

Область техники

Настоящее изобретение касается способа и устройства для измерения и индикации отклонений от постоянных состояний посредством обнаружения в реальном времени временных внутренних колебаний материала в важных деталях оборудования и сооружений, например, при испытаниях опытных образцов, в существующем производственном оборудовании и/или при контроле и обслуживании ранее созданной инфраструктуры.

Обзор известных технических решений

Последние разработки в области микроэлектроники, прежде всего развитие все более и более мощных запоминающих устройств для компьютеров, привели к тому, что имеющиеся на рынке измерительные преобразователи или датчики различных типов, такие как акселерометры, индикаторы изгиба/деформации, индикаторы акустической эмиссии и так далее, предназначенные для измерения величин, важных для определения размеров изделий при их разработке, стали слишком сложными по своей конструкции и, в результате, чрезмерно громоздкими и дорогостоящими для применения в масштабах, которых все более требует конструирование современного оборудования и которые, в частности, допускают современное программное обеспечение.

Сущность изобретения

Поэтому одной из главных целей настоящего изобретения является создание преобразовательного элемента или датчика и схемы с его использованием, которые, в принципе, являются чрезвычайно простыми и, следовательно, так экономят занимаемое пространство, что позволяют реализовать ранее невозможные конфигурации преобразователей или датчиков, в то же время предоставляя возможность измерения со значительно большей чувствительностью и точностью в более широких диапазонах, чем было возможно до настоящего времени, и, более того, предоставляя возможность измерения ранее почти не обнаружимых величин.

Другой целью настоящего изобретения является создание датчика, имеющего такую небольшую собственную массу, что она не оказывает никакого влияния на объект измерений.

Вышеуказанные цели достигаются посредством способа и устройства, при этом устройство состоит из одного или нескольких аморфных или нанокристаллических ленточных элементов толщиной по меньшей мере около 20 мкм с высокой магнитной проницаемостью и относительно высокой магнитострикцией, накладываемых на соответствующую деталь; эти ленточные элементы для достижения желаемой структуры материала подвергнуты термомагнитной обработке, ленточные элементы по меньшей мере частично окружены многослойными катушками; движения атомов, которые происходят при произвольном отклонении от постоянного состояния, передаются ленточному элементу/элементам, либо вызывая в катушке четко измеримое и обнаружимое изменение магнитного потока (dB/dt), пропорциональное упомянутым движениям атомов, либо аналогично измеримое и обнаружимое изменение индуктивности катушки/катушек.

Перечень чертежей

Ниже изобретение будет описано более подробно со ссылкой на сопровождающие чертежи. На чертежах:

фиг. 1 - показан датчик акустической эмиссии, сфотографированный на фоне миллиметровой бумаги;

фиг. 2 - показана схема датчика для обнаружения акустической эмиссии;

фиг. 3 - показан выходной сигнал как функция силы положительного и отрицательного растяжения в случае измерения изменения индуктивности;

фиг. 4 - показаны временные диаграммы сигналов от каждого из соответствующих преобразователей P1_1 (фиг. 4a, верхний график), P1_2 (фиг. 4b, в центре) и P1_3 (фиг. 4c, внизу);

фиг. 5 - показаны частотные спектры выходных сигналов при раскалывании стекла для P1_1, P1_2 и P1_3 (фиг. 5a, верхний график, фиг. 5b, в центре и фиг. 5c, внизу соответственно);

фиг. 6 - показано схематическое изображение возможной конструкции датчика акустической эмиссии на основе аморфного материала;

фиг. 7 - показан выходной сигнал датчика акустической эмиссии при кратковременном возбуждении.

Подробное описание изобретения

Применение в качестве датчика повреждения стекла.

Принцип действия.

Преобразователь или индикатор состоит из аморфного ферромагнитного материала, который обладает тем свойством, что ему может быть придана чрезвычайно высокая магнитная проницаемость, $5000 < \mu < 200000$, и в то же самое время он имеет, для некоторых составов сплава, относительно высокую магнитострикцию, $5 < \lambda_{\text{sat}} < 40 \text{ ppm}$. Все это вместе взятое дает материал, обладающий очень высокой магнитоупругой связью и поэтому очень подходящий в качестве материала датчика.

При использовании ленты с размерами приблизительно $3 \times 10 \text{ мм}$, которая вырезана из листа аморфного материала толщиной 22 мкм и затем наклеена на любой выбранный материал, могут быть обнару-

жены напряжения в этом материале. Аморфному материалу могут быть приданы различные свойства путем вырезания его в различных направлениях относительно направления прокатки, в данном случае оно было выполнено вдоль и поперек направления прокатки.

Параметры материала можно также изменять путем его термообработки в магнитных полях при температурах, близких к температуре кристаллизации, но ниже ее. В случае повреждения стекла, и вообще для акустической эмиссии, изменение магнитного потока обнаруживают путем намотки вокруг ленты многовитковой катушки, см. фиг. 1 и 2.

Теория.

Для того чтобы обнаруживать высокочастотные сигналы, удобно и просто измерять изменение магнитного потока и полагать, что оно пропорционально деформации ленты. Это подразумевает, что должно быть достигнуто вполне определенное начальное состояние намагниченности, так как ненамагниченная лента не дает никакого изменения потока при изменении напряжения.

Для того чтобы достигнуть намагниченного начального состояния, в принципе достаточно магнитного поля Земли величиной 30-60 мкТл (20-40 А/м), но, с другой стороны, необходимость контролировать направление и величину магнитного поля Земли при установке и калибровке индикатора является непрактичной.

Есть два способа достигнуть удовлетворительного начального состояния
легкая магнитная оболочка и пропускание постоянного тока через катушку датчика;
легкая магнитная оболочка и смещающее намагничивание постоянным магнитом.

Величина поля должна быть такой, чтобы магнитная индукция составляла 0,2-0,7 Тл. Это означает, что напряженность магнитного поля в ленте должна иметь величину порядка 2-56 А/м. Напряженность поля в общем случае может быть вычислена по формуле

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu},$$

где H - напряженность магнитного поля;

B - плотность магнитного потока;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Вс/Ам - магнитная проницаемость вакуума;

μ - относительная магнитная проницаемость, в данном случае для аморфной ленты.

Измеряемый сигнал получают путем обнаружения изменения магнитного потока в ленте вследствие растяжения/сжатия. Для линейного случая функцию будет описывать следующее уравнение:

$$\Delta B = d \cdot \Delta \sigma + \mu_0 \cdot \mu \cdot \Delta H,$$

где σ - механическое напряжение;

d - коэффициент магнитоупругой связи.

Префикс Δ обозначает изменение относительно первоначального значения. Параметр d материала может быть приблизительно определен путем деления максимальной магнитострикции при постоянном механическом напряжении, $\Delta \sigma = 0$, на намагничивающее поле при магнитном насыщении, т.е.

$$\frac{\lambda_{\max}}{H_{\max}} = d,$$

так как

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta \sigma}{E''} + d \cdot \Delta H,$$

что при $\lambda_{\max} = 35 \cdot 10^{-6}$ и $H_{\max} = 200$ А/м дает коэффициент связи $d = 1,75 \cdot 10^{-7}$ м/А - очень высокое значение для магнитоупругой связи.

Выходной сигнал, который можно ожидать, пропорционален изменению потока и механическому напряжению

$$U(t) = N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt},$$

где N - число витков катушки датчика;

A - площадь поперечного сечения аморфной ленты.

Полагая, что $\Delta H = 0$, используем следующие уравнения:

$$\begin{cases} \Delta \sigma = \Delta \lambda \cdot E'' \\ \Delta B = d \cdot \Delta \sigma \end{cases}$$

где E'' - модуль упругости в постоянном намагничивающем поле.

Переход к частотной плоскости и использование вышеупомянутых уравнений дает

$$\hat{U} = \left| N \cdot A \cdot \omega \cdot \Delta \lambda \cdot E'' \right|,$$

где ω - угловая частота, рад/с.

Циркумфлекс указывает на то, что подразумевается амплитудное значение. Если модуль упругости

имеет величину порядка 100 ГПа, то растяжение в датчике при частоте 100 000 кГц должно иметь величину порядка $0,0025 \cdot 10^{-6}$ для случая P1_2, см. фиг. 4 и фиг. 5, в центре.

Результаты измерений.

Первые эксперименты с датчиками, приклеенными к стеклянной пластинке, показали, что могут быть обнаружены колебания в диапазоне частот 40 кГц-1 МГц.

Были выполнены следующие сравнительные испытания.

Описание индикатора

Датчик	Ориентация ленты	Число витков	Примечания	Статическая ненагруженная проницаемость (мГн)
P1_1	Поперечная	280	Соединение толстым слоем клея	158
P1_2	Поперечная	280		60
P1_3	Продольная	280	Толстая пластмассовая капсула	32

При испытании отламывался угол стеклянной пластинки и регистрировался выходной сигнал с усилением приблизительно в 100 раз.

На фиг. 3 показано изменение индуктивности при различном растяжении для датчиков P1_1, P1_2 и P1_3. Здесь ясно видно, что P1_1 и P1_2, для которых ленты были вырезаны в поперечном направлении, имеют самые высокие значения магнитоупругой связи. Эти два образца также показывают значительно более высокую магнитную проницаемость. Это было продемонстрировано также в экспериментах с разбиванием стекла, где уровни сигнала при одинаковом возбуждении были выше для P1_1 и P1_2. Датчик P1_2 по сравнению с P1_1 и P1_3 показывает значительно более широкий спектр сигнала. Вероятно, это можно объяснить большими количествами клея, см. таблицу.

Применение в первом опытном образце датчика акустической эмиссии.

Принцип действия.

Индикатор или преобразователь состоит из аморфного ферромагнитного материала, который обладает тем свойством, что ему может быть придана крайне высокая магнитная проницаемость, $5000 < \mu < 200000$, и в то же время для некоторых составов сплава он имеет относительно высокую магнитострикцию, $5 < \lambda_{\text{sat}} < 40 \text{ ppm}$. Взятое в целом, это дает материал с очень высокой магнитоупругой связью, т.е. очень подходящий в качестве материала датчика. Индикатор или преобразователь состоит из аморфной ленты с размерами $3 \times 18 \times 0,022 \text{ мм}$. Лента свернута в два витка с изолирующей пластмассовой полоской между ними. Принципиально важно, чтобы различные слои ленты не имели электрического контакта друг с другом, так как лента в таком случае функционировала бы как короткозамкнутая вторичная обмотка. Полученный в результате активный цилиндр одной стороной приклеивают тонким слоем клея к объекту измерения, а другой стороной приклеивают ко дну чашеобразного пластмассового каркаса. На дне пластмассового каркаса закреплена инерционная масса, а на его боковой поверхности намотана катушка с 1000 витков. Преобразователь этого типа лучше всего подходит для обнаружения динамических циклов, так как в нем имеется только одна катушка. При использовании двух катушек, включенных в половину моста (полагая, что катушки работают в противофазе, т.е. для положительного ускорения одна катушка дает положительный выходной сигнал, в то время как другая дает, соответственно, отрицательный сигнал), будет достигнуто ограничение или устранение воздействий всех токов (распространяющихся в пространстве электромагнитных волн и т.д.) и изменений, вызванных внешними глобальными явлениями (тепло, магнитное поле и т.д.), которые симметричны относительно катушек.

Инерционная масса (см. фиг. 6), которая закреплена на дне пластмассового каркаса, создает действующую на активный цилиндр силу реакции, которая пропорциональна ускорению и массе. Частотная характеристика определяется в основном жесткостью цилиндра, а также величиной инерционной массы.

Теория.

Для того чтобы обнаруживать высокочастотные сигналы, удобно и просто обнаруживать изменение потока и считать, что оно пропорционально деформации ленты. Это подразумевает, что должно быть достигнуто хорошо определенное начальное состояние намагниченности, так как ненамагниченная лента не дает никакого изменения потока при изменении растяжения. Для того чтобы достигнуть намагниченного начального состояния, в принципе достаточно магнитного поля Земли величиной 30-60 мкТл (20-40 А/м), но, с другой стороны, необходимость контролировать направление и напряженность магнитного поля Земли при установке и калибровке индикатора является непрактичной. Есть два способа достигнуть хорошего начального состояния:

1. Легкая магнитная оболочка и пропускание постоянного тока через катушку датчика.
2. Легкая магнитная оболочка и смещающее намагничивание постоянным магнитом.

Величина поля должна быть такой, чтобы магнитная индукция составляла 0,2-0,7 Т; это подразумевает, что намагничивающее поле в ленте должно иметь напряженность порядка 2-56 А/м. Напряженность поля в общем случае может быть вычислена по формуле

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu},$$

где H - намагничивающее поле;

B - плотность магнитного потока;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Вс/Ам - магнитная проницаемость вакуума;

μ - относительная магнитная проницаемость, в данном случае для аморфной ленты.

Измеряемый сигнал получают путем обнаружения изменения потока в ленте вследствие растяжения/сжатия. Для линейного случая функцию будет описывать следующее уравнение:

$$\Delta B = d \cdot \Delta \sigma + \mu_0 \cdot \mu \cdot \Delta H,$$

где σ - механическое напряжение;

d - коэффициент магнитоупругой связи.

Префикс Δ обозначает изменение относительно первоначального значения. Параметр d материала может быть приблизительно определен путем деления максимальной магнитострикции при постоянном механическом напряжении, $\Delta \sigma = 0$, на намагничивающее поле при магнитном насыщении, т.е.

$$\frac{\lambda_{\max}}{H_{\max}} = d,$$

так как

$$\Delta \lambda = \frac{\Delta \sigma}{E''} + d \cdot \Delta H,$$

что при $\lambda_{\max} = 35 \cdot 10^{-6}$ и $H_{\max} = 200$ А/м дает коэффициент связи $d = 1,75 \cdot 10^{-7}$ м/А - очень высокое значение для магнитоупругой связи.

Выходной сигнал, который можно ожидать, пропорционален изменению потока и механическому напряжению

$$U(t) = N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt},$$

где N - число витков катушки датчика;

A - площадь поперечного сечения аморфной ленты.

Полагая, что $\Delta H = 0$, применяем следующие уравнения:

$$\begin{cases} \Delta \sigma = \Delta \lambda \cdot E'' \\ \Delta B = d \cdot \Delta \sigma \end{cases},$$

где E'' - модуль упругости в постоянном намагничивающем поле.

Переход к частотной плоскости и использование вышеприведенных уравнений дает:

$$\dot{U} = \left| N \cdot A \cdot \omega \cdot \Delta \lambda \cdot E'' \right|,$$

где ω - угловая частота, рад/с.

Циркумфлекс указывает на то, что подразумевается амплитудное значение.

Результаты измерений.

Измерительная катушка имела 650 витков, что дает индуктивность 3,2 мГн. Резонансная частота может быть рассчитана как

$$f_{\text{res}} = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot \frac{1}{2\pi}.$$

Полагая, что модуль упругости равен 100 ГПа, высота активного цилиндра - 3 мм, площадь поперечного сечения - $2,3 \cdot \pi \cdot 0,022$ мм² и инерционная масса - 4 г, получаем резонансную частоту примерно 10 кГц. На фиг. 7 показан усиленный в 50 раз выходной сигнал преобразователя, аналогичного показанному на фиг. 6, установленного на большой железной заготовке и возбуждаемого ударом молота.

Частотный анализ (не показан) приведенной на фиг. 7 временной зависимости показывает, что сигналы приблизительно до 5 кГц являются широкополосными, после чего имеется явно выраженный пик на частоте 8 и на частоте 60 кГц. Представляется вероятным, что сигнал на частоте 8 кГц является резонансом преобразователя, в то время как сигнал на частоте 60 кГц - это то, что обычно называется акустической эмиссией, т.е. переходный процесс высвобождения энергии в случае, например, деформации материала. Широкополосный сигнал ниже частоты 5 кГц обусловлен вибрациями в испытываемом теле.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ обнаружения и индикации отклонения от постоянного состояния в соответствующей детали на основе обнаружения временных внутренних колебаний материала, так называемой акустической эмиссии, в режиме реального времени, в котором

один или более ленточный элемент, сформированный из ленты, по меньшей мере, частично окруженной по меньшей мере одной многovitковой катушкой, приклеивают к указанной соответствующей детали, причем указанный ленточный элемент сформирован из аморфного и/или нанокристаллического материала;

подвергают ленточный элемент смещающему намагничиванию путем пропускания постоянного тока через катушку и/или с использованием постоянного магнита, после чего

регистрируют изменение магнитного потока (dB/dt) в катушке или изменение индуктивности указанной катушки, вызываемое деформацией ленточного элемента при возникновении акустической эмиссии.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что указанный материал подвергают терромагнитной обработке при температуре, близкой к температуре кристаллизации, но ниже ее, с получением высокой магнитной проницаемости и относительно высокой магнитострикции.

3. Способ по п.1 или 2, отличающийся тем, что указанный аморфный материал является ферромагнитным.

4. Способ по одному из пп.1-3, отличающийся тем, что магнитную проницаемость μ выбирают в пределах $5000 < \mu < 200000$.

5. Способ по одному из пп.1-4, отличающийся тем, что магнитострикцию λ_{sat} выбирают в пределах $5 < \lambda_{sat} < 40$ ppm.

6. Способ по одному из пп.1-5, отличающийся тем, что указанный аморфный материал вырезают в форме одного или более ленточных элементов так, что он вытянут в длину в направлении поперек выбранного направления прокатки.

7. Способ по п.1, отличающийся тем, что указанный ленточный элемент, прикрепленный к стеклянной пластине, обеспечивает чувствительность в диапазоне частот 40 кГц-1 МГц.

8. Способ по п.1, отличающийся тем, что используют один или более подвергнутый терромагнитной обработке аморфный или нанокристаллический ленточный элемент толщиной по меньшей мере около 20 мкм с высокой магнитной проницаемостью и относительно высокой магнитострикцией.

9. Устройство для обнаружения и индикации отклонения от постоянного состояния в соответствующей детали на основе обнаружения временных внутренних колебаний материала, так называемой акустической эмиссии, в режиме реального времени, содержащее один или более чем один ленточный элемент, сформированный из ленты, по меньшей мере, частично окруженной по меньшей мере одной многovitковой катушкой, выполненный с возможностью приклеивания ленты к указанной соответствующей детали, причем указанный ленточный элемент сформирован из аморфного и/или нанокристаллического материала и подвергнут смещающему намагничиванию путем пропускания постоянного тока через катушку и/или с использованием постоянного магнита, при этом относительное расположение ленты и катушки такое, что деформация ленты при возникновении акустической эмиссии вызывает изменение магнитного потока (dB/dt) в указанной катушке, пропорциональное упомянутой деформации, или изменение индуктивности указанной катушки.

10. Устройство по п.9, отличающееся тем, что указанный материал подвергнут терромагнитной обработке при температуре, близкой к температуре кристаллизации, но ниже ее, с получением высокой магнитной проницаемости и относительно высокой магнитострикции.

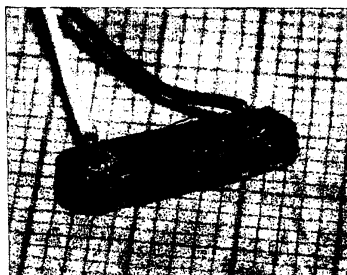
11. Устройство по п.9, отличающееся тем, что в нем использован один или более подвергнутый терромагнитной обработке аморфный или нанокристаллический ленточный элемент толщиной по меньшей мере около 20 мкм с высокой магнитной проницаемостью и относительно высокой магнитострикцией.

12. Устройство по п.9, отличающееся тем, что ленточный элемент/элементы с соответствующей катушкой/катушками заключены в упруго деформируемый эпоксидный полимер.

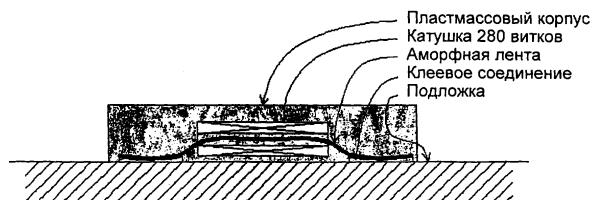
13. Устройство по любому из пп.9-12, отличающееся тем, что его чувствительность различна в зависимости от ориентации направления обнаружения относительно направления прокатки ленточного элемента/элементов, что обусловлено анизотропными свойствами материала.

14. Устройство по любому из пп.9-13, отличающееся тем, что ленточные элементы с соответствующими катушками соединены с мостом и усилителем для повышения чувствительности и обнаружительной способности соответственно.

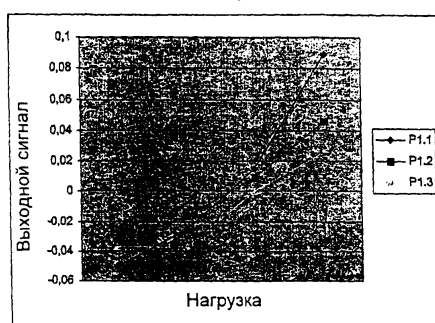
15. Устройство по любому из пп.9-14, отличающееся тем, что оно представляет собой индикатор повреждения стекла.



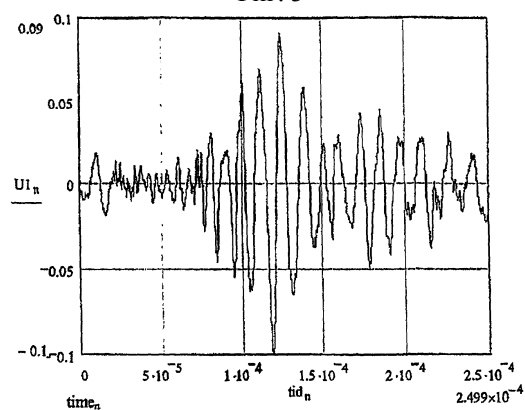
Фиг. 1



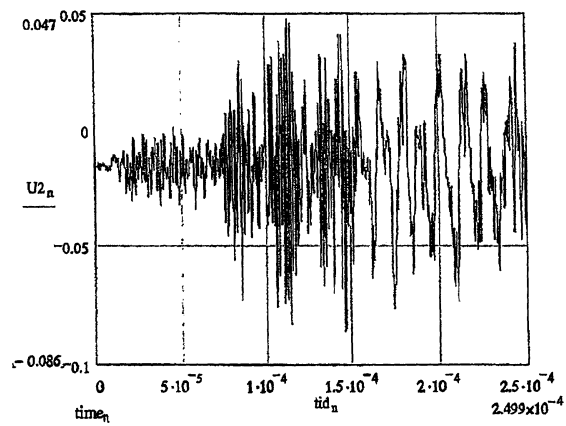
Фиг. 2



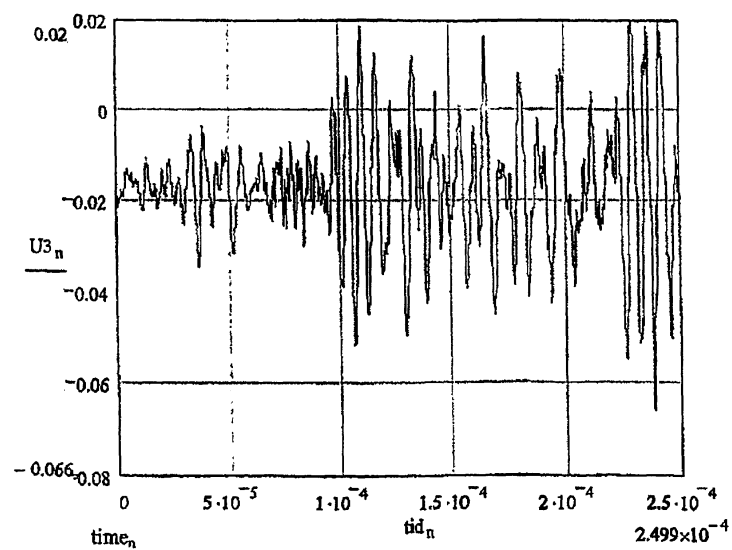
Фиг. 3



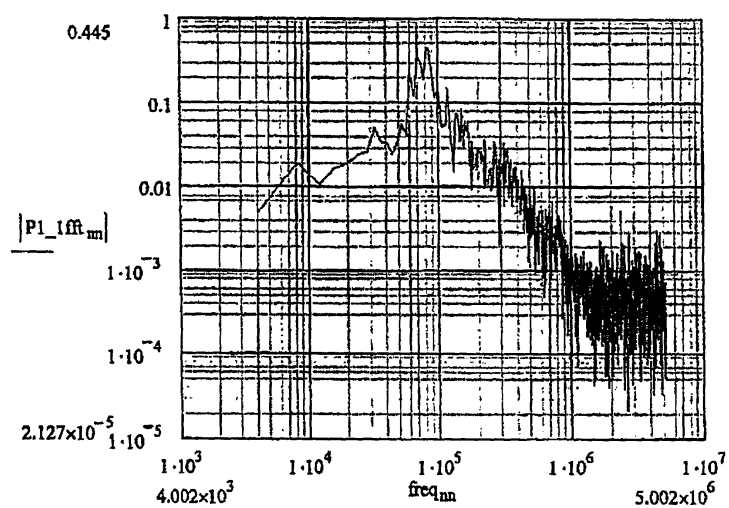
Фиг. 4a



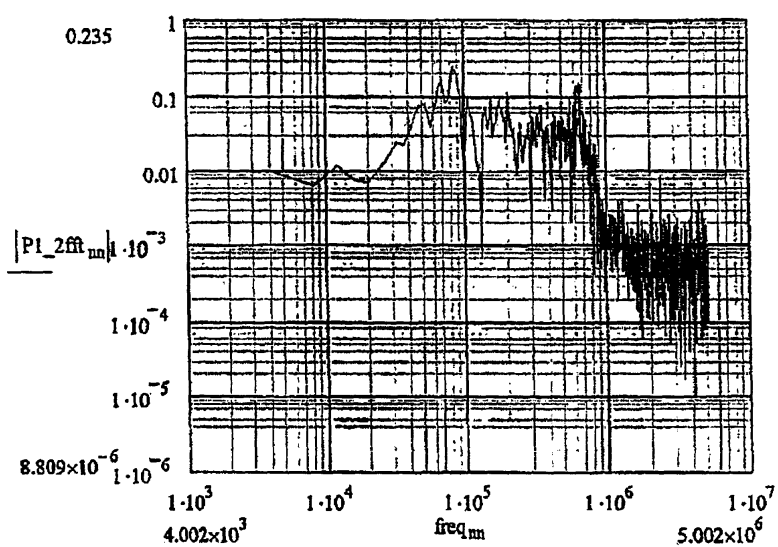
Фиг. 4b



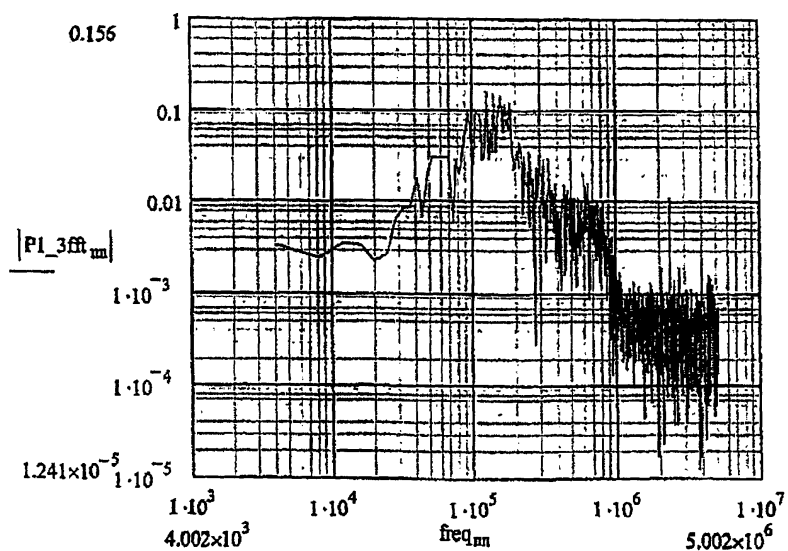
Фиг. 4с



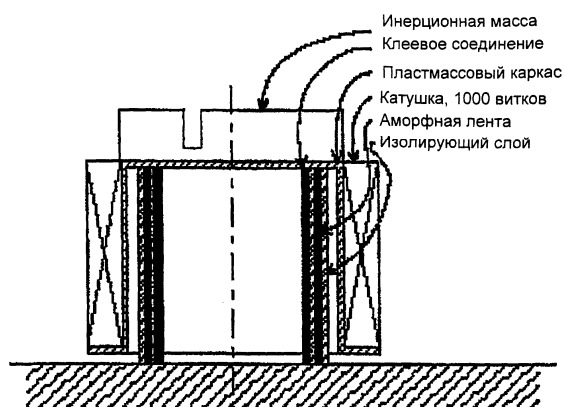
Фиг. 5а



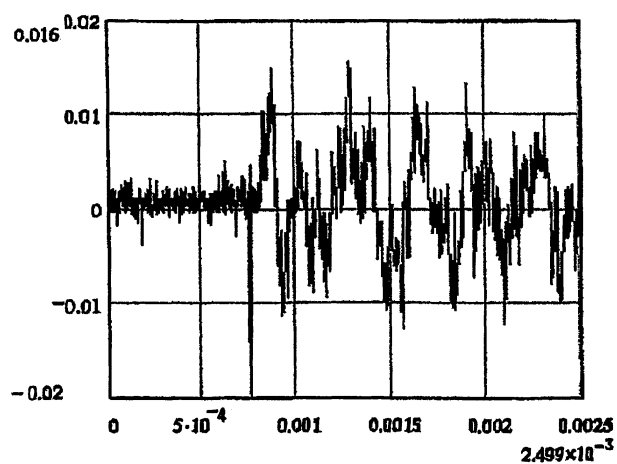
Фиг. 5б



Фиг. 5 с



Фиг. 6



Фиг. 7

