

Система неразрушающего контроля на основе явления акустической эмиссии

77-48211/478936

08, август 2012

Однокольцев А. В., Власов А. И., Руткевич А. В.

УДК 21.474

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

info@iu4.bmstu.ru

Введение

Системы на основе акустической эмиссии применяются в устройствах неразрушающего контроля, способных вести мониторинг разнообразных по форме и размеру конструкций [1, 2]. Главным достоинством таких систем является их способность к **масштабированию**, то есть для контроля большей конструкции потребуется больше датчиков и каналов обработки сигнала, однако принципы и методы обработки информации о состоянии объекта остаются неизменными. Это позволяет использовать унифицированное оборудование и программное обеспечение для контроля различных по геометрии объектов.

Акустическая эмиссия - это мощное техническое средство неразрушающего контроля [1, 2]. Оно основано на обнаружении упругих волн, генерируемых внезапной деформацией напряженной структуры. Эти волны распространяются от источника к датчику (датчикам). Приборы акустической эмиссии измеряют эти сигналы и отображают данные, на основе которых оценивается состояние и поведение структуры под напряжением.

Традиционные методы неразрушающего контроля (такие, как ультразвуковой, радиационный, токовихревой) [3] обнаруживают геометрические неоднородности путем излучения в исследуемую структуру

некоторой формы энергии. Акустическая эмиссия использует другой подход: она обнаруживает микроскопические движения, а не геометрические неоднородности. Так, например, в процессе дуговой сварки акустическая эмиссия наблюдается при пластической деформации сварного шва и околошовной зоны, плавлении и кристаллизации материала в сварочной ванне, окислении незащищенных поверхностей. Также акустическая эмиссия наблюдается при истечении газа или жидкости из сосудов, что важно для мониторинга таких промышленных объектов как газопроводы и резервуары под давлением [2]. Вопросы акустико-эмиссионного мониторинга и проектирования систем неразрушающего контроля широко рассматривались в работах В.А. Грешникова, Ю.Б. Дробота, В.М. Белова и В.И. Иванова, в том числе в работах представителей научных школ МГТУ им.Н.Э.Баумана: Г.А Бигуса и Е.Г. Дороховой, а так же работах иностранных авторов Яна Скотта (Ian Scott) и Ворренна Макгоннегла (Warren McGonnagle) [1-11]. В работе [1] подробно рассмотрен механизм появления и распространения сигнала акустической эмиссии. А в работе [2] приведены конструкции приборов акустико – эмиссионного контроля в частности приборов, используемых в ядерной энергетике.

Однако на сегодня остаются не до конца изученными связи между параметрами сигнала акустической эмиссии и развивающимися дефектами, что усложняет ручную или аппаратную обработку сигналов, также существуют трудности в применении метода акустической эмиссии в случаях присутствия сильных шумов в исследуемой полосе частот.

Целью работы является создание системы неразрушающего контроля, реализованной с применением отечественной элементной базы, на основе явления акустической эмиссии, обеспечивающей обнаружение дефектов при скорости раскрытия трещины не менее 1.4 м/с и напряжении, предшествующему раскрытию трещины не менее 55 МПа.

Для достижения заявленной цели в работе предусматривается решение следующего **комплекса задач**:

- разработка подсистемы датчиков, обладающих чувствительностью, для локации дефекта и определения его величины, при вызываемых им высокочастотным перемещениям поверхности объекта с амплитудой 10^{-7} - 10^{-14} м;

- разработка зарядочувствительного усилителя обеспечивающего усиление информационного сигнала не менее 100 раз в диапазоне частот от 5 Гц до 50 КГц для исключения влияния соединительных кабелей на результаты измерений;

- разработка методики определения характеристик дефектов, обнаруживаемых модулем акустической эмиссии, характеризующейся универсальностью в отношении к материалу исследуемого объекта и его форме.

Научная новизна работы заключается в предложенной методике локации развивающегося дефекта с помощью сигнала акустической эмиссии, с использованием отечественной элементной базы, отличающаяся применимостью к объектам различной формы, при условии малости толщины материала в сравнении с остальными размерами и выполненным из различных конструкционных материалов, включая металлы и неметаллы, проводящие материалы и диэлектрики.

Практическим результатом работы является разработанный инструментальный усилитель на базе микросхемы, выполненной при помощи комбинированной биполярно-полевой технологии. В результате испытаний усилителя заряда были получены экспериментальные сведения о характеристиках использованной элементной базы, на основании которых приняты решения по её модернизации и улучшению.

Также в ходе работы была предложена методика локации развивающегося дефекта с помощью сигнала акустической эмиссии, принимаемого пьезоэлектрическими датчиками.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что предложенную методику и средства модуля акустической эмиссии можно

применять для решения широкого круга задач по мониторингу и неразрушающему контролю объектов, к ним относятся задачи:

- мониторинг технологических процессов;
- исследование свойств материалов и материаловедение;
- мониторинг элементов конструкций.

1 Физические принципы работы системы неразрушающего контроля на основе явления акустической эмиссии

С точки зрения акустической эмиссии растущий дефект производит свой собственный сигнал [3], который проходит метры, а иногда и десятки метров. Дефект не только может быть обнаружен дистанционно; часто представляется возможным найти его местоположение путем обработки разницы времен прихода волн к различным датчикам.

Перемещение точки поверхности материала вызванное источником акустической эмиссии в простейшем случае будет носить характер затухающих колебаний рисунок 1.

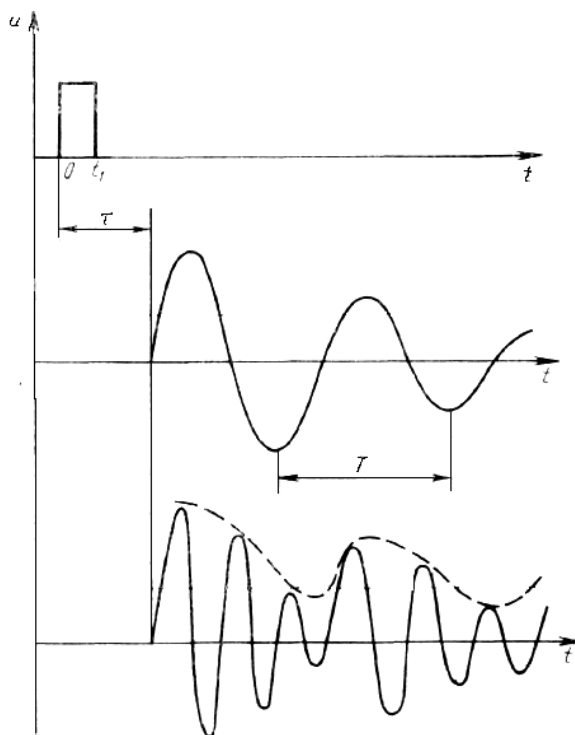


Рисунок 1 – Схематичное изображение формы сигнала акустической эмиссии

Каждый импульс может быть приближенно аппроксимирован зависимостью:

$$U = Ae^{-nt} \sin \omega t , \quad (1.1)$$

где: A-амплитуда,
n-показатель затухания,
 ω - круговая частота.

$$\omega = \sqrt{p^2 - n^2} , \quad (1.2)$$

здесь
$$p = \frac{c}{m} ; \quad (1.3)$$

где:

c – коэффициент жесткости,
m – приведенная масса.

Период колебаний системы с учетом того, что $n \ll p$ и $\omega \approx p$ можно найти из соотношения:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{p^2 - n^2}} \approx \frac{2\pi}{p} \quad (1.4)$$

Информацию о источнике акустической эмиссии содержит амплитуда импульса, его длительность и время прихода импульса в заданную точку поверхности. При возбуждении колебаний коротким прямоугольным импульсом амплитуда приближенно определяется зависимостью:

$$A = \frac{S}{mp} \quad (1.5)$$

Где импульс силы:

$$S = \int_0^t P(t) dt \quad (1.6)$$

Для последовательности импульсов дискретной эмиссии суммарная акустическая эмиссия характеризует число импульсов за исследуемый интервал времени.

2 Математические модели подсистем модуля акустической эмиссии

В качестве чувствительных элементов в предложенном модуле акустической эмиссии используются пьезоэлектрические датчики марки R15a [9]. Датчики R15a представляют собой цилиндр с дисковыми электродами на торцах. Расчетная схема пьезоэлектрического датчика представлена на рисунке 2.

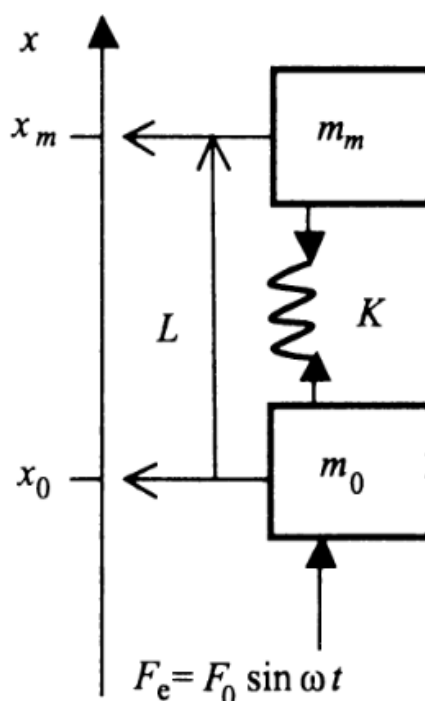


Рисунок 2 – Расчетная схема пьезоэлектрического датчика (m_0 - масса основания; m_0 - инерционная масса; K – эквивалентная жесткость пьезоэлемента; x_0 -перемещение основания; x_m - перемещение инерционной массы; L – расстояние между центром тяжести инерционной массы и основанием; F_e -гармоническая вынуждающая сила; F_0 -гармоническая вынуждающая сила; ω – угловая частота вынуждающей силы)

При действии ускорения вдоль оси акселерометра неполяризованная часть цилиндра стремится сместиться относительно поляризованной, создавая напряжения и соответственно деформации на границе с поляризованной зоной. Это создает в последней электрический заряд, пропорциональный ускорению. Кроме того, часть торцевой поверхности цилиндра, опирающейся на основание, работает на сжатие, что приводит к генерации дополнительного заряда, который оказывает влияние на выходной сигнал акселерометра.

Для уменьшения влияния генерации заряда при сжатии поверхности акселерометра, части цилиндра, используемые для крепления покрываются электродами и соединяются между собой и корпусом.

В общем, для пьезоэлектрических датчиков с цилиндрическим чувствительным элементом, чувствительность определяется формулой:

$$S = \frac{Q_x}{F_y} = \frac{2}{\pi} d_{11} \frac{h}{a}, \quad (2.1)$$

где Q_x – заряд, F_y – сила, действующая на пьезоэлемент, d_{11} – пьезомодуль, h , a – высота и толщина стенки цилиндра.

Датчик R15a имеет следующие электрические характеристики:

- чувствительность.....69 дВ;
- частотный диапазон.....10 – 400 кГц;
- резонансная частота.....75 кГц.

Предлагаемая схема усилителя модуля акустической эмиссии состоит из усилителя заряда и инструментального усилителя. Эквивалентная электрическая схема усилителя заряда, соединенного с пьезоэлектрическим преобразователем показана на рисунке 3.

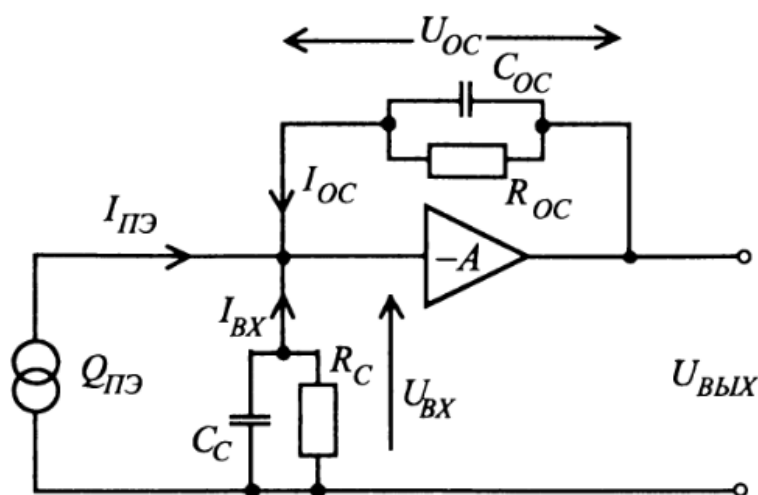


Рисунок 3 – Эквивалентная электрическая схема усилителя заряда, соединенного кабелем с пьезоэлектрическим преобразователем

На приведенной на рисунке 3 схеме: $Q_{пэ}$ – электрический заряд, отдаваемый пьезопреобразователем и пропорциональный ускорению механических колебаний; C_c – суммарная емкость на входе усилителя, включающая емкость пьезопреобразователя, кабелей и входную емкость усилителя; R_c – суммарное сопротивление на входе усилителя, включающее сопротивление соединительных кабелей, сопротивление пьезоэлемента и входное сопротивление усилителя; C_{oc} – емкость цепи обратной связи; R_{oc} – сопротивление цепи обратной связи; A – коэффициент усиления операционного усилителя.

Используя, показанную на рисунке 3, эквивалентную схему в качестве расчетной можно записать следующие выражения [11]:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{пэ}} + \frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_{BX}}; \quad U_{ВЫХ} = -AU_{ВХ}; \quad (2.2)$$

$$U_{OC} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) U_{ВЫХ}; \quad (2.3)$$

$$I_{OC} = C_{OC} \frac{dU_{OC}}{dt} + \frac{U_{OC}}{R_{OC}} = \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_{OC} \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} + \frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}} \right]; \quad (2.4)$$

$$I_{ВХ} = -C_c \frac{dU_{ВХ}}{dt} - \frac{U_{ВХ}}{R_c} = \frac{1}{A} \left[C_c \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} + \frac{U_{ВЫХ}}{R_c} \right]; \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{пэ}}{dt} = & - \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[C_{OC} \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} + \frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}} \right] - \\ & - \frac{1}{A} \left[C_c \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} + \frac{U_{ВЫХ}}{R_c} \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Т.к. амплитуды всех токов и напряжений подчиняются гармоническому закону, то решение дифференциального уравнения можно представить в виде:

$$\begin{aligned} j\omega Q_{пэ} = & - \left(1 + \frac{1}{A}\right) \left[j\omega U_{ВЫХ} C_{OC} + \frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}} \right] - \\ & - \frac{1}{A} \left[j\omega U_{ВЫХ} C_c + \frac{U_{ВЫХ}}{R_c} \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

При условии использования операционного усилителя с высоким значением коэффициента усиления и большим входным сопротивлением можно записать:

$$U_{ВЫХ} = -\frac{Q_{ПЭ}}{C_{ОС} \left(1 + \frac{1}{j\omega R_{ОС} C_{ОС}}\right)} \quad (2.8)$$

Т.к. создаваемый пьезоэлектрическим преобразователем электрический заряд пропорционален ускорению, общей чувствительностью системы преобразователь – усилитель можно управлять путем изменения емкости в цепи обратной связи усилителя заряда.

Амплитудно-частотная характеристика усилителя заряда в области низких частот определяется постоянной времени цепи обратной связи и не зависит от нагрузки на входе предусилителя. Нижний предел частоты усилителя заряда регулируется путем настройки сопротивления цепи обратной связи.

3 Архитектура подсистем модуля акустической эмиссии

Центральным узлом системы неразрушающего контроля на основе явления акустической эмиссии является **модуль акустической эмиссии**, который должен выполнять следующие функции [4, 5]:

- регистрация сигнала акустической эмиссии;
- усиление сигнала акустической эмиссии и подавление шумов;
- обработка сигнала и определение параметров акустической эмиссии;
- отображение параметров акустической эмиссии с помощью устройств вывода информации;
- выработка оповещения в случае выхода параметров акустической эмиссии за границы установленного интервала.

Для реализации представленных функций модуль акустической эмиссии имеет структуру, приведенную на рисунке 4.

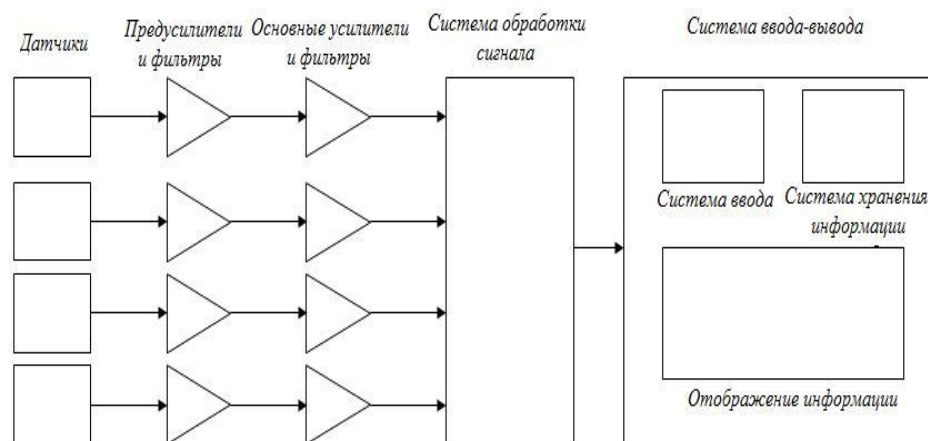


Рисунок 4– Структурная схема модуля акустической эмиссии

Как видно из рисунка 4 модуль акустической эмиссии состоит из четырех основных подсистем:

- подсистема датчиков;
- подсистема усиления и фильтрации сигнала;
- подсистема обработки сигнала;
- подсистема ввода-вывода.

В состав модуля акустической эмиссии, как правило, входят множество датчиков, что делает необходимым использование системы обработки сигнала, поддерживающей независимую обработку.

4 Проблема локации источника акустической эмиссии и ее решение

Информация о координатах источников акустической эмиссии имеет важное практическое значение, т.к. источниками являются дефекты материала конструкций и узлов. Обычно считается, что координаты источника и дефекта совпадают. Однако дефекты могут иметь определенную пространственную конфигурацию и характеризоваться множеством источников.

Для локации источников акустической эмиссии широко используются следующие методы [5, 7]:

- метод, основанный на разнице прибытия акустической волны в разные точки объекта
- метод, основанный на разнице энергии акустической волны в разных точках объекта;
- методы зонной локации;
- кросс - корреляционный метод.

Информация о местоположении дефекта заключена в амплитуде принятых сигналов и времени их прибытия к разным датчикам.

Наибольшее применение нашли временные методы локации, в которых используется зависимость времени прихода сигнала на различные приемники от координат источника рисунке 5.

Пусть имеется плоская поверхность исследуемого объекта, на которой установлены пьезоэлектрические датчики, служащие приемниками сигнала акустической эмиссии.

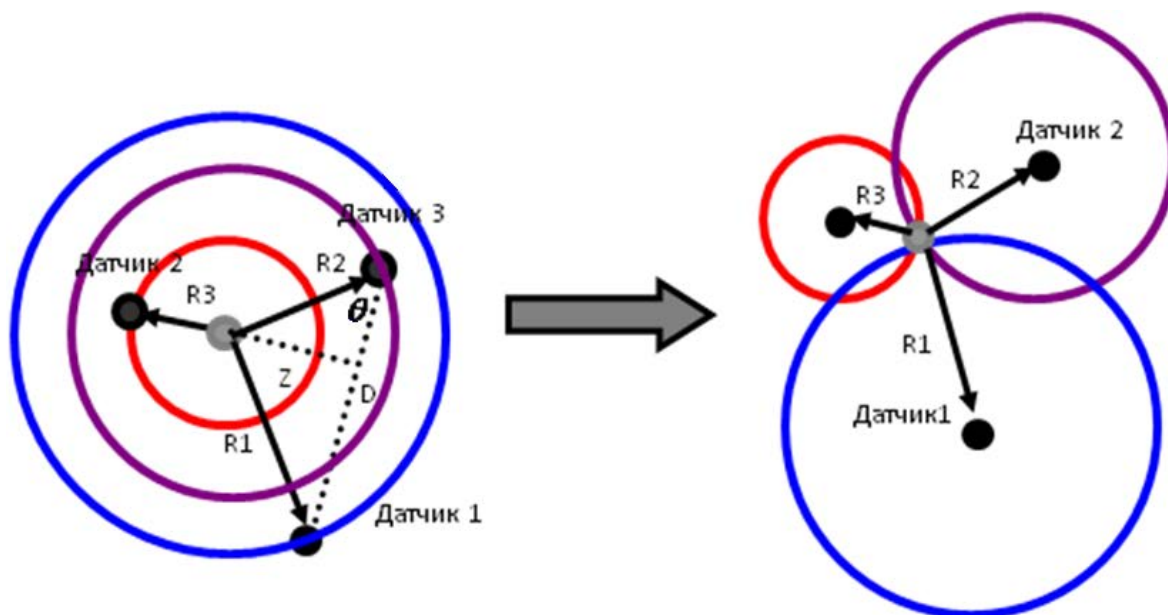


Рисунок 5 – Локация источника акустической эмиссии на поверхности (расстояние между датчиками 1 и 2 – D , R_1 – расстояние между датчиком 1 и источником акустической эмиссии, R_2 – расстояние между датчиком 2 и источником акустической эмиссии, $\Delta t_{1,2}$ – задержка распространения волны между 1 и 2 датчиками, θ – угол между вектором R_2 и D , Z – перпендикуляр к D)

Следовательно, локация источника акустической эмиссии на поверхности исследуемого объекта может быть произведена на основании анализа разницы во времени прихода сигнала акустической эмиссии к датчикам. Разность времени прихода сигнала акустической эмиссии к датчику 1 и датчику 2 можно определить из следующих соотношений:

$$\Delta t_{1,2}V = R1 - R2 \quad (4.1)$$

$$Z = R2 \sin \theta \quad (4.2)$$

$$Z^2 = R1^2 - (D - R2)^2 \quad (4.3)$$

Из формул 4.1, 4.2 и 4.3 следует что

$$R2 = \frac{1}{2} \frac{D^2 - \Delta t_{1,2}^2 V^2}{\Delta t_{1,2} V + D \cos \theta} \quad (4.4)$$

Приведенный расчет необходимо повторить рассматривая другую пару датчиков, полученные координаты позволят однозначно определить местоположение источника акустической эмиссии на поверхности.

Указанные соотношения применимы и в случае локации источников акустической эмиссии в толще материала, но при этом необходимо использование 4-х датчиков.

5 Проблема уровня входного сигнала модуля акустической эмиссии и ее решение

Широко известна проблема низкого уровня входного сигнала модуля акустической эмиссии, обусловленная низким уровнем выходного сигнала пьезопреобразователя (до 1 мВ) [1]. При работе пьезоэлектрического датчика необходимо обеспечить режим работы его выхода, близкий к холостому ходу, так как нагрузка на выходе пьезопреобразователя может повлиять на характеристики датчика из-за обратного пьезоэффекта. Это выдвигает высокие требования к входному сопротивлению предусилителя и его

входной емкости, а также накладывает ограничение на длину информационных каналов от датчика до усилителя (необходимо, чтобы предусилитель и датчик были реализованы на одном кристалле).

В модулях акустической эмиссии применяют предусилители, образующие две группы:

- усилители заряда, выходное напряжение которых пропорционально поступающему на их вход заряду;

- усилители напряжения, выходное напряжение которых пропорционально поступающему на их вход напряжению.

Для решения проблемы уровня входного сигнала модуля акустической эмиссии предлагается на одном кристалле с датчиком реализовать предусилитель, принципиальная схема которого представлена на рисунке 6.

Предлагаемый усилитель модуля акустической эмиссии имеет в своем составе 2 усилителя заряда и инструментальный усилитель, состоящий из трех операционных усилителей, коммутация компонентов усилителя модуля акустической эмиссии, регулировка чувствительности усилителя и другие настройки производятся при помощи внешних компонентов, установленных на плате усилителя акустической эмиссии.

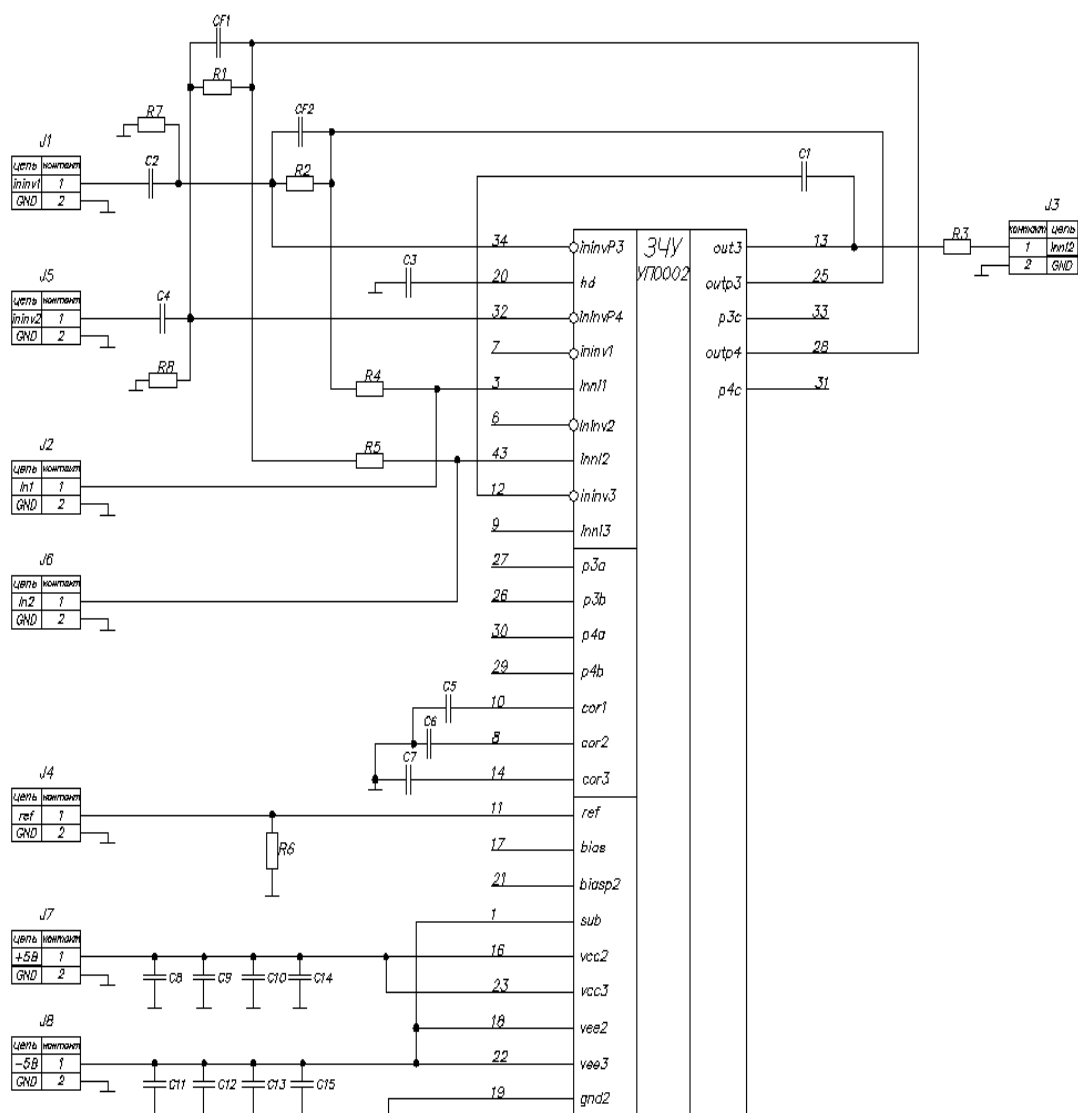


Рисунок 6 - Принципиальная электрическая схема усилителя акустической ЭМИССИИ

Экспериментальное исследование усилителя модуля акустической эмиссии проводилось на базе испытательного стенда, в состав которого испытательного стенда входили:

- пьезоэлектрический преобразователь;
- пьезоэлектрический излучатель;
- генератор синусоидального напряжения;
- цифровой осциллограф.

На входе усилителя установлена емкость 1 пФ, благодаря чему схема работает как дифференциатор. Осциллограмма сигнала на выходе предварительного усилителя представлена на рисунке 7.

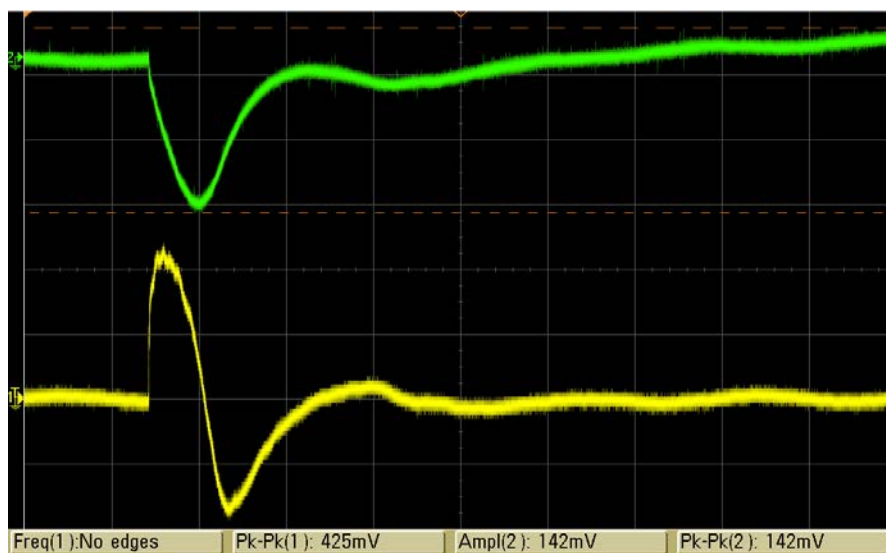


Рисунок 7 – Осциллограмма сигнала на выходе предварительного усилителя:
сигнал на выходе вибропреобразователя – зеленый (выше);
сигнал на выходе зарядочувствительного усилителя – желтый (ниже)

Экспериментально измеренное на испытательном стенде усиление, полученное с помощью зарядочувствительного усилителя, составило три раза.

На рисунке 8 представлена осциллограмма сигнала на выходе усилителя модуля акустической эмиссии. Экспериментально измеренное на испытательном стенде усиление K_y , полученное с помощью усилителя заряда, составило 100 раз. На основании измерений, произведенных в диапазоне частот F от 5 Гц до 1 МГц, был построен график амплитудно-частотной характеристики усилителя модуля акустической эмиссии (см. рисунок 9).

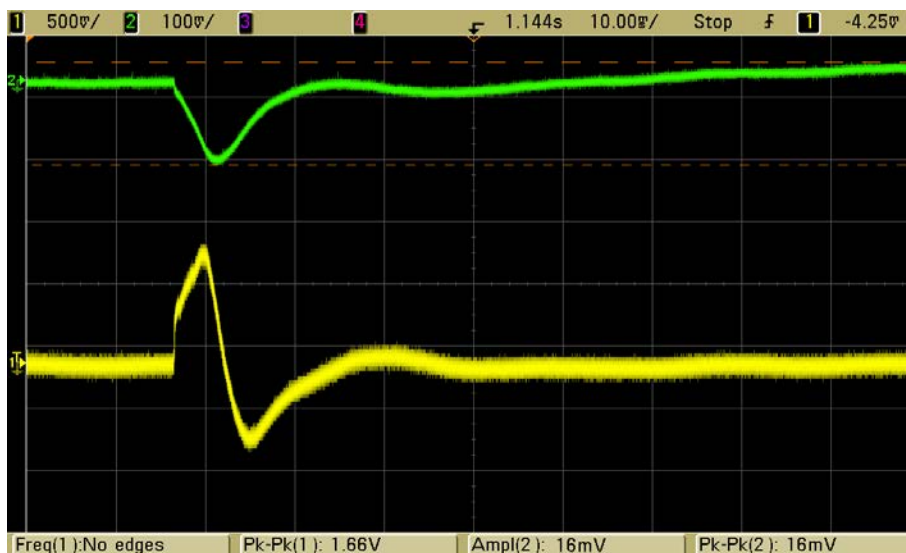


Рисунок 8 – Осциллограмма сигнала на выходе усилителя модуля акустической эмиссии: сигнал на выходе вибропреобразователя- зеленый (выше); сигнал на выходе зарядочувствительного усилителя – желтый (ниже)

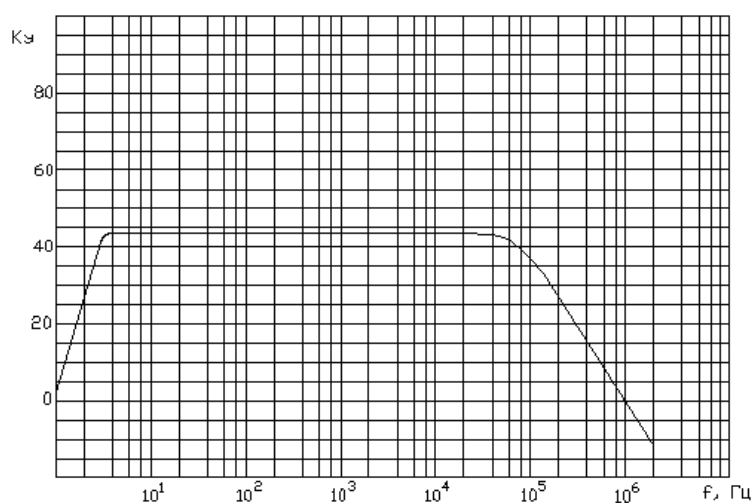


Рисунок 9 – Амплитудно-частотная характеристика усилителя акустической эмиссии.

Из графика амплитудно-частотной характеристики видно, что усилитель акустической эмиссии обеспечивает усиление в 100 раз в полосе частот от 5 Гц до 50 кГц. В результате предложенного подхода проблема уровня входного сигнала модуля акустической эмиссии решается за счет предварительного усиления сигнала, принимаемого от пьезоэлектрического датчика.

6 Анализ применения метода акустической эмиссии и приборов на его основе

Характерными особенностями метода акустической эмиссии, определяющими его преимущества, возможности, параметры и области применения, являются следующие особенности:

- метод акустической эмиссии обеспечивает обнаружение и регистрацию только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности;

- предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по расчетным оценкам составляет порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм², что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм, что указывает на весьма высокую чувствительностью к растущим дефектам;

- свойство интегральности метода акустической эмиссии обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей акустической эмиссии, неподвижно установленных на поверхности объекта;

- положение и ориентация дефекта не влияет на выявляемость дефектов;

- контроль зон недоступных для других методов (не влияет наличие тепло- и гидроизоляции, конструктивных особенностей);

- предотвращение катастрофических разрушений конструкций при испытаниях и эксплуатации за счет оценки скорости развития дефектов;

- определение мест течей.

Эти уникальные свойства позволяют акустической эмиссии находить применение в следующих областях:

- мониторинг технологических процессов (мониторинг процесса сварки, мониторинг процесса сушки, мониторинг структурных превращений в материалах и т.п.);

- исследования свойств материалов и материаловедение (исследование роста трещин в материалах, исследование развития дефектов, вызванных

коррозией, исследование движения дислокаций в материалах, исследование структурных превращений и структурной стабильности материала, исследование усталостных явлений в материалах, измерение предела текучести материала, исследование разрывов материалов и т.п.);

- мониторинг элементов конструкций (выявление течей жидкостей и газов из резервуаров под давлением, мониторинг труб и трубопроводов, мониторинг реакторов, мониторинг, мостов, тоннелей и зданий, мониторинг вращающихся механизмов и т.п.).

Предложенные в работе способы решения проблемы локации источника сигнала акустической эмиссии, позволяют определять координаты развивающихся дефектов в конструкционных материалах. В ходе работы был разработан инструментальный усилитель на базе микросхемы, выполненной при помощи комбинированной биполярно-полевой технологии с применением возможностей производства “РНИИКП”.

Разработанная микросхема усилителя имеет размеры 4x3 мм, и уровни питания $\pm 5В$, что позволяет поместить ее в корпус пьезопреобразователя. Такое решение позволит практически избавиться от соединительных кабелей между датчиком и усилителем, и тем самым сократить возможные помехи, вызванные наводками, возникающими в межсоединительных кабелях.

Литература

1. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. - М.: Изд-во стандартов, 1976. - 276 с.
2. Тутнов А.А., Тутнов И.А. Диагностика разрушения на основе регистрации и анализа акустических и электромагнитных волн: Обзор: М.: ЦНИИАтоминформ, 1988. 72 с.
3. Бойко В.С., Нацик В.Д. Элементарные дислокационные механизмы акустической эмиссии/ В кн.: Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. Киев: Наукова думка. С.159-189.

4. Бартенев О.А., Фадеев Ю.И. Применение акустической эмиссии в механических испытаниях: Обзор// Заводская лаборатория. 1990. №1. С.34-39.
5. Шахнов В.А., Власов А.И., Князев В.С. Аппаратно-программный комплекс обработки сигналов для мониторинга и анализа состояния технических систем // 3-ая Международная конференция "Компьютерные методы и обратные задачи в неразрушающем контроле и диагностике". Москва. 18-21 марта 2002.
6. Акустическая диагностика и контроль на предприятиях топливно-энергетического комплекса / В.М. Баранов, А.И. Гриценко, А.М. Карасевич и др. – М.: Наука, 1998. – 304 с.
7. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Муравьев В.В. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии. М. Машиностроение. 2004
8. Серьезнов А.Н., Степанова Л. Н., Кабанов С.И., Кареев А.Е. Акустико-эмиссионный контроль авиационных конструкций М. Машиностроение. 2008
9. Неразрушающий контроль: Справочник: в 7 т. Под общ. ред. Клюева В.В. Т.7: в 2 кн. Кн.1: Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
10. Семашко Н.А., Шпорт В.И., Марьин Б.Н. и др. Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Семашко Н.А., канд. техн. наук Шпорта В.И. Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. – М.: Машиностроение, 2002. – 240 с.
11. Ian G. Scott Volume 6 of Nendestructive Testing Monographs and Tracts . – Breach Science Publishers, 1991. – 252 с.