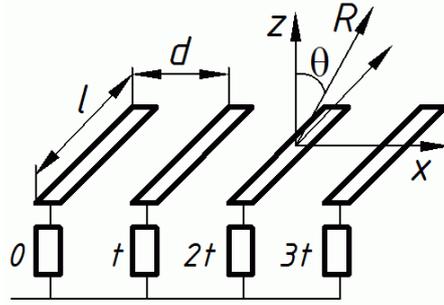
г). **Дефлекторы** – зональные пластины, состоящие из чередующихся акустически прозрачных и непрозрачных колец, внутренний  $ab$  и наружный  $ah$  радиусы которых определяются соотношениями

$$a_{\text{вн}} = \sqrt{2mF\lambda}, \quad a_{\text{н}} = \sqrt{(2m+1)F\lambda}, \quad m = 1, 2, \dots$$

## Фазированные решетки

Для повышения производительности контроля, по сравнению с механическими сканирующими преобразователями, и возможности управления диаграммой направленности (изменение угла ввода и ширины пучка) в последнее время все большее распространение получили преобразователи в виде фазированных решеток.

Фазированная решетка представляет собой набор идентичных пьезоэлементов, расположенных на расстоянии не более  $\lambda$  друг от друга. В линейной решетке центры преобразователей расположены на одной оси, причем длина пьезоэлемента значительно превосходит их ширину  $l \gg a$ ;  $d < \lambda$ .

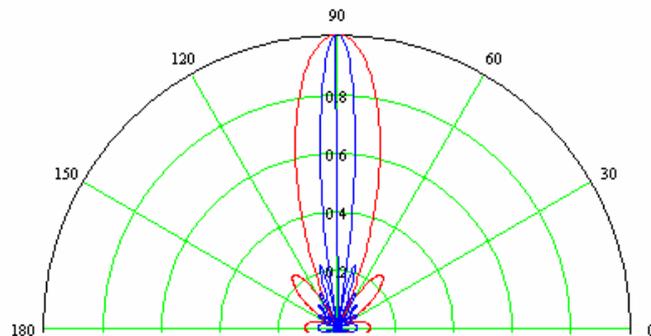


Угол максимального излучения акустической волны  $\vartheta_{max}$  определяется выражением

$$\sin \vartheta_{max} = \lambda(tf + p)/d,$$

где  $d$  – период решетки;  $t$  – время задержки УЗ-сигналов на соседних пьезоэлементах, связанных с фазовым сдвигом  $\psi$  соотношением  $t = T\psi/2\pi = \psi/2\pi f$ ;

$T = 1/f$ ,  $f$  – соответственно период и частота УЗ-сигналов пьезоэлементов;  $p = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$  – индекс излучаемой волны. Варьируя число и шаг расположения пьезоэлементов, а также фазовый сдвиг, можно обеспечить излучение УЗ-волн в заданном угловом диапазоне –  $90^\circ < \vartheta_{max} < 90^\circ$ . Ширина диаграммы направленности и уровень боковых лепестков зависят от вида амплитудного распределения на отдельных пьезопластинах и числа элементов в фазированной решетке.



Диаграммы направленности фазированных решеток, содержащих 7 (красная линия) и 17 (синяя линия) излучателей