

АКСЕЛЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЙ И СКОРОСТЕЙ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В работе показано, что из-за противоположности направления векторов чувствительности и направления измеряемой инерционной силы известные акселерометры позволяют измерить только линейные инерции и ускорения, изменяющиеся в относительно малых пределах, но не позволяют измерить скорости движущихся объектов. С другой стороны из-за наличия элементов, создающих электромагнитные поля, их конструкции в определенной мере усложняются. Для достижения поставленной цели разработан акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов, в котором наличие пьезоэлектрического элемента с секцией возбуждения механических колебаний и с секцией чувствительного элемента, вырабатывающего сигналы при быстроизменяющемся ускорении и скорости движущегося объекта измерений в автоматическом режиме позволяет повысить амплитуды сигнала и чувствительность в 4-5 раз за счет снятия сигнала с чувствительных элементов в вибрационном режиме акселерометра, создаваемого возбуждения. Кроме того, поставленная цель достигается за счет совпадения направления оси чувствительности пьезоэлектрического биморфного элемента с направлением инерционной силы измеряемого линейного движения.

Ключевые слова: акселерометр, вибрация, ускорение, скорость, пьезоэлемент, движущийся объект, виброметрия, виброконтроль, виброскорость, виброперемещение, масштабный коэффициент.

T.M. MANSUROV, CH.P. ALIYEV
Azerbaijan Technical University, Baku

THE ACCELEROMETER FOR MEASUREMENT OF ACCELERATIONS AND SPEEDS OF MOVING OBJECTS IN THE AUTOMATIC MODE

In work it is shown that because of contrast of the direction of vectors of sensitivity and the direction of the measured inertial force the known accelerometers allow to measure only linear inertia and the accelerations changing in rather small limits, but doesn't allow to measure speeds of moving objects. On the other hand because of existence of the elements creating electromagnetic fields, their design in a certain measure becomes complicated. For achievement of a goal the accelerometer is developed for measurement of accelerations and speeds of moving objects in the automatic mode. In the offered accelerometer supply with the sensor of provision of a subject to measurements by means of the block of recognition of signals of three axes of "XYZ" of rectangular system of coordinates provides definition of an axis X, Y or Z with measurement of acceleration or linear speed when moving a subject to measurements. Connection of the second exits of differential operational amplifiers via shapers of the impulses and integrators connected to entrances of the second digital indicators is provided measurement of speed of movement of a subject to measurements concerning three axes of "XYZ" of rectangular system of coordinates. Due to damping of piezoelectric elements with help "П" - figurative flat springs on all three axes of "XYZ" of rectangular system of coordinates at the movement of a subject to measurements on one of coordinate axes, on two other axes the developed signals of hindrances on amplitude considerably decrease by their repayment since the directions of the mechanical oscillations creating amplitudes of hindrances settle down along axes of rectangular system of coordinates of piezoelectric elements. Existence in a design of a piezoelectric element of section of initiation of mechanical oscillations and also sections of the sensitive element developing signals at the fast-changing acceleration and speed of a moving object, amplitude of a signal and sensitivity increases by 4-5 times at the movement of a subject to measurements of acceleration and speed in the automatic mode due to development of a signal sensitive elements in the vibration mode of the excitement created in the accelerometer.

Keywords: accelerometer, vibration, acceleration, speed, piezoelement, moving object, vibrometry, vibration control, vibrospeed, vibromovement, large-scale coefficient.

Введение. Актуальность исследований колебательных процессов связана с разработкой, испытанием и эксплуатацией различных технических и технологических устройств и эти исследования проводится с помощью виброметрии. Но наряду с этим, в последние годы широкое применение получили информационно-измерительной системы виброконтроля, мониторинга, диагностики и автоматического управления сложными техническими системами и технологическими процессами, дающими не только большой технико-экономический эффект, но и способствующие предотвращению возникновения редких событий.

Первичным звеном таких систем являются датчики параметров вибрационных и ударных колебаний, расположенные непосредственно на контролируемом объекте и осуществляющие преобразование измеряемой механической величины в электрический сигнал, поступающий на регистрирующее устройство. Из всех известных типов датчиков, наиболее широкое применение находят пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи или акселерометры, которые относятся к датчикам генераторного типа и непосредственно преобразуют вибрационное или ударное ускорение в пропорциональный электрический сигнал.

Акселерометр представляет собой закрепленную в упругом подвесе чувствительную массу и отклонение массы от ее первоначального положения при наличии кажущегося ускорения несет информацию о величине этого ускорения. Акселерометры считаются устройствами с одной степенью свободы и в его состав входят специальный элемент, называемый инерционной массой, движение которого отстает от движения корпуса, упругая поддерживающая система (пружина) и демпфирующее устройство. Независимо от конструкции датчика ускорений его основная цель заключается в детектировании перемещения этой

массы относительно корпуса устройства и преобразовании его в пропорциональный электрический сигнал. Поэтому другой составной частью всех акселерометров является детектор перемещений, способный измерять микроскопические амплитуды вибрационных колебаний или линейных ускорений. Выходной сигнал акселерометра, пропорциональный значению ускорения механических колебаний, может быть преобразован в электрический сигнал, пропорциональный виброскорости или виброперемещению [1–6].

Объектом исследований является акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов в автоматическом режиме.

Предметом исследований является исследование основных принципов и закономерностей повышения чувствительности и расширения функциональной возможности акселерометра.

Целью работы является повышение чувствительности и достоверности и расширение функциональных возможностей пьезоэлектрического акселерометра измерения ускорения и скорости при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат в автоматическом режиме. Поставленная цель достигается за счет совпадения направления оси чувствительности пьезоэлектрического биморфного элемента с направлением инерционной силы измеряемого линейного движения.

Постановка задачи. Для измерения линейных ускорений и скоростей движущихся объектов обычно применяются пьезоэлектрические акселерометры, что и связано с их преимуществом, т.е. широким рабочим диапазоном частот, линейностью амплитудной характеристики в широком динамическом диапазоне, высокой стойкостью к внешним воздействиям, активным характером преобразования, не требующим применения источника питания, отсутствием движущихся частей, гарантирующие высокую надежность и долговечность, возможностью реализации малогабаритного исполнения и технологичностью в производстве.

В известных акселерометрах из-за противоположности направления векторов чувствительности и направления измеряемой инерционной силы они позволяют измерить только линейные инерции и ускорений, изменяющихся относительно малых пределах, но не позволяют измерить скорости движущегося объекта измерений. С другой стороны из-за наличия элементов, создающих электромагнитные поля, их конструкции в определенной мере усложняется. В связи с этим возникает необходимость разработки пьезоэлектрического акселерометра, в котором вектор поляризации пьезоэлемента направлен вдоль оси чувствительности акселерометра, т.е. с направлением вектора линейного ускорения движущегося объекта измерений.

Разработка акселерометра. В настоящее время известны вибрационные устройства измерения ускорений для измерения линейных ускорений и скоростей и определения внешних влияний при отклонении из позиций движущихся объектов. Но в таких устройствах из-за наличия элементов, создающих электромагнитные поля, их конструкция в определенной мере усложняется [7–12].

Известен «Пьезоэлектрический акселерометр» для измерения ускорения и скорости объекта измерений [7], который содержит пьезоэлектрические чувствительные элементы, расположенные вдоль осей «XYZ» прямоугольной системы координат и инерционные массы, механически связанные с пьезоэлектрическими чувствительными элементами. В известном акселерометре осуществление автоматического режима измерений ускорения при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по координатным осям «XYZ» прямоугольной системы, отслеживание направления, ввиду наличия поперечных колебаний, не совпадающих с осью чувствительности представляет определенные трудности. Кроме того, для измерения скорости движения объекта измерений отсутствует возможность интегрирования сигнала ускорения, что в определенной мере ограничивает функциональные возможности акселерометра.

При движении объекта измерений вдоль одной из осей прямоугольной системы координат, из-за того, что чувствительные элементы, выполненные в виде пустотелых цилиндров, соединенных между собой жестко на основании, по причине отсутствия демпфера, гасящего поперечные механические колебания по этим осям, они создают сигналы помех напряжения, которые значительно затрудняют выделение полезного сигнала и получение необходимой достоверности измерения ускорения и скорости по данной оси объекта измерений.

Предложенный трехкоординатный акселерометр для измерения ускорений и скоростей движущихся объектов измерения в автоматическом режиме (рис. 1) [13] содержит пьезоэлектрические элементы, выполненные в виде двухслойных плоских пластин, склеенных или сваренных 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 соединен 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, блока распознавания -2 сигналов координат (рис. 4) с возможностью поцикловой 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. Все элементы акселерометра расположены в предохранительных кожухах -56,57,58.

На рис. 1 представлена схема предложенного «Трехкоординатного акселерометра для измерения ускорения и скорости объекта измерений в автоматическом режиме» с устройством управления, на рис. 2, 3 - схема операционных дифференциальных усилителей с подключенными секциями возбуждения и секциями чувствительных элементов, а на рис. 4 приведена схема распознавания сигналов координат по их амплитуде и частоте [13].

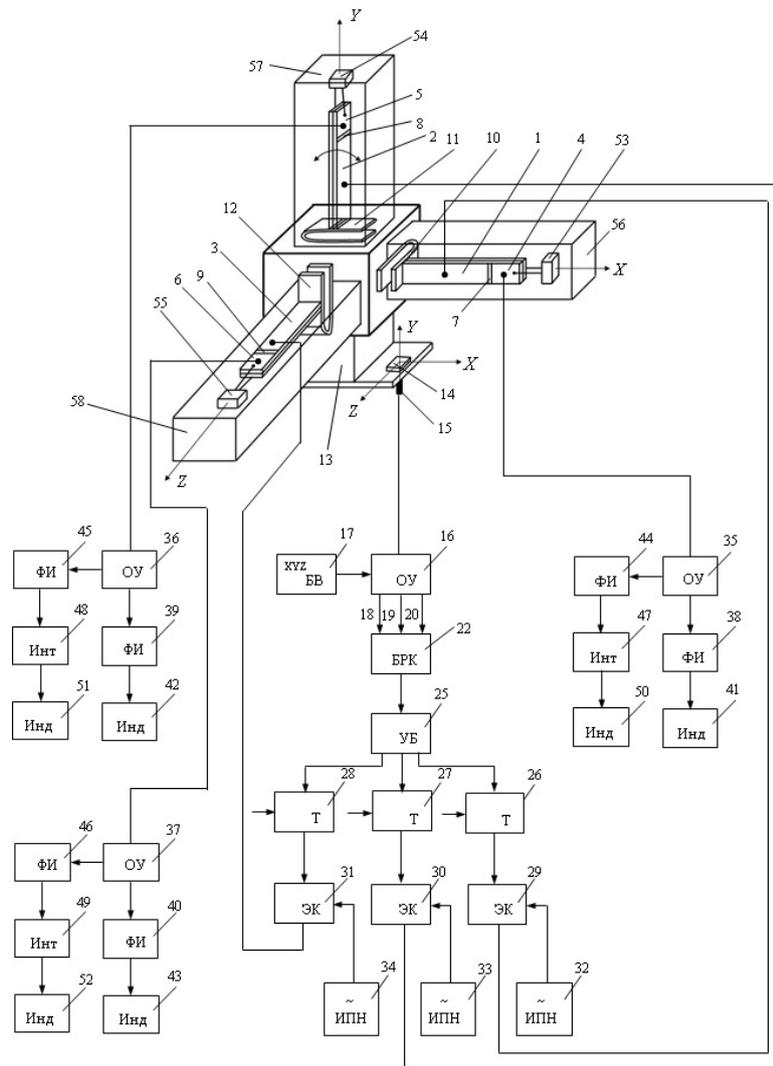


Рис. 1. Схема акселерометра с устройством управления

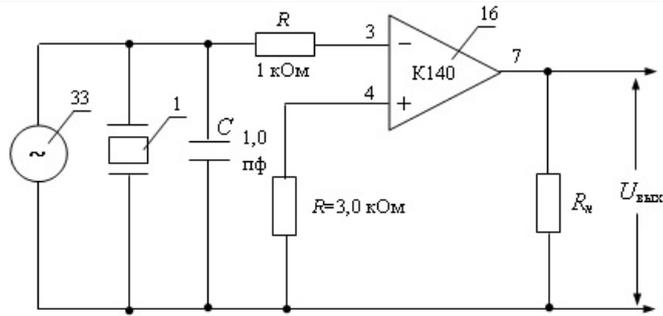


Рис. 2.

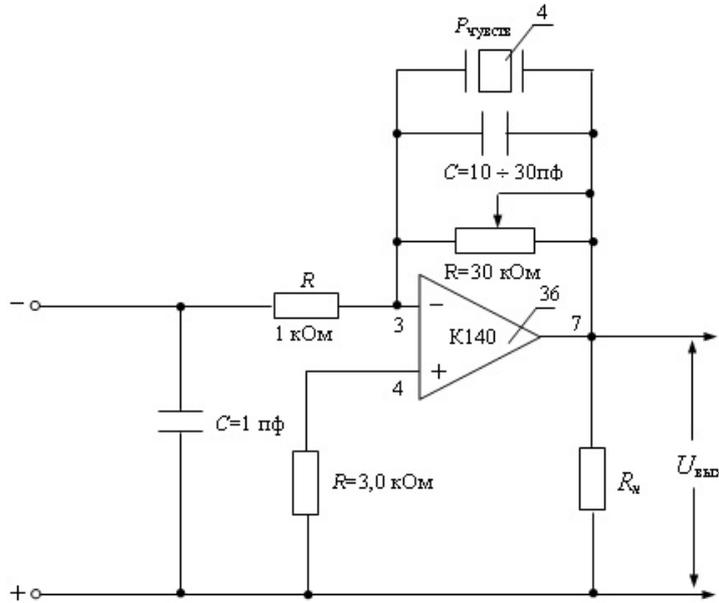


Рис. 3. Схема операционных дифференциальных усилителей с секциями возбуждения и чувствительных элементов

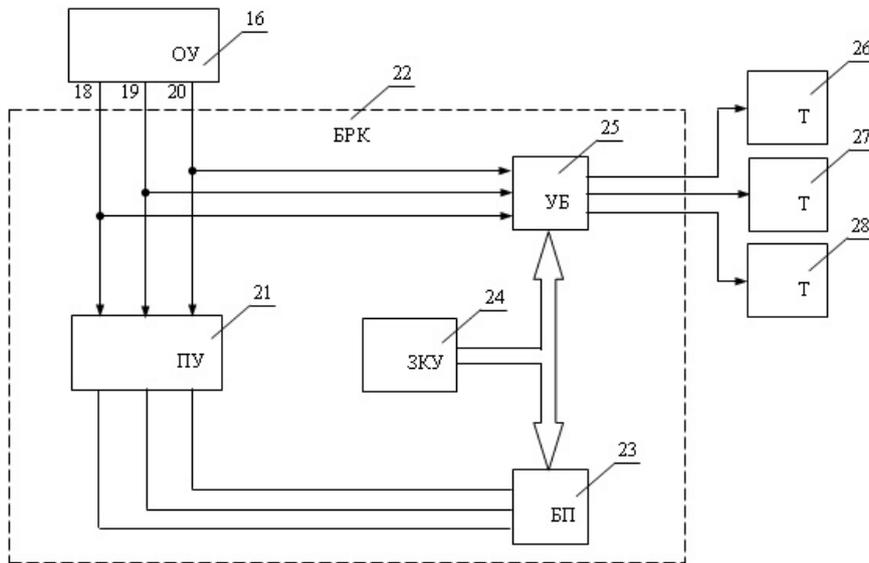


Рис. 4. Схема распознавания сигналов координат по их амплитуде и частоте

Принцип работы акселерометра

В начале в зависимости от требуемого направления движения объекта измерений -13 в блоке выборки -17 устанавливается первоначальное положение на одной из осей «XYZ» прямоугольной системы координат. При движении объекта измерений -13 в направлении вдоль оси «X» сперва трехкоординатный датчик положения -14 воспринимает движение объекта измерений -13 и сигналы с его выхода поступают на вход дифференциального операционного усилителя -16. Усиленные сигналы, проходя через пороговое устройство -21 (рис. 4), поступают в блок распознавания координат -22 (рис. 1, 4), которые подаются в блок памяти -23. Сигналы с выхода задатчика кода управления -24 (рис. 4) поступают на вход блока памяти -23 и управляемый блок -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 (рис. 1), направление которых совпадает с направлением вектора оси чувствительности секции - чувствительного элемента -5 (рис. 1) [13].

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 корпус объекта измерений -13, что создает воздействие инерционных сил на чувствительный элемент -5 (рис. 1), приводя его к изгибным деформациям, вырабатывающим сигналы, пропорционально изменяющемуся ускорению. Указанные сигналы поступают на дифференциальный усилитель -36 (рис. 3).

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 ускорения и скорости прямолинейного 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, 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. Все элементы акселерометра расположены в предохранительных кожухах -56,57,58.

Выводы

Таким образом, разработанный акселерометр отличается следующими важными новыми особенностями.

В известном акселерометре осуществление автоматического режима измерений ускорения и скорости при быстроизменяющемся направлении движения объекта измерений по трем осям «XYZ» прямоугольной системы координат, отсутствие датчика положения объекта измерений и схемы управления в его конструкции не предусмотрены, что ограничивает функциональные возможности акселерометра. В предложенном акселерометре снабжение датчиком положения объекта измерений с помощью блока распознавания сигналов трех осей «XYZ» прямоугольной системы координат обеспечивает определение оси X, Y или Z с измерением ускорения или линейной скорости при перемещении объекта измерений.

Измерение скорости перемещения объекта измерений в известном акселерометре из-за отсутствия интегратора для интегрирования ускорения измерение скорости перемещения не обеспечивается. 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.

В известном акселерометре при движении объекта измерений в направлении вдоль одной из осей «XYZ» прямоугольной системы координат по другим осям из-за жесткого крепления пьезоэлектрических чувствительных элементов через их основания, они создают сигналы помех, амплитуда которых превышает амплитуду полезного сигнала, что не обеспечивает достоверность измеряемого ускорения или скорости объекта измерений. В предложенном акселерометре за счет демпфирования пьезоэлектрических элементов с помощью «П» - образных плоских пружин по всем 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, т.к. направления механических колебаний, создающих амплитуды помех располагаются вдоль осей прямоугольной системы координат пьезоэлектрических элементов.

Чувствительность в известном акселерометре сравнительно невысокая, т.к. состоит из 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. 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, амплитуда сигнала и чувствительность повышается в 4-5 раз при движении объекта измерений ускорения и скорости в автоматическом режиме за счет выработки сигнала чувствительными элементами в вибрационном режиме возбуждения, создаваемого в акселерометре.

Литература

1. Иориш Ю.И. Виброметрия. Издание второе, переработанное и дополненное / Иориш Ю.И. – М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 771 с.
2. Генкин М.Д. Вибрации в технике : справочник : в 6-и т. Т. 5. Измерения и испытания / Генкин М.Д., Соколова А.Г. ; ред. совет: В.Н. Челомей. – М. : Машиностроение, 1981. – 496 с.
3. Фридлиндер Г.О. Пилотажные манометрические приборы, компасы и автоштурманы / Фридлиндер Г.О., Селезнев В.П. – М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1953. – 368 с.
4. Клюев В.В. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара : справочник : в 2 кн. Книга 1 / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1978. – 448 с.
5. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение / Виглеб Г. ; пер. с немецкого. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
6. Шарапов В.М. Пьезоэлектрические датчики / Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. ; под ред. В.М. Шарапова. – М. : Техносфера, 2006. – 632 с.
7. Патент РФ №2400760. Пьезоэлектрический акселерометр / Кирпичев А.А. – М., 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.findpatent.ru/patent/2400760.html>.
8. Брюль Пьезоэлектрические акселерометры и преусилители. Справочник по теории и эксплуатации / Брюль и Кьер. – Нэрум : Дания, издание фирмы Брюль и Кьер, 1978. – 111 с.
9. Янчич В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры) / Янчич В.В. – Ростов-на-Дону : Известия Южного федерального университета, 2010. – 304 с.
10. Пельх А.Н. Некоторые особенности пьезокерамики акселерометров при больших однократных ударах / А.Н. Пельх, П.Г. Соколов // Электроника. Приборостроение. БТИ. – 1977. – № 4. – С. 8–15.
11. Семенов Н.А. Потери при вводе энергии в оптический кабель / Н.А. Семенов // Электросвязь : ежемесячный научно-технический журнал по проводной и радиосвязи, телевидению и радиовещанию. – М., 1980. – № 12. – С. 24–26.
12. АС СССР №1021309. Пьезоэлектрический шаговый двигатель / Юсифзаде Э.М. и др. – М., 1981.
13. Трехкоординатный акселерометр для измерения ускорения и скорости объекта измерений в автоматическом режиме / Мансуров Т.М., Алиев Ч.П. / Евразийская патентная организация (ЕАПО), Москва. – Заявка № 201700327/26 от 04.07.2017.

References

1. Iorish YU.I. Vibrometriya. Izdanie vtoroe, pererabotannoe i dopolnennoe / Iorish YU.I. – M. : Gosudar-stvennoe nauchno-tehnicheskoe izdatelstvo mashinostroitel'noy literatury, 1963. – 771 s.
2. Genkin M.D. Vibratsii v tehnikе : spravochnik : v 6-i t. T. 5. Izmereniya i ispytaniya / Genkin M.D., Soko-lova A.G. ; red. совет: V.N. Chelomey. – M. : Mashinostroenie, 1981. – 496 s.
3. Fridlender G.O. Pilotajnyie manometricheskie pribory, kompasy i avtoshturmany / Fridlender G.O., Seleznev V.P. – M. : Gosudarstvennoe izdatel'stvo obronnoy promyshlennosti, 1953. – 368 s.
4. Klyuev V.V. Pribory i sistemy dlya izmereniya vibratsii, shuma i udara : spravochnik : v 2 kn. Kniga 1 / pod red. V. V. Klyueva. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 448 s.
5. Vigneb G. Datchiki. Ustroystvo i primeneniye / Vigneb G. ; per. s nemetskogo. – M. : Mir, 1989. – 196 s.
6. SHarapov V.M. Pezoelektricheskie datchiki / SHarapov V.M., Musienko M.P., SHarapova E.V. ; pod red. V.M. SHarapova. – M. : Tehnosfera, 2006. – 632 s.
7. Patent RF №2400760. Pezoelektricheskiy akcelerometr / Kirpichev A.A. – M., 2010 [Elektronnyiy re-surs]. – Rejim dostupu : <http://www.findpatent.ru/patent/2400760.html>.
8. Bryul Pezoelektricheskie akcelerometri i predusiliteli. Spravochnik po teorii i ekspluatatsii / Bryul i Kyer. – Nerum : Daniya, izdanie firmy Bryul i Kyer, 1978. – 111 s.
9. YAnchich V.V. Pezoelektricheskie vibroizmeritelnyie preobrazovateli (akcelerometri) / YAnchich V.V. – Rostov-na-Donu : Izvestiya YUjnogo federal'nogo universiteta, 2010. – 304 s.
10. Pelyih A.N. Nekotoryie osobennosti pezokeramiki akcelerometrov pri bolshih odnokratnyih udarah / A.N. Pelyih, P.G. Sokolov // Elektronika. Priborostroeniye. BTI. – 1977. – № 4. – S. 8–15.
11. Semenov N.A. Poteri pri vvode energii v opticheskiy kabel / N.A. Semenov // Elektrosvyaz : ezhemesyachnyiy nauchno-tehnicheskiiy jurnal po provodnoy i radiosvyazi, televideniyu i radioveschaniyu. – M., 1980. – № 12. – S. 24–26.
12. AS SSSR №1021309. Pezoelektricheskiy shagovyyi dvigatel / YUsifzade E.M. i dr. – M., 1981.
13. Trehkoordinatnyiy akcelerometr dlya izmereniya uskoreniya i skorosti obyekta izmereniy v avtomatichesk-om rejime / Mansurov T.M., Aliev CH.P. / Evraziyskaya patentnaya organizatsiya (EAPO), Moskva. – Zayavka № 201700327/26 ot 04.07.2017.

Рецензія/Peer review : 19.9.2018 р.

Надрукована/Printed : 18.9.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Мусаев В.Г.