

# Интеллектуальная роботроника

Курс лекций, семинаров и лабораторных работ  
“Сенсорные и управляющие системы роботов”

МГТУ “СТАНКИН”, кафедра «Сенсорные и  
управляющие системы» (СиУС) при Институте  
прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

Андреев Виктор Павлович, профессор, д.т.н.

Москва, 2022г.

## «Интеллектуальная роботроника»

Наука и практика разработки, производства и применения человеко-машинных, робототехнических систем (промышленных и сервисных), функционирование которых базируется на сенсорных и управляющих системах с элементами искусственного интеллекта и на распределённых микроэлектронных программно-аппаратных средствах

### Участники:

Российская Инженерная Академия

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН

Московский государственный технологический университет «Станкин»

(кафедра «Сенсорные и управляющие системы» при ИПМ им.Келдыша РАН)

Международная лаборатория «Сенсорика»

Международный институт новых образовательных технологий РГГУ

# **“ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РОБОТРОНИКА”**

Сенсорные и управляющие системы роботов

Тема 2а.

## **Сенсорные системы мобильных роботов**

(определения, датчики внутреннего состояния)

Лекция 3

# Органы чувств человека и робота

## 5 органов ЧУВСТВ человека:



6-й орган чувств – вестибулярный аппарат (чувство равновесия и положения в пространстве, ощущение ускорения и веса)

# Органы чувств человека и робота

## Восприятие через раздражение:

### ЧЕЛОВЕК

Информация о раздражителях, воздействующих на рецепторы органов чувств человека, передаётся одновременно по множеству каналов – нервов в центральную нервную систему – мозг. Там выполняется анализ поступающей информации и её идентификация одновременно множеством нейронов через синаптические связи (возникают ощущения). Реализуется параллельная обработка информации.

Параллельного действия

### РОБОТ

Информация о раздражителях, воздействующих на датчики, установленные на роботе (сенсорная система робота), поступают одновременно по множеству каналов в вычислительное устройство – компьютер или микропроцессор. Но там последовательно команда за командой в соответствии с алгоритмом выполняется анализ поступающей информации и её идентификация.

Последовательного  
действия

# Сенсорные системы мобильных роботов

**Датчики** (часто называемые измерительными преобразователями), или по-другому, **сенсоры** являются элементами многих систем автоматики – с их помощью получают информацию о параметрах контролируемой системы или устройства.

**Датчик** – это устройство, преобразующее физическое, химическое или иное воздействие в электрический сигнал.

**В зависимости от вида входной (измеряемой) величины различают:**

- датчики механических перемещений (линейных и угловых),
- пневматические,
- электрические,
- расходомеры,
- датчики скорости, ускорения,
- усилия,
- температуры,
- давления,
- яркости и др.

# Сенсорные системы мобильных роботов

**Датчик** – это устройство, преобразующее физическое, химическое или иное воздействие в электрический сигнал.

По виду выходной величины, в которую преобразуется входная величина, различают датчики:

- **неэлектрические** (например, пружинный безмен),
- **Электрические** (например, датчик-термопара).

По **принципу действия** датчики можно разделить на два класса:

- 1) **генераторные**,
- 2) **параметрические** (датчики-модуляторы).

**Генераторные** датчики осуществляют непосредственное преобразование входной величины в электрический сигнал.

**Параметрические** датчики входную величину преобразуют в изменение какого-либо электрического параметра ( $R$ ,  $L$  или  $C$ ) датчика.

# Сенсорные системы мобильных роботов

**Датчик** – это устройство, преобразующее физическое, химическое или иное воздействие в электрический сигнал.

**Различают три класса датчиков по типу представления выходной величины:**

1. Аналоговые датчики, т.е. датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал, пропорционально изменению входной величины.
2. Бинарные (двоичные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: "включено/выключено" (логические "0" или "1") – бит.
3. Цифровые датчики, генерирующие последовательность импульсов или двоичное слово – численное значение в двоичной форме, например, в байтах.



# Сенсорные системы мобильных роботов

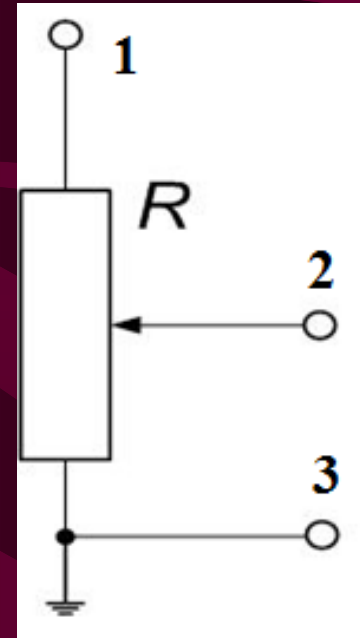
**1. Аналоговые датчики**, т.е. датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал, пропорционально изменению входной величины.

Пример: переменный резистор — на выходе датчика пропорционально положению ползунка изменяется сопротивление, имеющее непрерывное множество возможных значений, зависящих от величины сопротивления между контактами 1 и 2. При подаче напряжения на контакты 1 и 3 формируется электрический сигнал ( $U$ ), который также имеет непрерывное множество возможных значений.

В общем случае на выходе аналогового датчика может быть также ток ( $A$ ), пропорциональный входному воздействию, ёмкость ( $C$ ) или сопротивление ( $R$ ).

Для ввода аналоговых значений сигнала в цифровую ЭВМ требуется аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Встроенные АЦП, как правило, имеются у большинства микропроцессоров.



# Сенсорные системы мобильных роботов

2. Бинарные (двоичные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: "включено/выключено" (логические "0" или "1")

Двоичный выход — выходной сигнал может находиться в одном из двух состояний.

**Пример — выключатель (кнопка):**

Вкл. — логическая "1" ;

Выкл. — логический "0".

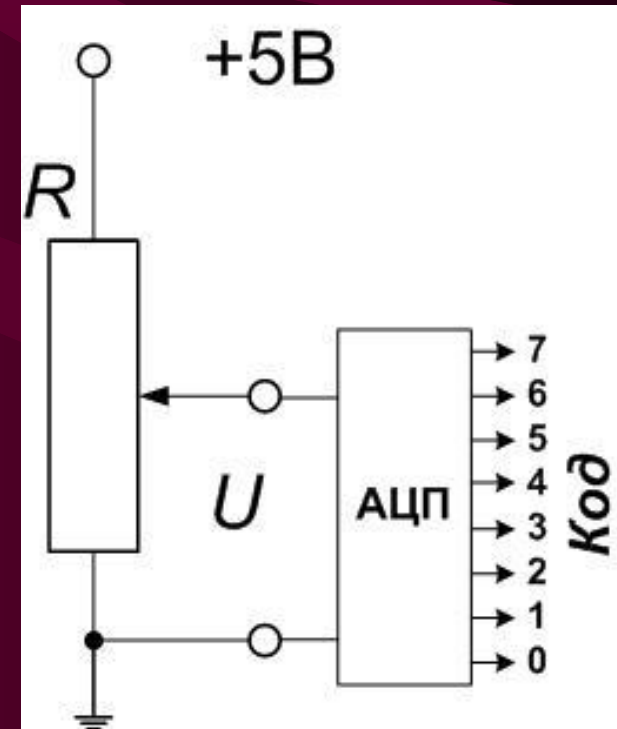


# Сенсорные системы мобильных роботов

## 3. Цифровые датчики, генерирующие последовательность импульсов или двоичное слово

Аналоговый выходной сигнал от датчика оцифровывается при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который, как правило, находится в корпусе датчика и не может быть отделён от датчика.

**Пример:**



# Сенсорные системы мобильных роботов

**Датчик** – это устройство, преобразующее физическое, химическое или иное воздействие в электрический сигнал.

## Требования, предъявляемые к датчикам:

- однозначная зависимость выходной величины от входной;
- стабильность характеристик во времени;
- высокая (достаточная) чувствительность;
- малые размеры и масса;
- отсутствие обратного воздействия на контролируемый процесс и на контролируемый параметр;
- работа при различных условиях эксплуатации;
- различные варианты монтажа.

# Сенсорные системы мобильных роботов

В мобильной робототехнике сенсорные устройства робота делятся на два класса:

1. Сенсорные устройства внутреннего состояния робота – *проприоцептивные* датчики.
2. Сенсорные устройства внешней среды робота – *экстероцептивные* датчики (дистанционные датчики).

Проприоцептивные датчики предназначены для организации контроля за внутренним состоянием системы. Например, моторные энкодеры колёс робота позволяют контролировать скорость движения робота, датчики контроля напряжения АКБ позволяют контролировать состояние системы энергообеспечения робота.

Значения показаний датчиков представляют собой *функцию состояния* робота  $z \{ z_p = z_p(x) \}$ . Состояние робота представляет собой *вектор* переменных, используемый для описания его текущего состояния (статуса).

Для случая простого движения на плоскости вектор  $z_p = (x, y, \varphi)$ . Это вектор линейных координат  $x, y$  и угла поворота  $\varphi$  робота.

# Сенсорные системы мобильных роботов

Экстероцептивные датчики обеспечивают контроль состояния внешней среды. С их помощью определяются характеристики окружающей робот среды и объектов манипулирования.

В основном, это дистанционные датчики, т.е. датчики, реагирующие на состояние внешней среды на расстоянии. К таким датчикам относятся телекамеры, ИК- и УЗ-датчики расстояния и т.п.

С помощью таких датчиков выполняется:

- обнаружение препятствий по ходу движения мобильного робота;
- распознавание объектов интереса;
- построение карты местности и т.п.

Измерения, выполняемые экстероцептивными датчиками, зависят как от *состояния* робота  $x$ , так и от *состояния* внешней среды  $y$  :  $z_d = z_d(x, y)$ , где все значения – векторы.

Описать состояние внешней среды можно, например, зная координаты стен, ориентиры (карта местности). Имея информацию о состоянии робота, можно определить в какой части внешнего мира он находится. Состояние робота может быть либо неопределённым, либо полностью известным.

# Сенсорные системы мобильных роботов

**В мобильной робототехнике используют, в основном, следующие датчики:**

- **Телекамеры** – как основной элемент систем технического зрения.
- **Ультразвуковые (УЗ) датчики** расстояния – для ориентации мобильного робота (МР) в пространстве.
- **Инфракрасные (ИК) датчики** расстояния – для ориентации мобильного робота в пространстве.
- **Лазерные дальномеры** – для анализа окружающего пространства при вычислении траектории движения мобильного робота.
- **Концевые датчики** – для ограничения диапазона механических перемещений МР и его актуаторов (например, манипулятора).
- **Одометры** – для исчисления пути, пройденного мобильным роботом.
- **Акселерометры** – предназначены для определения параметров ускорения при движении мобильного робота.
- **Гироскопы** – для определения ориентации МР в пространстве.

# Сенсорные системы мобильных роботов

## Некоторые виды датчиков, широко используемых в робототехнике (датчики внутреннего состояния)



# Сенсорные системы мобильных роботов

## Концевые, контактные датчики (концевые выключатели)

Это регулируемые механические датчики, размыкающие или замыкающие электрическую цепь в определённом положении актуатора. Нормально разомкнутый датчик при срабатывании замыкает электрическую цепь, а нормально замкнутый — размыкает. Устанавливаются как на линейно перемещающемся, так и на вращающемся элементе. Регулировка концевых выключателей позволяет ограничить длину хода актуатора с обеих сторон до требуемого диапазона.

### *Концевой микропереключатель.*

Датчик ("микрик") представляет собой обыкновенный механический переключатель. В мобильных роботах обычно устанавливается на бамперах. При механическом контакте с препятствием происходит замыкание/размыкание контактов.

Основной недостаток таких микропереключателей заключается в их низкой надёжности вследствие окисления контактов со временем. Также контакты могут «спекаться» при высоком коммутируемом напряжении вследствие возникновения искры, присутствует дребезг контактов.



# Сенсорные системы мобильных роботов

## Концевые, контактные датчики (концевые выключатели)

### Геркон.



Это электромеханическое коммутационное устройство, изменяющее состояние электрической цепи при воздействии постоянного магнитного поля, например, от постоянного магнита. Представляет собой нормально замкнутые или нормально разомкнутые контакты, помещённые в стеклянную ампулу, заполненную нейтральным газом, препятствующим окислению контактов и возникновению искры.

Геркон, как правило, используется в системах охранной сигнализации — магнит устанавливается на дверь, а геркон — на косяк двери. Пока дверь закрыта, контакты геркона замкнуты, при открывании двери контакты размыкаются и срабатывает сигнализация.

Недостаток — срабатывают на магнитное поле, что затрудняет их установку на металлические конструкции (железо, сталь).

# Сенсорные системы мобильных роботов

## Концевые, контактные датчики (концевые выключатели)

### *Концевой бесконтактный датчик.*



Датчик индуктивного, емкостного (и иного) типа намного надёжнее перечисленных изделий вследствие отсутствия механических контактов. Собственно чувствительный элемент с обрабатывающей электроникой помещён в герметичный корпус, из которого выходят электрические провода. Реагирует на изменение окружающего электромагнитного поля, изменяющего собственную индукцию или собственную ёмкость датчика. В зависимости от конструкции устройства, эти изменения приводят к изменению, например, резонансной частоты колебательного контура. При изменении амплитуды колебательного процесса происходит замыкание/размыкание электронного ключа.

Недостаток – узкие условия применения и дороговизна.

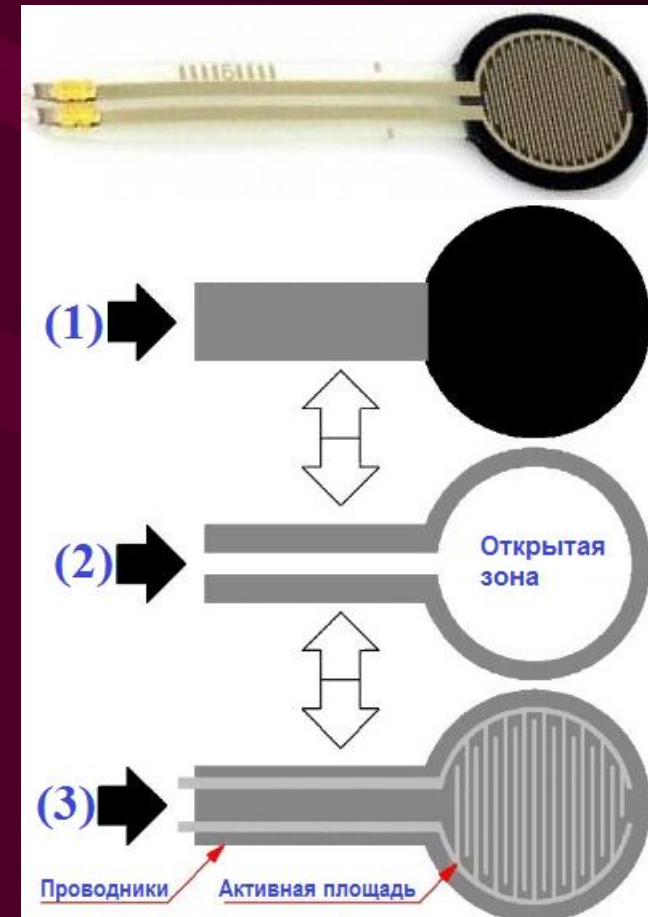
# Сенсорные системы мобильных роботов

## Концевые, контактные датчики

### Резистивный датчик силы (FSR 402: Sparkfun, США)

Представляет собой переменный резистор, сопротивление которого зависит от силы, приложенной к чувствительному элементу.

Конструктивно состоит из фиксированной подложки с печатным полупроводником (1), изоляционной клеевой прокладки специальной формы (2) и фиксированной подложки с печатными встречными электродами (3) – это и есть тот самый чувствительный элемент, на который необходимо воздействовать путём нажатия. Следовательно, чем больше будет оказываться давление на чувствительный элемент, тем больший процент печатных проводников начнёт взаимодействовать с полупроводниковой подложкой. Всё это приведёт к последовательному уменьшению сопротивления резистивного датчика.



# Сенсорные системы мобильных роботов

## Концевые, контактные датчики

### Резистивный датчик силы (FSR 402: Sparkfun, США)

Основным недостатком резистивных датчиков давления является их невысокая точность и нелинейность функции преобразования.

Поэтому применять подобные устройства для измерения точных величин не рекомендуется. Однако, оценить сам факт нажатия или степень давления на сенсор вполне возможно. На рисунке приведён график, взятый из технической документации. Он наглядно позволяет оценить нелинейную зависимость изменения сопротивления от силы нажатия на чувствительный элемент датчика.



С увеличением давления, сопротивление датчика начинает уменьшаться, но это процесс в каждой фазе происходит по-разному.



# Сенсорные системы мобильных роботов

## Концевые, контактные датчики

### Резистивный датчик силы (FSR 402: Sparkfun, США)

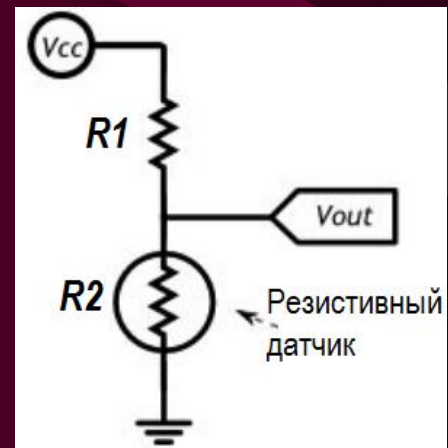
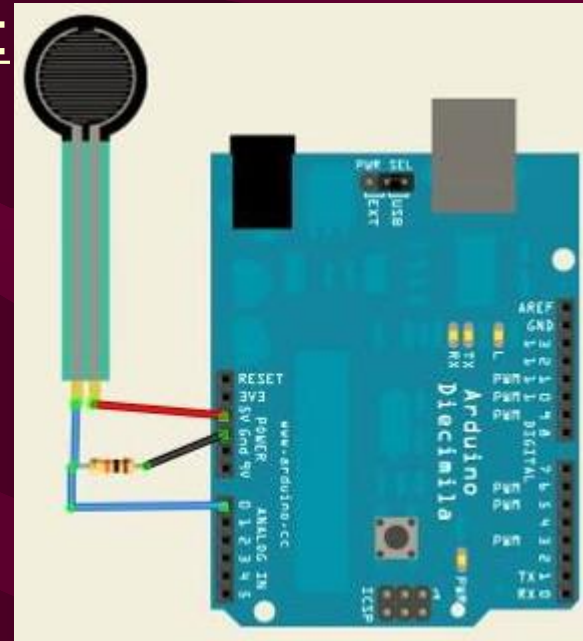
#### Подключение к микроконтроллеру Arduino:

Для того, чтобы получить сигнал с резистивного датчика силы нужно использовать делитель напряжения. Выходное напряжение зависит от соотношения сопротивления резисторов.

Используя закон Ома, можно вычислить выходное напряжение, это напряжение, которое падает на резисторе  $R2$ .

#### Области применения

- в качестве концевиков в различных механизмах
- подобие сенсорной кнопки
- сенсоры схватов
- регистратор присутствия груза на конвейере
- датчик удара
- бытовая техника
- и т.п.



# Сенсорные системы мобильных роботов

Концевые, контактные датчики (концевые выключатели)

*Схема подключения к микропроцессору:*

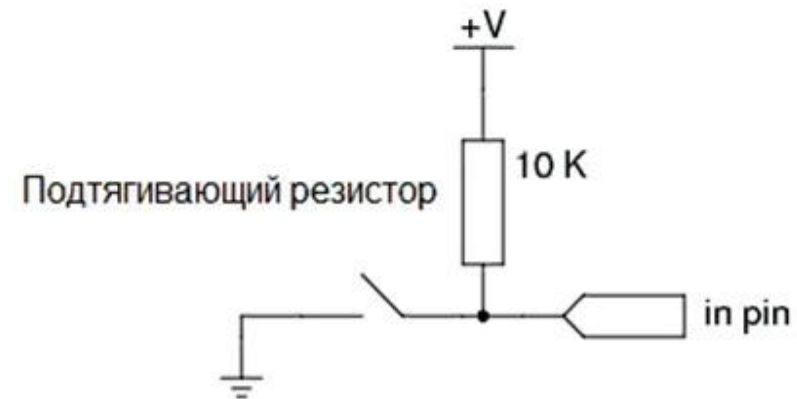
## Неверное подключение:

Возможность подачи высокого напряжения (больше допустимого) непосредственно на вход может привести к выходу из строя микропроцессора.

## Правильное подключение:

при подаче высокого напряжения ток по входу ограничивается «подтягивающим» резистором с большим сопротивлением.

### Варианты подключения кнопок



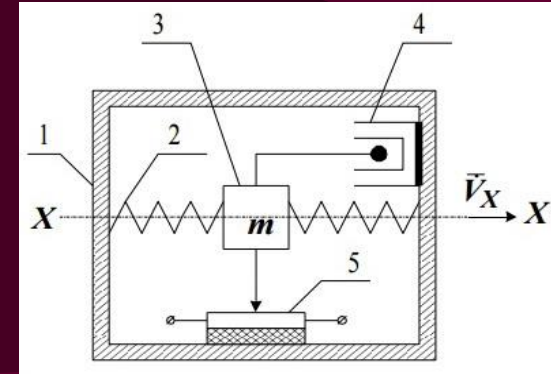
# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

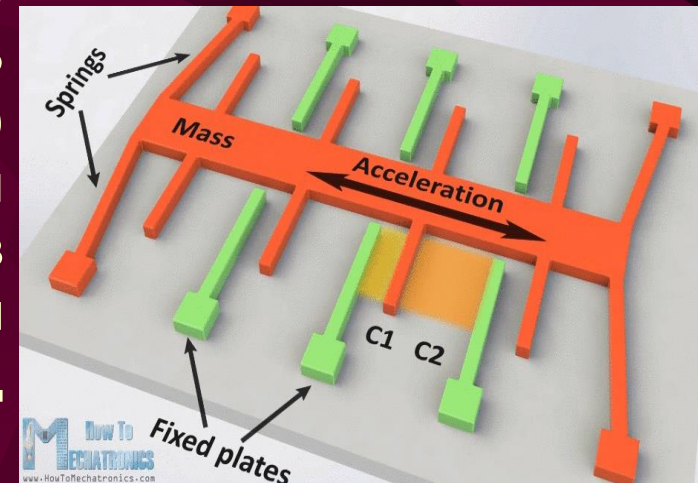
### Акселерометр

Датчик ускорения, измеряющий проекцию кажущегося ускорения (разности между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением). Как правило, представляет собой чувствительную массу, закреплённую в упругом подвесе. Отклонение массы от её первоначального положения несёт информацию о величине этого ускорения

Во время движения под воздействием ускорения или замедления масса (*Mass*) начинает перемещаться (*Acceleration*). В результате изменяются ёмкости (*C1* и *C2*) между электродами, изменение измеряется микропроцессором и преобразуется в выходной сигнал. При достижении нужной скорости или остановке масса под воздействием пружин (*Springs*) возвращается в исходную позицию и остаётся неподвижной при постоянной или нулевой скорости ( $C1 = C2$ ).



- 1 — корпус;
- 2 — пружины подвеса;
- 3 — масса;
- 4 — демпфер;
- 5 — потенциометр.





# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

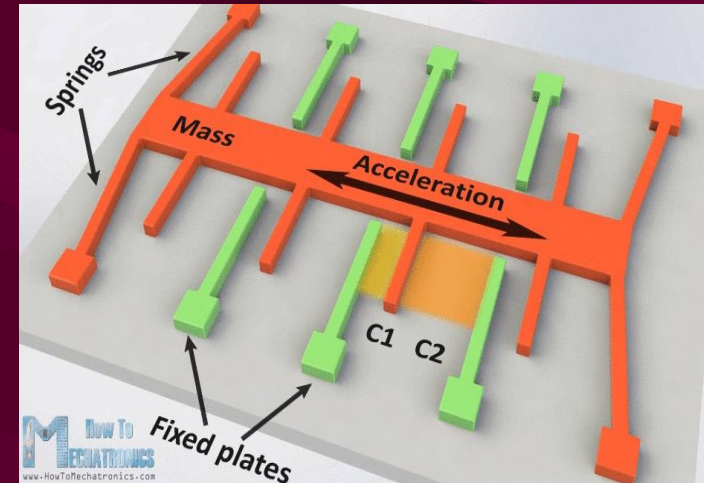
### Акселерометр

По конструктивному исполнению акселерометры подразделяются на:

- однокомпонентные,
- двухкомпонентные,
- трёхкомпонентные.

Соответственно, они позволяют измерять ускорение вдоль одной, двух и трёх осей.

Трёх-осевой акселерометр измеряет проекции ускорения на оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Если прибор размещен строго горизонтально и не движется, то проекции ускорения силы тяжести на оси  $X$  и  $Y$  равны нулю. Сила тяжести воспринимается только чувствительными элементами вертикальной оси  $Z$ .

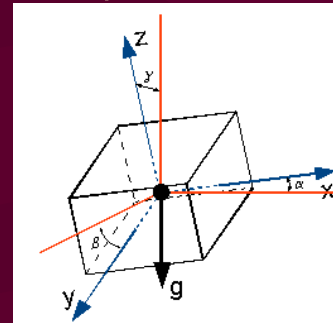
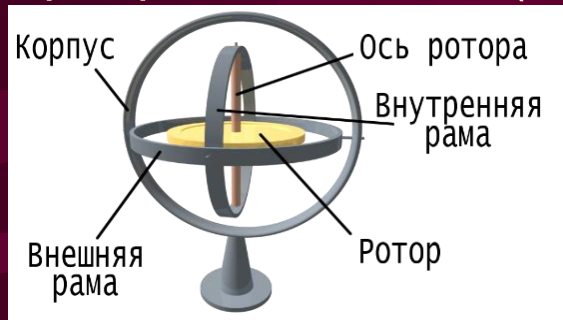
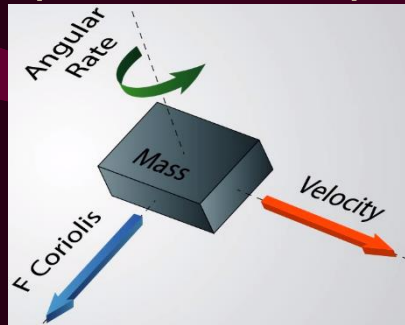
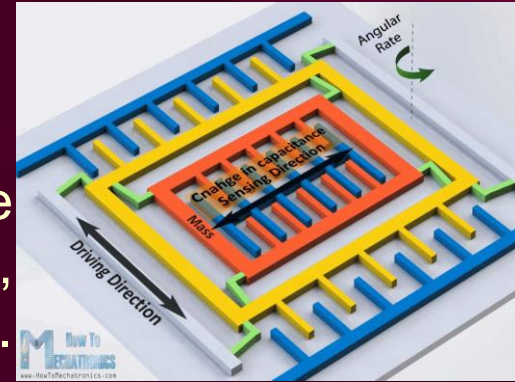


# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

### Гироскоп

Устройство, способное реагировать на изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчета. Простейший пример гироскопа – юла (волчок).



$$\gamma = \arctan\left(\frac{A_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2}}\right)$$
$$\alpha = \arctan\left(\frac{-x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right)$$
$$\beta = \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right)$$

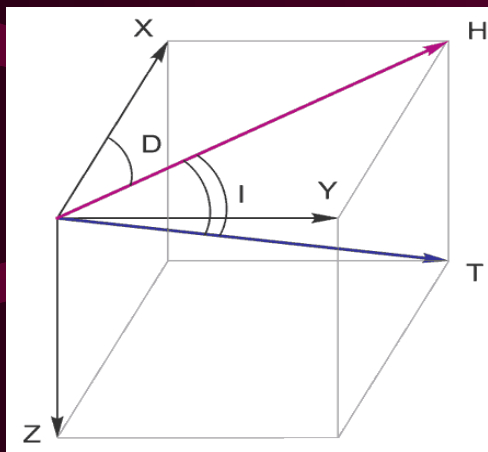
Трёх-осевой гироскоп – датчик поворота объекта, позволяющий вычислить углы поворотов по осям X, Y, Z благодаря измерению угловых скоростей через эффект Кориолиса. Если устройство постоянно движется в определенном направлении с определенной скоростью с приложением внешней угловой скорости, **Сила Кориолиса** вызовет перпендикулярное смещение **массы** (аналогично акселерометру), что повлечет измеряемые изменения на конденсаторе, которые будут соответствовать определенной скорости вращения.

# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

### Магнитометр

Прибор для измерения характеристик магнитного поля и магнитных свойств материалов. В зависимости от измеряемой величины различают приборы для измерения напряжённости поля, направления поля, градиента поля, магнитной индукции, магнитного потока, магнитной проницаемости, магнитной восприимчивости, магнитного момента.



Составляющие магнитного поля Земли



Сравнение неискажённого и искажённых полей

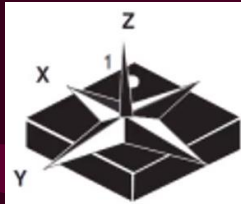
Магнитное поле Земли в каждой точке пространства характеризуется вектором напряженности  $T$ , направление которого определяется тремя составляющими по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  в прямоугольной системе координат.

# Сенсорные системы мобильных роботов

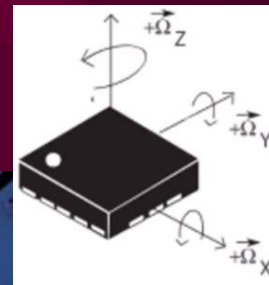
## Датчики внутреннего состояния

### Акселерометр, гироскоп и магнитометр

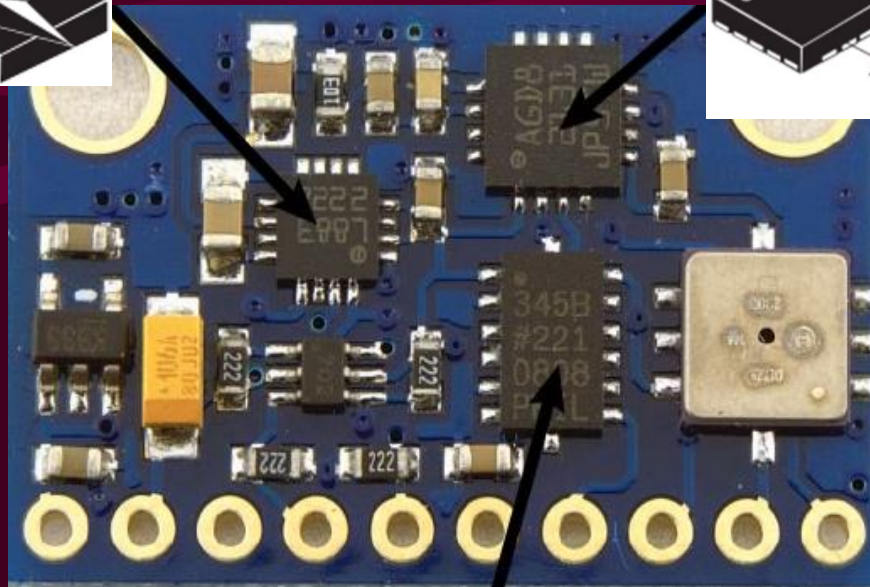
Это датчики ориентации робототехнического устройства в пространстве. Обычно все они объединяются в одну микроэлектромеханическую систему (МЭМС) – комплексный датчик.



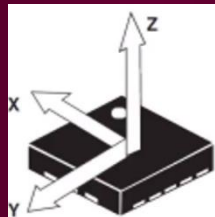
Магнитометр  
MC5883L



Гироскоп  
L3G4200D



Комплексный  
датчик ориентации  
GY-80



Акселерометр  
ADXL235



# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

### Акселерометр, гироскоп и магнитометр

Это датчики ориентации робототехнического устройства в пространстве. Обычно все они объединяются в одну микроэлектромеханическую систему (МЭМС) – комплексный датчик, например, GY-80.

Датчик GY-80 состоит из 4 датчиков:

- трёхосевой гироскоп ST Microelectronics L3G4200D,
- трёхосевой акселерометр Analog Devices ADXL345,
- трёхосевой магнитометр Honeywell MC5883L,
- барометр/термометр Bosch BMP085.



Пример подключения датчика GY-80.

Все эти датчики подключены к стандартной шине I2C. Для работы с этой шиной используется стандартная для Arduino библиотека Wire.

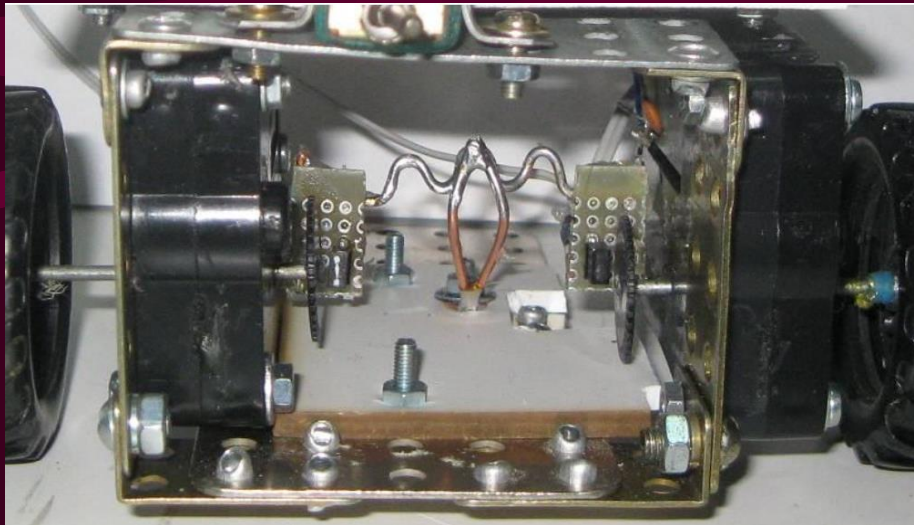
# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

### Оптический одометр

Прибор для измерения количества оборотов колеса или оси двигателя. При помощи одометра может быть измерен пройденный транспортным средством (ТС) путь.

Если одометры устанавливаются на оси колёс ТС, то исчисление пути определяется по количеству импульсов, сформированных на выходе одометра.



Но обычно одометр устанавливают на ось двигателя и вычисляют сначала среднюю скорость вращения (за счёт интегрирования за некоторый период, а затем дифференцирования), а затем уже пройденный путь.

# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

### Оптический одометр

### Принцип работы оптического одометра



Если одометры устанавливаются на оси колёс МР, то исчисление пути определяется по количеству импульсов, сформированных на выходе одометра.

Точность и, соответственно, количество прозрачных «щелей» в кодовом диске зависит от апертуры канала приёма оптического датчика.

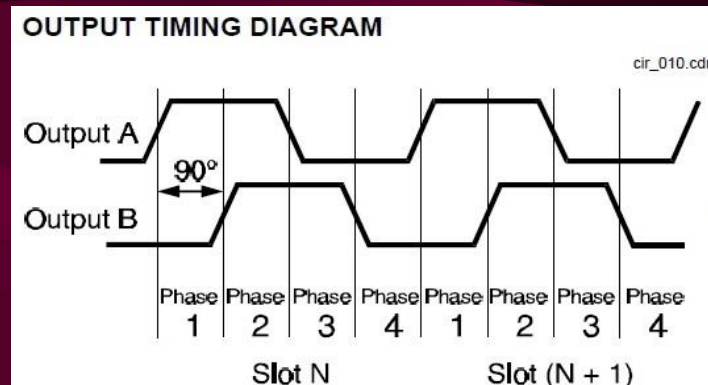
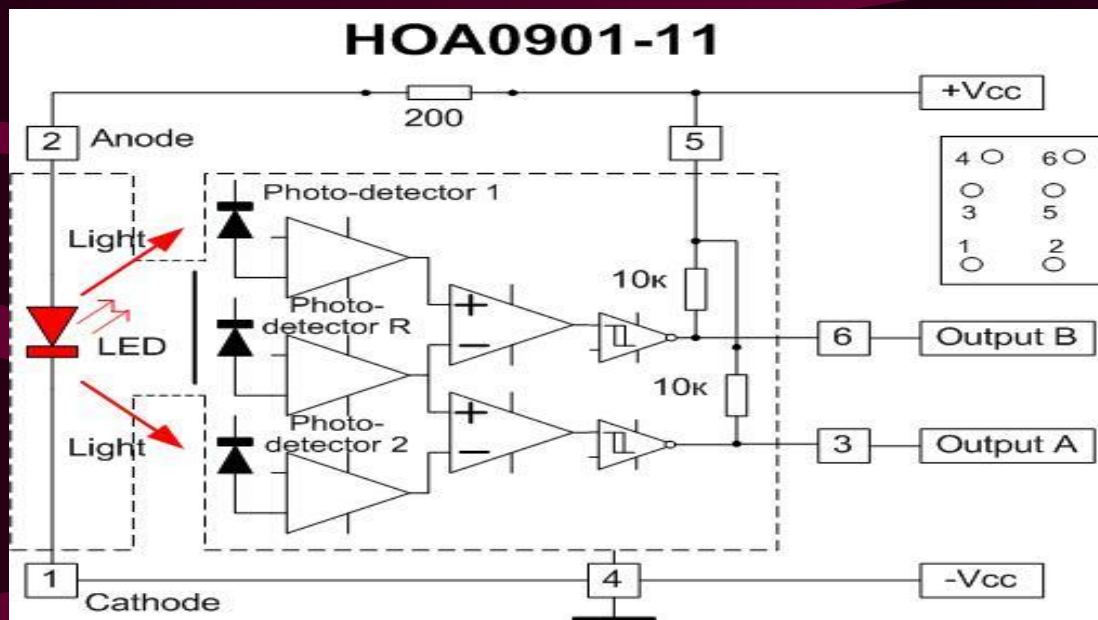
Существуют одометры, работа которых основана на эффекте Холла. Во многих моделях автомобилей используются именно такие одометры.

# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

### Оптический одометр

### Принцип работы оптического одометра



Направление вращения определяется по разности фаз между импульсами на выходах A и B.

ИК-излучение от светодиода LED через прозрачные «окна» кодового диска поступает на фотоприёмники Photo-detector 1, Photo-detector 2 и Photo-detector R. Электрические сигналы с фотоприёмников усиливаются операционными усилителями и поступают на триггеры Шмидта. За счёт *гистерезиса* по входу триггеров Шмидта выполняется фильтрация шума, и на их выходах формируются импульсы Output A и Output B с «резкими» фронтами.



# Сенсорные системы мобильных роботов

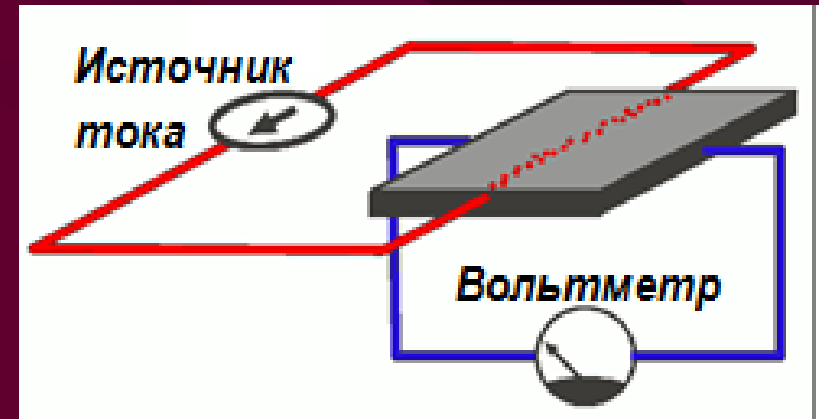
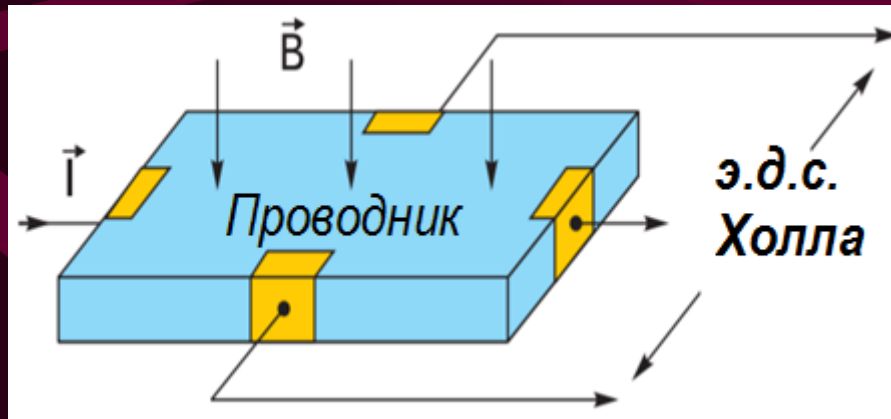
## Датчики внутреннего состояния

### Одометр на эффекте Холла

#### Эффект Холла

Если твердотельный проводник, по которому протекает *электрический ток*  $I$ , поместить в *магнитное поле*  $B$ , то в нём возникает *электрическое поле* в направлении, перпендикулярном направлению тока и магнитного поля (и соответствующая разность потенциалов  $E$ ).

Причиной появления эффекта Холла является отклонение заряженных частиц, движущихся в магнитном поле под действием силы Лоренца.

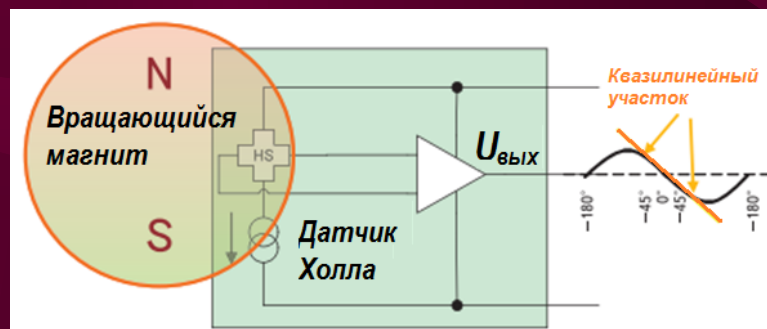
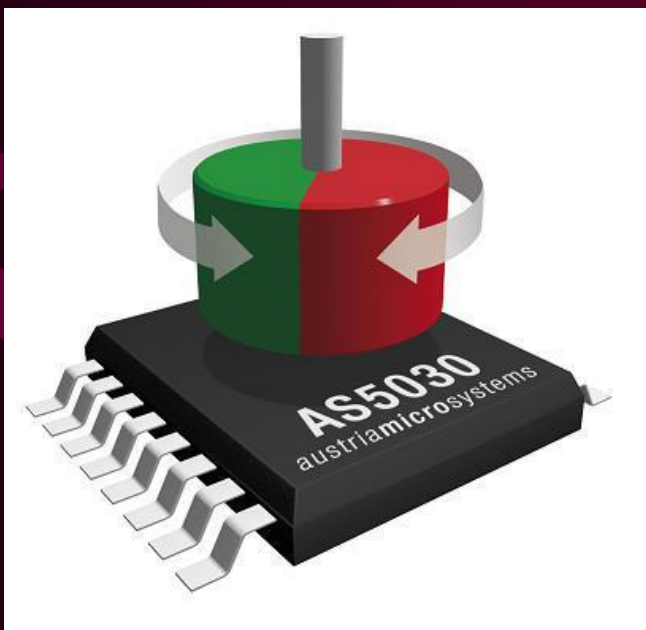


# Сенсорные системы мобильных роботов

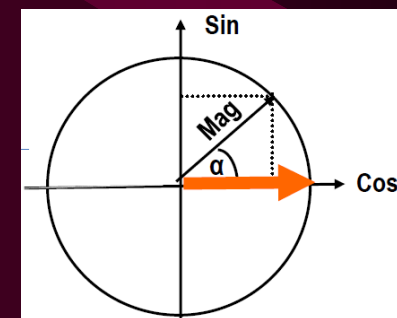
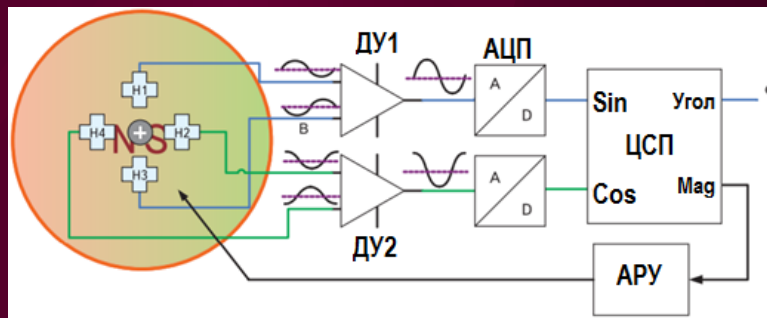
## Датчики внутреннего состояния

### Датчик угла поворота на основе эффекта Холла

Система измерения угла состоит из микросхемы и маленького магнита, размещенного на небольшом расстоянии над микросхемой. Датчики Холла, размещенные на кристалле микросхемы, фиксируют напряженность магнитного поля магнита, а встроенный в микросхему цифровой сигнальный процессор (DSP) рассчитывает абсолютное значение угла поворота магнита.



Простейший датчик угла поворота



# Сенсорные системы мобильных роботов

## Датчики внутреннего состояния

### Датчик угла поворота на основе эффекта Холла

Преимущества датчиков серии AS5000:

- Компактность (5,3 x 6,2 мм) и относительная дешевизна (588Р) датчика
- высокое быстродействие (частота дискретизации 10 кГц)
- высокая надёжность, обусловленная отсутствием механических контактов
- широкий диапазон рабочих температур от -40°C до +125°C

Недостатки:

- чувствительность к магнитным полям, создаваемым посторонними объектами

Области применения датчиков Холла:

- ❖ измерительная техника
- ❖ радиоэлектронная аппаратура
- ❖ датчики тока с гальванической развязкой
- ❖ бесконтактные датчики частоты вращения
- ❖ датчики угла поворота

# Сенсорные системы мобильных роботов

## Литература по теме:

Андреев В.П., Ким В.Л., Кувшинов С.В. и др. Интеллектуальная робототроника. Проектно-исследовательская деятельность учащихся и студентов с использованием модульных коллаборативных робототехнических систем // Учебно-методическое пособие для организации дополнительного образования. – М. : Изд-во «ОнтоПринт», 2020. – 424 с. (Имеется в библиот. СТАНКИН)

# “ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ РОБОТРОНИКА”

Сенсорные и управляющие системы роботов

Тема 2а

**Сенсорные системы мобильных роботов**

(определения, датчики внутреннего состояния)

ВОПРОСЫ?

Андреев Виктор Павлович, профессор, д.т.н.

*andreevvipa@yandex.ru*

Москва, 2022г.