

Лекция 4

Источники УЗ колебаний.

В настоящее время создано большое количество источников УЗ колебаний, так называемых УЗ преобразователей.

Что такое УЗ преобразователь ?

УЗ преобразователь - это устройство обеспечивающее преобразование подводимой энергии в энергию УЗ колебаний. Поскольку конечным результатом преобразования является энергия механических колебаний УЗ частоты, а подводимая энергия имеет различную природу, то произведем классификацию преобразователей с точки зрения природы подводимой энергии, преобразование которой обеспечивает формирование УЗК.

4.1. Классификация УЗП

1. Аэродинамические преобразователи обеспечивают преобразование энергии потока газа в УЗ колебания газовой среды.

По характеру преобразования энергии потока газа аэродинамические преобразователи делятся на :

- а) статические сирены или газоструйные излучатели
- б) динамические сирены

Аэродинамические преобразователи используются для возбуждения УЗК в газовых средах. $f_{\text{раб}} \leq 50 \text{ кГц}$

2. Гидродинамические излучатели обеспечивают преобразование в потоке жидкостей. Их действие основано на вихреобразовании, резонансе, автоколебаниях и др. физических эффектах.

В зависимости от характера преобразования энергии гидродинамические излучатели делятся на :

- а) пластинчатые излучатели
- б) клапанные
- в) вихревые
- г) пульсационные
- д) роторные

$$f_{\text{рабочая}} \leq 20 \text{ кГц}$$

3. Электромеханические преобразователи - НЧ вибраторы, обеспечивающие воздействие с большой амплитудой на объекты большой массы.

Делятся на :

1) электромагнитные с подвижным железным якорем, основанные на преобразовании энергии электрического тока в магнитном поле.

2) электро-динмические излучатели - преобразуется энергия электрического тока в магнитном поле

3) механические вибраторы - обеспечивают преобразование механической энергии одного вида (энергии вращения, кривошипно-шатунные механизмы). Рабочие частоты не более 10 кГц.

4. Импульсные источники.

Основаны на преобразовании различных видов энергии и создают короткие широкополосные сигналы. Различаются :

- 1) взрывные - преобразование энергии взрыва в звуковую
- 2) ударные - энергия механического удара
- 3) тепловые - тепловой удар
- 4) электроразрядные
- 5) импульсные электродинамические

5. Магнитострикционные преобразователи - обеспечивают преобразование энергии магнитного поля в механические колебания УЗ частоты. Используются для возбуждения колебаний в жидких и твердых телах.

Рабочие частоты до 100 кГц.

6. Пьезоэлектрические преобразователи - обеспечивают преобразование энергии электрического поля в механические колебания УЗ частоты.

Используются для формирования УЗК в жидких, твердых и газообразных веществах. Частоты от 20 кГц до 100 кГц.

Этот вид преобразователей получил наиболее широкое распространение и с них мы начнем рассмотрение УЗП.

4.2. Пьезоэффект.

Остановимся более подробно на изучении устройств обеспечивающих преобразование различных видов энергии в энергию ультразвуковых колебаний и начнем изучение с пьезоэлектрических преобразователей. Причина этого - широчайшее распространение пьезоэлектрических преобразователей, обусловлена следующими причинами:

1. Пьезоматериалы способны обеспечить формирование УЗК с частотами от 10 кГц до 25 МГц, то есть весь используемый в настоящее время частотный диапазон.

2. Пьезокерамика позволяет создать устройства для формирования УЗК в жидкостях, газах и твердых телах.

3. Современная пьезокерамика имеет максимальный КПД преобразования из всех преобразователей.

Смысл пьезоэффекта заключается в следующем.

Установлено что при растяжении и сжатии некоторых кристаллов - кварца, титанита бария, цирконата свинца и других материалов на их поверхностях возникают электрические заряды. С другой стороны, внесение пьезоэлектрического кристалла в электрическое поле, силовые линии которого совпадают с направлением его пьезоэлектрической оси, вызывают растяжение и сжатие кристалла (обратный пьезоэффект).

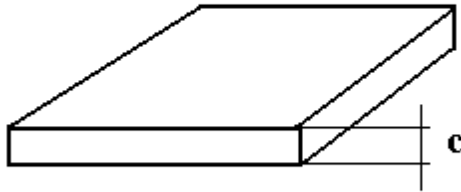
Механизм пьезоэффекта объясняется возникновением или изменением дипольного момента элементарной ячейки кристаллической решетки в результате смещения зарядов под действием механического напряжения (прямой пьезоэффект).

При действии электрического поля на элементарные заряды в ячейке происходит их перемещение и как следствие изменение средних расстояний между ними, то есть деформация (обратный пьезоэффект).

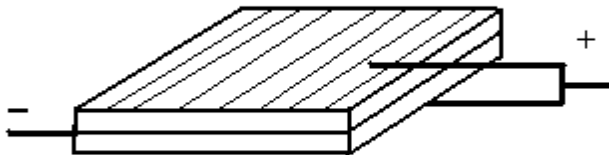
Изготовленная из пьезоэлектрического материала деталь простой геометрической формы (стержень, пластина, диск, цилиндр и т. п.) с нанесенными на ее определенные поверхности электродами называется пьезоэлементом. Пьезоэлемент - это основа пьезопреобразователя.

4.3. Виды пьезоэлементов.

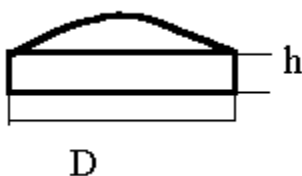
1. Прямоугольная пластина обычно используется для возбуждения колебаний на резонансной частоте. Если толщина пластины l , то пьезоэлемент будет иметь резонансную частоту



2. При работе в диапазоне низких частот часто используются изгибные моды колебаний. В этом случае две пьезопластины склеиваются механически по большим граням, образуя так называемый биморфный элемент. Электроды биморфного элемента включаются так, что один из пьезоэлементов сжимается, другой расширяется. При этом вся конструкция изгибается и резонансная частота определяется собственной частотой изгиба колеблющейся мембраны.



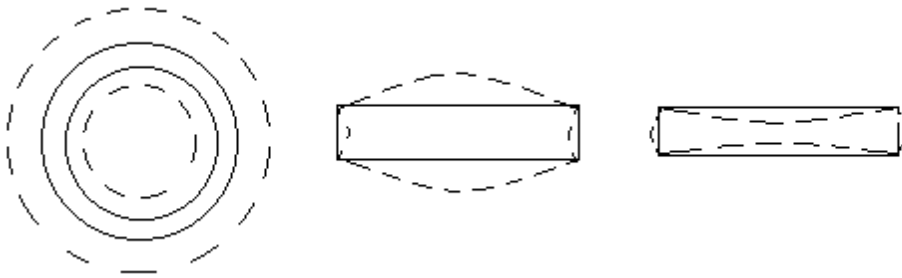
3. Круглые пьезоэлементы работают либо на толщинных, либо на радиальных модах колебаний. В этом случае пьезоэлемент имеет две резонансные частоты: $f_1=C/2h$ и $f_2=C/2D$



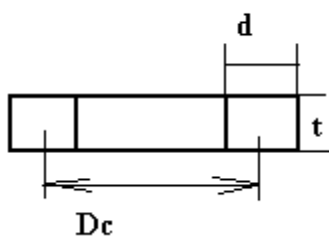
4. Трапецеидальные пьезоэлементы применяются в качестве деталей составных колец, работающих на колебаниях в НЧ диапазоне.



5. Прямоугольные и круглые стержни обычно работают на продольных колебаниях, то есть их длина соответствует половине длине волны возбуждающей колебания. Иногда используют поперечные колебания стержня и очень часто крутильные колебания.
6. Цилиндрические и сферические пьезоэлементы используются на радиальных модах колебаний. Рассмотрим как происходят колебания на примере сферы и цилиндра.



7. Пьезоэлементы в виде кольца имеют три резонансные частоты и используются в режиме толщинного резонанса и конструкциях.



Электроды на поверхности пьезоэлементов наносятся разными способами (методом напыления в вакууме, методом приклеивания серебряной или золотой фольги, внесение серебряной пасты).

Основные требования к электродам.

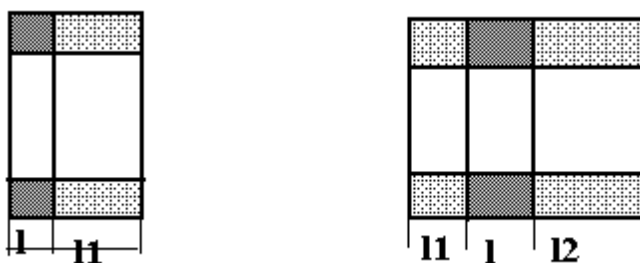
1. Высокая адгезионная прочность к керамике (наилучшие результаты получают методом внесения).
2. Неокисляемость на воздухе, то есть изготовление из неокисляющихся металлов.

4.4. Пьезоэлектрические преобразователи

На практике для решения технологических вопросов связанных с применением УЗ чаще используются преобразователи из пьезоэлемента в виде кольца, пьезоэлемента и металла, многослойных пластин.

Рассмотрим возможность использования пьезокольца. Для работы на частоте 22 кГц из формулы $f=C/2l$ следует $l= C/2f= 3000м/с/44000= 7см$. Изготовить такой пьезоэлемент возможно, но для его поляризации необходима напряженность поля 2000 В/мм, то есть 140000 В, что практически невозможно.

Поэтому чаще всего используются пьезоэлементы в сочетании с одно- и двухсторонней металлическими прокладками.



В таком случае резонансная частота определяется общей длиной преобразователя, то есть $l+n_1+n_2= \lambda/2$, а если $n_1=n_2$, то $\lambda/2$.

Металлические накладки на пьезоэлементы обеспечивают понижение рабочей частоты пьезоэлемента и называются частотопонижающими.

4.5. Материалы для пьезоэлементов.

В качестве материалов для преобразователей используются более 150 различных материалов, обладающих пьезоэффектом.

Наиболее известные и широко распространенные:

1. Кварц- природный материал, благодаря прочности и устойчивости нашедший широкое применение. Свои пьезосвойства сохраняет до 570 °С. Но природный материал редкий и используется только определенный срез кристалла- поэтому дорог. Недостатки- низкий КПД, требует высоких напряжений для работы ~1кВ/мм.
2. Пьезокерамический искусственный материал состоит из титаната бария с добавлением титаната свинца и циркония. ЦТС- цирконат- титанат свинца. Имеет КПД в сотни раз больше, чем кварц. Работает при напряжениях ~ сотен Вольт на мм. Прост в изготовлении.

Пьезокерамика делится на следующие классы:

1. Материалы для высокочувствительных элементов работающих в режиме приема и излучения (типа ЦТС-13, ЦТБС-1).

2. Материалы используемые для технологических аппаратов, в которых преобразователи работают в режиме сильных электрических и механических напряжений (типа ЦТС-23, ЦТС-24).
3. Материалы для УЗП с повышенной стабильностью частотных характеристик в заданном интервале T (типа ЦТС-22).
4. Материалы для работы при T=250°C и обладающих стабильностью пьезоэлектрических характеристик (типа ЦТС-21).

Пьезоматериалы отличаются своей рабочей температурой, то есть могут работать только до определенной температуры, называемой температурой Кюри. При достижении этой температуры пьезоэффект пропадает и не восстанавливается.

4.6. Определение излучаемой удельной механической мощности.

При работе УЗП необходимо знать активную мощность, вводимую в среду.

1. Выражение для определяемой удельной излучаемой акустической мощности ультразвуковых четверть- и полуволнового преобразователей в режиме одностороннего излучения имеет вид:

$$P_{уд} = (K_i * U_{эф} * U_{эф} * d_{зз} * d_{зз} * e * \eta) / (\rho * c * l * l), \text{ где}$$

K_i - коэффициент (1 для $\lambda/4$, 4 для $\lambda/2$)

$U_{эф}$ - эффективное электрическое напряжение на преобразователе,

$d_{зз}$ - площадь по толщине преобразования,

η - механико-акустический КПД преобразователя (~ 0.75–0.8),

ρ - волновое сопротивление среды.

2. Для многослойного преобразователя:

$$P_{уд} = \frac{2\pi * \pi * d_{зз} * d_{зз} (\rho_1 * c_1)^2 * f_0 * l^2 * E \varepsilon^2 * \eta}{\rho * c (1 + [\pi * f_0 * l * \rho_1 * c_1 * S_1 / (\rho * c^2 * S)]^2)}$$

ρ, ρ_1 - плотности керамики и металла,

S, S_1 - площади керамики и накладок.

4.7. Расчет ультразвуковых преобразователей

Исходные параметры расчета преобразователя.

Исходной величиной для расчета пьезоэлектрического преобразователя является мощность, которую необходимо ввести в зону обработки. Зная основные свойства пьезоматериала и удельную мощность излучения пьезоматериала, находим суммарную площадь излучателя S.

1. Эффективное напряжение необходимое для возбуждения преобразователя определяется по формуле:

$$U_{\text{эфф}} = \frac{1}{2 \cdot d_{33} \cdot E_3 \cdot \eta} \cdot \sqrt{P_{\text{изл.уд}} \cdot \rho \cdot c}$$

Таким образом определяется напряжение, которое нужно подать на пьезоматериал для обеспечения необходимой акустической мощности в обрабатываемой среде.

2. Амплитуда колебаний пьезоэлемента находится в зависимости от пьезомодуля и приложенного напряжения:

$$\xi = d_{33} \cdot U_{\text{эфф}} / 300$$

3. Сопротивление потерь в пьезокерамике

$$R_{\text{д}} = \frac{2}{(S \cdot f_0 \cdot \epsilon \cdot \text{tg} \delta)}$$

- 4 Сопротивление излучения

$$R_{\text{изл}} = \frac{U^2_{\text{эфф}}}{P_{\text{изл.уд}} \cdot S}$$

5. Полное активное сопротивление преобразователя при условии параллельного включения $R_{\text{д}}$ и $R_{\text{изл}}$.

$$R = \frac{R_{\text{д}} \cdot R_{\text{изл}}}{R_{\text{д}} + R_{\text{изл}}}$$

Емкостное сопротивление преобразователя

$$X_{\text{с}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C}$$

6. Полное сопротивление преобразователя

$$Z = R \cdot X_{\text{с}} \cdot \sqrt{R^2 + X^2_{\text{с}}}$$

7. Эффективное значение силы тока

$$I_{\text{эфф}} = U_{\text{эфф}} / Z$$

Пьезоэлемент входит в состав колебательной системы.

Колебательная система - основной узел УЗ установки. При всем многообразии УЗ технологических установок общим для них является то, что полезный эффект в них достигается за счет энергии УЗ колебаний.

В состав любой технологической установки входит источник энергии. УЗ колебательная система состоит из частотопонижающих резонаторов-накладок, согласующего трансформатора и рабочего элемента.

Назначение УЗ колебательной системы заключается не только в преобразовании электрической энергии в УЗК, но и в том, чтобы наиболее эффективно ввести акустическую энергию в рабочую среду при заданных значениях амплитуд колебательного звукового давления или колебательной скорости и мощности.

Между преобразователем и обрабатываемой средой может находиться дополнительная колебательная система, связывающая преобразователь с излучающим элементом, так называемым рабочим органом.

Волновод и излучатель, в отличие от пьезоэлемента, являются массивными элементами. На практике возможны два основных способа согласования с нагрузкой.

1. Согласование преобразователя со средой без существенной трансформации колебательной скорости и с помощью мембран.
2. Согласование в режиме усиления с помощью концентраторов. Этот способ наиболее широко используем.

4.7. Элементы теории УЗ концентраторов.

Концентраторы ультразвука являются механическими трансформаторами скоростей или смещений и представляют собой стержни переменного сечения в которых плотность энергии колебаний распределена неравномерно по длине.

На малом выходном сечении скорость понижается, следовательно, амплитуда смещения получается значительно больше, чем на большом входном сечении стержня.

В зависимости от формы образующей концентратора и отношения размеров его входного и выходного сечений коэффициент усиления принимает различные значения.

Под коэффициентом усиления понимают отношение амплитудного значения колебаний на выходе к ее значению на входе. Так, коэффициент трансформации скорости $K = V_1/V_0$, где

V_1 - скорость на выходе

V_0 - на входе.

Концентраторы по форме образующей подразделяют на следующие виды:



Применение каждого из видов концентраторов обусловлено его свойствами. Конические и экспоненциальные - когда УЗК передаются в среду при сравнительно большой нагрузке на выходной конус концентратора, с небольшим коэффициентом усиления.

Катеноидальный и ступенчатый - когда требуется большое усиление при небольшой нагрузке на концентраторе

Концентраторы обеспечивают интенсивности звука $\sim 5-10 \text{ Вт/см}^2$

При расчете концентраторов предполагается, что вдоль его оси распространяется без затухания плоская волна. Всякий концентратор должен быть резонансным (только в этом случае он обеспечивает усиление).

Резонансные длины концентраторов:

- ступенчатого $l_p = \lambda/2 = c/(2*f)$

- экспоненциального $l_p = \frac{c}{2*f} * \phi$, где ϕ - коэффициент, зависящий от соотношения $N = D1/D2$

N	2	3	5	10
ϕ	1.02	1.06	1.12	1.24

Коэффициент усиления ступенчатого концентратора $K = N*N$, является максимальным для всех концентраторов.

Для экспоненциального $K = N$.