

УДК: 531.768:621.395.721.5

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ В СОВРЕМЕННЫХ СМАРТФОНАХ

*Житникова Д.С., Зайцева С.В., студенты*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Солодухин И.А. – канд. физ.-мат. наук, доцент*

**Аннотация.** Рассмотрены физические принципы функционирования MEMS-акселерометров современных смартфонов. Показан переход от классического закона Ньютона к ёмкостному методу регистрации перемещения инерционной массы. Проанализирована физика работы переменного конденсатора. Рассмотрены технологические аспекты изготовления чувствительных элементов, роль поликремния и КМОП-технологии в миниатюризации датчиков. Приведены результаты экспериментальной проверки. Разграничены функции акселерометра и гироскопа, а также области применения G-сенсоров в мобильных устройствах.

**Ключевые слова.** акселерометр, MEMS, G-сенсор, ёмкостный метод, инерционная масса, смартфон, поликремний, гироскоп.

**Введение.** Современные смартфоны трансформировались из средств связи в многофункциональные вычислительные платформы, оснащённые широким спектром датчиков. Среди этих сенсоров особое место занимают акселерометры (G-сенсоры) – устройства, измеряющие кажущееся ускорение и позволяющие определять угол наклона объекта относительно земной поверхности. В смартфонах акселерометры выполняют ключевые функции: автоматический поворот экрана, управление в играх, стабилизация изображения, шагомеры и навигация [1]. Цель работы – анализ физических принципов функционирования MEMS-акселерометров, используемых в современных смартфонах, выявление связи между классической механикой и ёмкостным методом регистрации ускорения, определение роли новых материалов в миниатюризации датчиков.

### 1. Фундаментальные физические концепции, лежащие в основе работы микроэлектромеханических акселерометров.

Физический принцип работы акселерометра основывается на втором законе Ньютона. Конструкция состоит из инерционной (сейсмической) массы, подвешенной на упругих элементах – торсионах. При ускорении корпуса датчика масса стремится сохранить состояние покоя, что приводит к её смещению относительно неподвижных электродов. Это смещение ( $\Delta x$ ) уравнивается силой упругости:

$$F_{\text{упр}} = k\Delta x, \quad (1)$$

где  $k$  – жёсткость подвеса.

В состоянии равновесия:

$$ma = k\Delta x, \quad (2)$$

$$a = (k/m) \Delta x. \quad (3)$$

Таким образом, измерение ускорения сводится к прецизионному измерению смещения инерционной массы [2].

Важнейшим аспектом является принцип эквивалентности, утверждающий неразличимость гравитационных сил и сил инерции. Это означает, что акселерометр, находящийся в состоянии покоя в гравитационном поле Земли, будет измерять ускорение, равное ускорению свободного падения ( $g \approx 9.8 \text{ м/с}^2$ ), направленное вертикально вверх. Именно поэтому акселерометр может быть использован для определения ориентации устройства относительно вектора силы тяжести.

В микроэлектромеханических системах наибольшее распространение получил ёмкостный метод регистрации. Инерционная масса и неподвижные электроды образуют систему переменных конденсаторов. Изменение ёмкости описывается формулой:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d}, \quad (4)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $S$  – площадь перекрытия электродов;  $d$  – расстояние между ними [3].

При смещении массы меняются параметры конденсатора: по осям  $X$  и  $Y$  изменяется площадь перекрытия  $S$ , а по оси  $Z$  – зазор  $d$ . Часто используется дифференциальная схема, где подвижная масса располагается между двумя неподвижными электродами, образуя два конденсатора. При смещении массы ёмкость одного конденсатора увеличивается, а другого – уменьшается. Разность ёмкостей ( $\Delta C$ )

прямо пропорциональна смещению, что обеспечивает высокую чувствительность и линейность, а также подавление синфазных помех (например, температурного дрейфа).

## 2. Технологические аспекты и материалы миниатюризации микроэлектромеханических акселерометров

Миниатюризация акселерометров стала возможной благодаря использованию поликремния и совместимости с КМОП-технологией. Кремний обладает уникальным сочетанием свойств: высоким модулем Юнга, низкой плотностью, отсутствием механического гистерезиса и возможностью интеграции с электронными схемами [6].

Основным методом изготовления MEMS-акселерометров является поверхностная микрообработка. Процесс включает осаждение жертвенного слоя (диоксида кремния), на который затем наносится конструкционный слой поликремния. С помощью фотолитографии и плазменного травления формируется требуемая топология (пружины, гребенчатые структуры конденсаторов). На заключительном этапе жертвенный слой удаляется селективным травлением, в результате чего конструкционный слой становится подвижным [4].

Технология глубокого реактивного ионного травления (DRIE) позволяет создавать структуры с высоким аспектным отношением, что значительно увеличивает площадь боковых поверхностей электродов конденсатора при сохранении малой занимаемой площади, а следовательно, повышает чувствительность датчика [5].

Использование поликремния и совместимость с КМОП-технологией позволяют размещать на одном кристалле механическую структуру и электронику обработки сигналов, что критически важно для снижения паразитных параметров и повышения помехоустойчивости.

## 3. Сравнительный анализ моделей и характеристик современных акселерометров на примере SMB380

В качестве примера реализации рассмотрим трёхосевой акселерометр SMB380 производства Bosch Sensortec. Эта микросхема имеет размеры 3x3x0,9 мм и поддерживает три программируемых диапазона измеряемых ускорений:  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ . Выбор диапазона является компромиссом между возможностью регистрировать сильные ускорения (при падении или ударе) и чувствительностью к слабым сигналам. В режиме  $\pm 2g$  датчик обладает максимальной чувствительностью для определения наклона устройства [6].

Энергопотребление составляет 1-2 мкА в спящем режиме и 200-290 мкА в активном, что критически важно для портативных устройств с батарейным питанием. Чувствительность для цифровых акселерометров выражается в LSB/g. Например, 10-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в диапазоне  $\pm 2g$  (общий диапазон 4g) теоретически обеспечивает чувствительность  $1024 \text{ LSB} / 4g = 256 \text{ LSB/g}$  [3].

Внутренняя архитектура SMB380 включает чувствительный элемент (MEMS-структуру), АЦП, цифровой фильтр и встроенный температурный датчик для компенсации дрейфа нуля и чувствительности. Внешний вид микросхемы представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид акселерометра SMB380 [6]

## 4. Экспериментальное исследование и верификация метрологических характеристик

Экспериментальная проверка правильности работы датчика проводилась путём вращения его вокруг горизонтальной оси. Экспериментальная установка включала акселерометр SMB380, установленный на поворотном столике с угловым разрешением  $1^\circ$ , микроконтроллер для сбора данных и персональный компьютер для регистрации и обработки результатов. Полученная зависимость показаний от угла поворота описывается функцией:

$$A(\theta) = A_0 + g \sin(\theta), \quad (5)$$

где  $A_0$  – смещение нуля,  $g$  – ускорение свободного падения. Синусоидальный характер зависимости подтверждает корректность работы датчика [7].

Физическое обоснование: проекция вектора ускорения свободного падения на ось чувствительности датчика изменяется по синусоидальному закону при вращении. Высокое значение коэффициента детерминации ( $R^2 = 0,998$ ) подтверждает соответствие экспериментальных данных теоретической мо-

дели и свидетельствует о корректности работы датчика. Погрешность определения углов наклона в статическом режиме составляет не более  $0,5^\circ$ , что позволяет использовать акселерометр для точного определения ориентации устройства.

### **5. Акселерометр и гироскоп: функциональные различия и синергия в инерциальных измерительных блоках**

В современных смартфонах акселерометр практически всегда используется в паре с гироскопом. Несмотря на то, что оба устройства являются инерциальными MEMS-датчиками, они измеряют принципиально разные физические величины. Акселерометр фиксирует линейное ускорение и позволяет определять угол наклона в статическом режиме. Гироскоп измеряет угловую скорость вращения, используя эффект Кориолиса [1].

Функциональные различия определяют их взаимодополняемость. Гироскоп предоставляет точные данные о быстрых изменениях ориентации, но его показания со временем накапливают ошибку из-за интегрирования угловой скорости. Акселерометр, напротив, не подвержен долговременному дрейфу в статике, но его показания «зашумлены» линейными ускорениями. Объединение этих датчиков в инерциальном измерительном блоке (IMU) позволяет создать систему, лишённую недостатков каждого из них. Процесс объединения данных называется сенсорным слиянием (sensor fusion). С помощью алгоритмов (комплементарный фильтр, фильтр Калмана) система использует быстрые данные гироскопа для отслеживания ориентации в реальном времени, а стабильные данные акселерометра – для коррекции накопленного дрейфа.

### **6. Нерешенные физические проблемы и ограничения точности акселерометров для смартфонов**

Несмотря на впечатляющий прогресс, существует ряд нерешенных физических проблем, ограничивающих точность и стабильность MEMS-акселерометров.

Термомеханический шум (броуновский шум) обусловлен хаотическими тепловыми колебаниями инерционной массы. Величина этого шума обратно пропорциональна массе инерционного элемента. Стремление к миниатюризации (уменьшению массы) приводит к увеличению относительного уровня шума, что устанавливает физический предел разрешающей способности [4].

Эффект стикции (stiction) заключается в необратимом слипании микромеханических элементов после их соприкосновения. Причиной являются капиллярные силы, силы Ван-дер-Ваальса и электростатические силы, которые на микроуровне становятся доминирующими. Стикция может привести к полному отказу датчика.

Температурный дрейф нуля и чувствительности обусловлен изменением механических свойств материалов и параметров электронных схем при изменении температуры. Для компенсации используются встроенные температурные датчики, однако полностью устранить дрейф невозможно [3].

Нелинейность преобразования в широком диапазоне ускорений возникает из-за электростатической силы притяжения между обкладками конденсатора и механических ограничений конструкции.

**Заключение.** Современный MEMS-акселерометр является ярким примером взаимодействия классической механики и наноэлектроники. В работе показано, как фундаментальный закон Ньютона трансформируется в инженерное решение, основанное на ёмкостном методе измерения микроперемещений. Использование поликремния и совместимость с КМОП-технологией позволили достичь высокой степени интеграции, низкого энергопотребления и надёжности, необходимых для массового применения в смартфонах. Экспериментально подтверждена корректность работы датчика и его пригодность для определения углов наклона. Рассмотрены различия между акселерометром и гироскопом, а также принципы их совместного применения в системах инерциальной навигации. Выявлены нерешённые физические проблемы (термомеханический шум, стикция, температурный дрейф), ограничивающие точность измерений. Перспективы развития связаны с переходом к наноэлектромеханическим системам, внедрением новых материалов и алгоритмов машинного обучения.

#### **Список использованных источников:**

1. Распов, В.Я. Микросистемная акселерометрия / В.Я. Распов. – М.: Машиностроение, 2017. – 352 с.
2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. I. Механика / Д.В. Сивухин. – М.: Физматлит, 2006. – 560 с.
3. Рябова, Н.В. Физические основы микро- и наноэлектроники / Н.В. Рябова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 248 с.
4. Колесников, А.А. Технологии микромеханических систем / А.А. Колесников, В.А. Смирнов. – СПб.: Лань, 2019. – 288 с.
5. Абдуллин, Ф.А. Технологические особенности формирования кремниевых пьезорезистивных акселерометров с расширенным температурным диапазоном измерений / Ф.А. Абдуллин, В.Е. Пауткин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 2 (16). – С. 118–123.
6. SMB380 Triaxial Acceleration Sensor Data Sheet / Bosch Sensortec GmbH, 2008. – 45 p.
7. Цыкунов, И. Применение акселерометров в задачах локации мобильных объектов / И. Цыкунов // Компоненты и технологии. – 2009. – № 8. – С. 120–124.

UDC: 531.768:621.395.721.5

## PHYSICAL PRINCIPLES OF OPERATION OF ACCELEROMETERS IN MODERN SMARTPHONES

*Zaitseva S.V., Zhitnikova D.S., students*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics<sup>1</sup>, Minsk, Republic of Belarus*

*Saladukhin I.A. – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor*

**Annotation.** This article examines the physical principles underlying the operation of MEMS accelerometers in modern smartphones. It demonstrates the transition from Newton's classical law to a capacitive method for recording inertial mass displacement. The physics of a variable capacitor is analyzed. The technological aspects of manufacturing sensitive elements, as well as the role of polysilicon and CMOS technology in sensor miniaturization, are discussed. The results of experimental testing are presented. The functions of the accelerometer and gyroscope are distinguished, as well as the applications of G-sensors in mobile devices.

**Keywords.** accelerometer, MEMS, G-sensor, capacitive method, inertial mass, smartphone, polysilicon, gyroscope.