

## ПРИМЕНЕНИЕ ПЬЕЗОКРИСТАЛЛОВ В МАЛОГАБАРИТНЫХ ДАТЧИКАХ УСКОРЕНИЯ

*В статье рассмотрены примеры использования самодельных датчиков ускорения в научных целях (для изучения высокооборотных турбомашин).*

### 1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ДАТЧИКОВ УСКОРЕНИЯ НА ПЬЕЗОКРИСТАЛЛАХ

Пьезокристаллы (или пьезоэлектрики) – это вещества, обладающие способностью вырабатывать электричество под воздействием деформации или механического напряжения, см. рис. 1.

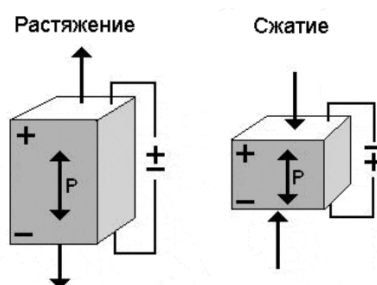


Рис. 1. Схема пьезокристаллов.

Обкладки пьезокристаллов имеют металлизированное напыление серебра, которое позволяет «снимать» ЭДС либо контактным способом (так делается в звукоснимателях), либо с помощью припаянных тонких проводков (в таком случае пайку следует осуществлять очень аккуратно, т.к. даже кратковременный перегрев при пайке может привести к разрушению металлизированного напыления).

В бытовой звуковоспроизводящей аппаратуре применяются пьезокристаллы, но в ограниченных объемах. В частности, в некоторых бытовых электропроигрывающих устройствах (ЭПУ) для виниловых граммофонных пластинок применяются звукосниматели на основе пьезокристаллов (однако, подавляющее большинство звукоснимателей для ЭПУ магнитного типа, т.к. они обеспечивают более качественное воспроизведение звука).

Пьезокристаллы для звукоснимателей бывают двух типов: пластинчатые или трубчатые, см. рис. 2, для понимания масштаба на фотографии размещена спичка. На трубчатом кристалле отчетливо видны зоны напыления серебра, эти зоны расположены на противоположных сторонах. ЭДС возникает только при прогибе кристалла в плоскости, проходящей через зоны напыления.



Рис. 2. Пластинчатый и трубчатый пьезокристаллы.

Пластинчатые (типа «ПЭК») представляют собой плоскую пластину небольших габаритов; в настоящее время они сняты с производства. Трубчатые (например, для монофонической головки типа «ГЗП-310») – еще более компактные в виде цилиндрической трубки диаметром  $\varnothing 1,4$  мм и длиной 15 мм; такие звукосниматели тоже сняты с производства, однако имеются в продаже до сих пор (по цене 50-100 рублей). На рис. 3 показаны паспорт и внешний вид звукоснимателя «ГЗП-310». Существуют также звукосниматели с трубчатыми пьезокристаллами в стереофоническом исполнении.



Рис. 3. Паспорт и внешний вид головки звукоснимателя «ГЗП-310».

Если к пьезокристаллу подвести электрический сигнал, то возникнет соответствующая деформация кристалла, сопровождающаяся характерным звуком. В бытовой аппаратуре это свойство используется в пьезозуммер излучателях, которые в компьютерах или в сигнальных устройствах издаю т звучание типа «бип-бип», см. рис. 4 (слева), а также в высокочастотных пьезогромкоговорителях. Последние «работают» в верхней области высокочастотного звукового диапазона. На рис. 4 (справа) показан высокочастотный пьезогромкоговоритель. В данных случаях пьезокристалл представляет собой плоский диск диаметром около Ø10-40 мм, а в случае ВЧ-громкоговорителя на плоский диск дополнительно наклеена сферическая излучающая мембрана из металлической фольги или из ПХВ-пленки.



Рис. 4. Внешний вид пьезозуммера и ВЧ-пьезогромкоговорителя.

Широкое применение пьезокристаллов получило у радиолюбителей. Прежде всего нужно отметить использование пьезокристаллов в самодельных датчиках ускорения для осуществления так называемой Электро-Механической Обратной Связи (сокращенно — система ЭМОС).

Дело в том, что пьезодатчик «выдает» сигнал пропорциональный ускорению. Также известно, что звуковое давление громкоговорителя пропорционально ускорению диффузора (или излучающей звук мембраны). Поэтому, если такой датчик ускорения (по-другому его еще называют датчик-акселерометр) приклеить с помощью специального кронштейна на диффузор динамика, то сигнал с датчика будет пропорционален звуковому давлению громкоговорителя. И если сигнал с такого датчика завести на вход усилителя мощности в качестве отрицательной обратной связи, то возникнет ЕДИНАЯ система «Усилитель-Громкоговоритель», которая будет воспроизводить низкие частоты (вплоть до 20-25 Гц) при очень ограниченных габаритах акустического агрегата. Это и есть система ЭМОС. Кроме того, измерения показали, что искажения звукового сигнала громкоговорителя в области низких частот при использовании системы ЭМОС снижаются в 2-3 раза — очень показательный фактор !

Из-за сложности в реализации система ЭМОС, к сожалению, практически не нашла применения в промышленных бытовых аудио агрегатах. Только радиолюбители отваживаются на изготовление подобной системы. Тем не менее, Рижский радиозавод (в бывшем СССР) выпускал серийно активную трехполосную акустическую систему «S-70», в которой была реализована система ЭМОС с датчиком-акселерометром (чуть ли не единственный случай).

В статье А. Имаса «Усилитель с ЭМОС по ускорению диффузора» (ж. «Радио» 1981г. №9, стр. 42-44) была предложена интересная конструкция самодельного датчика-акселерометра, см. рис. 5. На плоский пьезокристалл типа ПЭК (6) с двух сторон приклеены текстолитовые пластины (5). К обкладкам с напылением припаяны тонкие провода, размещенные в экранирующей оплетке (4). Датчик установлен в экране из латунной фольги (7) и закреплен с помощью кронштейна (2) в месте соединения диффузора (3) со звуковой катушкой динамика (1). Пластина под кристаллом расположена таким образом, что часть кристалла, как бы, «свисает» консольно над текстолитовой опорой. И если на основание датчика передается ВЕРТИКАЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ, то консольная часть кристалла под воздействием этого ускорения начинает попеременно изгибаться (вверх и вниз), что и приводит к появлению ЭДС на металлизированных обкладках кристалла.

Следует отметить, что ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ основания датчика не будет приводить к появлению ЭДС на обкладках датчика.

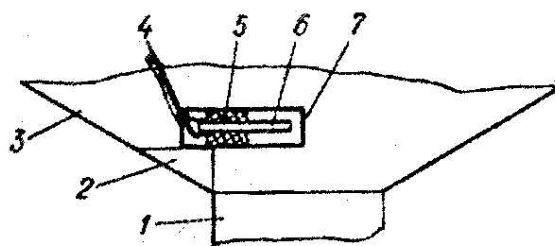


Рис. 5. Датчик ускорения, установленный на диффузоре низкочастотного динамика (рисунок скопирован из статьи А. Имаса).

## 2. ПРОБЛЕМЫ С ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬЮ ДАТЧИКОВ НА ПЬЕЗОКРИСТАЛЛАХ

Если рассмотреть положительные и отрицательные стороны пьезокристаллов в бытовых звукозаписывающих устройствах, то можно сказать следующее.

К положительным характеристикам этих устройств можно отнести относительно хорошую линейность характеристики (АЧХ – амплитудно-частотную характеристику), а также относительно высокий уровень ЭДС. Иными словами, уровень сигнала примерно одинаков по амплитуде в широком частотном диапазоне, а амплитуда сигнала составляет обычно около  $\sim 100$  мВ (или  $\sim 0,1$  в) – что вполне достаточно для регистрации осциллографом без промежуточного усиления (в случае дополнительного усилительного каскада – вообще не возникает никаких проблем). Указанные положительные свойства и предопределили широкое применение этих пьезокристаллов в бытовых звукозаписывающих устройствах.

Отрицательные характеристики пьезокристаллов очень существенные, но главное – их знать...

Первая и самая серьезная проблема – это очень высокое внутреннее сопротивление пьезокристалла – несколько МегаОм!!! Такое высокое внутреннее сопротивление источника сигнала приводит к тому, что источник сигнала начинает, говоря простыми словами, «ловить на себя» внешние помехи! Прежде всего, это касается электрического сетевого фона 50 Гц, но также могут улавливаться помехи от электрических дросселей (в т.ч. от ламп дневного света) или от промышленных шкафов с тиристорным управлением, которые расположены поблизости с пьезокристаллом.

Эксперименты с датчиками-акселерометрами показали, что уровень помехи (фон 50 Гц) может быть примерно равным по уровню с полезным сигналом датчика – **это и есть ГЛАВНАЯ проблема!**

Вторая проблема пьезокристалла – собственный резонанс кристалла, однако эта проблема НЕ существенная. На плоском пьезокристалле конструкции Имаса собственный резонанс датчика составляет примерно 7,5 кГц (измерено), на трубчатом элементе – резонанс не измерялся, но из-за меньших габаритов должен быть чуть выше (примерно 9-11 кГц).

В звукоснимателе с трубчатым элементом типа «ГЗП-310» проблема резонанса решена с помощью демпфирующей вставки (в виде шайбы из особомягкого каучукоподобного компаунда). Если применять подобные датчики в турбомашинах при виброиспытаниях, то следует иметь в виду, что резонанс датчика 7,5-10 кГц соответствует частоте вращения ротора 450-600 тыс. об/мин.

И если частоты вращения ротора турбомашин не превышают 250-300 тыс. об/мин, то такие датчики могут применяться без специальных мер по демпфированию пьезокристалла.

Как же решена проблема помехозащищенности в промышленных исполнениях звукоснимателей с пьезокристаллами?

В виниловых вертушках со звукоснимателем типа «ГЗП-310» использованы так называемые истоковые повторители на полевых транзисторах, которые, существенно ослабляют, но, тем не менее, не устраняют ПОЛНОСТЬЮ помеху в виде сетевого фона. Следует учесть, что данная аппаратура – это изделия второго или третьего класса. Т.е. какой-то фон «50 Гц», пусть слабый, но все-таки остается...

В акустической системе Рижского радиозавода типа «S-70» с системой ЭМОС для уменьшения помех также был применен истоковый повторитель на полевом транзисторе, но этот повторитель был «включен в конструкцию» датчика! **Спорное решение, хотя и обеспечило положительный результат.** Дело в том, что в данной конструкции датчик представляет собой печатную плату диаметром около Ø60 мм, на которой размещены кроме собственно датчика и его крепления, еще и полевой транзистор (в металлическом корпусе), а также и другие элементы схемы (резисторы) плюс припой. Кроме этого – имеет место еще и экран датчика! Данная печатная плата закреплена на диффузоре низкочастотного динамика. В итоге, суммарная масса такого датчика с платой оказалась существенно больше массы датчика конструкции Имаса (в разы!)

В сложившейся ситуации самым предпочтительным вариантом является способ **АКТИВНОГО ПОДАВЛЕНИЯ ПОМЕХИ**. Речь идет о так называемой «**двухпроводной линии**» и об усилителе с «**симметричным входом**».

Лучше всего объяснять это схемное решение на «Операционном Усилителе» (ОУ); это микросхема, как правило, широкого применения, в которой собран транзисторный маломощный усилитель и содержит внутри корпуса около 20-30 транзисторов. Окончательные характеристики электронного устройства определяются как схемотехникой собственно ОУ, так и внешними цепями, которые «навешиваются» снаружи на выводы микросхемы.

ОУ имеет, как минимум, пять (используемых) контактов: два входа, один выход и два контакта питания (плюсовой и минусовой). Это минимальное количество контактов, но иногда используются дополнительные выводы для цепей коррекции. Отличительной особенностью практически любого ОУ является его «двухполярное питание», как правило, это ±15 вольт. В принципе, допускается снижение напряжения питания этих микросхем до уровня ±5 вольт, но в такой ситуации ухудшаются характеристики самого ОУ.

Из двух входов ОУ – один так называемый «НЕинвертирующий», другой «Инвертирующий». Если подать сигнал на неинвертирующий вход, то на выходе ОУ сигнал будет совпадать по фазе с входным сигналом, разумеется, уровень выходного сигнала будет определяться коэффициентом усиления. Аналогично, если подать сигнал на инвертирующий вход, то на выходе ОУ сигнал будет в противофазе по отношению к

входному сигналу. Кстати, на схемах и обозначениях инвертирующий вход ОУ, как правило, обозначается знаком «-» или «кружочком».

На рис. 6 показана типовая схема инвертирующего включения ОУ. Коэффициент усиления в этом случае равен :

$$k_u = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

Знак «-» в данной формуле означает изменение фазы выходного сигнала по отношению к входному сигналу на  $180^\circ$ . Выходное и входное напряжения ОУ связаны соотношением :

$$U_{\text{вых}} = k_u * U_{\text{вх}}$$

На рис.7 показана схема неинвертирующего включения ОУ. Существенной характеристикой данной схемы является чрезвычайно высокое входное сопротивление усилителя, что актуально в случае, когда источник сигнала имеет очень высокое внутреннее сопротивление, например, пьезокристалл. Коэффициент усиления в этом случае равен :

$$k_u = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

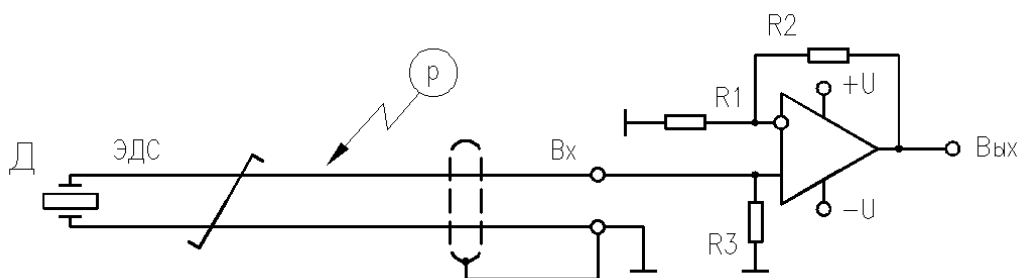


Рис. 7. Схема неинвертирующего включения ОУ.

На схеме приведена типовая схема подключения источника сигнала : один провод от источника (Датчика) подключен ко входу ОУ, другой – заведен на землю. Если источник сигнала и кабельная линия «ловят» помеху, то при такой схеме подключения помеха (р) вместе с полезным сигналом (ЭДС) «проникает» на вход усилителя. В конечном итоге избавиться от помехи практически невозможно! На схеме дополнительно показана «витая пара» и экранирующая оплетка кабеля.

Уникальным качеством ОУ является его способность подавлять так называемые «синфазные сигналы». Иными словами, если подать **ОДИНАКОВЫЕ** сигналы одновременно на оба входа (на инвертирующий и на неинвертирующий), то выходной сигнал будет близким к нулю. По-простому – ОУ будет «вычислять» разницу сигналов, подаваемых на два разных входа. Это так называемый «дифференциальный усилитель». Есть такой параметр ОУ, как «Коэффициент ослабления синфазной помехи», в типовых микросхемах он равен от 60 до 80 децибел. Так, например, значение этого параметра «60db» означает, что синфазный сигнал будет ослаблен в 1.000 раз по амплитуде, «80db» – в 10.000 раз по амплитуде !

Именно это свойство ОУ и используется в реализации активного подавления помехи. Источник сигнала подключен тонкими (и возможно, длинными) проводами на вход дифференциального усилителя. Но, эти провода предварительно скручены в витую пару, более того, эта витая пара должна быть размещена в экранирующей оплетке. На рис. 8 показана схема такого включения ОУ.

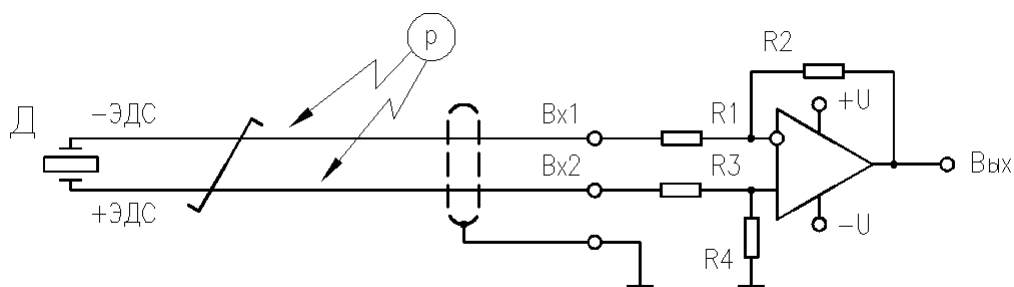


Рис. 8. Двухпроводная линия и усилитель с симметричным входом.

Идея метода состоит в том, что на противоположных обкладках датчика полезный сигнал генерируется в противофазе. Т.е. если на нижней обкладке датчика сигнал положительный (+ЭДС), то на верхней обкладке датчика сигнал будет в противофазе (-ЭДС). Соответственно, в подводящих проводах «полезные сигналы» также будут противоположные по фазе. Однако же помеха (р), которая наводится на эти же самые кабели извне – будет наводиться на оба провода **в одинаковой фазе!** В этом и есть, что называется, «ключевой момент»!

Кабельная линия датчика подключена между двумя входами ОУ (по сути, реализован вариант дифференциального усилителя), и на выходе усилителя формируется разница этих двух сигналов. Таким образом, помеха «уничтожается» (просто – арифметически вычитается), а полезный сигнал усиливается. Коэффициент усиления устройства определяется отношением  $(R2/R1)$ . Кроме того, чтобы схема работала корректно, должны соблюдаться следующие условия :  $R1=R3$  и  $R2=R4$ , резисторы должны быть подобраны с точностью не более 1%. Это и есть так называемая «**двухпроводная линия**» в сочетании с «**усилителем с симметричным входом**».

Однако, показанная на рис. 8 схема, идеально подходит для низкоомного источника сигнала, и не является абсолютно точной для случая высокоомного источника (пьезокристалла). Дело в том, что входное сопротивление инвертирующего входа ОУ существенно меньше входного сопротивления неинвертирующего входа, и для высокоомного источника это может иметь значение. Т.е. для пьезокристалла данная схема не совсем симметрична и была приведена здесь по причине максимальной простоты – на ней очень наглядно объяснить механизм подавления помехи.

### 3. КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА РЕГИСТРАЦИИ ВИБРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ МАЛОГАБАРИТНОГО ДАТЧИКА УСКОРЕНИЯ НА ПЬЕЗОКРИСТАЛЛЕ

Чтобы грамотно реализовать согласующее устройство с симметричным входом для источника с очень высоким внутренним сопротивлением нужно применить более сложную схему. Самым радикальным вариантом является дифференциальный усилитель на трех ОУ. Однако имеется оригинальный вариант – на двух ОУ, принципиальная схема такого согласующего устройства для датчика ускорения показана на рис. 9.

Из схемы видно, что оба провода датчика (Д) подключены по абсолютно симметричным линиям. Разумеется, провода скручены в «витую пару», которая размещена в экранирующей оплетке. Со стороны датчика экран припаян к экрану датчика, а в согласующем устройстве экран заведен на землю устройства.

Для правильной работы данной схемы необходимо обеспечить следующие условия :  $R1=R4$ ,  $R2=R3$ , резисторы R1-R4 должны быть подобраны с точностью не более 1%. Коэффициент усиления устройства равен :

$$k_u = 2 \left( \frac{R4}{R3} + 1 \right)$$

Для случая равенства всех резисторов ( $R1=R2=R3=R4$ ), коэффициент усиления схемы будет равен  $k_u=4$ .

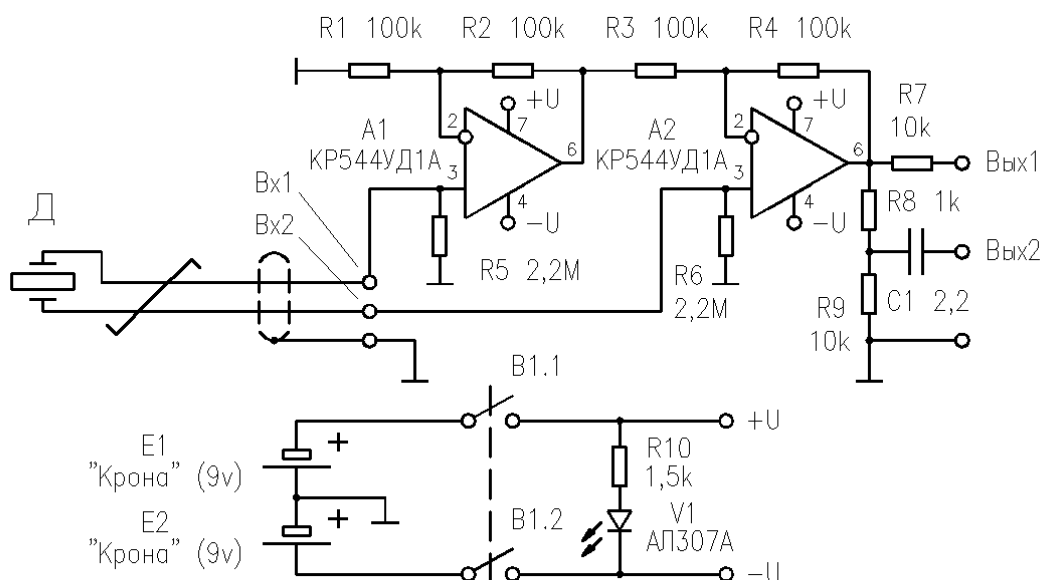


Рис. 9. Принципиальная схема согласующего устройства для пьезокристалла.

Электронный блок имеет два выхода : «Вых.1» – для подключения осциллографа, «Вых.2» – является «линейным выходом» согласующего устройства, этот выход можно использовать для записи аудио-сигнала на магнитофон или на компьютер (для дальнейшего исследования).

Блок питания устройства максимально упрощен. Применены две батарейки типа «Крона» (напряжением по 9 вольт), средняя точка между батарейками заведена на землю, таким образом организовано двухполярное питание ОУ ( $\pm 9$  вольт). Включение и выключение устройства обеспечивается выключателем с двумя группами контактов В1. Индикация включения питания отображается светодиодом V1.

Подобный вариант блока питания обеспечивает автономность устройства – отпадает необходимость в «привязке» к силовой сети 220 вольт. Все элементы схемы размещены в небольшой коробочке из алюминиевого сплава, которая имеет входной разъем для датчика «Джек-2,5мм, стерео», а также два выходных разъема : стандартный для осциллографа и «Джек-3,5мм, моно» для линейного выхода. На рис. 10 представлен внешний вид описанного выше согласующего устройства, габариты «коробочки» 100x65x35 мм (без учета выступающих тумблера питания и разъема для осциллографа).



Рис. 10. Внешний вид согласующего устройства.

Иногда в подобных схемах не удается ослабить помеху до желаемого уровня. Для того чтобы подавлять помеху более эффективно, нужно установить последовательно с резистором R1 дополнительный переменный резистор R1', на рис. 11 показан доработанный фрагмент предыдущей схемы.

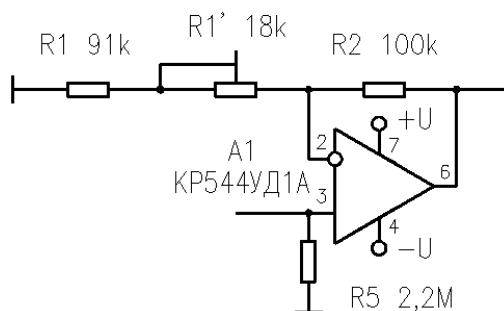


Рис. 11. Доработанный фрагмент согласующего устройства для более точного подавления помехи.

Главное, чтобы в сумме резисторы ( $R1+R1'$ ) имели бы возможность плавной регулировки в пределах  $\pm 10\%$  от расчетного номинала резистора  $[R1]$ . Тогда (при отсутствии сигнала с датчика) переменным резистором  $R1'$  следует добиться минимально возможного уровня помехи на выходе устройства.

В принципе для данной схемы подойдут любые ОУ широкого применения (например, К140УД6, КР140УД608, К140УД7, КР140УД708, К544УД1, К574УД1 и т.д.) Но поскольку пьезокристалл имеет очень высокое внутреннее сопротивление, то лучше применить ОУ с полевыми транзисторами во входном каскаде. В этом плане одной из лучших микросхем отечественного производства является микросхема 544УД1 (544УД1А или 544УД1Б) – малозумящий ОУ с полевыми транзисторами на входе, с внутренней коррекцией, с коэффициентом подавления синфазной помехи 80db, в металлическом корпусе, микросхема с военной приемкой.

При изготовлении самодельного датчика ускорения за основу была взята конструкция Имаса с той лишь разницей, что был использован трубчатый пьезокристалл из головки «ГЗП-310», см. рис. 12.

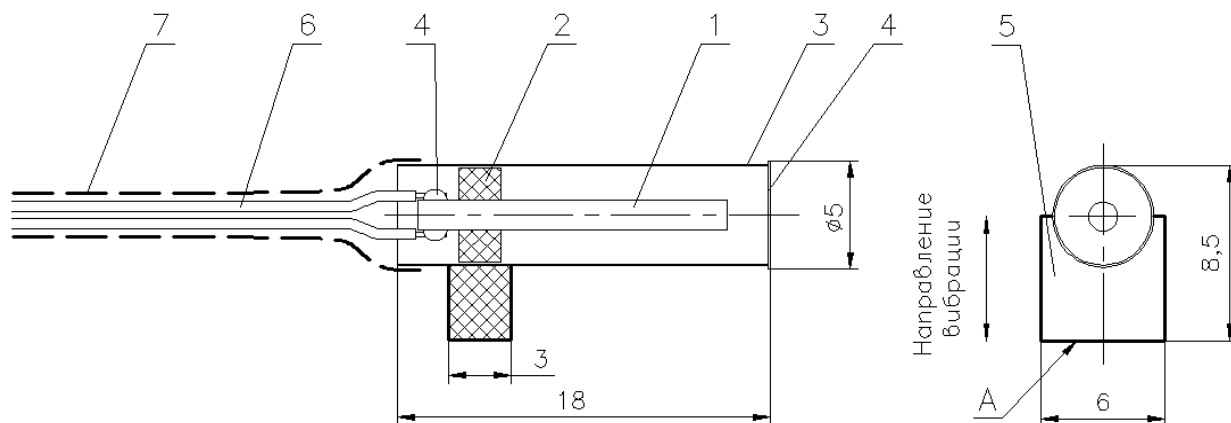


Рис. 12. Конструкция самодельного датчика ускорения на пьезокристалле.

К пьезокристаллу (1) предварительно припаяны очень тонкие провода с фторопластовой изоляцией МГТФ-0,03 (6). Места пайки (4) расположены на самом краю кристалла. Трубчатый пьезокристалл вклеивается с помощью эпоксидного клея в цилиндрическую вставку из стеклотекстолита (2) таким образом, чтобы свободный конец кристалла был выдвинут на 8-10 мм. Отдельно изготавливается экран (3) из латунной фольги толщиной 0,05 мм – лента сворачивается в цилиндр на оправке, стык запаивается. В цилиндрический экран вклеивается также на эпоксидном клее вставка (2) с пьезокристаллом (1) и с припаянными проводами (6). Полость с местами пайки следует также заполнить эпоксидным клеем. После высыхания клея провода следует скрутить в «витую пару», надеть на них экранирующую оплетку (7), желательно, чтобы оплетка не была слишком жесткая, и припаять экранирующий провод на латунный экран.



С противоположной стороны к экрану нужно припаять цилиндрический торец (4). Последняя операция – это приклеивание датчика на основание (5), очень желательно, чтобы основание располагалось под цилиндрической вставкой (2).

Самое главное при сборке – расположить металлизированные зоны напыления кристалла в вертикальной плоскости! В этом случае датчик будет реагировать на вертикальное ускорение. Ускорение в горизонтальной плоскости датчик не будет воспринимать. Масса такого датчика не превышает 1,5 грамма.

На экранирующую оплетку кабеля следует надеть ПВХ-кембрик или термоусадочную трубку. Длину кабеля рекомендуется сделать около 1 метра, но можно и значительно больше, т.к. согласующее устройство позволяет эффективно подавлять помехи. В качестве разъема использован разъем типа «Джек d2,5 мм, стерео».

Для приклеивания датчика на испытуемое изделие рекомендуется применять клей «Циакрин». Это однокомпонентный клей, который очень быстро сохнет и обеспечивает надежное соединение. Достаточно на нижнюю часть основания (А) нанести каплю клея циакрин, прислонить датчик к детали и зафиксировать его в прижатом состоянии на несколько секунд. Если нужно датчик снять с изделия, то достаточно несильно ударить по основанию датчика в горизонтальном направлении – и датчик «отвалится» (это особенность клея циакрин).

#### 4. ПРИМЕНЕНИЕ САМОДЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ УСКОРЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ И НАУЧНЫХ ЦЕЛЯХ

В конце 80-х годов на одном из заводов (п/я, г. Москва) возникла необходимость измерить резонансную частоту стяжки трехколесного ротора высокооборотного турбохолодильника на газовых подшипниках. На испытательной метрологической станции был предложен для испытаний аттестованный стандартный датчик-акселерометр, который конструктивно выглядел в виде болта с резьбой около М16 (масса такого датчика была около 70-90 грамм, «размер под ключ» – около  $S=24\text{мм}$ )... Что-то наподобие датчиков, показанных на рис. 13.



Рис. 13. Промышленные датчики-акселерометры.

Более компактного датчика в наличии не было... Очевидно, что предложенный датчик хорошо подошел бы для измерений вибраций большой гидротурбины на ГЭС, но совершенно не годился для измерений резонансных явлений в малогабаритных деталях высокооборотных турбомашин. Поэтому был изготовлен самодельный датчик конструкции Имаса на плоском пьезокристалле. Первоначально датчик был протестирован на вибростоле, эти испытания зафиксировали наличие собственного резонанса датчика на частоте около 7,5 кГц.

В ходе испытаний был собран ротор турбохолодильника (ТХ) с испытуемой стяжкой. На стяжку ротора клеем циакрин был приклеен самодельный датчик-акселерометр, стяжка была затянута штатным усилием (около 5 тонн), для вывода проводов датчика в вале предварительно было прожжено на электроэрозионном станке отверстие, см. рис. 14.

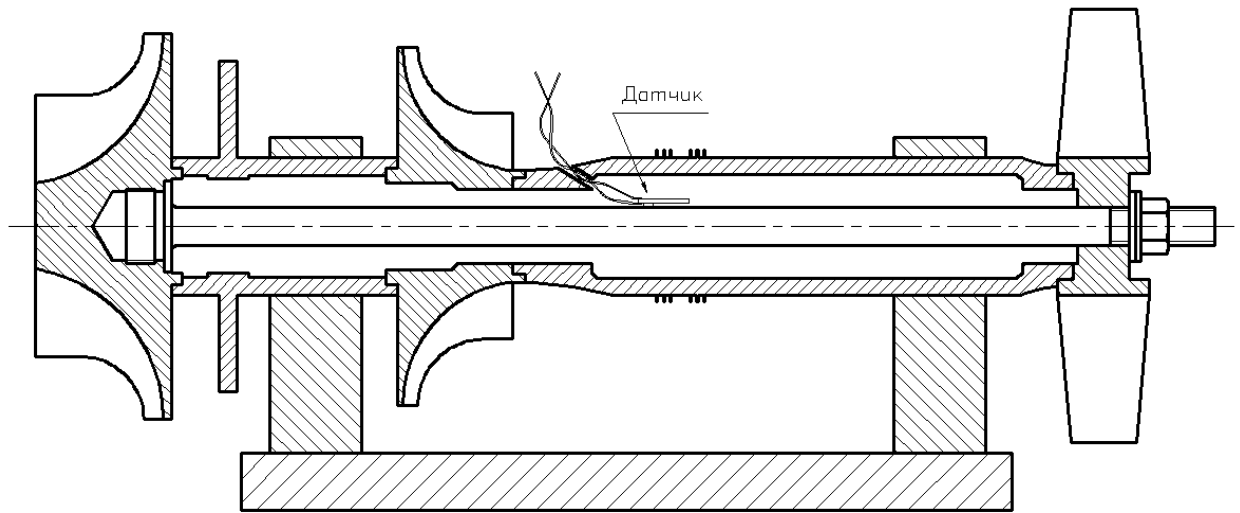


Рис. 14. Схема ротора турбохолодильника с испытуемой стяжкой.

Собранная конструкция была размещена на специальном ложементе и установлена на вибростол. В процессе сканирования частотного диапазона вибростола (при постоянной виброперегрузке около  $1g$ ) с помощью осциллографа и самописца была зафиксирована частота «первого резонанса» стяжки, которая составила  $470$  Гц (что соответствует частоте вращения ротора  $28,2$  тыс. об/мин). Картина на самописце выглядела примерно следующим образом, см. рис. 15 (справа). По оси абсцисс – частота в [Гц], а по оси ординат – амплитуда сигнала с датчика [вольт], на резонансной частоте амплитуда сигнала возрастает более чем на порядок.

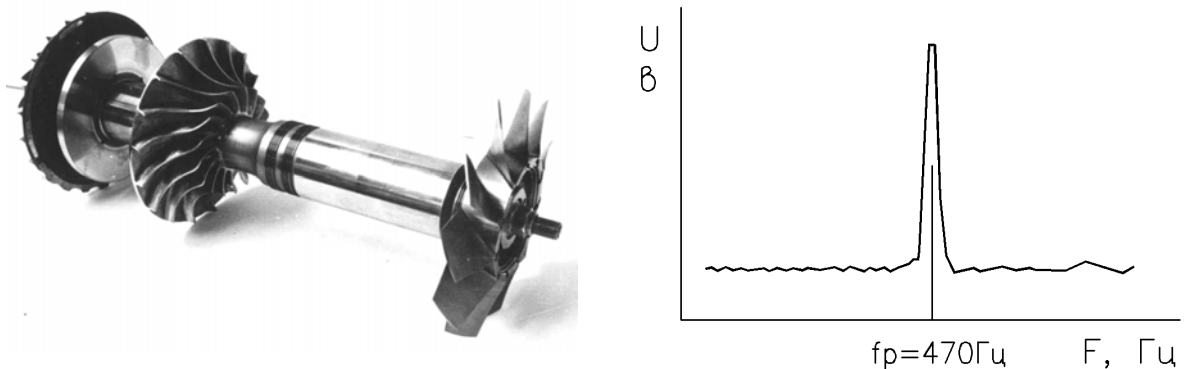


Рис. 15. Внешний вид ротора ТХ и результат испытаний на самописце.

При испытаниях экспериментального турбохолодильника при частоте вращения ротора около  $28.500$  об/мин произошел аварийный останов ТХ из-за заклинивания подшипников. Проведенные испытания стяжки подтвердили, что причиной аварии подшипников явился резонанс стяжки. В последствие были внесены изменения в конструкцию ротора, что позволило избавиться от нежелательных резонансов.

Далее приведен второй пример удачного использования самодельного датчика-аселерометра в реальной работе. В данном случае была измерена «первая критическая» частота ротора фреонового высокооборотного турбогенератора мощностью  $1$  кВт в экспериментальной установке по утилизации «сброного» тепла.

Был собран ротор с пятой, но без алюминиевого колеса турбины. Датчик Имаса на плоском элементе был приклеен на поверхность ротора (в данном случае клеем типа БФ-2). Ротор был подвешен в вертикальном положении с помощью ниток за пяту, как показано на рис. 16. По нижней части ротора наносился легкий удар карандашом, место и направление удара указано на схеме стрелкой. Провода с датчика были заведены на усилитель с симметричным входом и затем на цифровой запоминающий осциллограф.

В момент удара по ротору появлялся характерный звук : «дзинь...», что указывало на колебания ротора на частоте собственного резонанса. Датчик в этот момент генерировал синусоидальный сигнал соответствующей частоты, который быстро затухал. Картинка, возникающая на экране цифрового осциллографа, приведена на том же рисунке справа сверху.

С помощью «маркеров» осциллографа был измерен период колебаний ротора ( $T$ ), в данном случае он составил  $T=286\text{мкс}=2,86*10^{-4}\text{с}$ . Частота собственных колебаний ротора («первая критика») рассчитывается следующим образом :

$$fp = \frac{1}{T} = \frac{1}{2,86*10^{-4}} = 3500(\text{Гц})$$

Теперь остается перевести эту частоту в «обороты в минуту» :

$$n = 60 * fp = 60 * 3500 = 210000(\text{об / мин})$$

Если сигнал с датчика НЕ «обрабатывать» согласующим устройством с симметричным входом, а завести с датчика непосредственно на осциллограф, то на сигнал от собственных колебаний ротора будет накладываться помеха в виде фона «50 Гц». Причем амплитуда этой помехи, как оказалось, соизмерима с полезным сигналом датчика, см. картинку справа внизу на рис. 16. Очевидно, что при указанной схеме испытаний помеха в виде сетевого фона не может помешать измерить частоту собственных колебаний ротора.

Однако, при использовании датчика ускорения при других испытаниях применение согласующего устройства с симметричным входом крайне желательно! Иначе картина виброиспытаний изделий может быть сильно искажена из-за присутствия помехи с высоким уровнем.

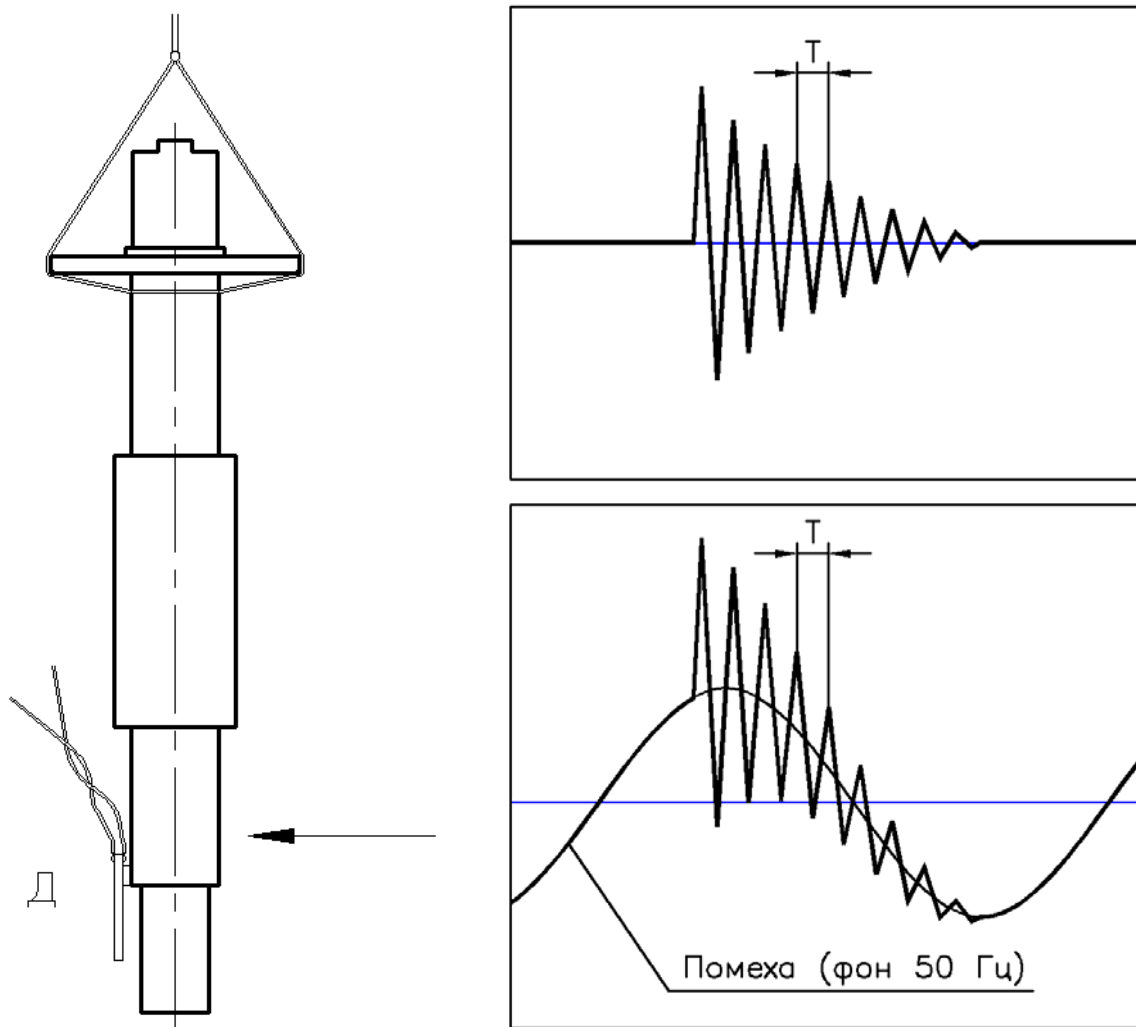


Рис. 16. Схема измерений «первой критической» частоты ротора, пояснения в тексте.

После этого испытания были продолжены. А именно, была измерена «первая критика» ротора с установленным рабочим колесом турбины. Резонансная частота с колесом уменьшилась до значения 195 тыс.об/мин (без колеса – 210 тыс.об/мин). Различие в результатах всего около 7%, такую незначительную разницу в результатах можно объяснить небольшим размером и массой колеса турбины.

Расчетная частота вращения ротора фреонового турбогенератора составляла 100 тыс.об/мин. В данном случае имел место 2х-кратный запас по критической частоте ротора. Дальнейшие испытания подтвердили надежность изделия.

Иногда еще на стадии проектирования турбомашин возникают сомнения по поводу критической частоты ротора. В этом случае можно изготовить упрощенную модель ротора (из недорогой стали и без соблюдения точных допусков), чтобы на этой модели оперативно измерить с помощью датчика ускорения резонанс – дешево, быстро и надежно.

Для исследования резонансных явлений в корпусах турбомашин можно также использовать датчики ускорения. Для этого датчик или несколько датчиков одновременно следует укрепить на корпусе турбины (в «нужных» местах) и вывести полученные сигналы на осциллограф или на линейный вход компьютера для записи и последующего изучения записанных файлов. Например, тонкостенные корпуса турбин могут резонировать и являться, таким образом, источником серьезных проблем в процессе эксплуатации. Совершенно очевидно, что подобным способом можно изучать вибрации не только турбин, но также и любых других механизмов : компрессоров, электродвигателей, редукторов, соединительных муфт, подшипников. Можно также изучать резонансные явления трубопроводов.

Автомеханики для диагностики работы двигателей применяют специальные фонендоскопы, см. рис. 17. Эти приборы заимствованы из медицины с некоторой доработкой и позволяют прослушивать характерные шумы от различных механизмов. Специальный щуп обеспечивает доступ в узкие щели конструкции.



Рис. 17. Фонендоскоп для авто-механиков.

Подобный фонендоскоп можно усовершенствовать, «приспособив» к нему предложенный выше (см. рис. 12) датчик ускорения. В качестве рукоятки лучше всего использовать готовую отвертку со спиленным концом. На рукоятку с помощью хомута и демпфирующей прокладки нужно закрепить щуп с плоской торцевой площадкой на противоположной стороне. На торцевой площадке следует укрепить датчик ускорения, см. рис. 18.

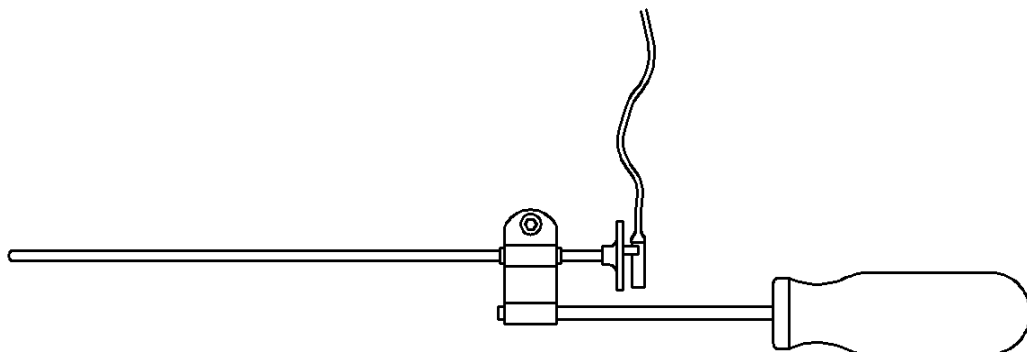


Рис. 18. Измерительный щуп с датчиком-акселерометром.

Подобное устройство в сочетании с согласующим устройством с симметричным входом позволяет оперативно наблюдать на экране осциллографа и записывать на компьютер «картины вибраций» практически в любом месте испытуемой машины, в т.ч. и в труднодоступных местах.

## 5. В КАКОМ ВИДЕ СЛЕДУЕТ ПРЕДСТАВЛЯТЬ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ?

Если датчик используется для измерения «первой критики» ротора, то никакой дополнительной обработки сигнала датчика не требуется. В этом случае датчик «выдает» синусоидальный затухающий сигнал (см. рис. 16), по которому нужно определить период колебаний (Т) и затем уже рассчитать критическую частоту.

Если датчик используется для определения частоты резонанса детали методом частотного сканирования на вибростоле, то также не требуется дополнительной обработки сигнала датчика. На самописце, который входит в комплект оборудования вибростола, будет зафиксирован резкий рост амплитуды сигнала с датчика, что укажет на частоту резонанса (см. рис. 15).

Совсем другое дело, когда датчик закреплен на корпусе турбины и показывает общую картину вибрации корпуса. Аналогичную картину можно наблюдать с датчика, если вибрация «снимается» с корпуса турбины с помощью измерительного щупа. В этом случае в сигнале датчика присутствует большое множество гармонических колебаний разных частот и амплитуд, картинка может быть примерно такой, как показано на рис. 19. И как в таком случае следует трактовать полученный результат ?

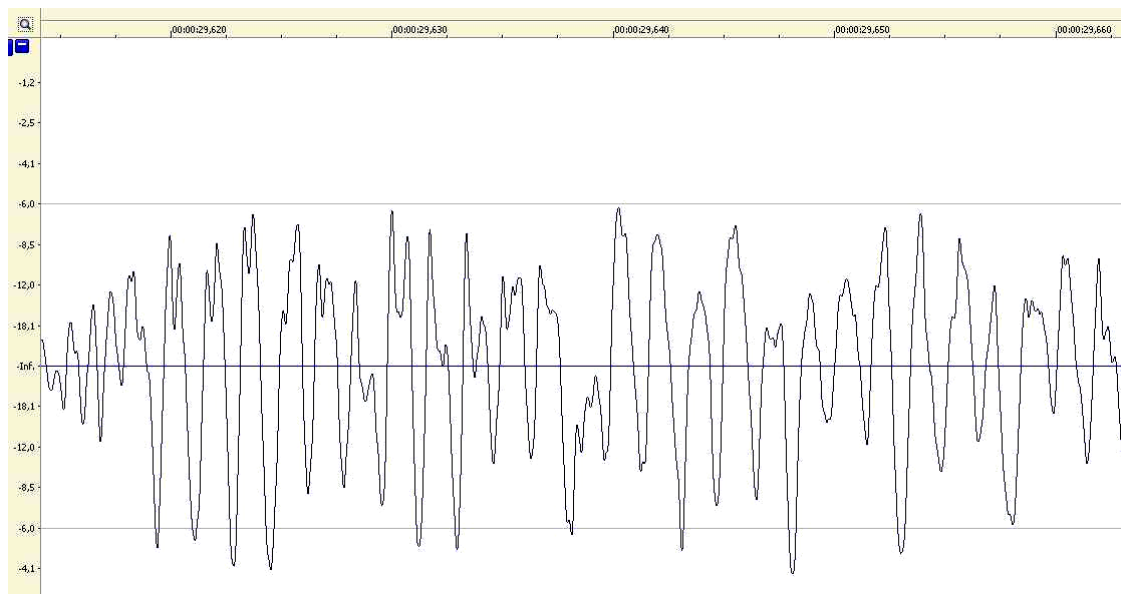


Рис. 19. Возможная картина вибрации.

Во-первых, следует обязательно избавиться от помехи с помощью согласующего устройства, иначе исследование полученного сигнала может существенно усложниться.

Во-вторых, если записывать полученный сигнал на компьютер, то очень желательно, чтобы компьютер имел высококачественную звуковую карту. Т.е, компьютер должен быть «заточен» для воспроизведения высококачественного звука уровня «Hi-Fi». Звуковая карта невысокого класса может добавить «новые помехи» уже на линии от согласующего устройства до компьютера, главным образом, по части фильтрации питания.

Итак, предположим, что помехи отсутствуют, что же делать дальше с полученным результатом?

На мой взгляд, следует полученный сигнал «обработать» с помощью спектроанализатора (это либо электронный блок, либо компьютерная программа, которые могут осуществить соответствующую обработку сигнала).

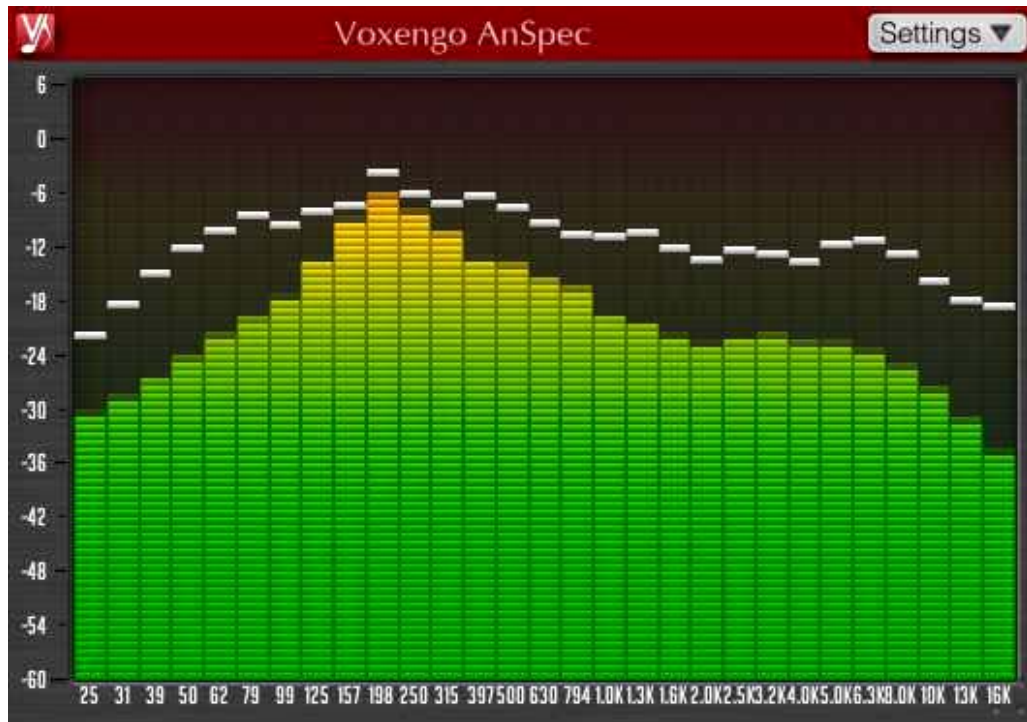


Рис. 20. Третьоктавный спектроанализатор.

На рис. 20 показан результат обработки аудио-сигнала с помощью третьоктавного спектроанализатора. Это такой спектроанализатор, который разбивает весь диапазон частот на узкие полосы (по три полосы в октаве) и в каждой полосе измеряет мощность сигнала. Результат представляется в виде набора «столбиков»: по оси абсцисс – частота каждого столбика, по оси ординат – мощность сигнала в каждой полосе, выраженная в децибелах.

В принципе, это удобно. Вместо нагромождения синусоидальных сигналов, в конечном счете, получаем картинку, указывающую на какой частоте какая именно мощность вибрации. Разница в каждые [3db] – соответствует разнице по мощности в 2 раза.

Существуют специальные программы для обработки звуковых файлов, например, «Sony Sound Forge 9.0». В этой программе имеются широкие возможности для обработки файлов (шумоподавление, эквалайзер и т.п.) В том числе есть и спектроанализатор, который можно дополнительно настроить. В частности, можно активировать режим «гистограмма» – тогда анализ спектра будет представлен в виде «столбиков». Или можно активировать режим «заполненная диаграмма», тогда анализ спектра сигнала будет осуществлен в виде сплошной линии, см. рис. 21. Кроме того, можно указать диапазон частот, в котором проводится анализ спектра вибрации, вне этого диапазона результаты игнорируются.

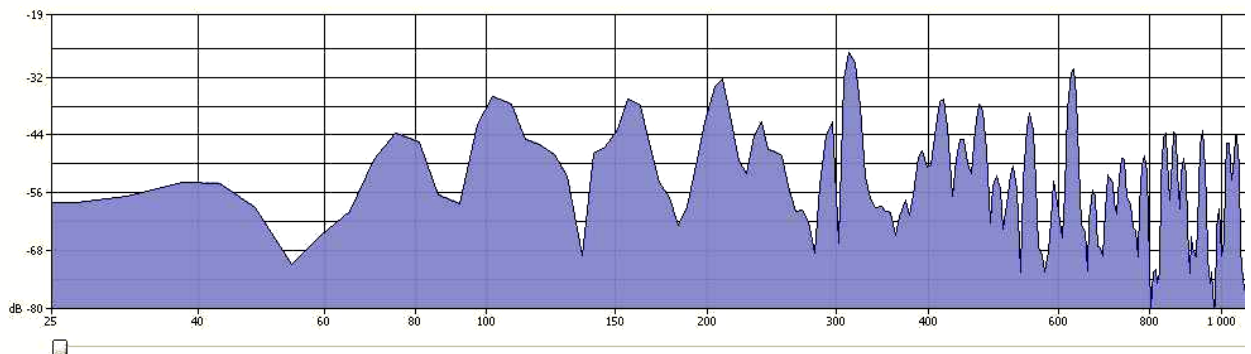


Рис. 21. Пример спектроанализатора программы «Sony Sound Forge 9.0» в виде заполненной диаграммы.

Программы обработки звука, как правило, могут работать в режиме «стерео», т.е. имеют два канала обработки. Таким образом, такой спектроанализатор может вести обработку сигналов одновременно с двух датчиков вибрации, в некоторых случаях при испытаниях турбомашин это может быть актуально.

Очевидно, что окончательный вид представленных результатов испытаний по вибрации корпусов турбин и других механизмов определяется компьютерными технологиями. Главная задача датчика ускорения – «выдать» электрический сигнал, пропорциональный ускорению испытываемого объекта. Задача согласующего устройства – подавить помехи, которые наводятся на кабельную линию.

## **6. ПУТИ ДОРАБОТКИ И МОДЕРНИЗАЦИИ УСТРОЙСТВА.**

Предложенное на стр. 6-9 устройство регистрации вибрации имеет хорошие характеристики и может контролировать вибрации различных механизмов, а также использоваться для научно-исследовательских целей. К нему только нужно добавить в комплект осциллограф и (или) компьютер. Тем не менее, можно улучшить его характеристики. Можно рекомендовать следующие доработки.

1. Желательно откалибровать датчик (совместно с согласующим устройством) на вибростоле с помощью аттестованного датчика-акселерометра. В этом случае при исследованиях можно будет точно знать, какая именно виброперегрузка возникает на испытуемом изделии (0.5g, 1g или 2g?) Без калибровки и тестирования данная система является только индикатором, но не измерителем.
2. Желательно сделать в согласующем устройстве переключатель на два диапазона по чувствительности. Один «нормальный» с коэффициентом усиления около 3-5, и другой – с коэффициентом усиления на порядок больше. Тогда при малых уровнях вибрации можно будет переключать диапазон на более чувствительный.
3. Желательно предусмотреть в согласующем устройстве потенциометр для точного подавления помехи. Таких потенциометров должно быть два – для каждого поддиапазона чувствительности. В случае замены датчика-акселерометра необходимо заново отрегулировать подавление помехи.
4. Целесообразно предусмотреть несколько независимых каналов в согласующем устройстве – 2, 3 или 4 канала. Тогда можно будет регистрировать вибрации одновременно по нескольким датчикам. В этом случае каждый датчик следует пронумеровать и если калибровать прибор, то каждый канал отдельно.
5. В случае выполнения всех предыдущих пунктов, согласующее устройство превращается в солидный электронный прибор, и на батарейках вряд ли сможет надежно работать. Для такого прибора следует изготовить «нормальный» блок двухполярного питания с номинальным для ОУ напряжением  $\pm 15$  вольт.

В итоге, согласующий блок станет «стационарным», но зато многоканальным и с улучшенными характеристиками. А предложенное ранее устройство (на батарейках) можно использовать как «переносное», так сказать, для работы «в полевых условиях».

**С. Зотов**  
**2012 год**