

Л.В.Журавлева канд. техн. наук, доцент,
Ю.Н. Тиняков, Кулик Д.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
e-mail: tinjakov48@mail.ru; dimkgi.94@mail.ru

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЭМС ДАТЧИКОВ ПРИ ДОБЫЧЕ И ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ

В работе проанализированы возможности применения МЭМС датчиков при добыче и транспортировке нефтепродуктов с целью создания измерительных систем, элементы которых работают при температуре ниже минус 60°C, в условиях обледенения, погружения в воду, надежных и не требующего обслуживания в процессе эксплуатации. Основное внимание уделено обработке таких параметров как: давление, температура, расход, состав измеряемых сред, при этом измерения должны проводиться в непрерывном режиме и в «полевых условиях». Показано, что классические методы измерения, основанные на индукционном, потенциометрическом методе измерения и использовании стальных упругих элементов непригодны для работы в районах Крайнего Севера. В заключении даны рекомендации по применению микроэлектромеханических систем для мониторинга трубопроводных систем в жестких условиях эксплуатации.

Ключевые слова: МЭМС – микроэлектромеханические системы, датчики давления, скорости потока, вибрации, транспортировка нефтепродуктов

Работа выполнена при частичной поддержке Гранта «Определение критических характеристик информационно-измерительной системы на базе МЭМС-устройств для обнаружения течей магистральных нефтепроводов» (Соглашение от 04.10.2012 № 14.В37.21.1888)

L.V. Juravleva, J.N.Tinjakov, D.V.Kulik

BMSTU

e-mail: tinjakov48@mail.ru; dimkgi.94@mail.ru

CONCEPT OF MEMS SENSOR FOREXTRACTING OIL AND OIL TRANSPORTATION

This paper analyzed the possibility of using MEMS sensors in extracting and transportation of petroleum products in order to create measurement systems, the elements of which are operated at temperatures below minus 60 ° C, in icing conditions , water immersion , reliable and maintenance free during the using. General attention paid to processing parameters such as pressure, temperature , flow rate, the composition of the process, in this case the measurement must be carried out in a continuous mode and in the "field". It is shown that the classical methods of measurement based on inductive , potentiometric measurement method and the use of steel elastic elements are not suitable for use in the Far North . Finally, recommendations for the use of microelectromechanical systems for monitoring pipeline systems in harsh environments.

Keywords: MEMS - mikroelektomechanical systems, pressure sensors, flow sensors, vibration sensors, transportation of petroleum products

This work was partially supported by Grant "Determination of critical characteristics of information-measuring systems based on MEMS devices to detect leaks oil trunk pipelines"
(Agreement of 04.10.2012 № 14.B37.21.1888)

Введение

В последние десять лет МЭМС датчики нашли широкое применение при добыче и транспортировке нефтепродуктов. Это обусловлено тем, что МЭМС датчики имеют чувствительность выше, чем традиционные датчики. Появляется возможность создания миниатюрных многофункциональных приборов (система на кристалле), расширения температурных пределов измерений, повышение надежности и радиационной стойкости. Применение технологий в МЭМС существенно снизит затраты на изготовление измерительных приборов и снизит эксплуатационные затраты, в следствие увеличения интервала между периодическими проверками. Создание измерительных систем элементы которых работают при температуре ниже минус 60°C, в условиях обледенения, погружения в воду, надежных и не требующего обслуживания в процессе эксплуатации, является сложной и актуальной научно-технической задачей.

В измерительных системах и автоматизированных системах управления технологических процессах при добыче, транспортировке полезных ископаемых необходимо иметь информацию о многочисленных параметрах технологического процесса. Наиболее важными параметрами являются давление, температура, расход, состав измеряемых сред. При этом измерения должны проводится в непрерывном режиме и в «полевых условиях». Старые методы измерения, основанные на индукционном, потенциометрическом методе измерения и использовании стальных упругих элементов непригодны для работы в районах Крайнего Севера. Измерительные приборы требуют обогрева помещений, постоянного обслуживания. Кроме того, для этих приборов сложно организовать современные протоколы обмена с контроллерами измерительных систем и автоматизированных систем управления. Применение микроэлектромеханических систем (МЭМС) решает выше изложенные проблемы.

На рынке России предложен широкий ряд измерительных систем и автоматизированных систем управления. Такие фирмы как Siemens, Honeywell, Yokogawa, ABB и другие широко представлены в добыче, транспортировке и переработке полезных ископаемых. В датчиках этих фирм используются кремниевые первичные преобразователи, изготовленные по концепции МЭМС. Продукция этих фирм является наукоемкой, надежной, и как правило удовлетворяет потребителя. Но для работы при температуре ниже минус 40°C, в условиях обледенения и затопления при паводках она не предназначена. Причиной этого, являются большие расходы на доработку при относительно небольшом объеме продаж в России.

В области измерительных приборов изготавливаемых по технологии МЭМС в России отсутствуют организации, владеющие этой технологией. Участие отечественных фирм в поставке оборудования для измерительных систем носят фрагментарный характер и как правило ограничиваются поставками датчиков на старых принципах работы («Метран», «Манометр», «ВНИИА»). Температурный диапазон работы этого оборудования ограничен

минус 40°C и они требуют частых подстройки в лабораторных условиях, что увеличивает эксплуатационные расходы [1-3].

В связи с этим, представляется интерес создания современных российских импортозамещающих измерительных систем на МЭМС преобразователях, предназначенных для работы в условиях Крайнего Севера.

1 Концепция реализации МЭМС преобразователей для систем транспортировки

Монокристаллический кремний обладает уникальными механическими характеристиками: отсутствует гистерезис, ползучесть. Кремниевые упругие элементы выдерживают перегрузку в десять раз превышающую рабочую. Кроме того, микрообработка кремния позволяет формировать трехмерные структуры. Использование таких структур в измерительных преобразователях датчиков давления, расхода и акселерометрах, позволит на два порядка повысить защиту от перегрузки и воздействия окружающей среды, уменьшает габариты.

Для создания измерительных систем работающих в условиях Крайнего Севера, необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать первичные преобразователи работающие при температуре минус 60 °С и сохраняющие свои характеристики в течении длительного времени.
2. Разработать микросхемы работающие при температуре минус 60 °С.
3. Разработать корпуса аппаратуры измерительных систем, с соответствующей защитой от влаги и взрывозащитной.

В России из серийно освоенных, известны датчики давления фирм «Метран», «Манометр», «ВНИИА», «МИДА». Тензометрическая схема съема сигнала в первичных преобразователях этих датчиков выполнена на структурах кремний на сапфире (КНС).

Чувствительный элемент первичного преобразователя является многослойной структурой (титан, серебро, сапфир, кремний), слои которой не согласованы по коэффициенту термического расширения. В процессе воздействия температуры и естественного старения материалов, характеристики датчиков изменяются

В связи с этим, датчики должны проходить периодическую проверку и настройку в условиях лаборатории, что обуславливает существенные затраты.

Кроме того, первичные преобразователи со структурой КНС изменяют свои характеристики после воздействия перегрузки в 1,5 раза превышающую номинальное давление, а при трех кратной перегрузке первичные преобразователи выходят из строя.

При использовании кремниевых первичных преобразователей, которые изготавливаются по технологии МЭМС, эти проблемы снимаются.

Монокристаллический кремний обладает уникальными механическими характеристиками: отсутствует гистерезис; ползучесть. Кремниевые упругие элементы выдерживают перегрузку в десять раз превышающую рабочую. Кроме того, микрообработка кремния позволяет создать конструкцию упругих элементов, которые при воздействии перегрузки ложатся на упор и не ломаются. Миниатюрные размеры кремниевых чувствительных элементов позволяют создавать многофункциональные датчики, как например совмещенный датчик разности давления и избыточного давления. Такие конструкции первичных преобразователей существенно снижает номенклатуру составных частей измерительных систем.

Схема детектирования сигнала выполняется в виде тензорезисторов, которые формируются легированием кремния в кристаллографической решетке. Таким образом монокристаллические кремниевые чувствительные элементы имеют одинаковые коэффициенты термического расширения, что способствует стабильности характеристик. Поскольку технология изготовления тензорезисторов совместима с технологией изготовления микросхем, в кристалл чувствительного элемента можно встраивать схему обработки сигнала (технология МЭМС). Встроенная схема обработки сигнала позволяет повысить точность измерения, уменьшить габариты и стоимость [4].

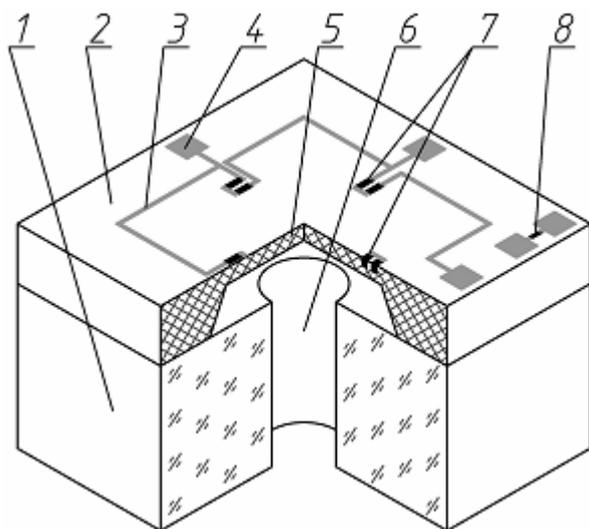
2 Комплексный подход определения несанкционированного подключения и малых течей в трубопроводе

Для определения несанкционированного подключения и малых течей в трубопроводе, МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает создать систему определения несанкционированного подключения и малых течей в трубопроводе используя следующие методы [5-8]:

- метод измерения скачка давления в трубопроводе;
- метод изменения скачка скорости продукта в трубопроводе;
- метод регистрации распространения вибрации и акустических сигналов в трубопроводе.

Все вышеуказанные методы дополняют друг друга, повышая тем самым достоверность определения несанкционированного подключения и малых течей. В момент открытия крана на врезке происходит понижение давления, которое регистрируется датчиком давления.

На рисунке 1 изображён кремниевый тензорезистивный кристалл (чувствительный элемент) сенсора.



- 1 - основание;
- 2 - кремниевый кристалл;
- 3 - алюминиевая дорожка;
- 4 - контактная площадка;
- 5 - мембрана;
- 6 - отверстие для подвода давления;
- 7 - тензорезисторы, полученные диффузией или ионной имплантацией;
- 8 - датчик температуры.

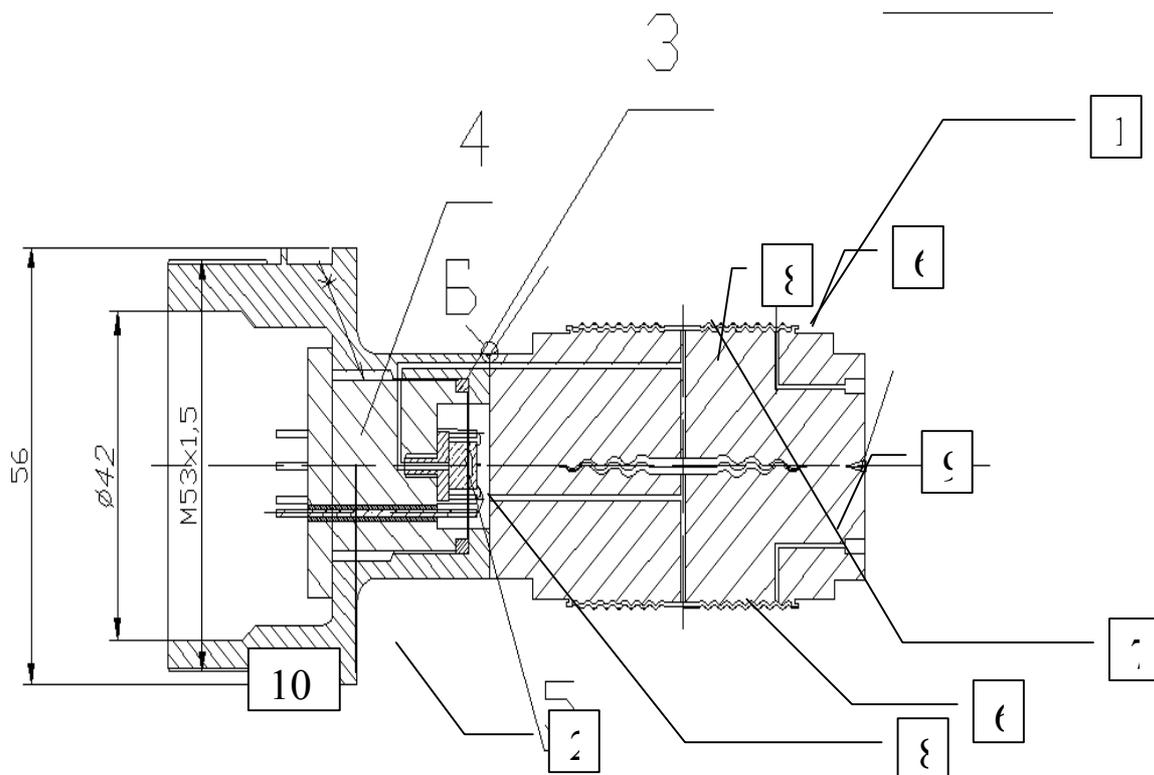
Рисунок 1 - Чувствительный элемент сенсора датчика давления

В центре тыльной стороны кремниевой пластины 2, имеющей форму квадрата, вытравлена квадратная чувствительная мембрана 5. На лицевой стороне пластины на границе чувствительной мембраны формируются четыре тензорезистора 7 р-типа проводимости, изолированные от подложки большим сопротивлением р-п перехода. Тензорезисторы токоведущими дорожками 3 объединяют в мостовую схему, которая с помощью проводников, привариваемых к контактным площадкам 4, соединяется с электронной схемой датчика. Кремниевый кристалл методом электростатического срачивания герметично соединяется с основанием из стекла. В центре основания - отверстие 6 для соединения с измеряемой средой. При подачи давления через отверстие под чувствительную мембрану, мембрана деформируется и вызывает изменение сопротивления тензорезисторов.

Так как выходным сигналом упругого преобразования является не перемещение или усилие, а деформация поверхности мембраны, воспринимаемая резисторами малых размеров (десятки мкм), то и мембрана может иметь малые размеры (1...2мм). Малые размеры и отсутствие дополнительных элементов, увеличивающих массу мембраны определяет хорошие динамические характеристики преобразователя.

Данные преобразователи пригодны для использования в диапазоне температур от -60 до +125°С.

Для того чтобы чувствительный элемент сенсора датчика давления преобразовывал давление в электрический сигнал, его необходимо поместить в корпус. Датчик разности давления представлен на рисунке 2.



- 1- гидроблок;
- 2- корпус ЧЭ;
- 3- изолирующее кольцо;
- 4- основание с гермовыводами;
- 5- чувствительный элемент сенсора;
- 6- разделительные мембраны;
- 7- защитная мембрана;
- 8-каналы;
- 9-отверстия заливки рабочей жидкости(на рисунке не загерметизированы);
- 10-гермовыводы.

Рисунок 2 - Датчик разности давления

Пространство под мембранами и в каналах 8 заполнено кремнеорганической жидкостью, которая предварительно закачивается через отверстия 9, а потом герметизируется.

В силу принципа несжимаемости жидкости, давление создаваемое на мембраны 6 будет неискаженно передаваться на ЧЭ 5.

Принцип работы сенсора в следующем: давление измеряемой среды через разделительные мембраны и кремнеорганическую жидкость передается на чувствительный элемент сенсора, каналы 8 обеспечивают 2стороннее

давление на ЧЭ, таким образом мембрана ЧЭ деформируется разностью давления. Тензорезисторы, установленные на ЧЭ деформируются под действием давления и изменяют свое сопротивление. Ток, проходящий через них, изменяет напряжение на резисторах моста. Сигналы с тензомоста поступают через гермовыводы 10 на плату усиления, а затем и последующей цифровой обработки (на рисунке платы не показаны).

Линеаризованный и термоскомпенсированный сигнал передается в токовую петлю, параллельно возможна передача HART-информации.

3 Защита от перегрузки для датчиков разности давления

Датчики разности давления, как правило, измеряют падение давления на сужающемся устройстве или на фильтре которые находятся в трубопроводе. Давление в трубопроводе может превышать измеряемую разность давления в сотни и в тысячу раз. Поскольку кремниевый чувствительный элемент выдерживает десяти кратную перегрузку, приходится принимать меры по защите кристалла чувствительного элемента от разрушения.

В настоящей статье предлагается использовать **защитную мембрану** для защиты от воздействия перегрузки.

На рисунке 3 представлен принцип защиты сенсора разности давления от перегрузки.

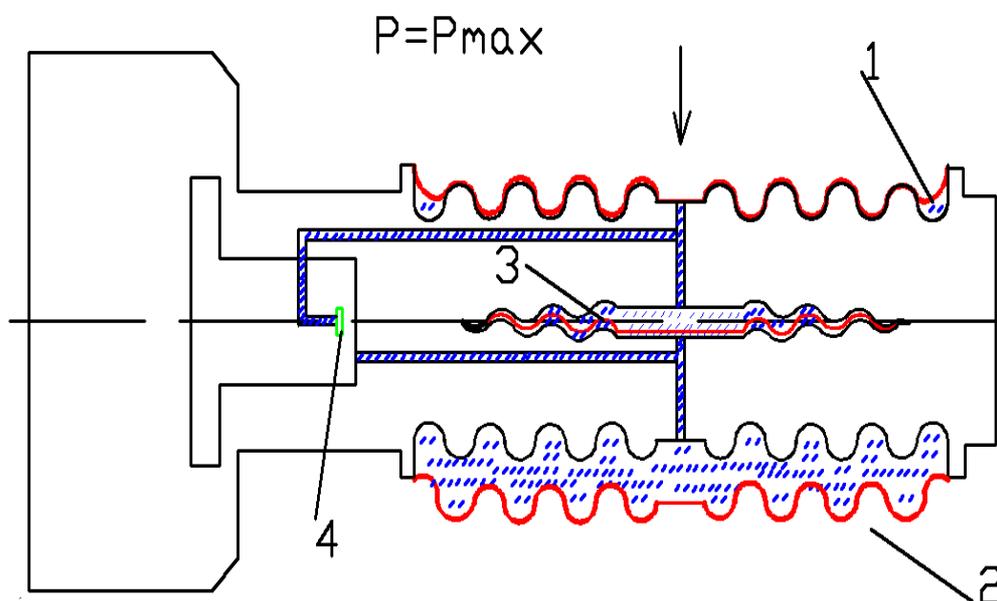


Рисунок 3 - Принцип защиты от перегрузки

- 1-мембрана 1;
- 2-мембрана 2;
- 3-защитная мембрана;
- 4-ЧЭ.

При превышении давления мембрана 1 ложится на упор и объем жидкости перетекает из под нее в полость образованной в результате смещения защитной мембраны 3, в результате притока жидкости разделительная мембрана 3 ложится на упор и разрушающее давление уже не передается на кристалл ЧЭ. Тем самым предотвращается поломка чувствительного элемента сенсора датчика давления.

Для регистрации резкого понижения давления в трубопроводе вследствие несанкционированного отбора нефтепродуктов в трубопровод врезают датчик разности давления рисунке 4.

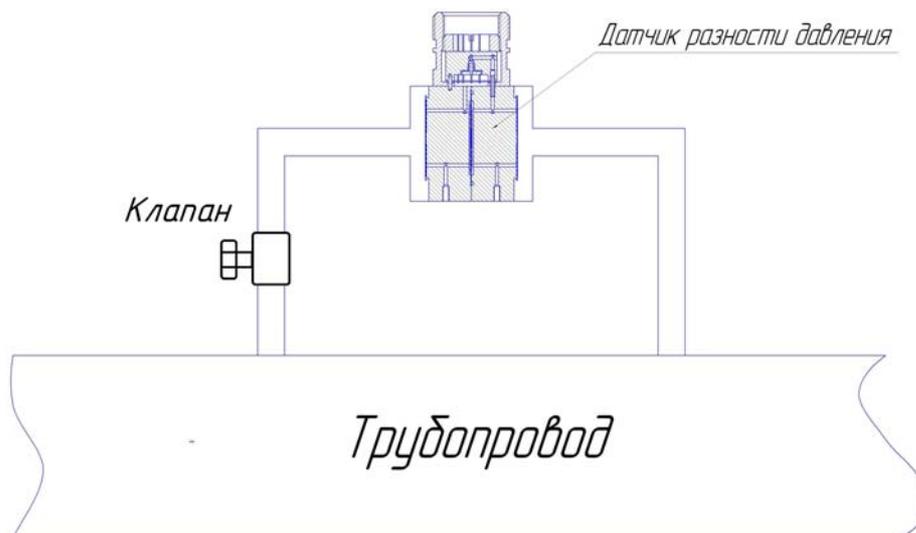


Рисунок 4 - Датчик разности давления в трубопроводе

Датчик разности давления устроен так, что при подключении к трубопроводу и сети питания рисунок 4 происходит перекрытие клапаном полости датчика разности давления, при этом образуется опорная полость, давление в которой соответствует статическому давлению трубопроводе. Клапан отсекает воздействие давления в трубопроводе. Разность давления между измерительной и опорной полостью регистрируется кремниевым чувствительным элементом, чувствительность которого в несколько тысяч выше чем чувствительность «штатных» датчиков которые измеряет давление в трубопроводе. При несанкционированной врезке в трубопровод давление за точкой врезки изменяется, что регистрируется кристаллом кремниевого чувствительного элемента. Величина скачка давления незначительно и может составлять тысячную долю от давления в трубопроводе. Такое давление обычный датчик избыточного давления зарегистрировать не сможет.

При несанкционированной врезке в трубопровод или при образовании течи происходит скачек изменения скорости потока в трубопроводе. Зарегистрировать скачек изменение скорости потока можно с помощью теплового (термоанемометрического) метода измерения скорости потока.

4 Принцип действия теплового МЭМС датчика скорости потока

Термоанемометры основаны на зависимости между потерей тепла непрерывно нагреваемого тела и скоростью газа или жидкости, в которых это тело находится. Основное назначение термоанемометров – измерение местной скорости и ее вектора

Тепловой метод измерения скорости потока основан на изменении сопротивления нагретого резистора при изменении скорости потока.

В момент несанкционированной врезки в трубопровод, резко падает скорость потока жидкости. При этом нарушается температурный баланс нагретого резистора и его омическое сопротивление увеличивается. Электронная схема отслеживает изменение сопротивления.

На рисунке 5 представлен принцип работы теплового (термоанемометрического) измерителя скорости (расхода).

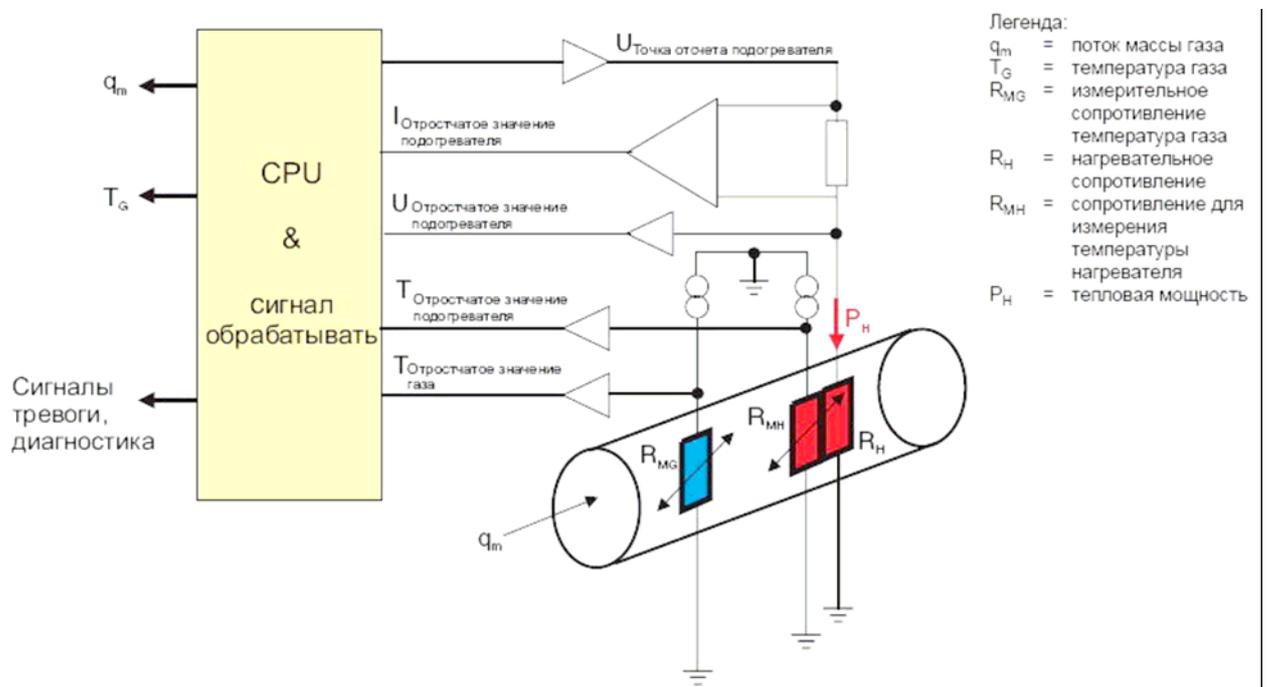


Рисунок 5 - Принцип работы теплового (термоанемометрического) измерителя скорости

В приборе для измерения скорости потока (расхода) (рис. 5) в трубопровод установлены два пленочных терморезистора, включенных в мостовую схему. Один терморезистор измеряет температуру среды. Второй терморезистор перегрет на несколько десятков градусов. Разность температур терморезисторов регулируется и поддерживается постоянный перегрев второго терморезистора по отношению к температуре среды. Необходимый для перегрева электрический ток напрямую зависит от скорости потока и удельной теплоемкости среды.

Такой метод позволяет улавливать малые изменения расхода (0.04-10 кг/час). Расходомер устанавливается непосредственно в трубопровод. При несанкционированной врезке в трубопроводе возникает вибрация от

режущего инструмента. Такие вибрации можно зафиксировать датчиками вибрации.

5 Принцип действия МЭМС тензорезистивного датчика вибрации

На рисунке 6 схематично представлен МЭМС тензорезистивный сенсор вибрации изготовленный из кремния. 3. Инерционная масса 3 и упругие пружины 4 сформированы химическим травлением кремния, и составляют с кремневым основанием единую конструкцию. Схема преобразования ускорения вибрации в электрический сигнал выполнена в виде тензорезисторов, которые имплантированы в кремниевые упругие пружины. Таким образом, схема преобразования сигнала является частью монокристаллической структуры, повторяя ее высокие механические и электрофизические свойства.

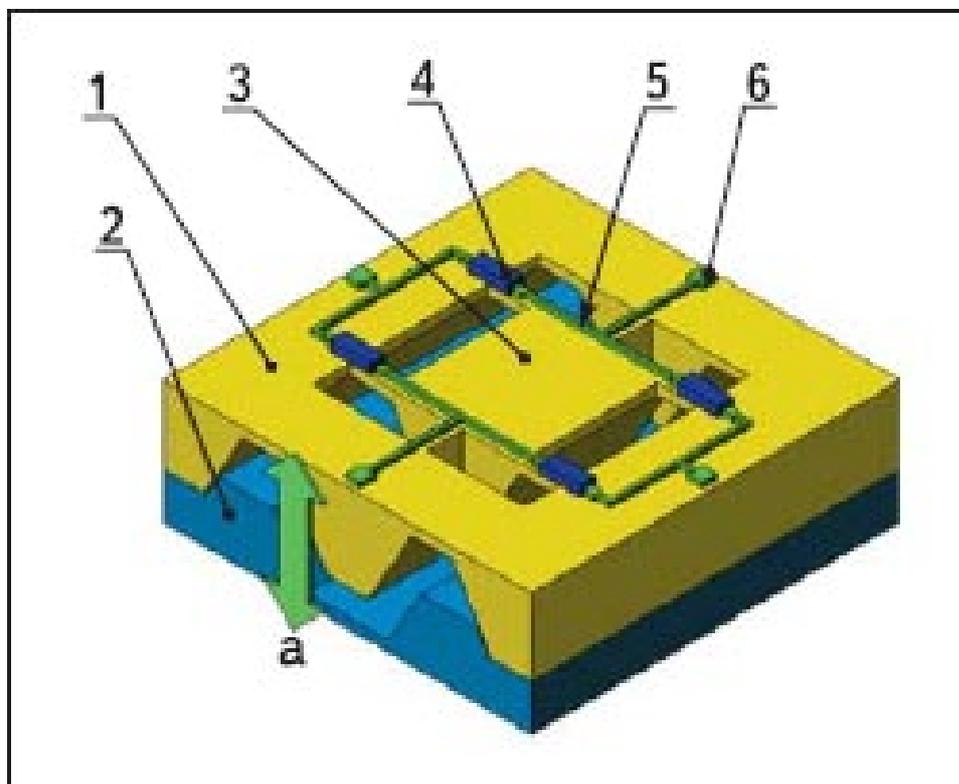


Рисунок 6 - МЭМС тензорезистивный сенсор вибрации

Такая конструкция сенсор вибрации практически не чувствует ускорения действующие по осям перпендикулярным оси чувствительности.

На рисунке 7 показан разрез структуры МЭМС сенсора вибрации.

При действии ускорения вибрации по оси Z упругие перемычки изгибаются, тензорезисторы А и В растягиваются и меняют свое сопротивление в сторону увеличения, на достаточно большое значение.

При действии ускорения вибрации по оси Y упругие перемычки деформируются незначительно, при этом тензорезистор А растягивается, а

тензорезистор В сжимается, изменение их сопротивлений в схеме, взаимно вычитаются (погрешность равна нулю).

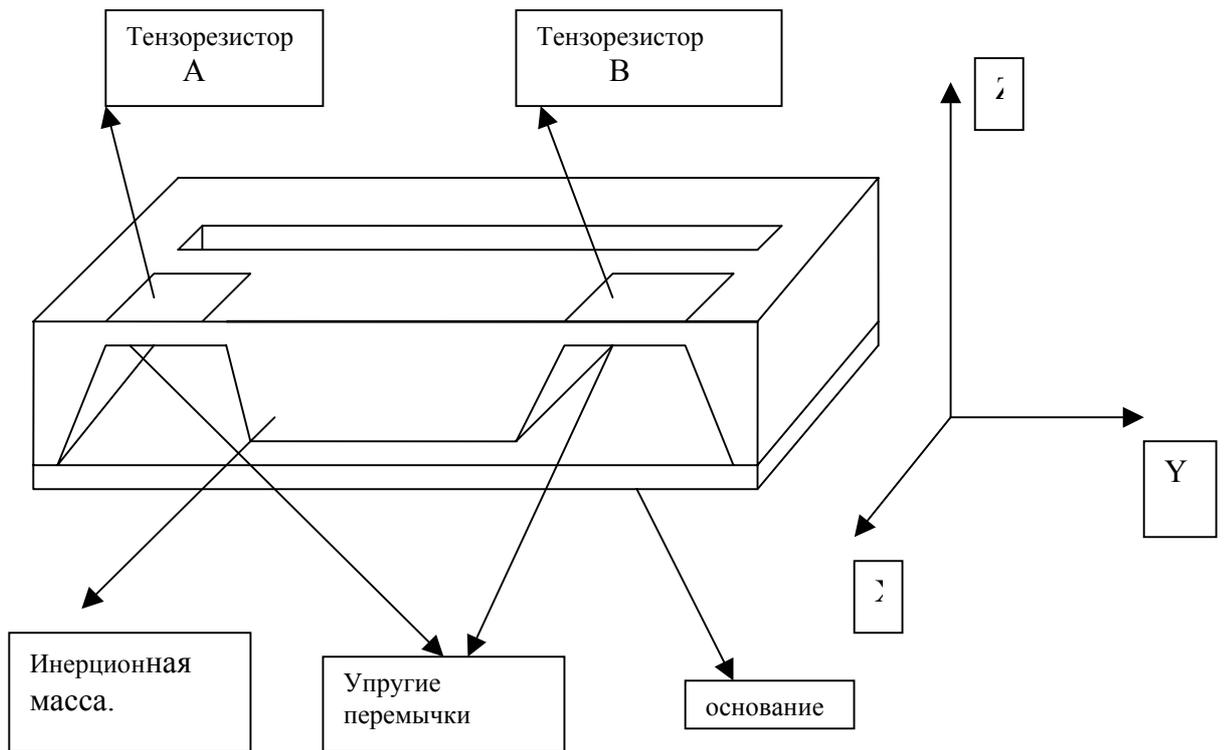


Рисунок 7 - Разрез структуры МЭМС сенсора вибрации

Если на трубопроводе закрепить при непосредственном контакте с металлом датчики вибрации и чувствительные микрофоны, то можно определить момент несанкционированной врезки.



Рисунок 8 - Принцип работы определения врезки датчиками вибрации

При действии ускорения вибрации по оси X упругие перемишки практически не деформируются, т.к. жесткость по оси X на два порядка выше, чем жесткость по оси Z.

Благодаря преимуществам такой конструкции МЭМС сенсора вибрации, компании ENDEVCO позволило разработать сенсор вибрации с уникальными точностными характеристиками.

В качестве первичных датчиков применить кремниевые чувствительные элементы. В настоящее время ведущими мировыми производителями в качестве конструкционного материала в производстве датчиков используется объемный кремний. Кремний - материал с уникальными механическими характеристиками. Отсутствие гистерезиса, стойкость к перегрузкам на порядок больше, чем у сталей, возможность встраивания схемы обработки сигнала в кристалл чувствительного элемента идеально подходит для конструирования и производства преобразователей физических величин и датчиков.

Для реализации современной измерительной системы с цифровыми каналами связи для обработки сигналов с датчиков и передачи информации о подключении в диспетчерскую службу будут использованы современные технические решения с учетом взрывозащиты.

Литература

- 1 Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 138 с., ил.
- 2 Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с, ил.
- 3 Ушков А.В Разработка конструктивно-технологических основ производства кремниевых чувствительных элементов давления с повышенной стойкостью к перегрузкам // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.
- 4 Распопов В.Я Микромеханические приборы – Машиностроение, 2007 – 400 с., ил.
- 5 Проектирование наносенсоров : учеб. пособие /А.А.Денисов, В.А.Кальнов, В.А.Шахнов - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011. (Библиотека Наноинженерия»: в 17 кн. Кн.6). - 128 с.:ил.
- 6 К.И.Билибин, А.И.Власов, Л.В.Журавлева и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств /под общ. редакцией В.А.Шахнова. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002. 500 с. (серия: Информатика в техническом университете).
- 7 Ю.И.Нестеров, А.И.Власов, Б.Н.Першин Виртуальный измерительный комплекс// Датчики и системы. – 2000. - №4.- С.12-22.
- 8 Т.И.Агеева, А.И.Афонин, А.И.Власов и др. Информационные технологии в инженерном образовании/под ред. С.В.Коршунова, В.Н.Гузненкова. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2007. – 432 с.: ил.

Сведения об авторах

Журавлева Людмила Васильевна - канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им.Н.Э.Баумана. Автор более 10 научных работ в области технологической подготовки производства и герметизации.

Телефон: 8-499-263-65-53

Кулик Дмитрий Вячеславович, студент 3 курса кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им.Н.Э.Баумана (ИУ4). Автор более 5 научных работ.

Телефон: 8-499-263-65-53, dimkgi.94@mail.ru

Тиняков Юрий Николаевич главный конструктор СКБ «Сенсорные системы» кафедры «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им.Н.Э.Баумана. Автор более 10 научных работ в области сенсорных систем.

Телефон: 8-499-263-65-53, dimkgi.94@mail.ru