

УДК 681.5:51

DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-28-36

О классификации и подборе МЭМС-акселерометров

А. А. Папко, доктор технических наук, профессор,

АО «Научно-исследовательский институт физических измерений», Пенза, Россия

Б. В. Чувькин, доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

Т. А. Редькина, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье рассматриваются различные области применения акселерометрических датчиков и показано, что наиболее широко акселерометры используются при разработке и создании геонавигационных систем, функционирующих на борту подвижных объектов – летательных аппаратов, включая беспилотные (БПЛА), космической техники, надводных и подводных морских судов, наземного транспорта. В отдельную область выделено применение акселерометров в так называемых системах подземной геонавигации, к которым относятся инклинометрические системы, используемые при выполнении геофизических исследований скважин, и забойные телесистемы, функционирующие непосредственно в процессе выполнения буровых работ.

Рассматриваются известные варианты классификации акселерометров по ряду существенных признаков. Показано, что в последние годы находят все большее применение МЭМС-акселерометры, выполненные по технологиям производства интегральных микросхем, включающих размещение на одной подложке как полупроводниковых элементов, так и самих датчиков в виде конструкций микроэлектромеханических систем.

Предлагается в качестве дополнения к известным решениям выполнять поэтапную классификацию, на основе которой будет осуществляться подбор того или иного МЭМС-акселерометра, технические и эксплуатационные характеристики которого будут удовлетворять предъявляемым требованиям.

Предлагается классификация МЭМС-акселерометров по первично запрашиваемым параметрам: количество осей чувствительности акселерометров в одном корпусе, диапазоны измерений, тип выхода (аналоговый, цифровой и ШИМ), температурный диапазон; несоосность.

Приводится классификация МЭМС-акселерометров по вторично запрашиваемым параметрам: напряжение питания, потребляемый ток, корпус, чувствительность, полоса пропускания, максимальная допустимая перегрузка.

Рассматривается вариант автоматизированного подбора МЭМС-акселерометров, основанный на объектно-ориентированном программном обеспечении, включающем в себя соответствующие базы данных и имеющем открытую архитектуру с возможностью дополнения актуализированной информацией.

Ключевые слова: акселерометр, параметры, классификация, признаки.

Введение

Под акселерометрами понимают измерительные преобразователи, предназначенные для измерений линейных или угловых ускорений. Акселерометры используются в различных областях науки и техники. Наиболее широкое применение акселерометры нашли в информационно-измерительных системах при контроле углов пространственной ориентации подвижных или стационарных объектов. К таким системам в первую очередь относятся геонавигационные системы, функционирующие на борту подвижных объектов – летательных аппаратов, включая беспилотные (БПЛА), космической техники, надводных и подводных морских судов, наземного транспорта [1]. Отдельной областью применения акселерометров являются так называемые системы подземной геонавигации, к которым относятся инклинометрические системы, используемые при выполнении геофизических исследований скважин, и забойные теле-

системы, функционирующие непосредственно в процессе выполнения буровых работ [2–5]. Акселерометры как датчики ускорений обеспечивают получение измерительной информации при статическом входном воздействии и при динамических возмущениях, которые могут расцениваться как дестабилизирующие воздействия и восприниматься в виде входной измеряемой физической величины. В работе [6] рассмотрены вопросы применения акселерометров в кренодифференциаторах. Акселерометры могут быть использованы при определении угла крена быстровращающегося летательного аппарата [7], в аэрогравиметрии [8], для вибромониторинга механообрабатывающих центров [9], в контроле параметров наклона различных строительных конструкций и сооружений и иных объектов [10, 11], в системах контроля параметров вибрационных и ударных перегрузок [12], а также в системах обеспечения безопасности функционирования различных уст-

роисств, например бытовой техники, автотранспорта и др. Акселерометры, как и любое другое средство измерений физических величин, обладают рядом технических и эксплуатационных характеристик, которые оказывают непосредственное влияние на их конкурентоспособность. Разработкой и созданием акселерометров занимаются как отечественные организации, так и зарубежные фирмы.

При разработке как акселерометрических датчиков, так и устройств на их основе, специалистами большое внимание уделяется калибровке [13–16], обеспечению высокой разрешающей способности и стабильности метрологических характеристик, термоустойчивости и механической прочности др.

В последние годы находят все большее применение акселерометры, выполненные по технологиям производства интегральных микросхем, включающих размещение на одной подложке как полупроводниковых элементов, так и самих датчиков в виде конструкций микроэлектромеханических систем. Такие устройства принято именовать МЭМС-акселерометры. Известны такие ведущие зарубежные фирмы-производители МЭМС-акселерометров, как Analog Devices, Freescale Semiconductor, STMicroelectronics, Kionix и др. Существуют многочисленные публикации в области МЭМС-акселерометров [9, 10, 12, 14, 15].

Практически все фирмы предлагают довольно широкую линейку МЭМС-акселерометров. При проектировании различных информационно-измерительных систем на основе акселерометров разработчики и специалисты, особенно начинающие или ранее не имеющие достаточного опыта в предметной области, могут сталкиваться с определенными трудностями в подборе конкретных изделий МЭМС-акселерометров, исходя из поставленной задачи и предъявляемых требований.

На этом этапе проработки может быть также затрачено довольно большое время при выполнении обзора и сопоставительного анализа технических характеристик МЭМС-акселерометров.

Целью данной работы является формирование систематизированного подхода в выборе как фирмы производителя, так и основных технических характеристик современных МЭМС-акселерометров, основанного на предлагаемом варианте классификации, который позволит разработчикам подобного рода аппаратуры более оперативно осуществлять обзор и анализ в предметной области.

Классификация акселерометров

Классификация (образовано от латинского *classis* – разряд, класс; *facio* – делаю, раскладываю) в общем понимании – это общенаучный метод систематизации знания, направленный на организацию некоторой совокупности изучаемых объектов различных областей действительности, знания и деятельности, в систему соподчиненных групп (классов), по которым эти объекты распределены на основании их сходства в определенных сущностных свойствах.

Важная задача классификации состоит в проведении эффективного поиска информации или каких-либо объектов, содержащихся в специальных информационных хранилищах, и представлении в надежном и удобном для пользователя виде всей изучаемой области и максимально полной информации о ее объектах.

Классификация средств измерений регламентирована в национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ Р 8.1030–2024 «Государственная система обеспечения единства измерений. Классификация средств измерений»; введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 января 2024 г. № 136-ст. 2025-01-01. Классификация может быть представлена в различной интерпретации – в табличном виде, в текстовом формате, в виде графического изображения иерархической разветвленной структуры и др.

Классификации акселерометров посвящено довольно большое количество публикаций. На ранних этапах разработки акселерометров известна работа А. М. Малышенко, в которой приведен пример основополагающей классификации акселерометров по ряду существенных признаков:

- по назначению;
- по измеряемому значению контролируемого ускорения;
- по числу измеряемых компонент;
- по характеру изменения во времени выходной величины;
- по характеру зависимости выходной величины от измеряемого ускорения;
- по структурной схеме;
- по типу инерционной массы, характеру перемещения и способу подвеса;
- по природе уравнивающих сил;
- по типу датчика смещения инерционной массы;
- по физической природе выходной величины.

Следует отметить, что приведенные существенные признаки характерны соответствующей

эпохе становления и развития акселерометрических устройств.

С появлением МЭМС-акселерометров признаки в классификации значительно расширяются. При этом рекомендовалось учитывать:

- диапазон измерений, измеряемый в единицах ускорения свободного падения g ;
- порог чувствительности;
- полоса пропускания;
- случайные вариации смещения;
- диапазон рабочих температур;
- ударостойкость;
- тип корпуса, способ установки и др.

На современном уровне развития акселерометрической аппаратуры объектно-ориентированного программного обеспечения, технологий производства датчиков и функциональных электронных блоков, перечень существенных признаков и классификация акселерометров могут быть расширены.

При создании информационно-измерительных систем разработчикам приходится выполнять поиск и сопоставительный анализ технических и эксплуатационных характеристик акселерометров как в традиционно классическом исполнении, так и устройств, в которых реализованы МЭМС-технологии. Это, как правило, занимает много времени и представляется довольно трудоемким процессом.

В данной работе авторами предлагается в качестве дополнения к известным решениям выполнять поэтапную классификацию, на основе которой будет осуществляться подбор того или иного МЭМС-акселерометра, технические и эксплуатационные характеристики которого будут удовлетворять предъявляемым требованиям в соответствии с техническим заданием на разработку.

Классификация МЭМС-акселерометров по первично запрашиваемым параметрам

На первоначальном этапе классификации МЭМС-акселерометров предполагается принять во внимание следующие существенные признаки.

Количество осей чувствительности акселерометров в одном корпусе. По этому признаку различают одно-, двух-, трехкомпонентные акселерометры.

На рис. 1 схематично показаны расположения осей чувствительности одно-, двух-, трехкомпонентных акселерометров (X , XY , XYZ).

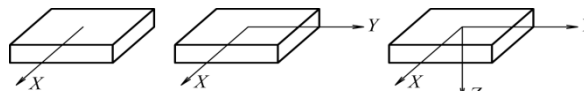


Рис. 1. Расположение осей чувствительности МЭМС-акселерометров

Fig. 1. Location of the sensitivity axes of the MEMS accelerometers

Последующие признаки предлагаются к рассмотрению на примере МЭМС-акселерометров фирмы Analog Devices. Внешний вид таких акселерометров различного конструктивного исполнения представлен на рис. 2.

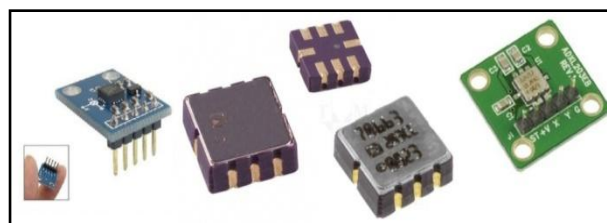


Рис. 2. Внешний вид МЭМС-акселерометров фирмы Analog Devices

Fig. 2. The appearance of MEMS - accelerometers from Analog Devices

В таблице приведены данные линейки акселерометров, которые классифицируются по первично запрашиваемым параметрам.

МЭМС-акселерометры Analog Devices

MEMS-accelerometers of Analog Devices

| Название | Оси чувствительности | Диапазон измерения | Тип выхода | Напряжение питания, В | Потребляемый ток, мА | Корпус | Темп, диапазон, °C | Несоосность, град |
|----------------|----------------------|---|------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------|
| <u>ADXL001</u> | X | $\pm 70g$; $\pm 250g$; $\pm 500g$ | Аналоговый | 3,1÷6 | 5 | 5x5x2 мм, 8-выводной LCC | -40...+125 | — |
| <u>ADXL103</u> | X | $\pm 1,7g$ | Аналоговый | 3÷6 | 0,7 | 5x5x2 мм, 8-выводной LCC | -4...+125 | — |

Продолжение таблицы

| Название | Оси чувствительности | Диапазон измерения | Тип выхода | Напряжение питания, В | Потребляемый ток, мА | Корпус | Темп, диапазон, °С | Несоосность, град |
|----------------|----------------------|---|---------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| <u>ADXL180</u> | X | $\pm 50\text{g} \div \pm 500\text{g}$ | Цифровой | $5 \div 14,5$ | 7,7 | 5x5x1,5 мм, 16-выводной LFCSP_LQ | -40...+125 | – |
| <u>ADXL193</u> | X | $\pm 250\text{g}$ | Аналоговый | $4,8 \div 5,2$ | 1,5 | 5x5x2 мм, 8-выводной LCC | -40...+125 | – |
| <u>ADXL203</u> | XY | $\pm 1,7\text{g}$ | Аналоговый | $3 \div 6$ | 0,7 | 5x5x2 мм, 8-выводной LCC | -40...+125 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL206</u> | XY | $\pm 5\text{g}$ | Аналоговый | $4,8 \div 5,2$ | 0,7 | 13x8x2 мм, 8-выводной SBDIP | -40...+175 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL212</u> | XY | $\pm 2\text{g}$ | ШИМ | $3 \div 5,25$ | 0,7 | 5x5x2 мм, 8-выводной LCC | -40...+85 | $\pm 0,01$ |
| <u>ADXL213</u> | XY | $\pm 1,2\text{g}$ | ШИМ | $3 \div 6$ | 0,7 | 5x5x2 мм, 8-выводной LCC | -40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL278</u> | XY | $\pm 70\text{g}$ | Аналоговый | $4,8 \div 5,2$ | 2,2 | 5x5x2 мм, 8-выводной LCC | -40–105 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL312</u> | XYZ | $\pm 1,5\text{g}; \pm 3\text{g}; \pm 6\text{g}; \pm 12\text{g}$ | Цифровой, SPI, I ² C | $2,0 \div 3,6$ | 0,17 | 5x5x1,45 мм, 32-выводной LFCSP | -40–105 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL313</u> | XYZ | $\pm 0,5\text{g}; \pm 1\text{g}; \pm 2\text{g}; \pm 4\text{g}$ | Цифровой, SPI, I ² C | $2,0 \div 3,6$ | 0,17 | 5x5x1,45 мм, 32-выводной LFCSP | -40–105 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL325</u> | XYZ | $\pm 5\text{g}$ | Аналоговый | $1,8 \div 3,6$ | 0,35 | 4x4x1,45 мм, 16-выводной LFCSP | -40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL326</u> | XYZ | $\pm 16\text{g}$ | Аналоговый | $1,8 \div 3,6$ | 0,35 | 4x4x1,45 мм, 16-выводной LFCSP | -40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL327</u> | XYZ | $\pm 2\text{g}$ | Аналоговый | $1,8 \div 3,6$ | 0,35 | 4x4x1,45 мм, 16-выводной LFCSP | -40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL335</u> | XYZ | $\pm 3\text{g}$ | Аналоговый | $1,8 \div 3,6$ | 0,35 | 4x4x1,45 мм, 16-выводной LFCSP | -40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL337</u> | XYZ | $\pm 3\text{g}$ | Аналоговый | $1,8 \div 3,6$ | 0,3 | 3x3x1,45 мм, 16-выводной LFCSP | -40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL343</u> | XYZ | $\pm 2; \pm 4; \pm 8; \pm 16\text{g}$ | Цифровой, SPI, I ² C | $2,0 \div 3,6$ | 0,14 | 3x5x1 мм, 14-выводной LGA | -40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL344</u> | XYZ | $\pm 2; \pm 4; \pm 8; \pm 16\text{g}$ | Цифровой, SPI, I ² C | $1,7 \div 2,8$ | 0,14 | 3x3x0,95 мм, 16-выводной LGA | -40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL345</u> | XYZ | $\pm 2; \pm 4; \pm 8; \pm 16\text{g}$ | Цифровой, SPI, I ² C | $2,0 \div 3,6$ | 0,145 | 3x5x1 мм, 14-выводной LGA | -40...+85 | $\pm 0,1$ |

Окончание таблицы

| Название | Оси чувствительности | Диапазон измерения | Тип выхода | Напряжение питания, В | Потребляемый ток, мА | Корпус | Темп, диапазон, °С | Несоосность, град |
|----------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------|
| <u>ADXL346</u> | XYZ | $\pm 2; \pm 4; \pm 8; \pm 16g$ | Цифровой, SPI, I ² C | 1,7÷2,8 | 0,145 | 3×3×0,95 мм, 16-выводной LGA | –40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL350</u> | XYZ | $\pm 2; \pm 4; \pm 8g$ | Цифровой, SPI, I ² C | 2,0÷3,6 | 0,166 | 3×4×1,2 мм, 16-выводной LGA | –40...+85 | $\pm 0,1$ |
| <u>ADXL362</u> | XYZ | $\pm 2; \pm 4; \pm 8g$ | Цифровой, SPI | 1,6÷3,5 | 0,0018 | 3×3,25×1,06 мм, 16-выводной LGA | –40...+85 | - |
| <u>ADXL363</u> | XYZ | $\pm 2; \pm 4; \pm 8g$ | Цифровой, SPI | 1,6÷3,5 | 0,00195 | 3×3,25×1,06 мм, 16-выводной LGA | –40...+85 | - |
| <u>ADXL375</u> | XYZ | $\pm 200g$ | Цифровой, SPI, I ² C | 2,0÷3,6 | 0,145 | 3×5×1 мм, 14-выводной | –40...+85 | - |
| <u>ADXL377</u> | XYZ | $\pm 200g$ | Аналоговый | 3÷3,6 | 0,3 | 3×3×1,45 мм, 16-выводной LFCSP | –40...+85 | - |
| <u>ADXL78</u> | X | $\pm 70g$ | Аналоговый | 4,8÷5,2 | 1,3 | 5×5×2 мм, 8-выводной LCC | –40...+105 | - |

Диапазоны измерений. Как было показано выше, диапазоны принято обозначать численными значениями по отношению к ускорению свободного падения g . В таблице приведены диапазоны измерений от $\pm 1,2g$ до $\pm 500g$. Следует также обратить внимание на то, что один акселерометр (например, ADXL001) может иметь различные регламентированные диапазоны: $\pm 70g$; $\pm 250g$; $\pm 500g$.

Тип выхода. Представленные в таблице акселерометры могут иметь аналоговый, цифровой и широтно-модулированный выходной информационный сигнал.

Температурный диапазон. МЭМС-акселерометры Analog Devices классифицируются по трем диапазонам рабочих температур: от –40 до +85 °С; от –40 до +105 °С; от –40 до +125 °С и от –40 до +175 °С (ADXL206).

Несоосность. Этот параметр относится только к двухосевым и трехосевым акселерометрам и характеризует отклонение осей чувствительности от взаимно ортогонального позиционирования в корпусе. В основном несоосность составляет $\pm 0,1$ град. за исключением акселерометра ADXL212, у которого несоосность не превышает $\pm 0,01$ град. Этот акселерометр следует отнести к разряду прецизионных сенсоров.

Классификация МЭМС-акселерометров по вторично запрашиваемым параметрам

В предыдущем разделе представлены классификация и параметры МЭМС-акселерометров Analog Devices, по которым на начальных эта-

пах проектирования разработчики имеют возможность лишь предварительно осуществить выбор того или иного акселерометра, а на последующих этапах получить дополнительную информацию по следующим классифицируемым параметрам и характеристикам.

Напряжение питания. Как следует из таблицы, допустимые диапазоны напряжения питания находятся в пределах 1,6÷3,5 В; 1,7÷2,8 В; 1,8÷3,6 В; 2,0÷3,6 В; 3÷5,25 В; 3÷6 В; и 4,8÷5,2 В.

Потребляемый ток. Наименьший ток потребления составляет 0,0018 мА у акселерометра ADXL362, а наибольший 7,7 мА – у акселерометра ADXL180.

Корпус. Минимальные габариты корпуса 3×3×0,95 мм, 16-выводной LGA характерны для акселерометров ADXL346 и ADXL344, а максимальные 13×8×2 мм, 8-выводной SBDIP – для акселерометра ADXL206.

Кроме указанных в таблице, рекомендуются при подборе также принимать во внимание следующие показатели.

Чувствительность. Под чувствительностью датчиков понимают крутизну статической характеристики «выход – вход». Для МЭМС-акселерометров чувствительность имеет размерность мВ/г. Минимальная чувствительность составляет 6,5 мВ/г для ADXL377, а максимальная – 1000 мВ/г для ADXL103 и ADXL203.

Полоса пропускания. Полоса пропускания – это диапазон частот, в котором акселерометр измеряет ускорение. Минимальная полоса про-

пускания для МЭМС – акселерометров, представленных в таблице, составляет от 0 до 200 Гц для ADXL362 и ADXL363, а максимальная – от 0 до 22 кГц для ADXL001.

Максимальная допустимая перегрузка. Для МЭМС-акселерометров максимальная допустимая перегрузка лежит в пределах от 500 до 10000g.

Выходной сигнал нуля. Для акселерометров с аналоговым выходом (разнополярным) выходной сигнал соответствует 0 В. Для акселерометров с аналоговым выходом (однополярным, смещенным) выходной сигнал соответствует 1,5 или 2,5 В, в зависимости от напряжения питания.

Плотность шума. Плотность шума для МЭМС-акселерометров, представленных в таблице, лежит в диапазоне от 110 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Гц}}$ до 5000 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Кроме того, на последующих этапах могут также приниматься во внимание дополнительные показатели – нестабильность смещения (это случайные вариации смещения, вычисленные как усредненные значения за определенный временной интервал); тип подключения (пайка на печатную плату или подключение через разъём); стоимость и др.

Поиск и систематизированный анализ технических характеристик требуемых акселерометров может осуществляться каждым разработчиком или специалистом индивидуально («вручную»), но это потребует определенных усилий и времени. В последующем разделе рассматривается вариант автоматизированного подбора акселерометров с требуемыми характеристиками.

Автоматизированный подбор МЭМС – акселерометров

Пример подбора МЭМС-акселерометров в упрощенном варианте основывается на приведенной выше классификации по первично запрашиваемым параметрам. На рис. 3 показан внешний вид интерфейса программы подбора МЭМС-акселерометров.

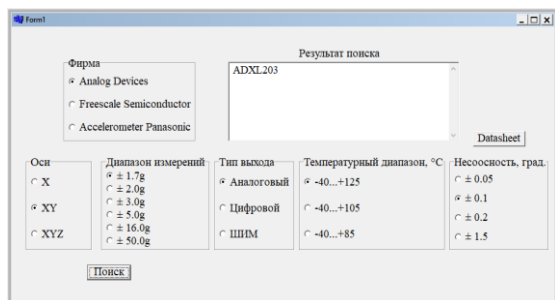


Рис. 3. Интерфейс программы подбора МЭМС-акселерометров

Fig. 3. Interface of the MEMS accelerometer selection program

Диалоговое окно интерфейса имеет несколько информационных разделов, и подбор осуществляется в несколько этапов. В разделе «Фирма» пользователь выбирает и маркирует одну из представленных фирм-производителей МЭМС-акселерометров: Analog Devices, Freescale Semiconductor или Accelerometer Panasonic. Затем в разделе «Оси» пользователь активирует один из вариантов структуры МЭМС-акселерометров: одно- (X), двух- (XY) или трехосевой (XYZ). В следующем разделе «Диапазон измерений» активируется требуемое значение. В разделе «Тип выхода» выбирается и маркируется аналоговый, цифровой вид выходного сигнала или ШИМ-сигнал. Затем выбирается и маркируется требуемый диапазон рабочих температур в разделе «Температурный диапазон» и в следующем разделе «Несоосность» выбирается требуемое значение. На завершающем этапе активируется клавиша «Поиск» и в разделе «Результат поиска» выводится информация о рекомендуемом претенденте. При этом пользователь может получить доступ к полному описанию претендента (выбранного МЭМС-акселерометра) путем активирования клавиши Datasheet.

Представленный вариант автоматизированного подбора МЭМС-акселерометров основывается на объектно-ориентированном программном обеспечении, включающем в себя соответствующие базы данных. Структура программно-алгоритмического обеспечения имеет открытую архитектуру и может дополняться актуализированной информацией. Разделы диалогового окна также могут быть расширены по дополнительным параметрам в соответствии с классифицированными признаками МЭМС-акселерометров.

Выводы

1. Определены различные области применения акселерометрических датчиков и показано, что наиболее широко акселерометры используются при разработке и создании геонавигационных систем, функционирующих на борту подвижных объектов – летательных аппаратов, включая беспилотные (БПЛА), космической техники, надводных и подводных морских судов, наземного транспорта. В отдельную область выделено применение акселерометров в так называемых системах подземной геонавигации, к которым относятся инклинометрические системы, используемые при выполнении геофизических исследований скважин, и забойные телесистемы, функционирующие непосредственно в процессе выполнения буровых работ.

2. Рассмотрены известные варианты классификации акселерометров по ряду существенных

признаков. Показано, что в последние годы находят все большее применение МЭМС-акселерометры, выполненные по технологиям производства интегральных микросхем, включающих размещение на одной подложке как полупроводниковых элементов, так и самих датчиков в виде конструкций микроэлектромеханических систем.

3. Предложено в качестве дополнения к известным решениям выполнять поэтапную классификацию, на основе которой будет осуществляться подбор того или иного МЭМС-акселерометра, технические и эксплуатационные характеристики которого будут удовлетворять предъявляемым требованиям.

4. Приведена классификация МЭМС-акселерометров по первично запрашиваемым параметрам:

- количество осей чувствительности акселерометров в одном корпусе;
- диапазоны измерений;
- тип выхода (аналоговый, цифровой и ШИМ);
- температурный диапазон;
- несоосность.

5. Приведена классификация МЭМС-акселерометров по вторично запрашиваемым параметрам:

- напряжение питания;
- потребляемый ток;
- корпус;
- чувствительность;
- полоса пропускания;
- максимальная допустимая перегрузка.

6. Предложен вариант автоматизированного подбора МЭМС-акселерометров, основанный на объектно-ориентированном программном обеспечении, включающем в себя соответствующие базы данных и имеющем открытую архитектуру с возможностью дополнения актуализированной информацией.

Библиографические ссылки

1. Трефилов С. А., Никитин Ю. Р., Пономарев Д. А. Исследование цифрового дискретного быстроедействующего полосового фильтра высоких порядков на процессоре TMS320F28377D для навигации мобильных роботов // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 55–69. DOI 10.22213/2413-1172-2024-4-55-69. EDN HPIVHS.
2. Кочеткова А. С. Применение инклинометра для подземных измерений // Наука и образование сегодня. 2021. № 7 (66). С. 23–24.
3. Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н. Компоновка сборки геофизических приборов с целью минимизации погрешностей инклинометра // НТВ «Каротажник». 2021. Вып. 2 (308). С. 89–94.

4. Люшнина М. С., Штрунова Е. С. Математическая модель инклинометра на основе трехосного микромеханического акселерометра // Вестник РГРТУ. 2023. № 84. С. 58–65.

5. Проценко Д. Е. Метод электронной юстировки MEMS-инклинометра // 79-я научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио : сб. докладов. СПб., 2024. С. 343–346.

6. Грязин Д. Г., Падерина Т. В. Разработка электронного кренодифференциатора на микромеханических датчиках, свободных от действия переносных ускорений // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31, № 2 (121). С. 51–64.

7. Суров И. Л. Алгоритм определения угла крена быстровращающегося летательного аппарата по данным микромеханических датчиков угловой скорости на баллистическом участке траектории // Гироскопия и навигация. 2024. Т. 32, № 1 (124). С. 41–52.

8. Вязьмин В. С., Голован А. А., Говоров А. Д. Начальная и конечная выставки бескарданного аэрогравиметра с определением смещений нулевых сигналов акселерометров // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31, № 1 (120). С. 76–88.

9. Алейников Д. П., Костин П. Н., Лукьянова А. В. Использование МЭМС-акселерометров для вибромониторинга механообрабатывающих центров // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 2 (62). С. 14–20.

10. Мониторинг крена зданий и смещения элементов с помощью решений ZETLAB // Информатизация и системы управления в промышленности. 2022. № 1 (97). С. 12–14.

11. Браславская К. Е. Возможности применения автоматизированных систем для наблюдения за деформациями уникальных сооружений // Молодой исследователь Дона. 2018. № 4 (13). С. 24–27.

12. Аунг Тхура, Симонов Б. М., Тимошенко С. П. Исследование воздействия случайной вибрации на характеристики микромеханических акселерометров // Известия вузов. Электроника / Proceedings of Universities. Electronics. 2019. № 24 (5). С. 511–20.

13. Миловзоров Д. Г., Ясоев В. Х. Construction and Calibration of InclinoMetric Systems with Fluxgate and Accelerometric Sensors // 2021 International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED).

14. Нгуен Чонг Иен, Нгуен Куок Хань, Ха Мань Тханг. Алгоритм калибровки микроэлектромеханических инерциальных датчиков // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 90–104.

15. Вялков А. В., Вялкова Т. П. Калибровка MEMS датчиков инерциальных модулей с использованием ручного стенда // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31, № 2 (121). С. 26–50.

16. Определение основных параметров акселерометра / К. Д. Кочеткова, П. А. Шолохов, А. Балгожиев, В. Красноперов, М. Мырзагадиев // Азаматтық авиация академиясының жаршысы. 2024. № 1 (32). С. 49–53.

References

1. Trefilov S.A., Nikitin Yu.R., Ponomarev D.A. [A study of a digital discrete high-speed high-order band-pass filter on a TMS320F28377D processor for navigation of mobile robots]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*. 2024. Vol. 27, no. 4. Pp. 55-69 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2024-4-55-69. EDN HIIVHS.
2. Kochetkova A.S. [The use of an inclinometer for underground measurements]. *Nauka i obrazovanie segodnya*. 2021. No. 7. Pp. 23-24. 2 (in Russ.).
3. Grinev I.V., Korolev A.B., Sitnikov V.N. [Assembly layout of geophysical instruments in order to minimize inclinometer errors]. *NTV «Karotazhnik»*. 2021. Issue 2. Pp. 89-94 (in Russ.).
4. Lyushnina M.S., Shtrunova E.S. [Mathematical model of an inclinometer based on a three-axis micro-mechanical accelerometer]. *Vestnik RGRTU*. 2023. No. 84. Pp. 58-65 (in Russ.).
5. Protsenko D.E. [Method of electronic alignment of the MEMS inclinometer]. 79th Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific Research Institute named after A.S. Popov, dedicated to Radio Day: collection of reports. Saint Petersburg, 2024. Pp. 343-346 (in Russ.).
6. Gryazin D.G., Paderina T.V. [Development of an electronic krenodifferentometer based on micromechanical sensors free from the action of portable accelerations]. *Giroskopiya i navigaciya*. 2023. Vol. 31, no. 2. Pp. 51-64 (in Russ.).
7. Surov I.L. [Algorithm for determining the roll angle of a rapidly rotating aircraft based on micromechanical angular velocity sensors in the ballistic section of the trajectory]. *Giroskopiya i navigaciya*. 2024. Vol. 32, no. 1. Pp. 41-52 (in Russ.).
8. Vyazmin V.S., Golovan A.A., Govorov A.D. [Initial and final exhibitions of a non-gimbal aerogravimeter with determination of displacements of zero accelerometer signals]. *Giroskopiya i navigaciya*. 2023. Vol. 31, no. 1. Pp. 76-88 (in Russ.).
9. Aleynikov D.P., Kostin P.N., Lukyanova A.V. [The use of MEMS accelerometers for vibration monitoring of machining centers]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2024. No. 2. Pp. 14-20 (in Russ.).
10. [Monitoring of the roll of buildings and displacement of elements using ZETLAB solutions]. *Informatizaciya i sistemy upravleniya v promyshlennosti*. 2022. No. 1. Pp. 12-14 (in Russ.).
11. Braslavskaya K.E. [Possibilities of using automated systems to monitor deformations of unique structures]. *Molodoj issledovatel' Dona*. 2018. No. 4. Pp. 24-27 (in Russ.).
12. Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. [Investigation of the effects of random vibration on the characteristics of micromechanical accelerometers]. *Izvestiya vuzov. Electronics / Proceedings of Universities. Electronics*. 2019. No. 24(5). Pp. 511-520 (in Russ.).
13. Milovzorov D.G., Yasoveev V.H. [Construction and Calibration of Inclinometric Systems with Fluxgate and Accelerometric Sensors]. International Seminar on Electron Devices Design and Production (SED). 2021.
14. Nguyen Trong Yen, Nguyen Quoc Han, Ha Man Thang. [The algorithm of calibration of microelectromechanical inertial sensors]. *Izvestiya vuzov Rossii. Radio electronics*. 2022. Vol. 25, no. 4. Pp. 90-104 (in Russ.).
15. Vyalkov A.V., Vyalkova T.P. [Calibration of MEMS sensors of inertial modules using a manual stand]. *Giroskopiya i navigaciya*. 2023. Vol. 31, no. 2. Pp. 26-50 (in Russ.).
16. Kochetkova K.D., Sholokhov P.A., Balgozhiev A., Krasnoperov V., Myrzagaliev M. [Determination of the main parameters of the accelerometer]. *Azamattyk aviation akademiya syn zharshysy*. 2024. No. 1. Pp. 49-53.

* * *

On MEMS Accelerometer Classification and Selection

A. A. Papko, DSc in Engineering, Professor, JSC "Scientific Research Institute of Physical Measurements", Penza, Russia

B. V. Chuvykin, DSc in Engineering, Professor, Penza State University, Penza, Russia

T. A. Redkina, Senior Lecturer, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The article examines various application fields of accelerometric sensors and shows that accelerometers are most widely used in the development of geo-steering systems operating onboard of mobile objects – aircraft, including unmanned aerial vehicles (UAVs), space technology, surface and underwater vessels, and land transport. A separate area is the use of accelerometers in the so-called underground geo-steering systems, which include inclinometer systems used in performing geophysical studies of wells, and downhole MWD systems operating directly during drilling operations.

The known variants of the accelerometer classification according to a number of essential features are considered. It is shown that in recent years, MEMS accelerometers have been increasingly used, produced by means of integrated circuit manufacturing technologies, including the placement of both semiconductor elements and sensors themselves on a single substrate in the form of microelectromechanical system structures.

As an addition to the known solutions, it is proposed to perform a step-by-step classification, on the basis of which a selection of a particular MEMS accelerometer will be carried out, the technical and operational characteristics of which will meet the requirements.

The classification of MEMS accelerometers according to the primary requested parameters is proposed: the number of sensitivity axes of accelerometers in one housing, measurement ranges, output type (analog, digital and PWM), temperature range; misalignment.

MEMS accelerometers are classified according to the secondary parameters requested: supply voltage, current consumption, housing, sensitivity, bandwidth, maximum permissible overload.

A variant of automated selection of MEMS accelerometers is being considered, based on object-oriented software that includes appropriate databases and has an open architecture with the possibility of supplementing updated information.

Keywords: accelerometer, parameters, classification, attributes.

Получено: 11.02.25

Образец цитирования

Папко А. А., Чувькин Б. В., Редькина Т. А. О классификации и подборе МЭМС-акселерометров // Интеллектуальные системы в производстве. 2025. Т. 23, № 2. С. 28–36. DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-28-36.

For Citation

Papko A.A., Chuvykin B.V., Redkina T.A. [On MEMS Accelerometer Classification and Selection]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2025, vol. 23, no. 2, pp. 28-36 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2025-2-28-36.