

МЭМСы. Как устроены современные датчики?

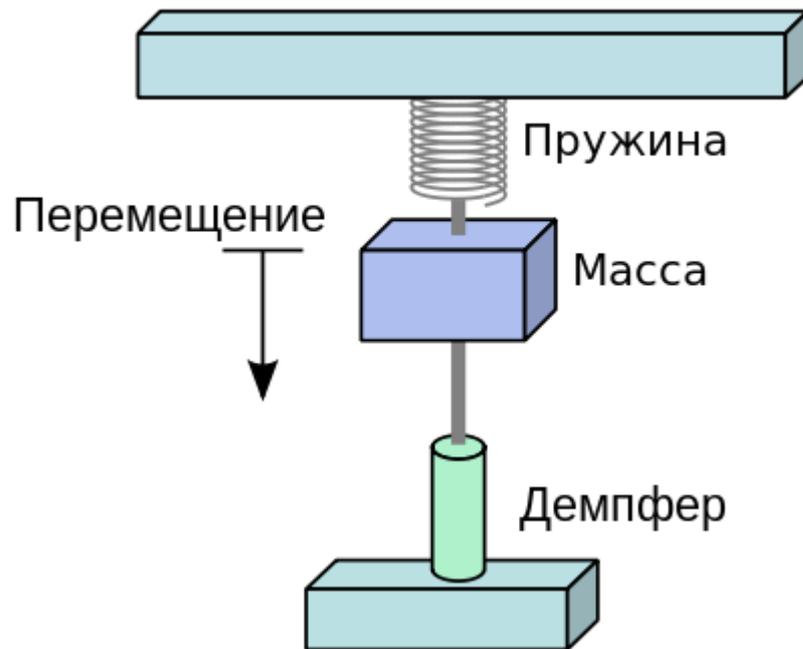
- [Блог компании Миландр.](#)
- [Схемотехника,](#)
- [Производство и разработка электроники,](#)
- [Электроника для начинающих,](#)
- [Инженерные системы](#)

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) — устройства, объединяющие в себе микроэлектронные и микромеханические компоненты. Сейчас довольно трудно встретить системы в которых не используются датчики, выполненные по данной технологии. Но как устроены современные датчики и какие преобразователи используются для работы с ними? Постараемся детально разобраться в этом вопросе, основываясь на работе современных МЭМС-акселерометров.



Простейший акселерометр, как он работает?

Акселерометр — прибор, измеряющий проекцию кажущегося ускорения (разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением). Принцип работы можно объяснить с помощью простой модели.



Модель устройства механического акселерометра ([оригинал](#))

При увеличении ускорения, масса будет растягивать пружину. По закону Гука из школьной программы физики можно с легкостью найти ускорение системы:

$a = k \cdot \delta x / m$, где k - коэффициент упругости пружины, δx – ее растяжение и m – масса груза.

Используя три перпендикулярно расположенных датчика, можно узнать ускорение предмета по 3-м осям, и зная начальные условия определить положение тела в пространстве.

Эта незамысловатая модель представляет собой основу работы большинства акселерометров, которые можно поделить на 3 основные подгруппы:

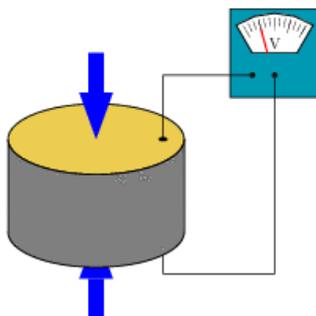
- механические
- электронные
- пьезоэлектрические

Есть еще термальные и оптические, однако их рассматривать не будем. Если с механическими все понятно (по сути, их работу отражает модель сверху), то с электронными и пьезоэлектрическими немного поинтереснее.

Пьезоэлектрический акселерометр

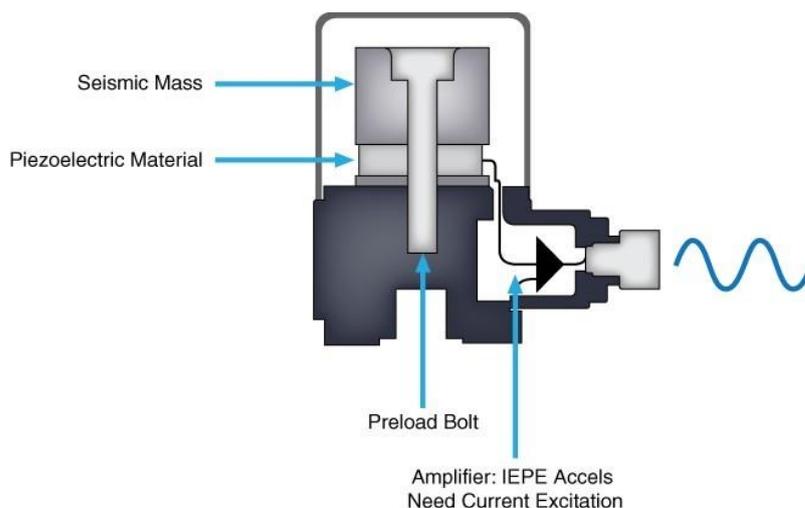
Основывается данный тип датчиков на пьезорезистивном эффекте, который был открыт в 1954 году Смитом в таких полупроводниках как германий и кремний. В

отличие от пьезоэлектрического эффекта, пьезорезистивный эффект вызывает изменение только электрического сопротивления, но не электрического потенциала.



Анимация пьезоэффекта ([оригинал](#))

При увеличении ускорения, инертная масса увеличивает/уменьшает давление на пьезоэлемент. Благодаря пьезоэффекту происходит генерация сигнала, который зависит от внешнего ускорения.



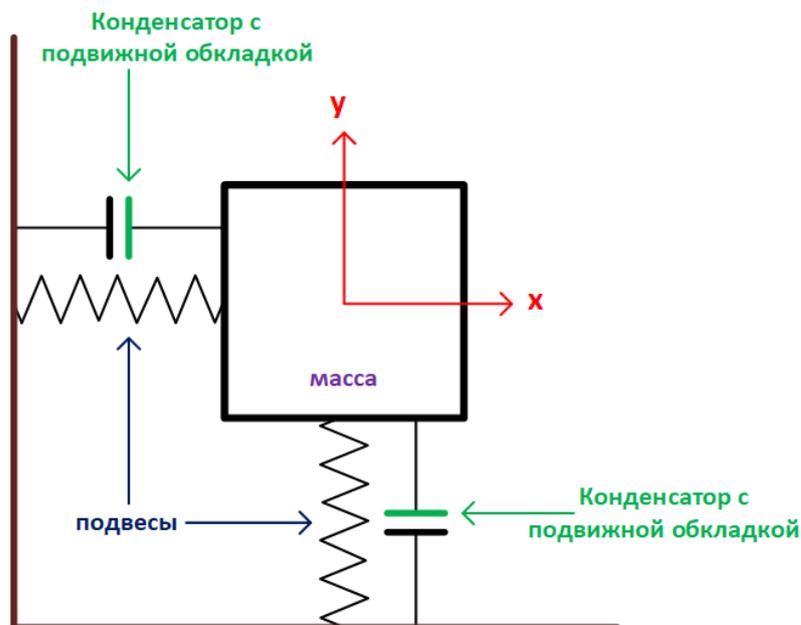
Устройство пьезоэлектрического акселерометра ([оригинал](#))

Датчики такого типа требуют дополнительного усилителя, который увеличивает амплитуду сигнала, и создает низкоимпедансный выход для работы с внешними устройствами. Для калибровки нулевого значения ускорения используется Preload Bolt, масса которого рассчитана так, чтобы соответствовать нулевой точки ускорения в системе.

Датчики такого типа до сих пор сильно распространены, и в основном применяются в системах, требующих высокую надежность — automotive. Для коммерческой электроники зачастую используют электронные акселерометры, которые имеют меньший размер и цену.

Электронные акселерометры

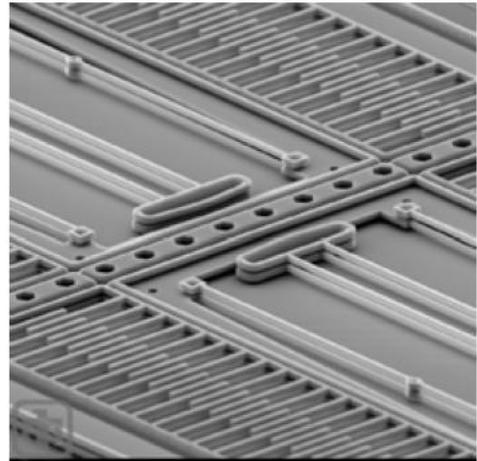
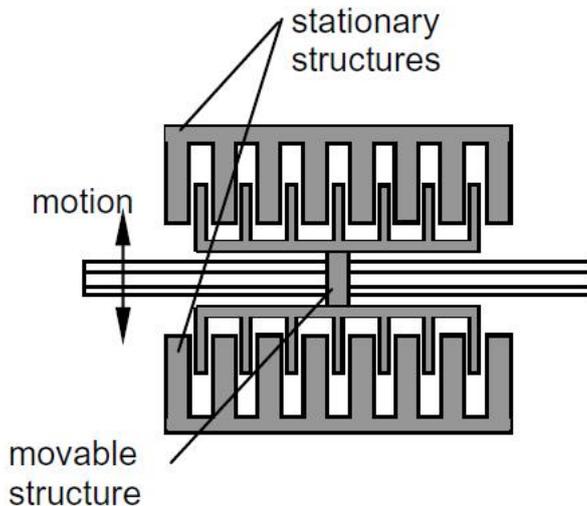
Принцип работы электронных датчиков основан на изменении емкости конденсаторов при изменении ускорения. Простейшая модель работы представлена на картинке.



Устройство 2-х осевого электро-механического акселерометра

При изменении ускорения, масса изменяет расстояние между обкладками конденсатора. Из простейшей формулы емкости конденсатора $C = \epsilon \epsilon_0 S / d$ следует, что при изменении d расстояния между обкладками емкость конденсатора будет также изменяться. Широкое применение данный метод получил, благодаря развитию МЭМС (MEMS) – микроэлектромеханических систем.

МЭМС технологии позволяют создавать конденсаторы с подвижными обкладками на кремниевой подложке, что существенно уменьшает размер устройства, и что не маловажно – его стоимость.



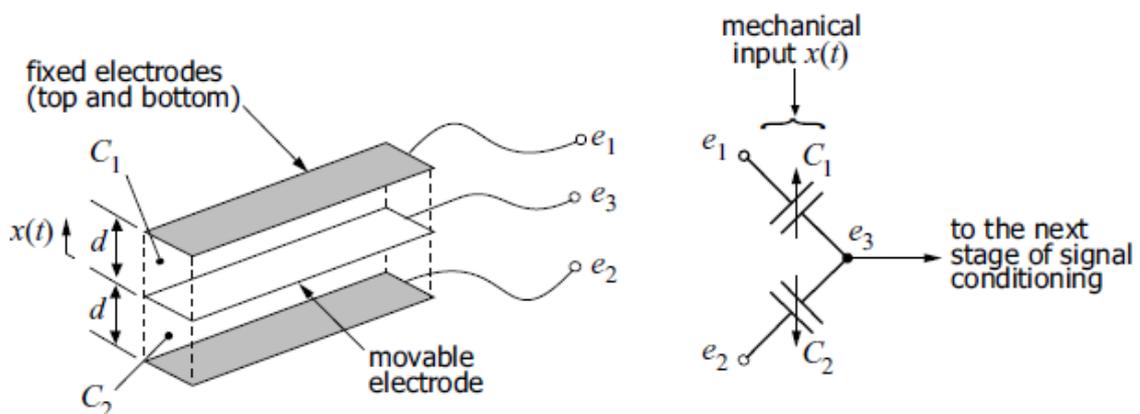
Устройство 2-х осевого электро-механического акселерометра (оригинал из книги [«Introductory MEMS»](#). Дальнейшие иллюстрации тоже взяты из этой книги)

У читателя наверняка возник вопрос: “как именно детектировать изменение емкости конденсатора?” Постараюсь дать на этот вопрос исчерпывающий ответ.

Устройство МЭМС акселерометра. Как превратить изменение емкости в сигнал?

Емкостной полумост

Итак прежде, чем описывать работу самого датчика, обратимся к довольно популярной схеме в схемотехнике – емкостному полумосту (Capacitive half-bridge).



Емкостной полумост — основа МЭМС-датчиков

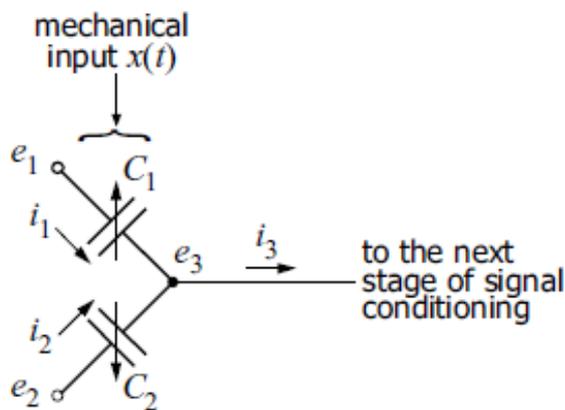
Напряжения e_1 и e_2 являются входными, а e_3 – выходной сигнал для последующего преобразования. Емкости обоих конденсаторов зависят от

внешнего ускорения, и изменяются на величину $x(t)$. При $x = 0$, заряды на емкостях являются идентичными, и при этом $C_1=C_2=C_0$. При условии, что $x \ll d$ найдем как зависит изменение емкости конденсаторов от изменения положения обкладки.

Вывод формулы для изменения емкости

$$\Delta C(x) = \epsilon S d 2x \quad (1.2)$$

Итак часть пути пройдена, мы получили как зависит значение изменения емкости от изменения положения обкладки (то есть внешнего ускорения). Пора это изменение детектировать: вводим дополнительные токи — i_1, i_2, i_3 . Теперь остается вычислить как выходной ток будет зависеть от изменения положения обкладки.



Емкостной полумост — токи

Вывод формулы зависимости выходного тока от изменения емкости

Итак если использовать одинаковые потенциалы входных напряжений $e_1=e_2=e_s$ получаем зависимость тока:

$$i_3 = \frac{d}{dt} [2C_0(e_s - e_3)]$$

Результат получился довольно странный: выходной ток никак не зависит от изменения емкости. Для того, чтобы детектировать изменение емкости, необходимо задавать на обкладках напряжения разной полярности, то есть: $e_1=e_s$, а $e_2=-e_s$. Тогда переделаем уравнение с учетом данной модификации.

Зависимость тока от изменения положения обкладки с учетом разной полярности входных напряжений

$$i_3 = 2(\epsilon_s \epsilon S d 2x' + x \epsilon S d 2e_s' - C_0 e_3') \quad (1.4)$$

Из этого уравнения видны следующие факты:

- если положение пластин не меняется во времени, то $x' = 0$
- аналогично если источник сигнала e_s постоянный (DC), то $e_s' = 0$

Для эффективной работы емкостного полумоста необходимо использовать переменные входные сигналы e_1 и e_2 , смещение фаз между которыми будет равно 180 градусов (для того, чтобы потенциалы имели разный знак). Поэтому получаем следующий вид сигналов:

$$e_1 = +e_s = +B\sin(\omega t)$$

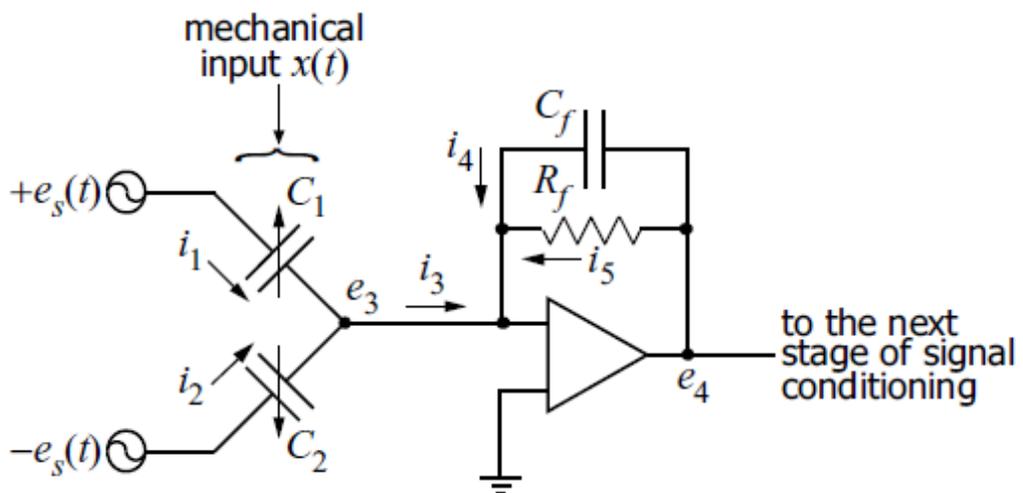
$$e_2 = -e_s = -B\sin(\omega t)$$

, где ω – частота переменного сигнала (определяется на этапе разработки, в зависимости от полосы пропускания системы и нормальной работы механических емкостей).

Итак, мы получили уравнение (1.4), которое показывает, как изменение емкости конденсатора влияет на выходной сигнал системы. Однако такой сигнал будет довольно малый по амплитуде, к тому же если подключим к нему нагрузку для общения с внешним миром — вся система рухнет. Тут нужен усилитель...

Просто добавь усилитель

Добавим в нашу систему усилитель (будем считать, что коэффициент усиления — ∞ — сл-но работает принцип виртуальной земли).



Емкостной полумост + интегратор

Итак теперь найдем зависимость выходного напряжения усилителя от изменения емкости.

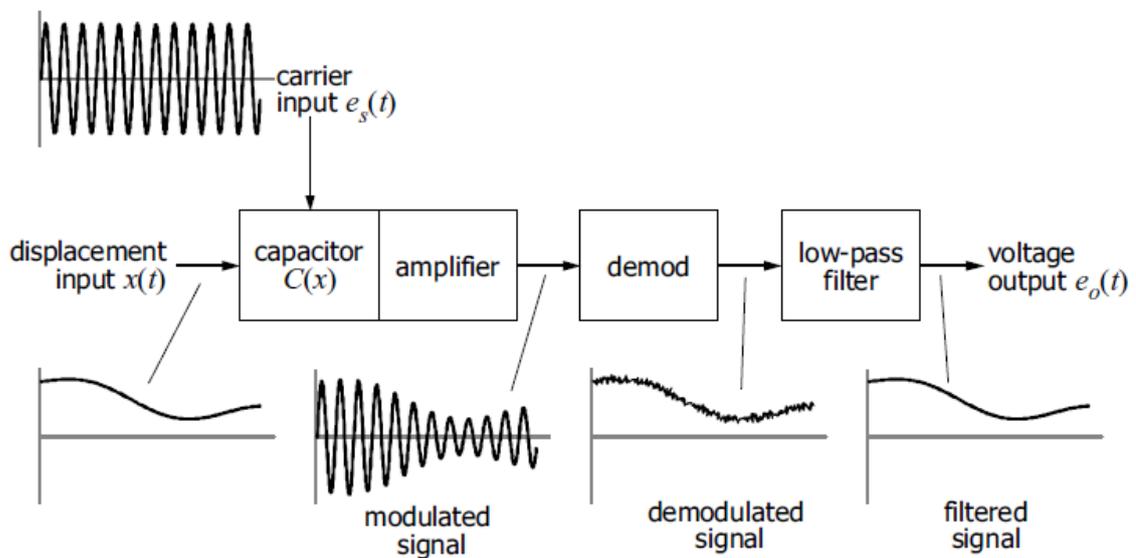
Выходное напряжение усилителя

$$|e_4 e_s| = 2\epsilon S C_f d^2 x$$

В итоге мы получили зависимость выходного сигнала усилителя от изменения положения обкладки конденсатора. Внимательный читатель должен сразу обратить внимание – это же амплитудная модуляция! Действительно, в данной системе мы имеем сигнал $x(t)$, который перемножается с сигналом $e_s(t)$ и усиливается на величину $2\varepsilon SCfd^2$. Следующий шаг – убрать несущую частоту $e_s(t)$, и мы получим усиленный сигнал $x(t)$ – который пропорционален ускорению. Долгий путь вычислений привел нас к пониманию архитектуры МЭМС-акселерометра.

Архитектура МЭМС акселерометра

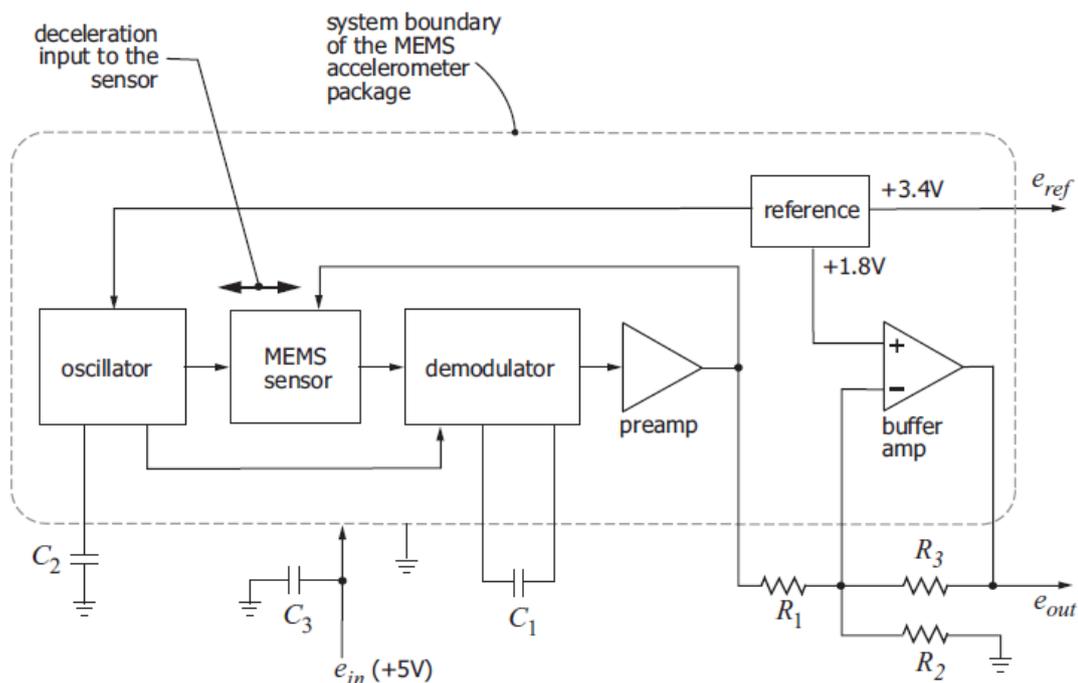
Рассмотрим сначала функциональную схему датчика:



Функциональная схема МЭМС-акселерометра

Изначально у нас есть сигнал $x(t)$ – который отражает изменение ускорения. Далее мы перемножаем его с несущим сигналом $e_s(t)$ и усиливаем с помощью операционного усилителя (в режиме интегратора). Далее происходит демодуляция – простейшая схема – диод и RC фильтр (в реальности используют усложненную схему, синхронизируя процесс модуляции и демодуляции одной несущей частотой $e_s(t)$). После чего остатки шума фильтруются с помощью фильтра низких частот.

В качестве примера приведу один из первых МЭМС акселерометров компании Analog Devices – ADXL50:



Структурная схема ADXL50

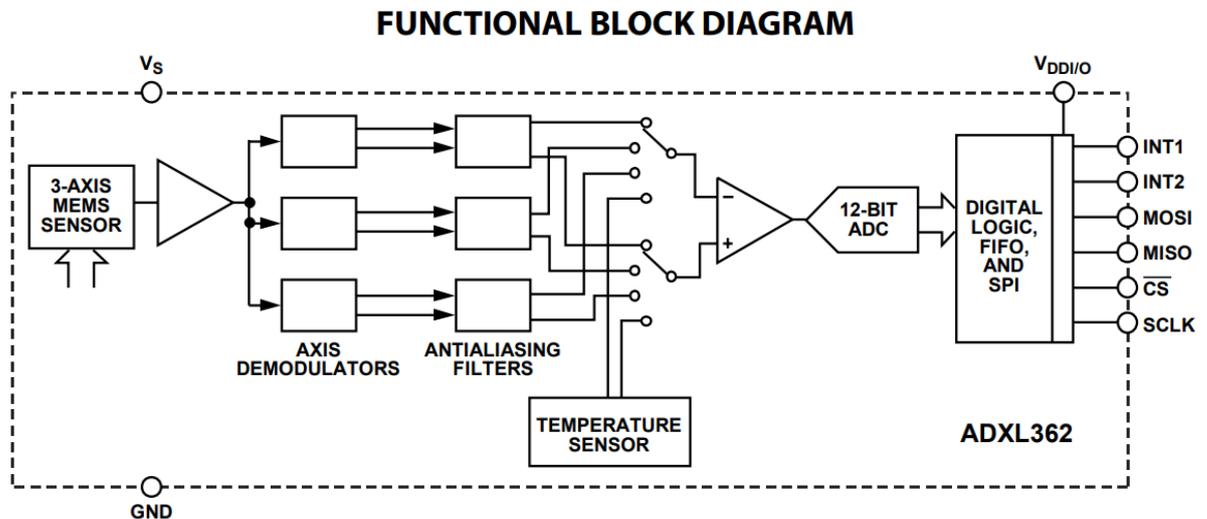
Наверное, приведя структурную схему датчика в начале статьи многим читателям не было бы понятно назначения некоторых блоков. Теперь завеса приоткрыта, и можем обсудить каждый из них:

- Блок, который называется "MEMS sensor" – является емкостным полумостом.
- Блок "oscillator" генерирует сигнал на частоте 1ГГц.
- Сигнал осциллятора также используется для синхронной демодуляции.
- Выходной усилитель и дополнительные резисторы создают нулевую точку, относительно которой можно смотреть знак изменения ускорения (обычно это $VDD/2$ - половина питания, для биполярных датчиков — «земля»).
- Внешняя емкость C_1 определяет полосу измерения системы.
- Внутреннего фильтра низких частот в данной схеме нет, но в современных схемах они имеются.

Какой преобразователь выбрать для работы с датчиками?

Выбор преобразователя для работы с датчиками зависит от точности, которую вы хотите получить. Для работы с датчиками подойдут АЦП с архитектурой SAR или Delta-Sigma с высокой разрядностью. Однако современные датчики обладают встроенными преобразователями. Лидерами этого направления являются

STMicroelectronics, Analog Devices и NXP. В качестве примера, можно привести новую микросхему с 3-х осевым акселерометром и встроенным АЦП – ADXL362.

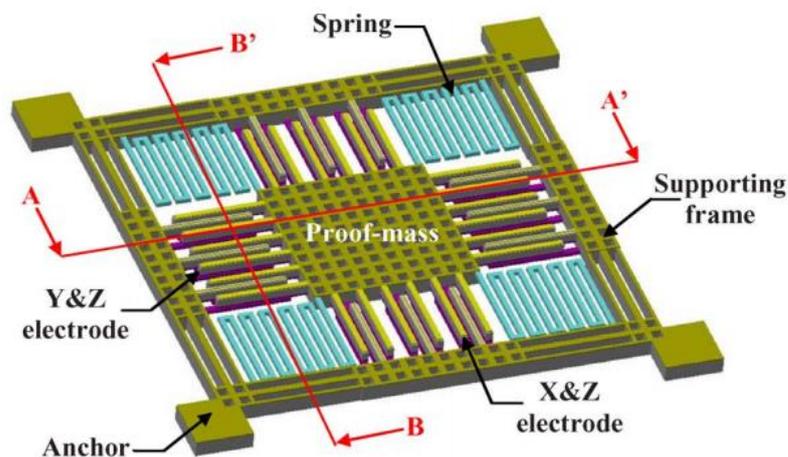


Структурная схема ADXL362

Для работы с АЦП в схему добавлены антиэлайзинговые фильтры, чтобы исключить попадания в спектр дополнительных гармоник.

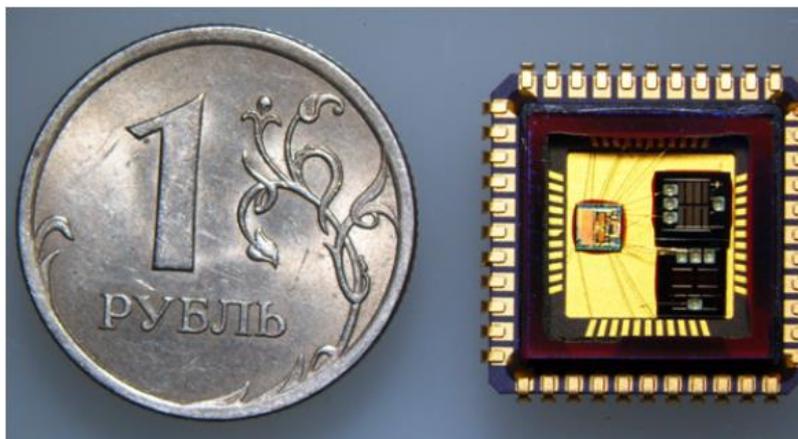
Где достать такие технологии?

Сейчас для fabless компаний доступно множество фабрик, которые предлагают технологии МЭМС. Однако для создания современных микросхем требуется интегрировать емкости с подвижными пластинами в стандартный маршрут проектирования, ведь помимо такой емкости необходимо спроектировать дополнительные блоки (генератор, демодулятор, ОУ и тд) на одном чипе. В качестве примера можно привести фабрики [TSMC](#) и [XFab](#), которые предлагают технологию для реализации МЭМС датчика вместе со всей обвязкой. На картинке представлены емкости, которые позволяют создать трехосевой акселерометр:



Трехосевой емкостной полумост от [TSMC](#)

В России также существует фабрика по выпуску МЭМС датчиков – ["Совтест"](#), однако предприятие не обладает технологией интегрирования дополнительных схмотехнических блоков, которые необходимы для создания конечного устройства и единственный выход — применять технологию микросборки.



МЭМС-акселерометр разработки [Совтест](#)

Какие наработки есть у нашей компании в этом направлении?

У нас есть несколько преобразователей, которые предназначены для работы с датчиками. Из новых продуктов это:

- [5101НВ035](#) – 16-канальный преобразователь на основе 8-ми Дельта-Сигма АЦП, предназначена для работы с токовыми датчиками
- [1316НХ035](#) – 4-х канальный интегрирующий преобразователь напряжение-частота (ПНЧ), предназначенный для работы с 3-х осевыми акселерометрами и гироскопами.

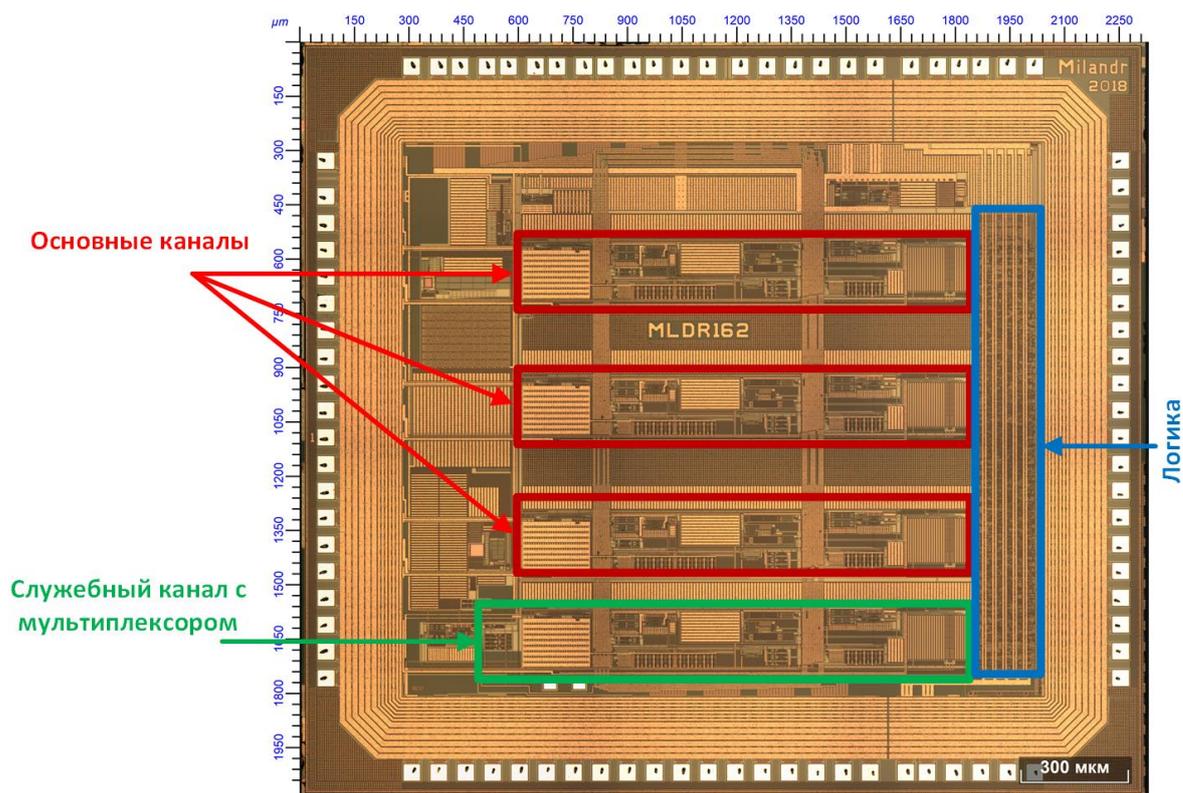
Как я писал в [предыдущей статье](#), период ожидания пластин с фабрики может занять довольно долгий промежуток времени. После первого тестового запуска АЦП 400МГц, время прихода пластин и дальнейших измерений заняло более полугода. За это время наша команда успела сделать ПНЧ 1316НХ035 (развитие предыдущей схемы [1316ПП1У](#)), о котором могу немного рассказать.

Преобразователь напряжение-частота

Для преобразования данных с датчика обычно используются SAR или delta-sigma АЦП, однако существует еще один тип преобразователей — интегрирующие ПНЧ, которые имеют существенные преимущества:

1. Занимают меньшую площадь и имеют меньшее потребление при том же показателе линейности и шума.
2. Простая архитектура.
3. Высокая устойчивость к входному шуму и сигналам помех.
4. Устойчивость к шуму и помехам выходного сигнала.
5. Возможность передачи данных без обработки на радиочастотный канал связи.

Микросхема 1316НХ035 представляет собой четырехканальный преобразователь напряжения в частоту и цифровой код, к трем основным высокоточным каналам подключаются выходы трехосевого акселерометра. 4-ый канал имеет входной 4-канальный мультиплексор, к которому можно подключать дополнительные датчики системы: температуры, влажности и др. Под микроскопом схема выглядит так:



ПНЧ под микроскопом

Каждый из трех основных каналов преобразует входное напряжение в диапазоне $\pm 4\text{В}$ в частоту до 1250кГц на 3-х выходах, соответствующих положительному и отрицательному входным напряжениям. Также микросхема имеет в каждом канале 16 битный реверсивный счетчик, для подсчета частотных импульсов. SPI интерфейс

служит для управления режимами преобразования и выборки содержимого счетчиков импульсов каналов. Основными требованиями к параметрам ПНЧ являлись:

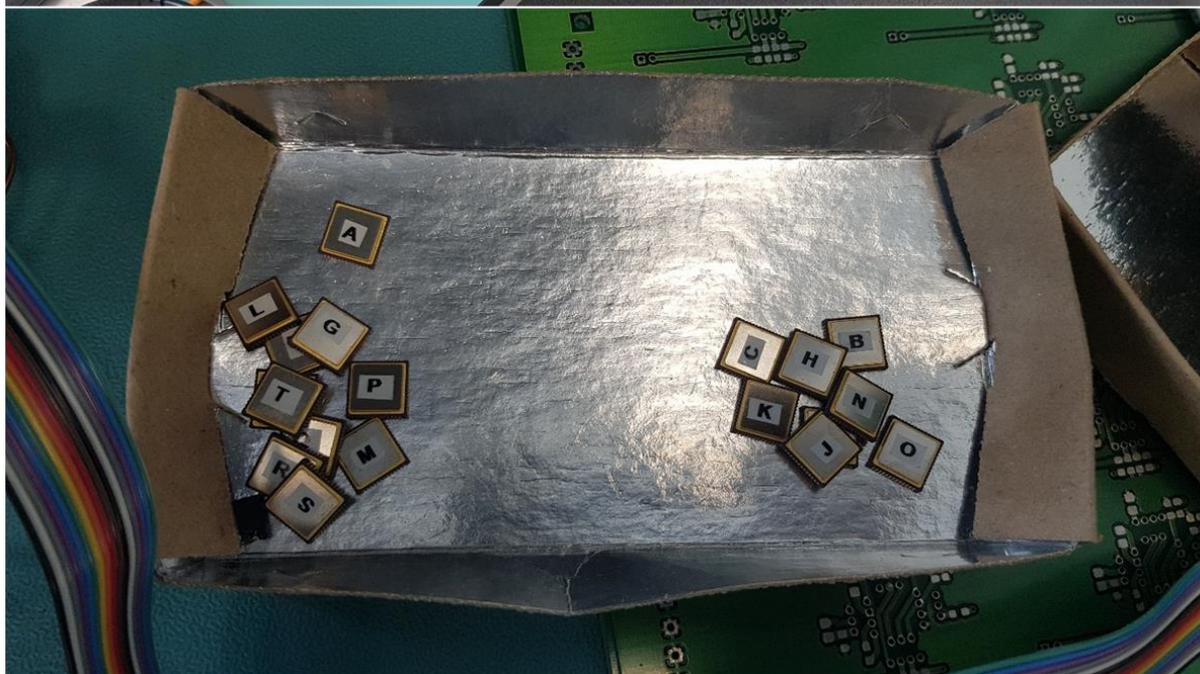
1. высокая термо и временная стабильность выходной частоты при нулевом входном сигнале (заземленных входах)
2. динамический диапазон преобразования – не менее 22 бит
3. непрерывность преобразования входного сигнала и недопустимость потери ни одного частотного импульса.

Для обеспечения требований 1 и 2 используется аналоговая [автокалибровка](#), которая выполняется автоматически при включении схемы, а также может запускаться в любой момент по команде через SPI интерфейс. Требование 3 обеспечено и гарантируется схемотехническими решениями. Удалось достичь довольно приличных параметров точности: типовая нелинейность преобразования составила 30 ppm, а смещение нуля менее 0.1 Hz при коэффициенте преобразования 200 kHz/V. Динамический диапазон преобразования: $f_{max}/f_{min} = 2 \cdot 1.25 \text{ МГц} / 0.3 \text{ Гц} \sim 8.33 \text{ млн.}$, что соответствует более 23 битам.

Есть только одно “но” – биполярное питание. Для обеспечения хорошей стабильности нуля (напряжение, которое соответствует ускорению 0g) необходимо использовать биполярное питание. Такое решение довольно эффективное – ведь когда 0g соответствует “земля”, система априори будет стабильной. Также это улучшает проектирование системы. В современных датчиках в качестве нуля используют половину питания $V_{dd}/2$, однако если значение напряжения на преобразователе будет отличаться от напряжения на датчике – мы автоматически получаем смещение, которое нужно дополнительно калибровать.

Наверное, для многих потребителей биполярное напряжение немного отпугивает, и мы как разработчики это понимаем. Возможно, в дальнейшем сделаем коммерческий вариант для МЭМСов (или интегрируем датчик в ПНЧ). Пока, конечно, это всего лишь планы, но уверен они увидят свет.

P.S. Нашел бонусные фотографии с процесса исследования образцов. Вообще это, как по мне, самое интересное в процессе разработки. Тебе дают в руки твое детище с пылу жару с завода, ты подаешь на него питание и скрестив пальцы ждешь – “работает или нет?”.



P.P.S. Кому понравилась тема датчиков, в будущем коллега из центра проектирования аппаратуры хотел бы рассказать про создаваемую инерциальную систему на основе МЭМС датчиков — [ВИНС](#).