

# ТРЕХМЕРНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-7-29-35

**Мансуров Тофиг Магомед оглы,**  
Азербайджанский Технический Университет,  
Баку, Азербайджан, [tofiq-mansurov@rambler.ru](mailto:tofiq-mansurov@rambler.ru)

**Алиев Чингиз Паша оглы,**  
Министерство Оборонной Промышленности  
ПО "УФУГ", Баку, Азербайджан, [ufiq09@mail.ru](mailto:ufiq09@mail.ru)

**Ключевые слова:** акселерометр, пьезоэлемент, вектор чувствительности, инерционная сила, линейное ускорение, скорость, виброметрия

Проведен анализ структурного построения существующих трехмерных акселерометров, в которых векторы чувствительности направлены против измеряемой инерционной силы и в связи с этим возможно измерения линейной инерции и ускорения в малых пределах. В состав этих акселерометров входит элементы, создающие дополнительные электромагнитные поля и усложняющие их конструкции. В известных акселерометрах из-за отсутствия датчика положения объекта измерений и электронной схемы управления ограничиваются функциональные возможности акселерометра, из-за отсутствия интегратора для интегрирования ускорения измерение скорости перемещения не обеспечивается, из-за жесткого крепления пьезоэлектрических чувствительных элементов через их основания, в процессе измерения они создают сигналы помех, амплитуда которых превышает амплитуду полезного сигнала, что не обеспечивает достоверность измеряемого ускорения или скорости и из-за наличия чувствительных пьезоэлектрических элементов, обладающих большей жесткостью и требующих действия сравнительно больших механических усилий для выработки сигналов при движении объекта измерений ускорения и скорости в автоматическом режиме, что снижает чувствительности акселерометра. Предложена новая конструкция и схема управления трехмерного пьезоэлектрического акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов в автоматическом режиме, в котором снабжение датчиком положения движущегося объекта измерений с помощью блока распознавания сигналов по трем координатным осям обеспечивает определение направления движения с измерением ускорения или линейной скорости при перемещении объекта измерений по данной координатной оси, с помощью дифференциальных операционных усилителей через формирователи импульсов и интеграторы, соединенных к цифровым индикаторам обеспечивается измерение скорости, за счет демпфирования пьезоэлектрических элементов при движении объекта измерений по одной из координатных осей, по двум другим осям вырабатываемые сигналы помех по амплитуде значительно уменьшаются путем их погашения, наличие в конструкции пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин с секцией возбуждения и секцией чувствительного элемента,рабатывающего сигналы при быстроизменяющемся ускорении и скорости движущегося объекта, амплитуда сигнала и чувствительность повышается в 4-5 раз за счет выработки сигнала чувствительными элементами в вибрационном режиме возбуждения, созданного в акселерометре. Разработана математическая основа разработки схемы управления трехмерным акселерометром и математическая модель функционирования акселерометра, применение которой позволяет оценить степени повышения чувствительности акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов в реальном масштабе времени и тем самым расширить функциональные его возможности.

#### Информация об авторах:

**Мансуров Тофиг Магомед оглы**, д.т.н., профессор, Азербайджанский Технический Университет, Баку, Азербайджан  
**Алиев Чингиз Паша оглы**, генеральный директор, ПО "УФУГ" Министерство Оборонной Промышленности, Баку, Азербайджан

#### Для цитирования:

Мансуров Т.М., Алиев Ч.П. Трехмерный пьезоэлектрический акселерометр измерения динамических параметров движущихся объектов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №7. С. 29-35.

#### For citation:

Mansurov T.M., Aliyev C.P. (2020) Three-dimensional piezoelectric accelerometer for measuring dynamic parameters of moving objects. T-Comm, vol. 14, no.7, pp. 29-35. (in Russian)

### Введение

Актуальность исследования колебательных процессов, происходящих в движущихся объектах, связана с разработкой трехмерного акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов в реальном времени. С другой стороны применение информационно-измерительных систем позволяет автоматизировать процесса измерения динамических параметров движущихся объектов, что способствует учету редких событий, сильно влияющих на результаты измерений [2, 3, 6, 7]. С этой целью в измерительных устройствах устанавливаются трехкоординатные датчики положения, воспринимающие движения объекта измерений по трем координатам прямоугольной системы координат, размещенные на движущихся объектах и преобразующие механическую величину в соответствующий электрический сигнал. Данный сигнал поступает на регистрирующее устройство. В качестве таких датчиков положения в основном применяются пьезоэлектрические измерительные преобразователи вибраций, которые являются датчиками генераторного типа, которые преобразуют вибрационное ускорение в пропорциональный электрический сигнал.

Как известно [1-3], акселерометр состоит из чувствительной массы, закрепленной в упругом подвесе, под воздействием каждого ускорения происходит отклонение от первоначального положения, пропорциональное этому ускорению. Акселерометры являются устройствами с одной степенью свободы и содержит инерционную массу, плоские пружины в качестве упругой поддерживающей системы и демпфирующее устройство. Датчики положения детектируют перемещения инерционной массы относительно объекта измерения и преобразует в пропорциональный электрический сигнал. В связи с этим другой составной частью акселерометра является детектор перемещений, способный измерять амплитуды вибрационных колебаний в определенном диапазоне или линейные ускорения. Выходной сигнал акселерометра, пропорциональный значению ускорения механических колебаний, с помощью измерителя преобразуется в электрический сигнал.

Объектом исследований является трехмерный пьезоэлектрический акселерометр измерения динамических параметров движущихся объектов в автоматическом режиме.

Предметом исследований является исследование основных принципов и закономерностей повышения чувствительности и достоверности и расширение функциональной возможности трехмерного пьезоэлектрического акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов в автоматическом режиме.

Целью работы является повышение точности и достоверности проведенных измерений, чувствительности и расширение функциональных возможностей трехмерного пьезоэлектрического акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат в автоматическом режиме.

### Постановка задачи

Для измерения динамических параметров движущихся объектов в автоматическом режиме в качестве рабочего органа акселерометра применяются пьезоэлектрические акселерометры. Применение пьезоэлектрических акселеромет-

ров связано с их преимуществом по сравнению с другими известными видами акселерометров. Пьезоэлектрические акселерометры имеют широкий рабочий диапазон частот, активный характер преобразования, обладают линейностью амплитудной характеристики, высокой стойкостью к внешним воздействиям. Отсутствие в них движущихся частей обеспечивают высокую надежность и долговечность, их можно реализовать в малогабаритном исполнении с высокой технологичностью в производстве.

В известных акселерометрах вектор чувствительности и направление измеряемой инерционной силы имеют противоположные направления, что дает возможность измерять только линейные инерции и ускорений в малых пределах. Такие акселерометры не позволяют измерять скоростей движущихся объектов в реальном масштабе времени. С другой стороны из-за наличия элементов, создающих электромагнитные поля, их конструкции в определенной мере усложняется и требует дополнительных мер по исключению влияния этих электромагнитных полей [7-10].

В связи с этим возникает необходимость разработки трехмерного пьезоэлектрического акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов, математической основы построения и математической модели его функционирования, в котором вектор поляризации пьезоэлектрического элемента направлен вдоль оси чувствительности акселерометра, т.е. направления вектора линейного ускорения движущихся объектов. Наряду с этим, ниже проведена классификация акселерометров, их характеристик и параметров, измеряемых акселерометром, сформулирована целевая функция.

### Разработка целевой функции

Для оценки эффективности трехмерного пьезоэлектрического акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов, определяемой повышением точности и достоверности проведенных измерений, чувствительности и расширением функциональных возможностей данного акселерометра при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат в автоматическом режиме сформулирована целевая функция. Точность работы акселерометра зависит от чувствительности датчиков и динамического диапазона, а чувствительность, т.е. амплитуда, с которой прибор отдает электрический сигнал, которая считается основным параметром при выборе измерительного устройства. Ведь именно от него зависит точность полученных данных в ходе проведения измерения. Динамический диапазон улавливаемых акселерометром колебаний определяется энергией колебаний, которая находится в очень узком частотном диапазоне. Поэтому необходимо учитывать то, что процесс измерения колебаний выполняется с очень малыми или очень большими амплитудами ускорения и соответственно скорости.

Повышение эффективности функционирования данного акселерометра заключается в решении двух основных задач, т.е. в разработке целевой функции и определении оптимальных значений ее аргументов, которые обеспечили бы работу акселерометра при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат в автоматическом режиме.

Руководствуясь вышеперечисленными принципами целевую функцию трехмерного пьезоэлектрического акселерометра можно определить в следующем виде:

$$E_{TIA} = \{\min[t_{uz}, \delta_{uz}, P_{nom}], \max[\tau_{l_1}, A_{y_{ac}}, D_{uz}]\}, \quad (1)$$

где  $t_{uz}$  – время измерения;  $\delta_{uz}$  – погрешность измерения;  $P_{nom}$  – уровень помех по двум другим координатам, по которым в данный момент времени измерения не проводится;  $\tau_{l_1}$  – быстродействие акселерометра;  $A_{y_{ac}}$  – чувствительность акселерометра, т.е. амплитуда, начиная с которой акселерометр отдает электрический сигнал и считается основным параметром при выборе измерительного устройства;  $D_{uz}$  – динамический диапазон измерения акселерометра, который определяется верхним и нижним значением колебаний, которые акселерометр способно улавливать и находится в очень узком частотном диапазоне.

### Разработка трехмерного пьезоэлектрического акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов

Для расширения функциональных возможностей, повышения точности, чувствительности и достоверности процесса измерения динамических параметров движущихся объектов относительно координатных осей «XYZ» прямоугольной системы координат в автоматическом режиме измерений при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений разработана схема конструкции акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов в автоматическом режиме и схема его управления, которая представлена на рис. 1 [1, 4, 5].

Разработанный акселерометр содержит пьезоэлектрический элемент по каждой координате, выполненный в виде двухслойной плоской пластины, склеенной или сваренной между собой широкими гранями, имеющими секцию возбуждения -1,2,3 и секцию чувствительного элемента -4,5,6, изолированных друг от друга изоляционными канавками -7,8,9, причем пьезоэлектрические элементы демпфированы относительно продольных координатных осей через «П»-образные плоские пружины -10,11,12, при этом объект измерения -13 снабжен трехкоординатным датчиком положения -14, электроды -15 которого подключены к первому входу первого дифференциального операционного усилителя -16, ко второму входу которого подключен выход блока выборки -17 осей прямоугольной системы координат «XYZ», первый -18, второй -19, третий -20 выходы первого дифференциального операционного усилителя по трем осям координат соединены к входам порогового устройства -21, которое в зависимости от установленного порога срабатывания не пропускает выработанные сигналы помех по двум другим координатам на выход, блока распознавания -22 сигналов координат с возможностью обработки случайной последовательности, выходы порогового устройства соединены к входам блока памяти -23, который подключен к задатчику кода управления -24 и к управляющему блоку -25, выходы которого по трем осям «XYZ» подключены к управляющим входам триггеров -26,27,28, выходы которых соединены к входам электронных ключей -29,30,31, сигнальные входы и выходы которых соответственно соединены к входам источника переменного напряжения -32,33,34 координатных осей «XYZ» и к электродам возбуждения пьезоэлектрических элементов, а электроды чувствительных элементов координатных осей «XYZ» подключены к входам дифференциальных операционных усилителей -35,36,37 координатных осей

«XYZ», первые выходы которых через формирователи импульсов -38,39,40 подключены к первым цифровым индикаторам -41,42,43, а вторые выходы дифференциальных операционных усилителей через формирователи импульсов -44,45,46 и интеграторы -47,48,49 соединены к входам вторых цифровых индикаторов -50,51,52. Инерционные массы -53,54,55 механически связаны с пьезоэлектрическими чувствительными элементами, пьезоэлектрические элементы установлены на «П»-образных плоских пружинах. Каждый из пьезоэлектрических чувствительных элементов, расположенный вдоль координатных осей «XYZ» вместе с механически связанным с ним инерционной массой, размещен внутри отдельного защитного кожуха -56,57,58.

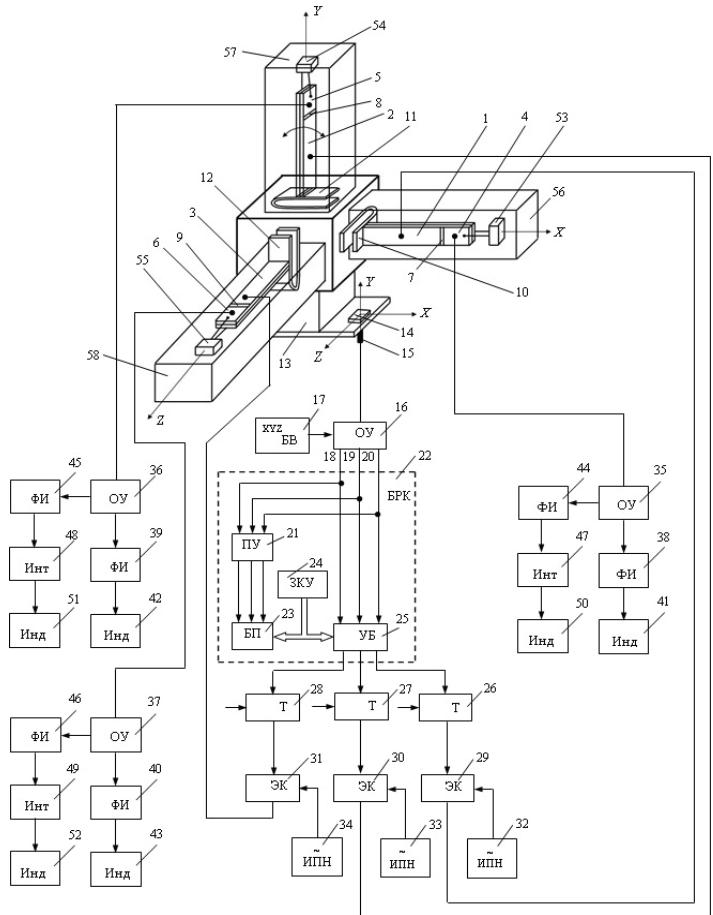


Рис. 1. Схема конструкции трехмерного пьезоэлектрического акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов измерений со схемой управления

### Принцип действия

Принцип действия акселерометра основывается на том, что в зависимости от требуемого направления движения объекта измерений -13 в начале в блоке выборки -17 устанавливается первоначальное состояние по одной из осей «XYZ» прямоугольной системы координат [5, 6].

При движении объекта измерений -13 вдоль оси «X» сперва трехкоординатный датчик положения -14 воспринимает движение объекта измерений -13 и сигналы с его выхода поступают на вход первого дифференциального операционного усилителя -16. Усиленные сигналы, проходя через пороговое устройство -21, которое в зависимости от уста-

новленного порога срабатывания не пропускает выработанные сигналы помех по двум другим координатам на выход, поступают в блок распознавания координат -22, которые подаются в блок памяти -23. Сигналы с выхода задатчика кода управления -24 поступают на вход блока памяти -23 и управляемого блока -25, с выхода которого сигналы распознают по их амплитуде, по их частоте или по их среднему значению в выделенной полосе частот. Поскольку максимальная амплитуда сигнала имеет место по оси «Y», т.к. направление оси чувствительности в трехкоординатном датчике -14 по оси «Y» прямоугольной системы координат совпадает с направлением движения объекта измерений -13 вдоль оси «X», сигналы с выхода блока распознавания координат -22 оси «Y» подаются на управляющий вход триггера -27, с выхода которого сигналы поступают на управляющий вход электронного ключа -30. При этом сигналы с выхода источника переменного напряжения -33 подаются на сигнальный вход электронного ключа -30, с сигнального выхода которого напряжение поступает на электроды секции возбуждения -2 пьезоэлектрического элемента, создающие в нем знакопеременные изгибные колебания, направление которых совпадает с направлением вектора оси чувствительности секции чувствительного элемента -5.

При линейном движении объекта измерений -13 в зависимости от изменения скорости в направлении вдоль оси «X» инерционная масса -54, ввиду своей инерционности отстает или опережает корпуса объекта измерений -13, что создает воздействие инерционных сил на чувствительный элемент -5, приводя его к изгибным деформациям, вырабатывающим сигналы, пропорционально изменяющемуся ускорению. Указанные сигналы поступают на дифференциальный операционный усилитель -36.

Усиливаясь, эти сигналы через формирователь импульсов -39 подаются на цифровой индикатор -42, показывая измеряемое ускорение прямолинейного движения объекта измерений -13, а сигналы, проходящие через формирователь импульсов -45, интегратор -48 и цифровой индикатор -51 показывает измеряемую скорость движения объекта измерений -13.

Измерение динамических параметров движения объекта измерений -13 относительно двух других осей «Y» и «Z» прямоугольной системы координат осуществляется в автоматическом режиме работы аналогично в вышеописанной последовательности. С помощью трехкоординатного датчика положения -14, дифференциального операционного усилителя -16 и блока распознавания координат -22 осуществляется автоматическое переключение координатных осей «XYZ» в зависимости от изменения направления движения объекта измерений -13, инерционные массы -53,54,55 механически связаны с пьезоэлектрическими чувствительными элементами. Каждый из пьезоэлектрических чувствительных элементов, расположенный вдоль координатных осей «XYZ» вместе с механически связанным с ним инерционной массой, размещен внутри отдельного защитного кожуха -56,57,58.

### Математическая основа функционирования акселерометра

В разработанном акселерометре в качестве рабочего органа предложено применять пьезоэлектрический элемент, выполненный в виде двухслойных плоских пластин по каждой координатной оси X, Y и Z, склеенных или сваренных

между собой широкими гранями, имеющими секцию возбуждения и секцию чувствительного элемента, в зависимости от изменения направления движения объекта измерения.

Применение пьезоэлектрического элемента в качестве рабочего (преобразовательного) органа связано с его преимуществами, перечисленными выше.

При движении объекта измерения по одной из координатной оси создается влияние на секции чувствительности пьезоэлектрического элемента акселерометра, измеряемое в единицах инерционной силы тяжести и в результате происходит создание составляющих напряжения, получаемого из электродов пьезоэлектрического элемента.

Момент инерции пьезоэлектрического элемента связан с геометрической формой инерционной массы и определяется следующим образом [4-6]:

$$i = l_2 \cdot l_3^3 / 12, (\text{м}^4) \quad (1)$$

где  $l_2$  – ширина пьезоэлектрического элемента (м);  $l_3$  – толщина пьезоэлектрического элемента (м).

Жесткость пьезоэлектрического элемента акселерометра определяется по следующей формуле:

$$C = l_1 / 3 \cdot E_\nu \cdot i, (\text{Н/м}) \quad (2)$$

где  $l_1$  – длина пьезоэлектрического элемента (м);  $E_\nu$  – модуль Юнга (модуль упругости) ( $\text{Н/м}^2$ );  $i$  – момент инерции пьезоэлектрического элемента ( $\text{м}^4$ ).

Согласно выражение (2) в известном акселерометре пьезоэлектрический элемент имеет относительно высокое значение жесткости [1] и поэтому для снятия сигнала с напряжением 0,5 мВ с электродов чувствительного пьезоэлектрического элемента значение линейной инерционной силы должно быть в 5...6 раз выше значения данной силы, действующей на чувствительный пьезоэлектрический элемент. Поскольку значение линейной инерционной силы находится на низкой чувствительной зоне, то он позволяет измерить относительно меньшие значения данной силы.

Дифференцируя вектора скорости свободного конца пьезоэлектрического элемента по временному вектору можно определить ускорения свободного конца пьезоэлектрического элемента по следующей формуле:

$$\vec{i} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2r}{dt}, \quad (3)$$

где  $\vec{v}$  – скорость свободного конца пьезоэлектрического элемента ( $\text{м/с}$ );  $t$  – время ( $\text{с}$ );  $r$  – траектория движения.

Если учесть траектории движения объекта измерений по одной из координатной оси, то в какой-то момент времени  $t_0$  вектор траектории движения  $\vec{r}(t) = \vec{r}_0$  и зависимость вектора ускорения свободного конца пьезоэлектрического элемента от времени  $\vec{i} = \varphi(t)$ .

Тогда интегрируя формулы (3) на интервале времени от  $t_0$  до  $t$  получим следующие зависимости для определения  $\vec{v}$  – скорости свободного конца пьезоэлектрического элемента и  $\vec{r}(t)$  – вектора траектории движения:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + \int_{t_0}^t (t) dt, \quad (4)$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + (t - t_0) \vec{v}_0 + \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t \vec{i} dt^2. \quad (5)$$

Если вектор времени  $\vec{t}$  не меняется, тогда данное движение объекта измерения считается равноускоренным и преобразуя формулы (4) и (5) получим выражения для определения скорости свободного конца пьезоэлектрического элемента и вектора траектории движения:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_0 + (t - t_0) \cdot \vec{i}, \quad (6)$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r} + (t - t_0) \cdot \vec{v}_0 + \frac{(t - t_0)^2}{2} \cdot \vec{i}. \quad (7)$$

В зависимости от назначения акселерометра математическая основа позволяет определить необходимые узлы при построении схему управления трехкоординатного пьезоэлектрического акселерометра измерения динамических параметров движущихся объектов в автоматическом режиме.

### Математическая модель функционирования

Математическая модель строится по следующей последовательности. Сначала для расчета основных параметров пьезоэлектрического элемента определим амплитуду смещения свободного конца пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин с длиной  $l_1$  при продольных колебаниях первой моды вдоль ее длины по следующей формуле:

$$\Delta_{\text{пз}} = \frac{2T_u \cdot l_1}{\pi \cdot E_{\text{ю}}} = \frac{2E_{\sim} \cdot d_{31} \cdot Q_m \cdot E_{\text{ю}} \cdot l_1}{\pi}, \quad (8)$$

где  $T_u$  – максимально допустимое механическое напряжение ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ).

Максимально допустимое механическое напряжение, возникающее в деформируемом пьезоэлектрическом элементе при движении объекта измерения, определяется по следующему выражению:

$$T_u = E_{\sim} d_{31} \cdot Q_m \cdot E_{\text{ю}}, \quad \text{Н}/\text{м}^2 \quad (9)$$

где  $E_{\sim}$  – напряжение электрического поля, приложенного к обкладкам пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин ( $\text{В}/\text{м}$ );  $d_{31}$  – пьезоэлектрический модуль для пьезокерамики ЦТБС-3 (пьезокерамика из цирконата-титаната бария свинца) ( $\text{м}/\text{В}$ );  $Q_m$  – механическая добротность, определяемая экспериментально из амплитудно-частотной (резонансной) характеристики пьезоэлектрического элемента (рис. 2);  $E_{\text{ю}}$  – модуль Юнга для пьезоэлектрического элемента марки ЦТБС-3 ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ).

Если не учитывать конструктивные потери, то можно получить зависимость для предельно допустимой линейной скорости свободного конца пьезоэлектрического элемента:

$$V_{\text{пп.доп}} = \frac{4F_u \cdot V_{\text{зб}}}{\pi \cdot l_1 \cdot l_2 \cos \alpha \cdot E_{\text{ю}}} = \frac{4F_u}{\pi \cos \alpha \cdot Z_0} = \frac{4F_u V_{\text{зб}}}{\pi \cos \alpha \cdot E_{\text{ю}}}, \quad (\text{м}/\text{с}) \quad (10)$$

где  $Z_0 = l_1 \cdot l_2 \cdot \sqrt{\rho \cdot E_{\text{ю}}}$  – волновое сопротивление;  $\rho$  – плотность материала ЦТБС-3 ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Резонансную частоту пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин, можно определить по следующей формуле:

$$f_p = V_{\text{зб}} / 2 \cdot l, \quad (\text{кГц}) \quad (11)$$

где  $V_{\text{зб}}$  – скорость распространения продольных волн ( $\text{м}/\text{с}$ ).

Скорость рабочего конца нагруженного пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских

пластин, определяется следующим образом:

$$V_{\text{ркн}} = \frac{U_{\text{возд}} \cdot l_2 \cdot d_{31} \cdot E_{\text{ю}}}{R_{\text{мп}} \cdot \cos \alpha}, \quad (\text{м}/\text{с}) \quad (12)$$

где  $\alpha$  – угол наклона пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин, к рабочему органу (рад);  $R_{\text{мп}}$  – сопротивление механических потерь.

Сопротивление механических потерь определяется следующим образом:

$$R_{\text{мп}} = \omega \cdot M / Q_m, \quad (\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}) \quad (13)$$

Средняя линейная скорость перемещения рабочего органа определяется по следующей формуле:

$$V_{\text{ро}} = \Delta_{\text{пз}} \cos \alpha \cdot k, \quad (\text{м}/\text{с}) \quad (14)$$

Учитывая сложный линейный характер величины трения поправочный коэффициент средней линейной скорости перемещения рабочего органа определяется по формуле:

$$k = V_{\text{ро}} / V_{\text{ркн}}, \quad (15)$$

где  $V_{\text{ро}}$  – линейная скорость перемещения рабочего органа ( $\text{м}/\text{с}$ );  $V_{\text{ркн}}$  – скорость рабочего органа конца нагруженного пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин ( $\text{м}/\text{с}$ ).

Учитывая потери, связанные с действием постоянного прижимного усилия пьезоэлектрического элемента на рабочий орган, скорость рабочего органа конца нагруженного пьезоэлектрического элемента определяется следующим образом:

$$V_{\text{рк}} = V_{\text{ркн}} / 2, \quad (\text{м}/\text{с}). \quad (16)$$

Номинальный момент, действующий на пьезоэлектрический элемент определяется по следующей формуле:

$$M_H = F_T \cdot R, \quad (\text{Нм}) \quad (17)$$

где  $F_T$  – максимальное тангенциальное усилие на пьезоэлектрический элемент ( $\text{Н}$ );  $R$  – радиус изгиба пьезоэлектрического двигателя ( $\text{м}$ ).

Максимальное тангенциальное усилие на пьезоэлектрический элемент определяется следующим выражением:

$$F_T = U_{\text{возд}} \cdot l_2 \cdot d_{31} \cdot E_{\text{ю}} \cos \alpha. \quad (\text{Н}) \quad (18)$$

где  $U_{\text{возд}}$  – напряжение источника переменного тока ( $\text{В}$ );  $l_2$  – толщина пьезоэлектрического элемента ( $\text{м}$ );  $d_{31}$  – пьезоэлектрический модуль пьезокерамики ( $\text{м}/\text{В}$ );  $E_{\text{ю}}$  – модуль Юнга (модуль продольной упругости), т.е. физическая величина, характеризующая способность материала сопротивляться растяжению, сжатию при изгибе ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ).

Учитывая уравнение (18) в уравнении (17) получим следующее выражение для пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин, склеенных или сваренных между собой широкими гранями, имеющими секцию возбуждения и секцию чувствительного элемента:

- для пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин:

$$M_1 = U_{\text{возд}} \cdot l_2 \cdot d_{31} \cdot E_{\text{ю}} \cos \alpha \cdot R, \quad (\text{Нм}) \quad (19)$$

- для «П»-образных плоских пружин, с помощью которых пьезоэлектрические элементы демпфированы относительно продольных координатных осей:

$$M_2 = F_{\text{пп}} \cdot R, \quad (\text{Нм}) \quad (20)$$

где  $F_{\text{пп}}$  – прижимное усилие «П»-образных плоских пружин ( $\text{Н}$ ).

Момент, создаваемый тангенциальной силой и силой «П»-образных плоских пружин, действующий на пьезоэлектрический элемент, выполненный в виде двухслойных плоских пластин, определяется следующим образом:

$$M = M_1 + M_2, \text{ (Нм).} \quad (21)$$

Время, необходимое для пуска и установления механических колебаний пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин, определяется следующим образом:

$$t_{\text{пуск}} = 1,47 \cdot \frac{Q_m}{f_p}, \text{ (с).} \quad (22)$$

где  $f_p$  – резонансная частота питающего напряжения (Гц);

$Q_m$  – механическая добротность пьезоэлектрического элемента.

Механическая добротность пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин, определяется из амплитудно-частотной характеристики (рис. 2) по следующей формуле:

$$Q_m = f_p / \Delta f, \quad (23)$$

где  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания;  $f_p$  – частота механического резонанса (Гц).

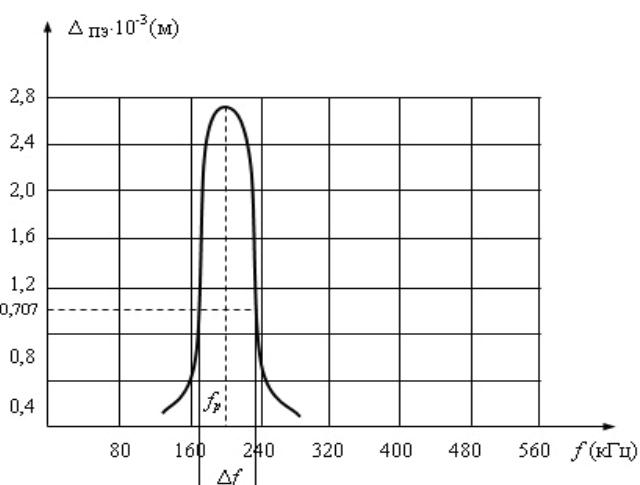


Рис. 2. Амплитудно-частотная (резонансная) характеристика пьезоэлектрического элемента

Быстродействие акселерометра зависит от частоты механического резонанса пьезоэлектрического элемента, выполненного в виде двухслойных плоских пластин, параметров электрической схемы источника питания и определяется по следующей формуле:

$$\tau_i = 1/2 \cdot f_p, \text{ (Гц)} \quad (24)$$

Как следует из выше полученных аналитических зависимостей, по которым были определены основные параметры акселерометра, совпадают с экспериментальными данными и расхождение между ними составляет 1...3%.

### Заключение

Таким образом, разработанный трехкоординатный пьезоэлектрический акселерометр измерения динамических параметров движущихся объектов измерения в автоматическом режиме имеет следующие преимущества по сравнению с известными акселерометрами:

1. В предложенном акселерометре измерения динамических параметров движущегося объекта измерений в автоматическом режиме снабжение датчиком положения объекта измерений с помощью блока распознавания сигналов трех координатных осей «XYZ» прямоугольной системы координат обеспечивает определение направления движения, т.е. координатной оси X, Y или Z с измерением ускорения или линейной скорости при перемещении объекта измерений по данной координатной оси.

2. В предложенном акселерометре соединение вторых выходов дифференциальных операционных усилителей через формирователи импульсов и интеграторы, соединенных к входам вторых цифровых индикаторов обеспечивается измерение скорости перемещения объекта измерений относительно трех осей «XYZ» прямоугольной системы координат.

3. В предложенном акселерометре за счет демпфирования пьезоэлектрических элементов с помощью «П»-образных плоских пружин по трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат при движении объекта измерений по одной из координатных осей, по двум другим осям вырабатываемые сигналы помех по амплитуде значительно уменьшаются путем их погашения, так как направления механических колебаний, создающих амплитуды помех располагаются вдоль осей прямоугольной системы координат пьезоэлектрических элементов.

4. В предложенном акселерометре наличие в конструкции пьезоэлектрического элемента секции возбуждения механических колебаний, а также секции чувствительного элемента, вырабатывающего сигналы при быстроизменяющемся ускорении и скорости движущегося объекта измерений, амплитуда сигнала и чувствительность повышается в 4-5 раз за счет выработки сигнала чувствительными элементами в вибрационном режиме возбуждения, созданного в акселерометре.

Сравнительный анализ показывает, что вышеупомянутые преимущества разработанного акселерометра на прямую влияют на достижение указанного технического результата, т.е. позволяют расширить функциональные возможности, повысить чувствительность и достоверность процесса измерения динамических параметров движущегося объекта измерений относительно осей «XYZ» прямоугольной системы координат в автоматическом режиме при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений.

### Литература

1. Кирпичев А.А. Пьезоэлектрический акселерометр. Патент Российской Федерации №2400760. <http://www.findpatent.ru/patent/240/2400760.html> © FindPatent.ru – патентный поиск, 2012-2015.
2. Янич В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). Ростов-на-Дону: Известия Южного федерального университета, 2010. 304 с.
3. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В.М. Шарапова. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
4. Мансуров Т.М., Алиев Ч.П. Акселерометр для измерения параметров движущихся объектов // Научный журнал «Проблемы инфокоммуникаций» Белорусской Государственной Академии Связи. Минск, 2017, № 2 (6). С. 37-46.
5. Мансуров Т.М., Алиев Ч.П. Трехкоординатный акселерометр для измерения ускорения и скорости объекта измерений в автоматическом режиме // Бюллетень Евразийского Патентного Ведомства (ЕАПВ) Евразийской Патентной Организации (приоритет заявки № 201700327/31). М., 2018. № 9. С. 125. 28.09.2018.

6. Мансуров Т.М., Алиев Ч.П. Акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов в автоматическом режиме // Научный журнал «Вестник Хмельницкого Национального Университета». Харьков, ХНУ. № 5. 2018. С. 78-83.
7. Иории Ю.И. Виброметрия. Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. 771 с.
8. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти томах / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). Под ред. М.Д. Генкина. М.: Машиностроение, 1981. Т. 5. Измерения и испытания. 496 с.
9. Бриндли К. Измерительные преобразователи: Справочное пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с.
10. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение / Пер. с немецкого. М.: Мир, 1989. 196 с.

## THREE-DIMENSIONAL PIEZOELECTRIC ACCELEROMETER FOR MEASURING DYNAMIC PARAMETERS OF MOVING OBJECTS

**Tofiq M. Mansurov**, Professor, Doctor of Technical Sciences, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan  
**Chingiz P. Aliyev**, Director General, Ministry of Defense Industry, Baku, Azerbaijan

### Abstract

Analysis of structural construction of existing three-dimensional accelerometers is carried out, in which due to the opposite direction of sensitivity vectors and direction of measured inertial force, they allow to measure only linear inertia and accelerations varying in relatively small limits. On the other hand, due to the presence of elements in them that create electromagnetic fields, their construction is somewhat complicated. In addition, in known accelerometers, due to the absence of a measurement object position sensor and an electronic control circuit, the functionality of the accelerometer is limited. Due to lack of integrator for acceleration integration, speed measurement is not provided. Due to rigid attachment of piezoelectric sensing elements through their bases, during measurement they generate interference signals, The amplitude of which exceeds the amplitude of the useful signal, which does not ensure reliability of the measured acceleration or speed and due to the presence of sensitive piezoelectric elements, Having higher rigidity and requiring relatively large mechanical forces for generation of signals during motion of acceleration and speed measurement object in automatic mode, which reduces sensitivity of accelerometer. Invention proposes new design and control scheme of three-dimensional piezoelectric accelerometer for measurement of dynamic parameters of moving objects in automatic mode. Wherein providing the position sensor of the moving measurement object with a three-axis signal detection unit to determine a direction of motion with measurement of acceleration or linear velocity when the measurement object moves along the coordinate axis; With the help of differential operational amplifiers through pulse generators and integrators, Speed measurement is provided by damping piezoelectric elements when the measurement object moves along one of the coordinate axes; Across the other two axes, the generated interference signals by amplitude are significantly reduced by their redemption; Having a piezoelectric element in the structure in the form of two-layer flat plates with an excitation section and a sensor section; Which generates signals at fast-changing acceleration and speed of moving object, amplitude of signal and sensitivity increases in 4-5 due to generation of signal by sensitive elements in vibration excitation mode created in accelerometer. Mathematical basis for accelerometer control circuits, mathematical model of its functioning is developed, application of which increases sensitivity of measurement of linear accelerations and speeds of moving objects and expands functional capabilities.

**Keywords:** accelerometer, piezoelectric element, sensitivity vector, inertial force, linear acceleration, velocity, vibration measurement.

### References

1. Brickichev A.A. Piezoelectric accelerometer. Patent of the Russian Federation No. 2400760. <http://www.findpatent.ru/patent/240/2400760.html> © FindPatent .ru - patent search, 2012-2015. (in Russian)
2. Jancic V.V. (2010). Piezoelectric vibration measuring converters (accelerometers). Rostov-on-Don: News of the Southern Federal University. 304 p. (in Russian)
3. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. (2006). Piezoelectric sensors . Ed. V.M. Sharapova. Moscow: Technosphere. 632 p. (in Russian)
4. Mansurov T.M., Aliyev Ch.P. (2018). Three-coordinate accelerometer for measurement of acceleration and speed of measurement object in automatic mode. Bulletin of the Eurasian Patent Office (EAPV) of the Eurasian Patent Organization (priority of application № 201700327/31). Moscow, № 9. P. 125. 28.09.2018. (in Russian)
5. Mansurov T.M., Aliyev Ch.P. (2018). Accelerometer for measurement of accelerations and speeds of moving objects in automatic mode. Scientific journal "Journal of Khmelnytskii National University." Kharkov, CNU, No. 5, pp. 78-83. (in Ukraine)
6. Iorish Yu.I. (1963). Vibrometriya. Second edition. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Machine-Building Literature. 771 p. (in Russian)
7. Genkin M.D., Sokolova A.G. (1981). Vibrations in Engineering: Handbook. In 6 volumes. Red. Council: V. N. Chelomey (before). Moscow: Mechanical engineering. Vol. 5. Measurements and tests. Ed. M. D. Genkin. 496 p. (in Russian)
8. Brindley K. (1991). Transmitters: Reference: Per. Moscow: Energoatomizdat. 144 p. (in Russian)
9. Vigleb G. Sensors. (1989). Device and application. Moscow: World. 196 p. (in Russian)

### Information about authors:

**Tofiq M. Mansurov**, Professor of department "Telecommunications and Information Security", Doctor of Technical Sciences, Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan  
**Chingiz P. Aliyev**, Director General of Production Association "UFUG", Ministry of Defense Industry, Baku, Azerbaijan