

МЕХАТРОНИКА

Литература

- Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб, пособие для студентов вузов. - М.: Машиностроение, 2006. - 256 с.
- Жавнер В.Л. Мехатронные системы: учеб. пособие / В. Л. Жавнер, А. Б. Смирнов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 131 с.
- Введение в мехатронику: уч. пособие / А.И. Грабченко, В. Б. Клепиков, В.Л. Доброскок и др. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – 264 с.
- THE MECHATRONICS H A N D B O O K. Editor-in-Chief Robert H. Bishop. The University of Texas Austin, Texas

Чигарев, А. В.

Введение в мехатронику : учебное пособие / А. В. Чигарев, К. Циммерманн, В. А. Чигарев. – Минск : БНТУ, 2013. – 388 с.
SBN 978-985-550-008-8.

Мехатроника

"МЕХАТРОНИКА" = "МЕХА ника" + "элек ТРОНИКА"

Область науки и техники, основанная на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей, вычислительных устройств (ЭВМ и микропроцессоры).

Мехатронная система – единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта.

Направление подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»

Дисциплины

Теория вероятностей и случайных процессов. Основы автоматического управления

Теория идентификации

Электроника

Микроконтроллерная техника

Преобразователи информации

Электронные устройства мехатронных и робототехнических систем

Программное обеспечение мехатронных и робототехнических систем

Основы технического зрения

Конструирование мехатронных модулей

Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование

Место мехатроники



Наиболее ярким примером мехатронных устройств являются роботы

Робототехника - область науки и техники, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, построенных на базе мехатронных модулей (информационно-сенсорных, исполнительных и управляющих). Роботы и робототехнические системы предназначены для выполнения рабочих операций от микро до макро размерностей, в том числе с заменой человека на тяжелых, утомительных и опасных работах.

В чем разница?

➤ *Роботизация (робототехника).* В середине второй половины XX века формируется новое научное направление — роботизация машин и промышленного оборудования, т.е. промышленная робототехника. Роботизация — это полная или частичная замена человека-оператора, осуществляющего управление многомерным комплексом, системой или объектом, на многоканальное техническое средство, которое в зависимости от текущих технологических процессов самостоятельно выбирает программы управления, эквивалентные действиям человека-оператора в этих конкретных условиях.

➤ **Мехатронизация (мехатроника)** — это быстро и динамично развивающееся научно-техническое направление («техногалактика»), включающее в себя исследования, разработку, создание, внедрение, отладку, эксплуатацию и обслуживание технических комплексов, машин и агрегатов, управление которыми осуществляется с помощью бортовых микропроцессорных информационно-управляющих систем.

Применение мехатроники

- машиностроение (автоматизированное машиностроение, станкостроение, электронное и энергетическое машиностроение и др.);
- транспортное машиностроение (авиакосмическая техника, автотракторное машиностроение, железнодорожный транспорт, нетрадиционные транспортные средства и др.);
- робототехника различного назначения;
- приборостроение (контрольно-измерительные устройства и машины, офисная техника, навигационные приборы, вычислительная техника);
- микроэлектромеханические системы (микромашины, микророботы и др.);
- нанотехнологии (микроскопы, зонды, машины микромеханической обработки поверхностей деталей и др.);
- бытовая техника (автономные пылесосы, швейные, стиральные, посудомоечные машины, холодильные установки);
- медицинское и спортивное оборудование (биоэлектрические и экзоскелетные протезы для инвалидов, тренажеры, массажеры и вибраторы и др.);
- фото- и видеотехника (устройства фокусировки видеокамер, проигрыватели видеодисков и др.);
- полиграфические машины;
- интеллектуальные аттракционы для шоу-индустрии.

Происхождение термина

Термин «мехатроника» (Mechatronics) введен в 1969 г. японским инженером Тецуро Мори (фирма Yaskawa Electric) применительно к механическим системам с электронным управлением.

- Этот термин был им введен для обозначения осуществлявших приведение в движение рабочих органов машин и агрегатов, электромеханических устройств с электродвигателями, управляемыми электронными полупроводниковыми преобразователями и представлял комбинацию слов «механика» и «электроника».
- В СССР, Германии и в некоторых других странах устройства преобразования электрической энергии в механическую для приведения в движение рабочих органов (исполнительных механизмов), начиная с 30-х годов прошлого столетия получили название «электрический привод». Этот термин в Японии и США не был распространен, что обусловило введение для характеристики данного класса устройств нового определения. Первоначально термин «мехатроника» был зарегистрирован как торговый знак.

Определение

Мехатроника - это область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем и машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями

Цель

Цель мехатроники как области науки и техники заключается в создании качественно новых модулей движения, а на их основе – движущихся интеллектуальных машин и систем.

Предмет

Предметом мехатроники являются процессы проектирования и производства модулей, машин и систем для реализации заданных функциональных движений.

Функциональное движение мехатронной системы предусматривает ее целенаправленное механическое перемещение, которое координируется с параллельно управляемыми технологическими и информационными процессами.

Метод

Метод мехатроники основан на системном сочетании таких ранее обособленных естественно-научных и инженерных направлений, как точная механика, микроэлектроника, электротехника, компьютерное управление и информатика.

Синергия (греч.) - это совместное действие, направленное на достижение общей цели.

Интерпретации понятия «мехатроника»

"... область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем и машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями"

- "...междисциплинарная инженерная область, связанная с проектированием изделий, функции которых основаны на интеграции механических и электронных компонентов, координируемых системой управления".
- "... синергетическое сочетание точной механики, электронных систем управления и информационных технологий для проектирования, производства и эксплуатации интеллектуальных автоматических систем".
- "... новая область науки и техники, посвященная созданию и эксплуатации машин и систем с компьютерным управлением движением, которая базируется на знаниях в области механики, электроники и микропроцессорной техники, информатики и компьютерного управления движением машин и агрегатов"

- "... область науки о механических, энергетических и информационных процессах и их системном взаимодействии в машинах с компьютерным управлением, обеспечивающим получение новых свойств самой машины и качества исполнительных движений".
- "... область техники, обеспечивающая реализацию жизненного цикла мехатронных объектов, вплоть до интеллектуальных машин".
- "... область науки, которая сочетает основы механических, электронных и компьютерных инженерных наук".

- "... область науки, посвященная анализу исполнительных состояний мехатронных объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов".
- "... технология, которая объединяет механику с электронными и информационными технологиями для получения, как функционального объединения, так и пространственной интеграции в компонентах, модулях, изделиях и системах".
- "... философия проектирования, которая использует синергетическую интеграцию механики, электроники и компьютерных технологий для производства качественно новых изделий, процессов и систем".
- "... метод принятия сложных решений для функционирования физических систем" .
- "... идеология пространственного и временного интегрирования функций в инженерных устройствах и технологических процессах" .

Методологические подходы

Классы машин

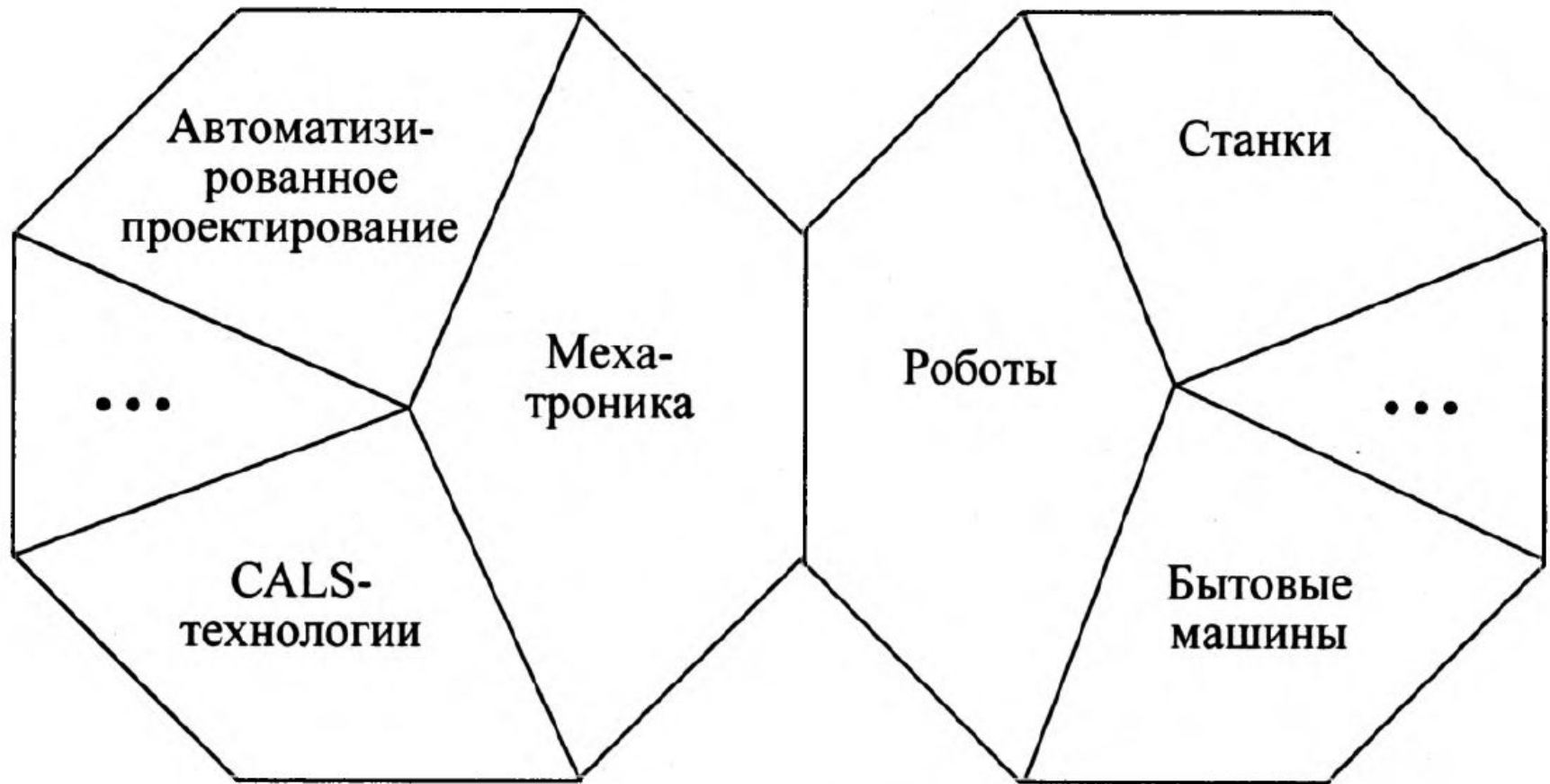


Рис. 1.23. Предметные области мехатроники и робототехники

CALS-технологии (англ. Continuous Acquisition and Life cycle Support — непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий)

Мехатроника и робототехника

- Мехатроника изучает новый методологический подход к созданию модулей и машин с качественно новыми характеристиками. Мехатронный подход охватывает все основные фазы жизненного цикла машины (проектирование, производство, эксплуатация и т.д.) и может быть применен в системах различного назначения, в том числе в манипуляционной технике и робототехнических системах.
- Роботы же представляют собой один из современных классов машин с компьютерным управлением движением. Проектирование и производство роботов базируется не только на мехатронных принципах и технологиях, но требует привлечения и других методологических подходов: методов технической кибернетики и бионики, САПР и CALS-технологий.

Мехатронная система

Состоит из нескольких агрегатов или агрегата и ряда отдельных модулей, т.е. из объектов одинаковых или разных низших уровней.

Система –совокупность компонентов, каким-либо образом связанных между собой: подчиненных определенному отношению, зависимости или закономерности; действующих как одно целое.

Примеры: гибкие производственные системы или современные автомобили.

Терминология

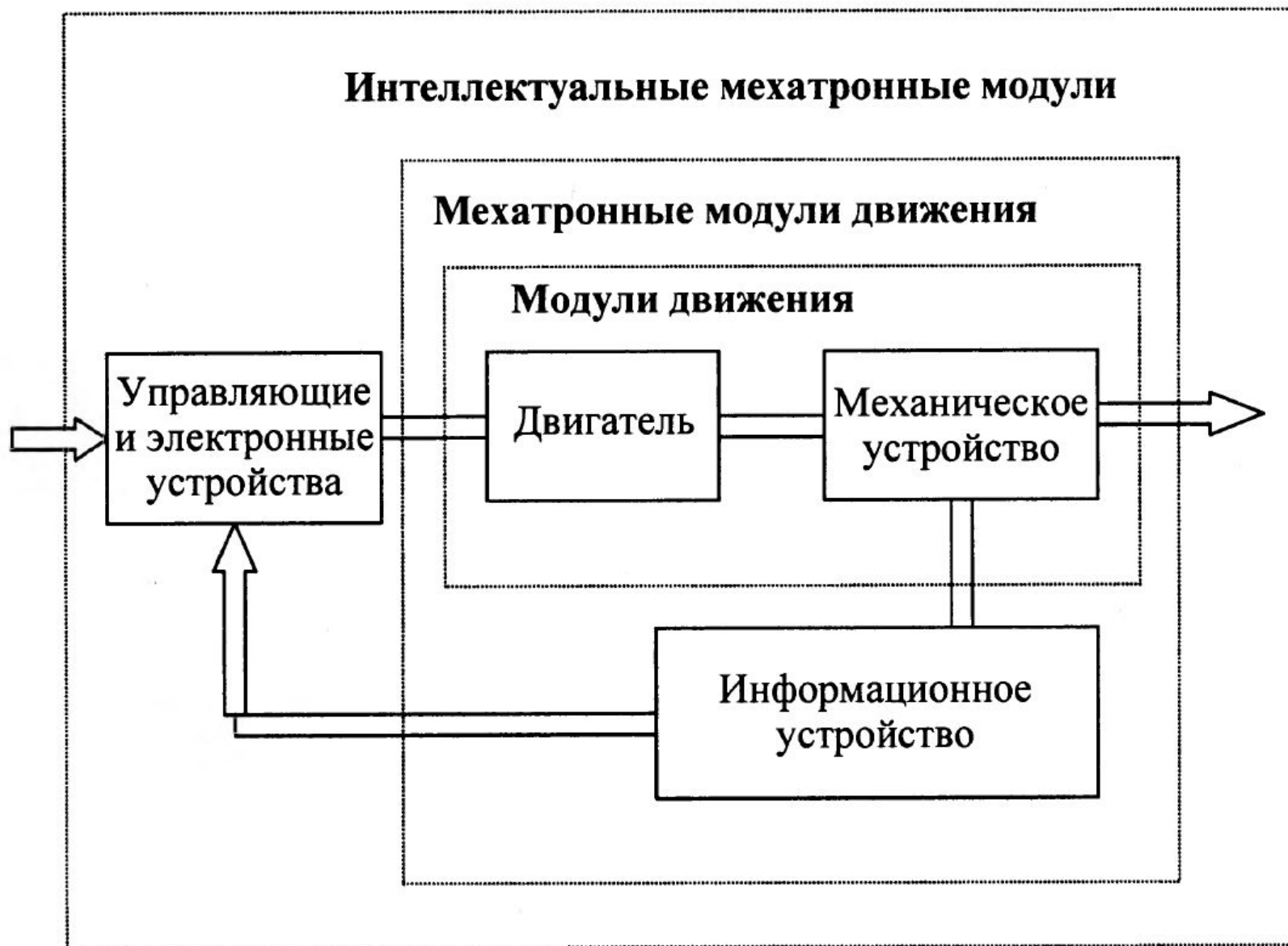
- «мехатронный объект» – это обобщающее понятие, которое включает в себя мехатронные систему, агрегат, модуль или узел.

Мехатронные модули

"Модуль - унифицированная функциональная часть машины, конструктивно оформленная как самостоятельное изделие«

Мехатронный модуль движения— унифицированный мехатронный объект, имеющий автономную документацию и предназначенный, как правило, для реализации движений по одной координате.

Модули мехатроники



- **Мехатронный модуль движения (ММД)** - конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя управляемый двигатель, механическое и информационное устройства.
 - Информационное устройство включает датчики обратной связи и информации, а также электронные блоки для обработки и преобразования сигналов. Примерами таких датчиков являются фотоимпульсные датчики (инкодеры), дающие информацию о скорости движения и угловом перемещении, оптические линейки, вращающиеся трансформаторы и т.д.

- **Модуль движения (МД)** - конструктивно и функционально самостоятельное изделие, в котором конструктивно объединены **управляемый двигатель и механическое устройство**.
- наиболее часто используются электрические двигатели - асинхронные и синхронные электромашины, двигатели постоянного тока, шаговые и пьезоэлектрические двигатели и др.
- в состав механического устройства могут входить разнообразные редукторы, преобразователи движения, вариаторы, ограничительные и предохранительные элементы.

Интеллектуальный мехатронный модуль (ИММ)

конструктивно и функционально самостоятельное изделие, построенное путем синергетической интеграции двигательной механической, информационной, электронной и управляющей частей.

В конструкцию ИММ дополнительно встраиваются управляющие и электронные устройства, что придает этим модулям интеллектуальные свойства. К этой группе можно отнести: цифровые вычислительные устройства (микропроцессоры, сигнальные процессоры и т.п.), электронные силовые преобразователи, компьютерные устройства

Мехатронные узлы

Мехатронный модуль –

унифицированный мехатронный объект, имеющий автономную документацию и предназначенный, как правило, для реализации движений по одной координате.

Примеры: шпиндельная бабка, поворотный стол.

Узел принципиально отличается от модуля тем, что он не унифицирован.

Мехатронный агрегат

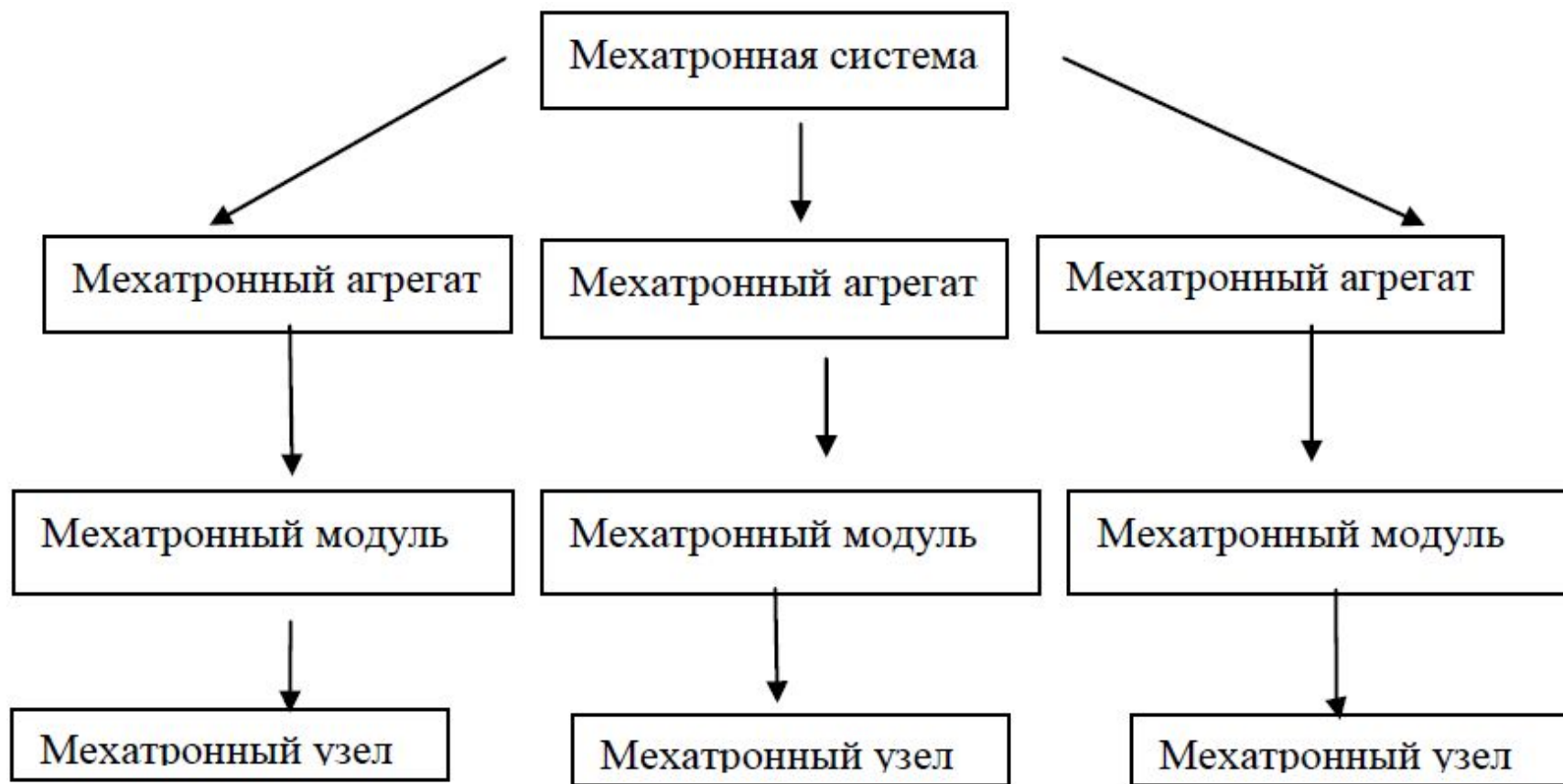
Мехатронный агрегат – это совокупность мехатронных модулей, предназначенная для выполнения группы однотипных функций (например, многокоординатная измерительная машина, а также многокоординатный столик микроскопа, если он состоит из модулей). Включает в себя несколько модулей, предназначенных для реализации заданных движений в условиях взаимодействия с внешней средой.

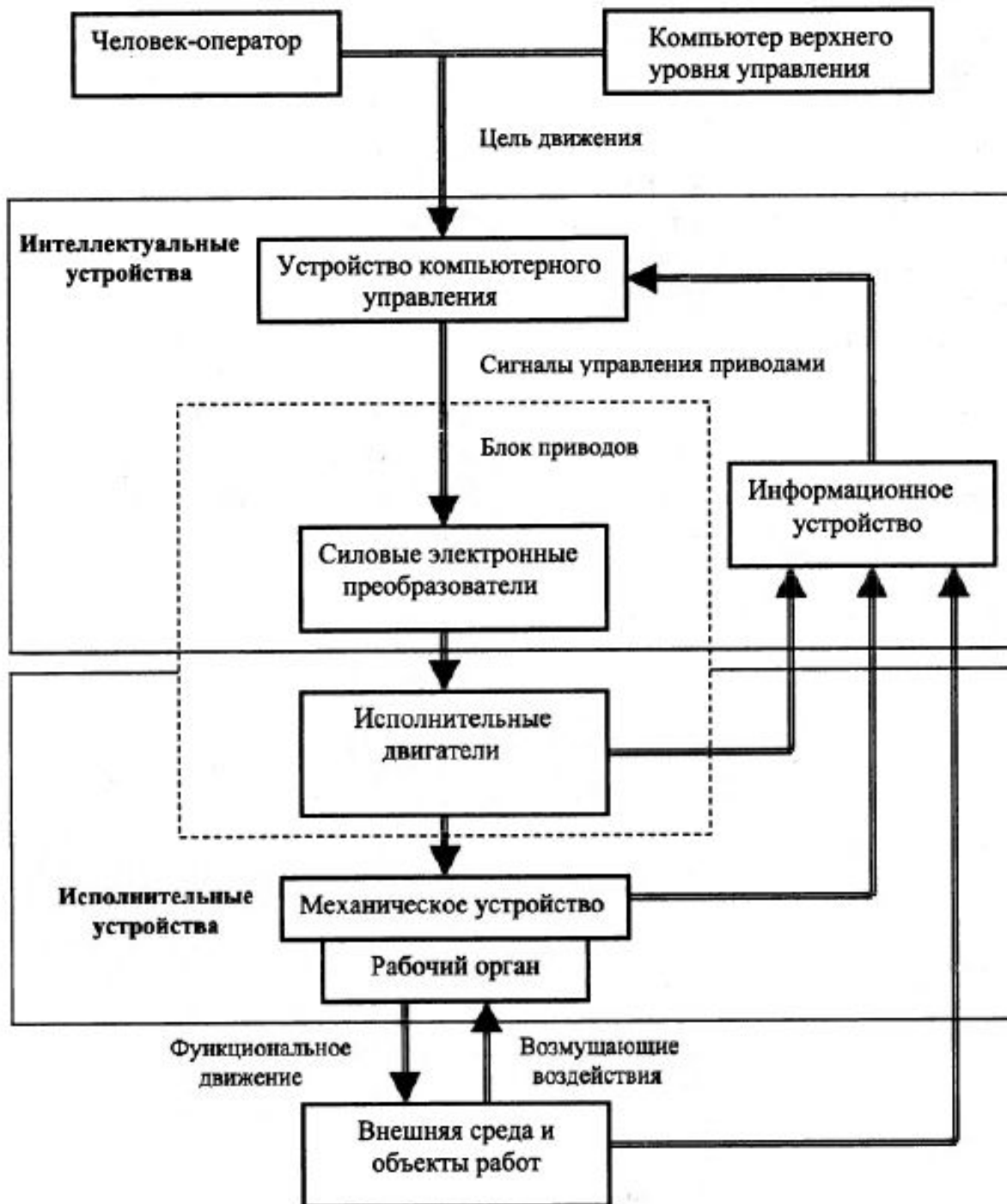
Примеры: промышленные роботы, станки с ЧПУ и т.д.

Мехатронные системы (машины)

интеллектуальные **многомерные**
системы, построенные на мехатронных
принципах и технологиях, которые
способны эффективно выполнять
программы функциональных движений в
изменяющихся условиях внешней среды.

Мехатронные объекты





Обобщенная
схема
машины с
компьютерны
м
управлением
движением

Мехатронные машины являются многомерными системами, которые komponуются на базе двух или более мехатронных модулей.

- *Внешней средой* для машин рассматриваемого класса является технологическая среда, которая содержит различное основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ.
- Внешние среды укрупненно можно разделить на два основных класса: *детерминированные и недетерминированные.*

Состав мехатронной машины

1. механическое устройство, конечным звеном которого является рабочий орган;
2. блок приводов, включающий в себя силовые преобразователи и исполнительные двигатели;
3. устройство компьютерного управления, на вход которого поступают команды человека-оператора либо ЭВМ верхнего уровня управления;
4. информационное устройство, предназначенное для получения и передачи в устройство компьютерного управления данных о реальном движении машины и о фактическом состоянии ее подсистем.

Механическое устройство и двигатели объединены в группу исполнительных устройств. В состав группы интеллектуальных устройств включены электронная, управляющая и информационная части машины.

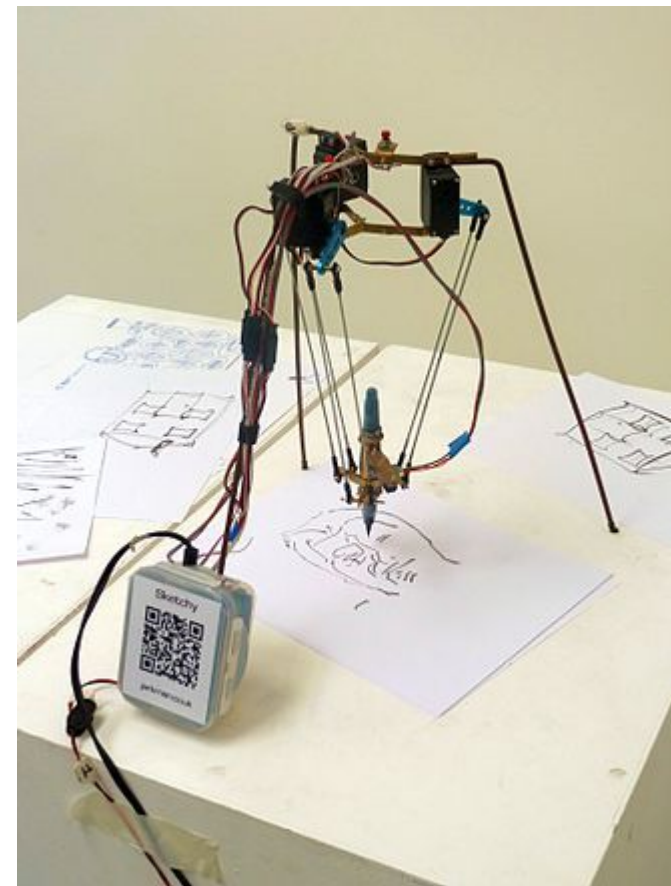
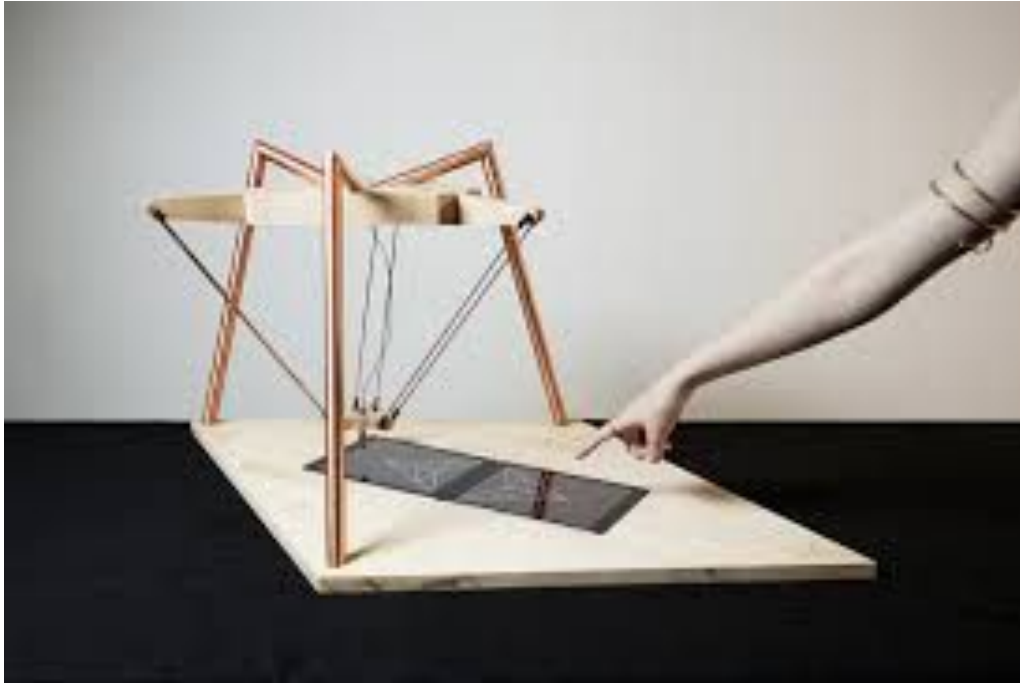
- *Механическое устройство* мехатронной машины представляет собой многозвенный механизм, кинематическую цепь которого образуют движущиеся звенья, составляющие кинематические пары. Конечным звеном кинематической цепи является рабочий орган.
- *Информационное устройство* предназначено для сбора и передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии внешней среды и движущейся мехатронной машины.

Рабочий орган

Рабочий орган мехатронной машины - это составная часть механического устройства для непосредственного выполнения технологических операций и/или вспомогательных переходов.

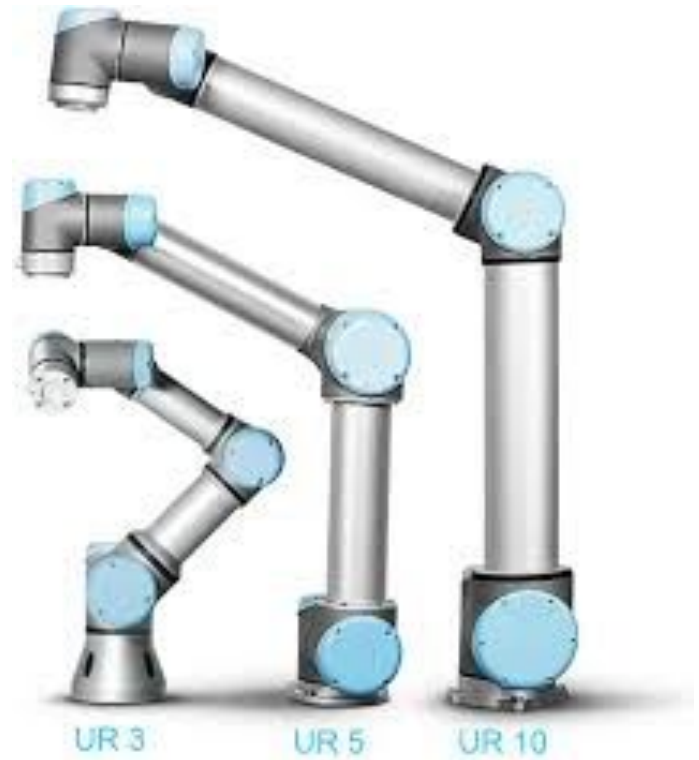
- механические схваты,
- вакуумные и электромагнитные захватные устройства,
- сварочные клещи (для точечной сварки),
- инструментальные головки для механообработки
- и лазерных операций,
- окрасочный пистолет.

Трипод. Дельта-робот



Дельта-робот был изобретен в начале 1980-х годов Реймондом Клавелем (фр. Reymond Clavel) в École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL, Швейцария). Основным замыслом было оперировать лёгкими объектами, но с большой скоростью, то что требовалось промышленности в то время.

Манипуляторы





Информационное устройство

Содержит группы сенсоров:

- 1) датчики информации о состоянии внешней среды и объектов работ (системы технического зрения, локационные датчики и дальномеры, т.д.);
- 2) датчики информации о движении механической части (датчики перемещений, скоростей, ускорений, сил и моментов);
- 3) датчики обратной связи блока приводов (дают информацию о текущих значениях электрических токов и напряжений в силовых преобразователях).

Устройством компьютерного управления будем называть комплекс аппаратных и программных средств, вырабатывающий сигналы управления для блока приводов машины. В состав этого комплекса обычно входят задающие устройства (например, джойстики и рукоятки), пульт управления оператора, вычислительные и преобразующие устройства, периферийные устройства ввода-вывода информации.

Функции устройства компьютерного управления

1. Управление функциональными движениями мехатронной машины в реальном масштабе времени.
2. Координация управления механическим движением с сопутствующими внешними процессами.
3. Взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах программирования (режим off-line) и непосредственно в процессе движения (режим on-line).
4. Обмен данными с внешними устройствами (информационным устройством, блоком приводов, компьютером верхнего уровня, периферийными устройствами).

Структурная пирамида мехатроники



Признаки мехатронных систем

1. Цифровое задание параметров и режимов работы оборудования, обеспечивающее отсутствие ручных настроек в процессе эксплуатации.
2. Мониторинг технологического процесса и архивирование его результатов.
3. Диагностика основных узлов и элементов, определяющих работоспособность оборудования, позволяющая избежать убытков от незапланированных простоев при внезапных отказах.
4. Модульный принцип построения, позволяющий в наименьший промежуток времени обеспечить их замену.
5. Современный человеко-машинный интерфейс.
6. Телеметрическая связь со службами сервиса.
7. Интерфейс с системами управления верхнего уровня.
8. Более широкое использование сервоприводов.
9. Статистическое управление, обеспечивающее стабильность процессов и режимов работы.
10. Автоматическое согласование режимов работы с предыдущим и последующим оборудованием в автоматизированных поточных линиях.
11. Лучшие массогабаритные характеристики и меньшее энергопотребление по сравнению с аналогичным оборудованием равной производительности.
12. Учет выпускаемой продукции и времени работы оборудования при сдаче его в аренду.
13. Объединение всех элементов оборудования в одном конструктивном блоке.

Мехатронный подход

Особенность мехатронного подхода к проектированию заключается в интеграции в единый функциональный модуль двух или более элементов возможно даже различной физической природы.

Соответственно на стадии проектирования из традиционной структуры машины исключается как минимум один интерфейс при сохранении физической сущности преобразования, выполняемого данным модулем.

Методы интеграции объектов мехатроники

- построение интегрированных мехатронных машин путем исключения из их структуры промежуточных преобразователей и соответствующих интерфейсов
- аппаратно-конструктивное объединение устройств различной физической природы в едином корпусе многофункционального мехатронного модуля
- перенос функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным и информационным)

Терминология в робототехнике
ГОСТР 60.0.0.4—2019/ИСО 8373:2012
РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ
УСТРОЙСТВА
Термины и определения

- **Промышленный робот (industrial robot):**
Автоматически управляемый,
перепрограммируемый , реконфигурируемый
манипулятор, программируемый по трем или
более степеням подвижности , который может
быть либо установлен стационарно, либо
перемещаться для применения в целях
промышленной автоматизации.

Робототехническое устройство (robotic device):

Исполнительный механизм, обладающий характеристиками промышленного робота или сервисного робота, но не имеющий либо

необходимого числа программируемых степеней подвижности либо некоторой степени автономности.

Пример — Устройство оказания физической помощи:
телеуправляемое устройство; двухосный промышленный манипулятор

степень подвижности (axis):

Управляемая координата, используемая для определения вращательного или поступательного движения робота.

автономность (autonomy): Способность выполнять поставленные задачи в зависимости от текущего состояния и восприятия окружающей среды без вмешательства человека.

манипулятор (manipulator): Машина, механизм которой обычно состоит из последовательности сегментов, перемещающихся вращательно или поступательно друг относительно друга с целью захвата и/или перемещения объектов (деталей или инструментов) обычно по нескольким степеням свободы

перепрограммируемый (reprogrammable): Спроектированный так, чтобы программные движения или вспомогательные функции могли быть изменены без конструктивного изменения

реконфигурируемый (multipurpose): Приспосабливаемый для другого применения за счет конструктивного изменения

сервисный робот (service robot): Робот, который выполняет задания, полезные для человека или оборудования, за исключением применений в целях промышленной автоматизации.

мобильный робот (mobile robot): Робот, способный передвигаться под своим собственным управлением.

робототехнический комплекс (robot system): Комплекс, состоящий из одного или нескольких роботов, их рабочих органов и любых механизмов, оборудования, приборов или датчиков, обеспечивающих выполнение роботом функционального назначения (задания).

робот для совместной работы (collaborative robot): Робот, разработанный для непосредственного взаимодействия с человеком.

ГОСТР 60.0.0.2—2016 РОБОТЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Классификация Классификация промышленных роботов

- промышленные манипуляционные роботы, выполняющие основные технологические операции;
- промышленные транспортные роботы, осуществляющие внутрицеховые и межцеховые перемещения грузов.

Промышленные манипуляционные роботы классифицируют по следующим признакам:

- специализация;
- грузоподъемность;
- способ управления;
- способ программирования;
- тип привода;
- возможность передвижения;
- выполняемая технологическая операция;
- кинематическая схема;
- способ установки на рабочем месте.

По специализации

- специальные;
- специализированные;
- универсальные.

По способу управления

- роботы с ручным управлением — копирующие манипуляторы
- роботы с программным управлением
- роботы с адаптивным управлением

По

способу формирования

траектории движения

- роботы с цикловым управлением — управляющая программа определяет жесткую последовательность движений робота по степеням подвижности
- роботы с позиционным управлением — управляющая программа определяет последовательность точек позиционирования без контроля траектории движения между ними;
- роботы с траекторным управлением — управляющая программа определяет движение рабочего органа робота по заданной траектории без контроля скорости перемещения по траектории.
- роботы с контурным управлением — управляющая программа определяет движение рабочего органа робота по заданной траектории с установленным распределением во времени значений скорости и ускорения

По выполняемой технологической операции

- универсальные роботы — роботы, осуществляющие разные технологические операции в зависимости от установленного рабочего органа;
- сборочные роботы — роботы, осуществляющие сборочные операции.
- сварочные роботы — роботы, осуществляющие сварочные операции.
- окрасочные роботы — роботы, осуществляющие окрасочные операции
- перегрузочные роботы — роботы, осуществляющие загрузо-разгрузочные операции;
- упаковочные роботы — роботы, осуществляющие упаковочные операции;
- измерительные роботы — роботы, осуществляющие измерительные операции;
- обрабатывающие роботы — роботы, осуществляющие операции механообработки (шлифовка,

Классификация сервисных роботов

- возможность передвижения;
- область применения.

По возможности передвижения

- мобильные сервисные роботы;
- стационарные сервисные роботы;
- экзоскелеты.

По области применения

- сервисные роботы для личного и домашнего использования;
- сервисные роботы для профессионального использования.

Для личного и домашнего использования

- сервисные роботы для работ по дому:
- роботы помощники, собеседники;
- роботы для уборки полов;
- роботы для стрижки газонов;
- роботы для чистки бассейнов;
- роботы для мытья окон;
- другие виды сервисных роботов для работ по дому;
- сервисные роботы для досуга:
- роботы-игрушки;
- мультимедийные роботы;
- обучающие роботы;
- другие виды сервисных роботов для досуга;
- сервисные роботы для помощи престарелым людям и инвалидам:
- робототехнические кресла-каталки;
- робототехнические ортопедические аппараты и протезы;
- другие виды помогающих сервисных роботов;
- персональные транспортные роботы;
- сервисные роботы, обеспечивающие безопасность и надзор за домом;
- другие виды сервисных роботов для личного и домашнего использования.

Для профессионального ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

- **сервисные роботы для профессиональной уборки:**
- роботы для уборки полов;
- роботы для очистки окон и стен;
- роботы для очистки цистерн, бочек и труб;
- роботы для очистки крупных корпусов (самолетов, автомобилей и т. п.);
- другие виды сервисных роботов для уборки;
- **сервисные роботы для работы в общественных местах:**
- роботы для обслуживания гостиниц и ресторанов;
- роботы для указания маршрута, сопровождения и информирования;
- роботы для рекламы и маркетинга;
- роботы для развлечения;
- другие виды сервисных роботов для работы в общественных местах;
- сервисные роботы для обследования и технического обслуживания:
- роботы для обследования и технического обслуживания производственных помещений и оборудования;
-

- роботы для обследования и технического обслуживания резервуаров, трубопроводов и коллекторов;
- другие виды сервисных роботов для обследования и технического обслуживания;
- сервисные роботы для строительства и сноса:
- роботы для демонтажа и сноса атомных, химических и других опасных объектов;
- роботы для строительства зданий;
- роботы для земляных работ;
- другие виды сервисных роботов для строительства и сноса;
- сервисные роботы для логистических систем:
- мобильные роботы для работы внутри помещений;
- мобильные роботы для работы на открытом воздухе;
- роботы для обработки и сортировки грузов;
- другие виды сервисных роботов для логистических систем;

медицинские роботы:

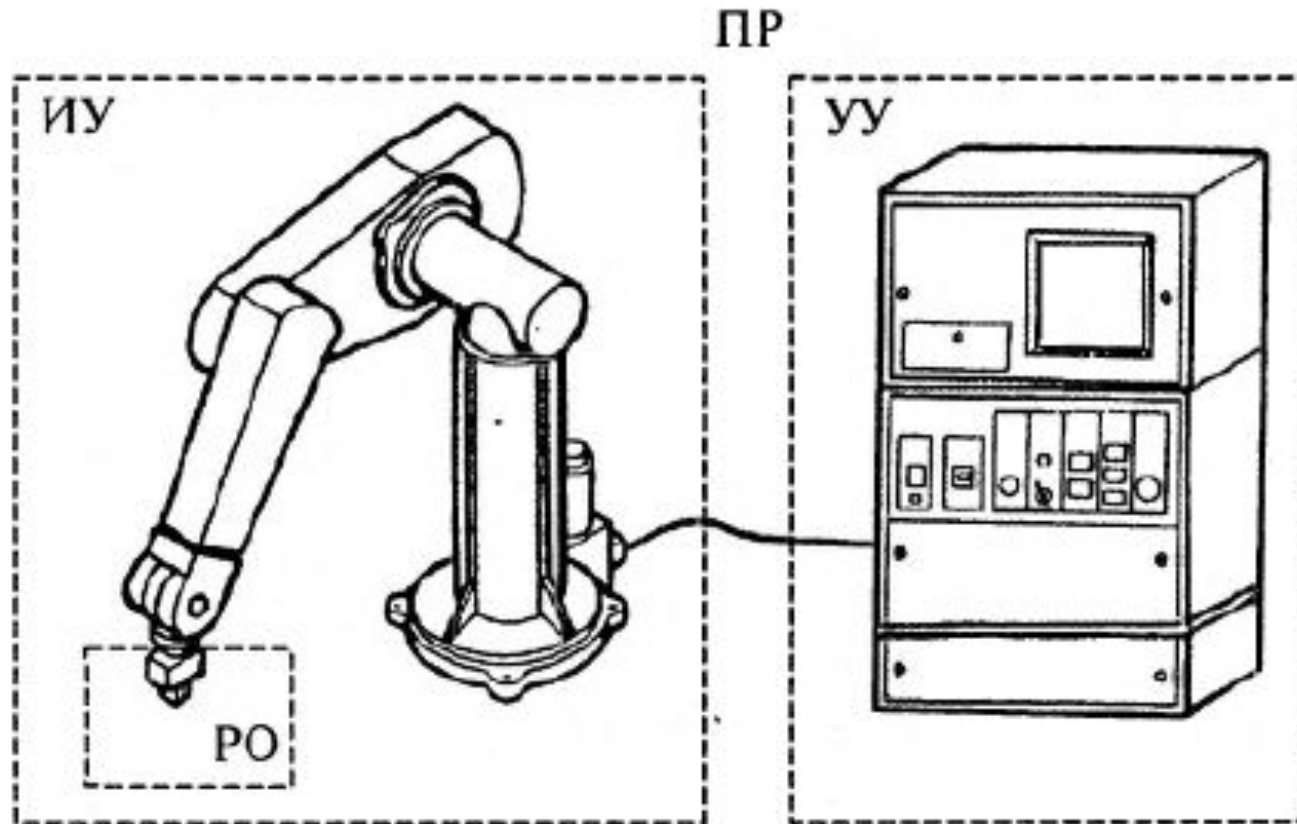
- роботы для проведения диагностики;
- роботы для проведения хирургических операций;
- роботы для терапии заболеваний и травм;
- роботы для реабилитации пациентов;
- другие виды медицинских роботов;
- сервисные роботы для выполнения технологических операций вне помещений;
- роботы для сельскохозяйственных полевых работ;
- роботы для дойки;
- роботы для других видов работ в животноводстве;
- роботы для лесного хозяйства и лесоводства;
- роботы для горнорудной промышленности;
- другие виды сервисных роботов для выполнения технологических операций вне помещений;
- роботы для работы в экстремальных условиях:
- роботы для проведения аварийно-спасательных работ;
- роботы для пожаротушения;
- роботы для работы в условиях повышенной радиации;
- роботы для наблюдения, разведки и обеспечения безопасности;
- другие виды роботов для работы в экстремальных условиях;

роботы военного и специального назначения:

- боевые (ударные) роботы;
- роботы боевого обеспечения (разведка, охрана военных объектов);
- роботы инженерного и химического обеспечения (разминирование, дезактивация территорий и военной техники, демонтаж зараженных конструкций);
- роботы технического и тылового обеспечения (экзоскелеты, транспортировка боеприпасов, эвакуация раненых);
- другие виды роботов военного и специального обеспечения;

другие виды сервисных роботов для профессионального использования.

Структура промышленного робота



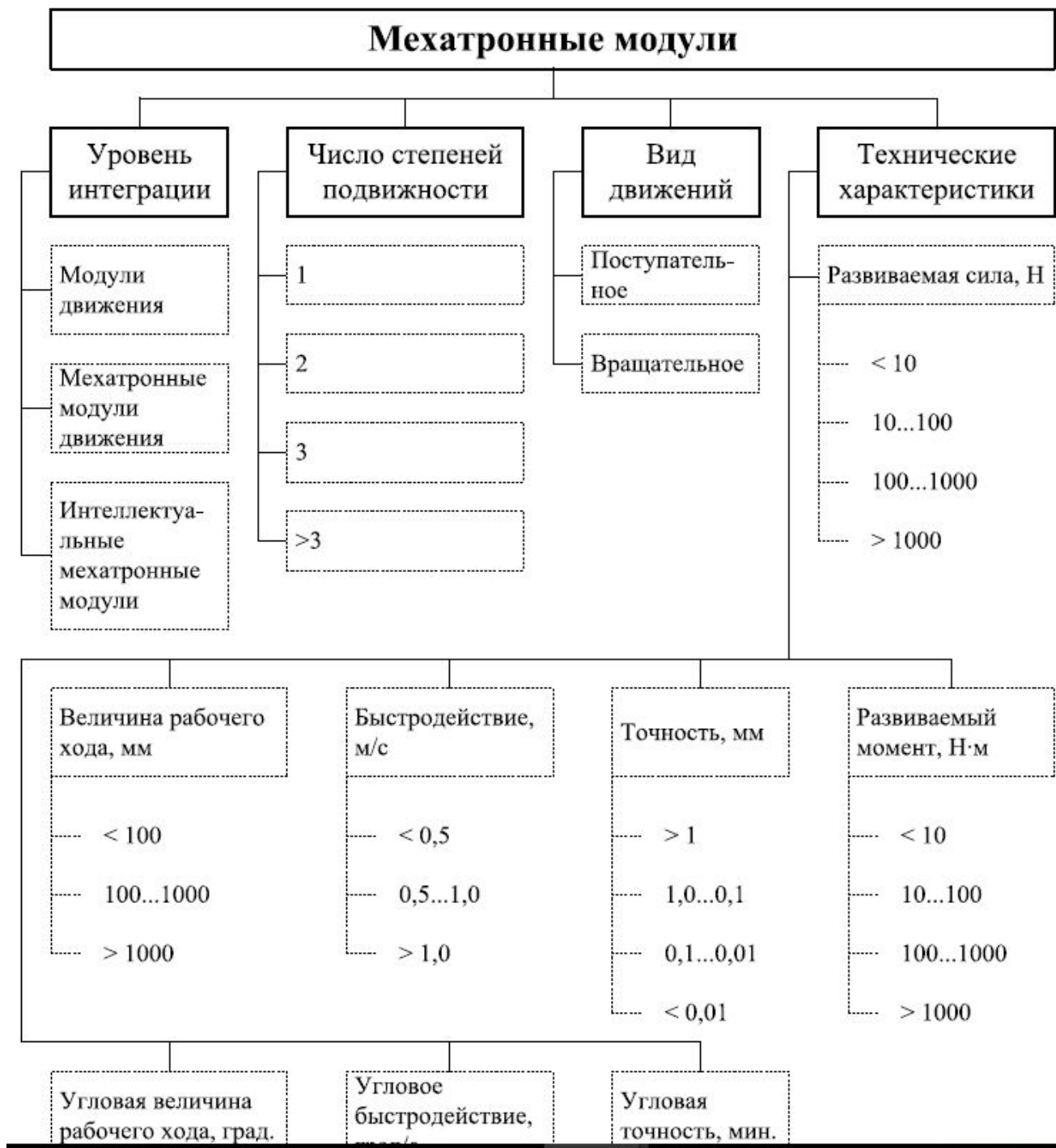
В состав промышленного робота входят:

- исполнительное устройство (ИУ) — устройство ПР, выполняющее все его двигательные функции
- рабочий орган (РО) — составная часть ИУ промышленного робота для непосредственного выполнения технологических операций и(или) вспомогательных переходов.
- устройство управления (УУ) — устройство ПР для формирования и выдачи управляющих воздействий в соответствии с управляющей программой

Структура исполнительного устройства робота с электромеханическим приводом



Система мехатронных модулей



Теория механизмов и машин

научная дисциплина (или раздел науки), которая изучает строение (структуру), кинематику и динамику механизмов в связи с их анализом и синтезом (И.И.Артоболевский).

- ***Цель ТММ*** - анализ и синтез типовых механизмов и их систем.
- ***Задачи ТММ:***
 - - создание робототехнических систем, связывающих отдельные технологические операции в единую цепь полностью автоматизированного производства;
 - - изучение совместной работы машин и управляющих ЭВМ, разработка необходимых алгоритмов и программ для функционирования автоматизированного производства;
 - - создание методов структурного, кинематического, динамического анализа и синтеза различных схем механизмов роботов, манипуляторов, шагающих и других машин и систем.

Основные разделы курса ТММ

- - структура механизмов и машин;
- - геометрия механизмов и их элементов;
- - кинематика механизмов;
- - динамика машин и механизмов.

История развития

- 1-й период до начала XIX века период эмпирического машиностроения
- 2-й период от начала до середины XIX века - период начала развития ТММ.
- 3-й период от второй половины XIX века до начала XX века - период фундаментального развития ТММ.
- 4-й период от начала XX века до настоящего времени - период интенсивного развития всех направлений ТММ как в России, так и за рубежом.

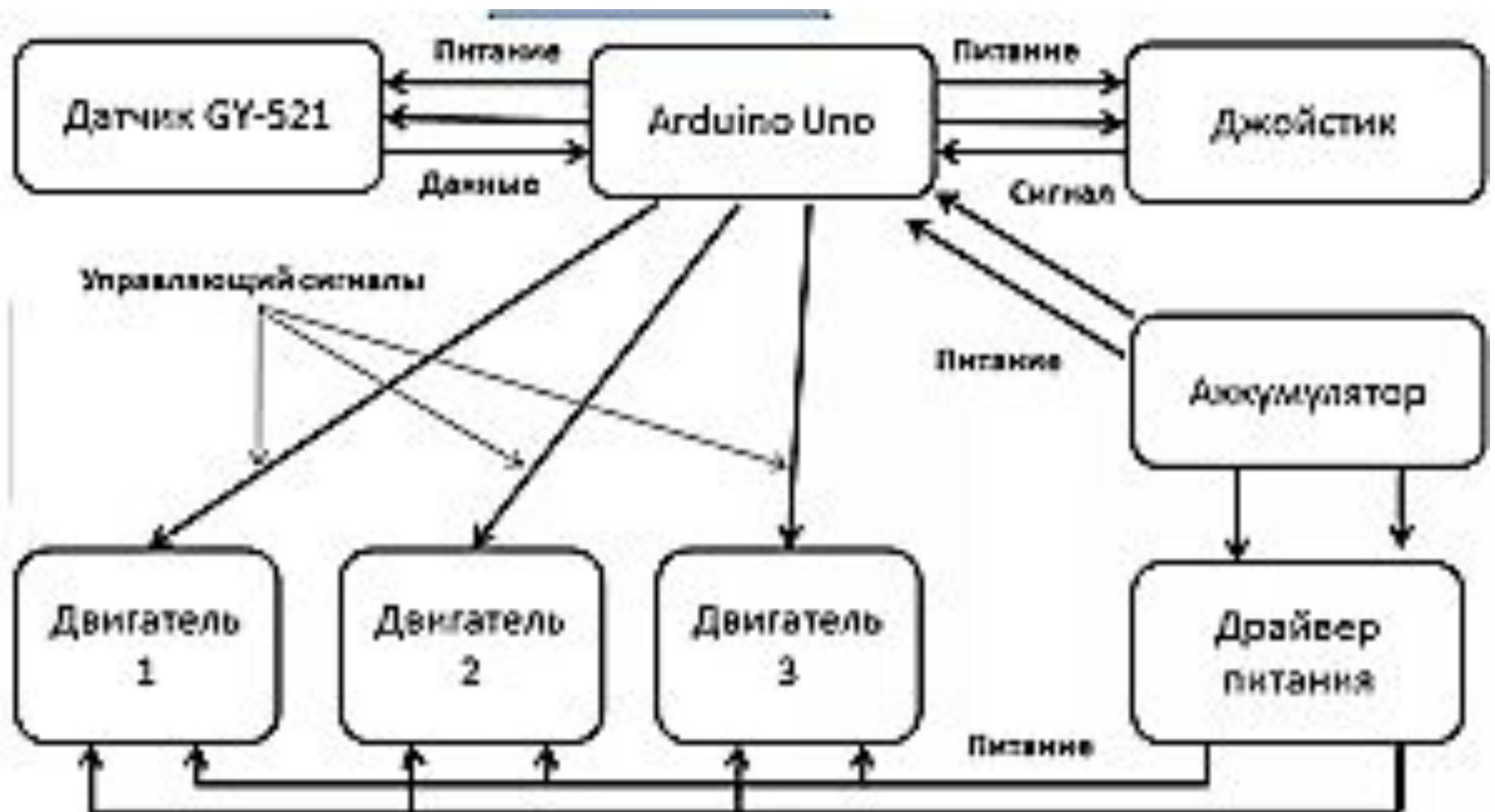
Этапы создания новой конструкции

- 1) Осознание общественной потребности в разрабатываемом изделии
- 2) Техническое задание на проектирование (первичное описание)
- 3) Анализ существующих технических решений
- 4) Разработка функциональной схемы
- 5) Разработка структурной схемы
- 6) Метрический синтез механизма (синтез кинематической схемы)
- 7) Статический силовой расчет
- 8) Эскизный проект
- 9) Кинетостатический силовой расчет
- 10) Силовой расчет с учетом трения
- 11) Расчет и конструирование деталей и кинематических пар (прочностные расчеты, уравнивание, балансировка, виброзащита)
- 12) Технический проект
- 13) Рабочий проект (разработка рабочих чертежей деталей, технологии изготовления и сборки)
- 14) Изготовление опытных образцов
- 15) Испытания опытных образцов
- 16) Технологическая подготовка серийного производства
- 17) Серийное производство изделия

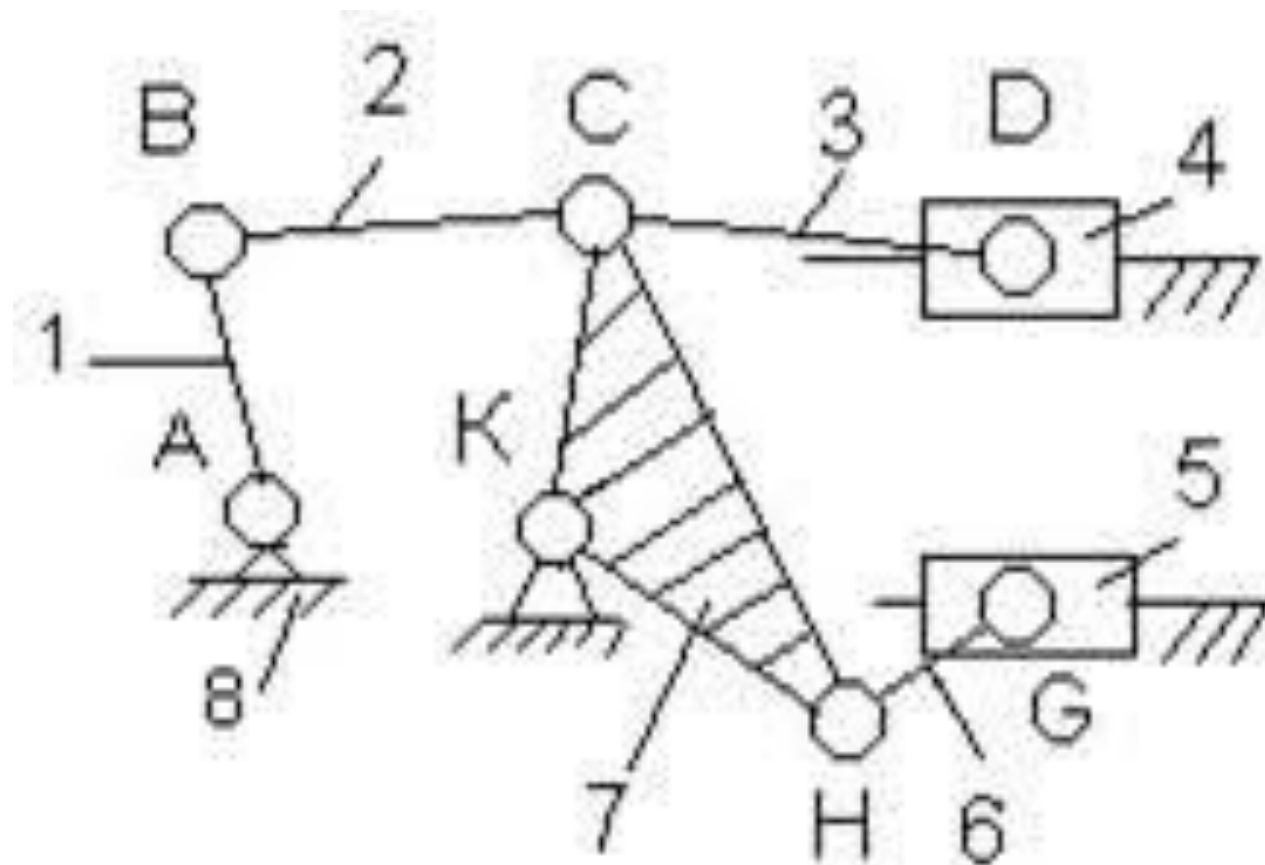
Кинетостатический расчет

- Функциональная схема — вид графической модели изделия. Их использование и построение позволяет наглядно отразить устройство функциональных (рабочих) изменений, описание которых оперирует любыми (в том числе и несущественными) микросхемами, БИС и СБИС. Поскольку функциональные схемы не имеют собственной системы условных обозначений, их построение допускает сочетание кинематических, электрических и алгоритмических обозначений
- Структурная схема механизма - графическое изображение механизма, выполненное с использованием условных обозначений, рекомендованных ГОСТ или принятых в специальной литературе, содержащее информацию о числе и расположении элементов (звеньев, групп), а так же о виде и классе кинематических пар, соединяющих эти элементы
- В отличие от статического, кинетостатический расчет механизмов наряду с внешними силами (движущими силами, силами полезных и вредных сопротивлений, силами тяжести) учитывает и силы инерции масс звеньев. Метод кинетостатики основан на принципе Даламбера, который применительно к механизмам можно сформулировать так: если ко всем внешним силам, действующим на систему звеньев, добавить силы инерции, тогда под действием всех этих сил система звеньев может условно считаться находящейся в равновесии

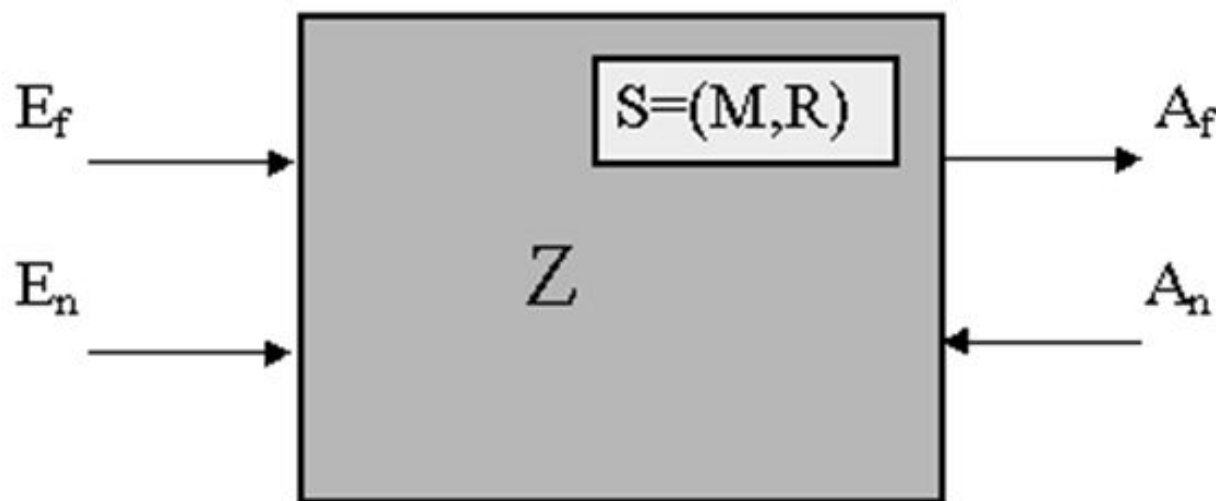
Функциональная схема



Структурная схема механизма



Техническая система и ее



E_f, A_f - параметры, характеризующие функции F системы;

E_n, A_n - параметры, не относящиеся к функциям прибора (условия работы, внешние и дополнительные воздействия);

Z - системный оператор;

M - элементы системы;

R - отношения между элементами системы.

Функция F - свойство системы, используемое для преобразования входных величин E_f , при внешних и дополнительных воздействиях A_n и условиях работы E_n , в выходные величины A_f .

Структура S - совокупность элементов M и отношений R между ними внутри системы $S=(M,R)$.

Определения

- Деталь - элемент конструкции не имеющий в своем составе внутренних связей (состоящий из одного твердого тела).
- Звено - твердое тело или система жестко связанных твердых тел (может состоять из одной или нескольких деталей) входящая в состав механизма.
- Группа - кинематическая цепь, состоящая из подвижных звеньев, связанных между собой кинематическими парами (отношениями), и удовлетворяющая некоторым заданным условиям.
- **Узел** - несколько деталей связанных между собой функционально, конструктивно или каким-либо другим образом.
- **Расположения** - такие отношения между элементами, которые описывают их геометрические относительные положения.
- **Связи** - отношения между элементами, предназначенные для передачи материала, энергии или информации между элементами.

Понятие машины

Машина есть устройство, создаваемое человеком для преобразования энергии, материалов и информации с целью облегчения физического и умственного труда, увеличения его производительности и частичной или полной замены человека в его трудовых и физиологических функциях.

Виды машин: технологические, транспортные, энергетические, информационные

Механизм и его элементы

- ***Механизмом*** называется система, состоящая из звеньев и кинематических пар, образующих замкнутые или разомкнутые цепи, которая предназначена для передачи и преобразования перемещений входных звеньев и приложенных к ним сил в требуемые перемещения и силы на выходных звеньях.

Из теоретической механики:

Системы материальных тел (точек), положения и движения которых подчинены некоторым геометрическим или кинематическим ограничениям, заданным наперед и не зависящим от начальных условий и заданных сил, называется **несвободной**.

Эти ограничения наложенные на систему и делающие ее несвободной называются **связями**.

Положения точек системы допускаемые наложенными на нее связями называются возможными.

Независимые друг от друга величины q_1, q_2, \dots, q_n , вполне и однозначно определяющие возможные положения системы в произвольный момент времени называются **обобщенными координатами системы**.

Основные понятия структурного синтеза и анализа механизмов

Подвижность механизма - число независимых обобщенных координат однозначно определяющее положение звеньев механизма на плоскости или в пространстве.

Связь - ограничение, наложенное на перемещение тела по данной координате.

Самыми распространенными в механизмах являются **геометрические связи**, которые ограничивают относительные перемещения звеньев и уравнения которых содержат только координаты точек (и, может быть, время). Такие связи имеют все кинематические пары и кинематические соединения с твердыми промежуточными элементами.

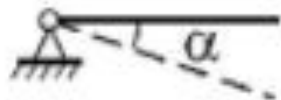
Кроме геометрических связей, в механизмах могут быть **дифференциальные (кинематические)** связи, уравнения которых содержат координаты точек и производные от этих координат по времени (и, может быть, время). Если эти уравнения интегрируются, то дифференциальная связь приводится к геометрической.

Дифференциальные интегрируемые и геометрические связи называются **голономными связями**.

Дифференциальные связи, уравнения которых не могут быть проинтегрированы, являются **неголономными связями**. Неголономные связи появляются в кинематических парах при учете трения

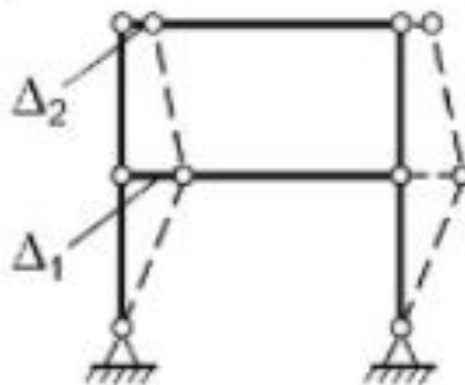
Кинематические связи

а)



$$W = 1$$

б)



$$W = 2$$

в)



$$W = 0$$

Элементы кинематической структуры исполнительного механизма

- Исполнительный механизм (ИМ) — механическая часть ИУ робота, реализующая двигательную функцию.
- Твердые тела, входящие в состав ИУ и являющиеся его функциональными элементами, называют звеньями.
- Звено, принимаемое за неподвижное, называют основанием (стойкой).
- Звено, которому сообщают движение, преобразуемое ИМ в требуемые движения других звеньев, называют входным.
- Звено, совершающее движение, для выполнения которого предназначен ИМ, называют выходным (конечным, последним).
- Максимальное число входных звеньев равно числу степеней подвижности
- ИМ. Звенья, находящиеся между входным и выходным звеньями, называют промежуточными.

Примеры звеньев

Стойка – звено механизма, принимаемое за неподвижное.

Неподвижность на схемах указывается путём нанесения штриховки на часть контура условного обозначения элемента

Кривошип - звено, совершающее вращательное движение на полный оборот вокруг неподвижной точки.

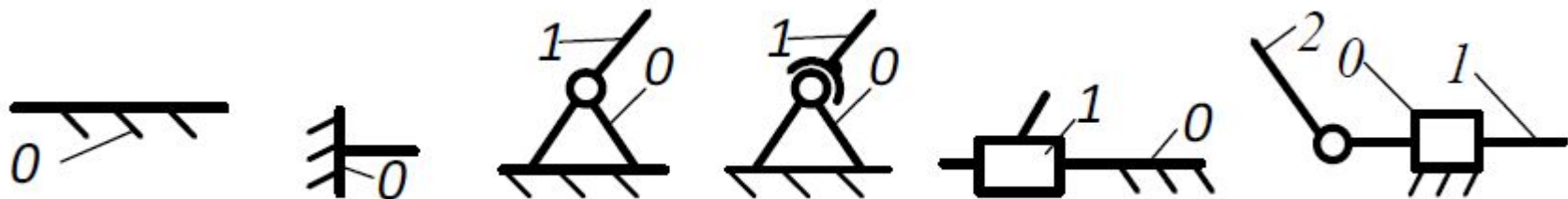
Коромысло - звено, совершающее вращательное движение на неполный оборот вокруг неподвижной точки.

Ползун - звено, совершающее возвратно-поступательное движение.

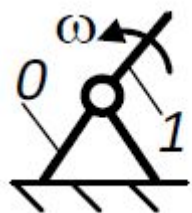
Шатун - звено, совершающее сложное плоскопараллельное движение. Шатун – звено рычажного механизма, образующее кинематические пары только с подвижными звеньями (не образует кинематических пар со стойкой)

Кулиса – звено рычажного механизма (1), вращающееся вокруг неподвижной оси (0) и образующее с другим подвижным звеном (2) поступательную пару

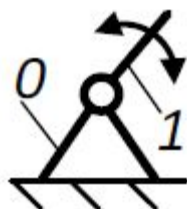
Направляющая – звено поступательной пары, имеющее большую протяжённость сопрягаемого элемента по сравнению с длиной сопрягаемого элемента другого звена



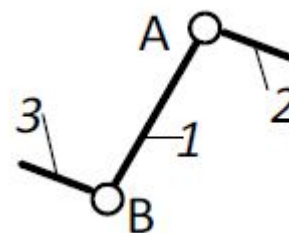
Стойка



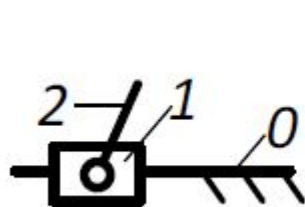
Кривошип



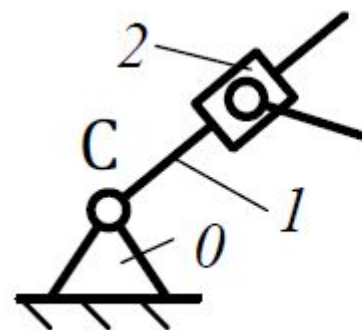
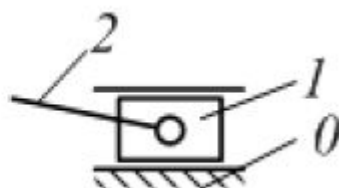
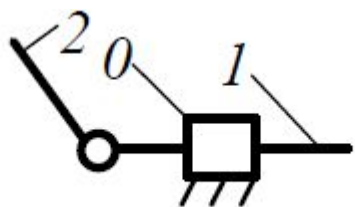
Коромысло



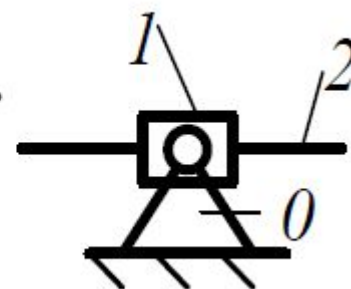
Шатун



Ползун



Кулиса



Кинематические пары

- Соединение двух соприкасающихся звеньев, допускающих их относительное движение, называют кинематической парой.
- Совокупность поверхностей, линий и точек звена, входящих в соприкосновение (контакт) с другим звеном пары, называют элементом пары.
- Для того чтобы элементы пары находились в постоянном соприкосновении, пара должна быть замкнута геометрическим (за счет конструктивной формы звеньев) или силовым (силой тяжести, пружиной, силой давления жидкости или газа и т. п.) способом.

Классификации кинематических пар

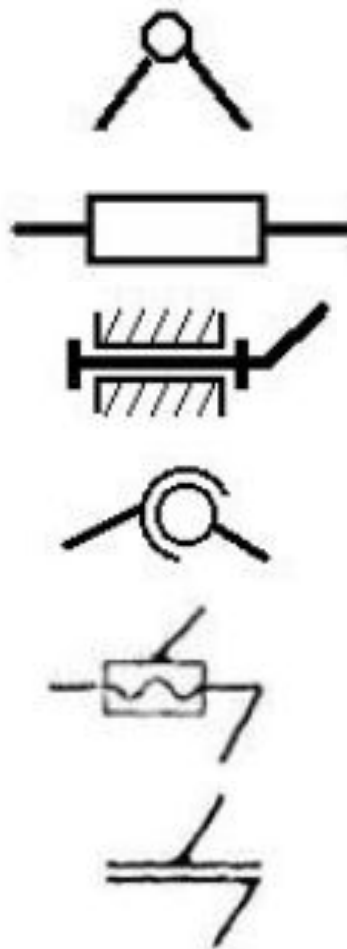
По виду места контакта (места связи) поверхностей звеньев

- низшие пары, если элементы звеньев соприкасаются только по поверхности
- высшие, если элементы звеньев соприкасаются только по линиям или в точках

под нагрузкой звенья, образующие высшую пару, будут соприкасаться по некоторой фактической поверхности, называемой пятном контакта

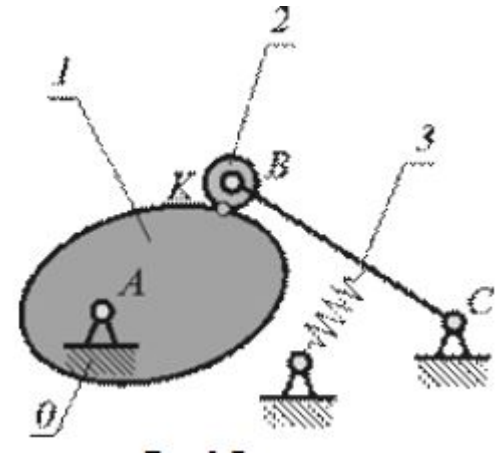
По относительному движению звеньев, образующих пару

- - вращательные;
- - поступательные;
- - цилиндрические;
- - сферические;
- - винтовые;
- - плоские.

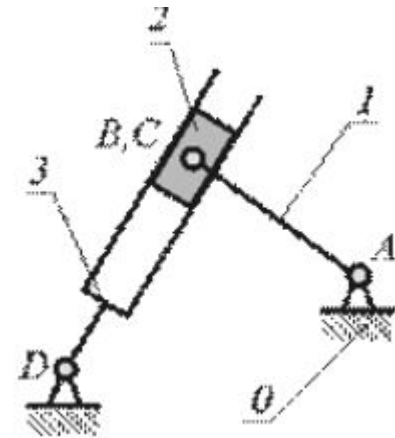


По способу замыкания (обеспечения контакта звеньев пары)

- - силовое (за счет действия сил тяжести, силы упругости пружины, инерции, давления жидкости и газа);














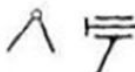



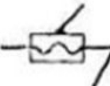


- - геометрическое (за счет конструкции рабочих поверхностей пары).



По числу подвижностей в относительном движении звеньев (по числу условий связи)

Таблица 2. Условные обозначения кинематических пар

Класс пары	Число условий связи	Число степеней свободы	Название пары	Рисунок	Условное обозначение
I	1	5	Шар-плоскость		
II	2	4	Шар-цилиндр		
III	3	3	Сферическая		
III	3	3	Плоскостная		
IV	4	2	Цилиндрическая		
IV	4	2	Сферическая с пальцем		
V	5	1	Поступательная		
V	5	1	Вращательная		
V	5	1	Винтовая		

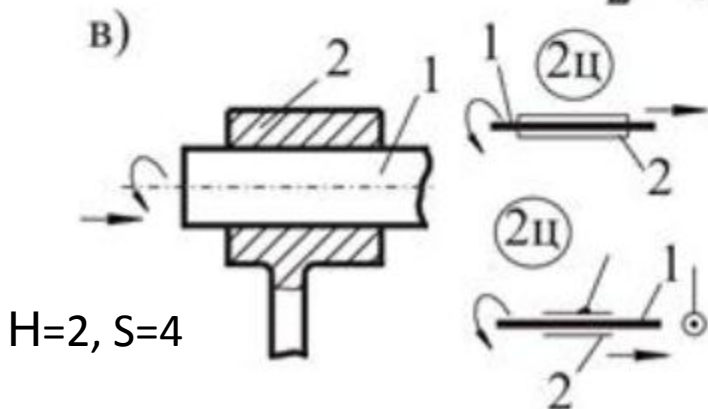
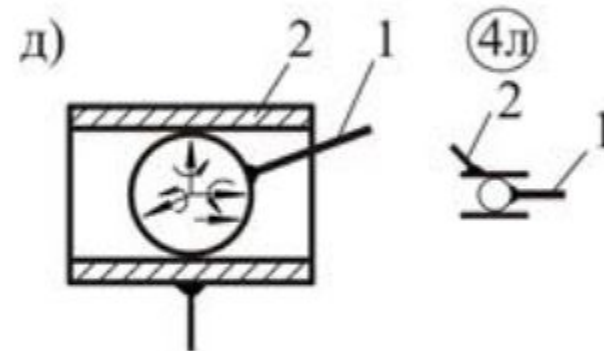
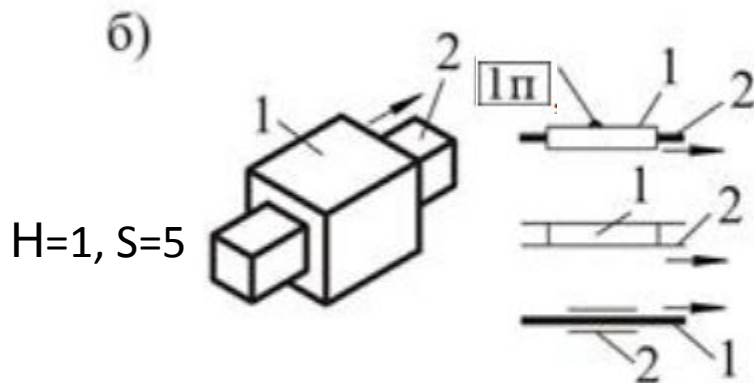
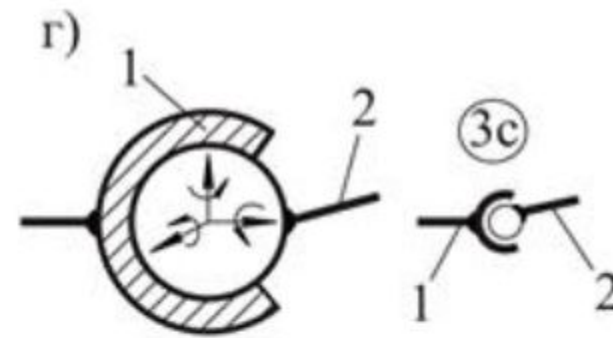
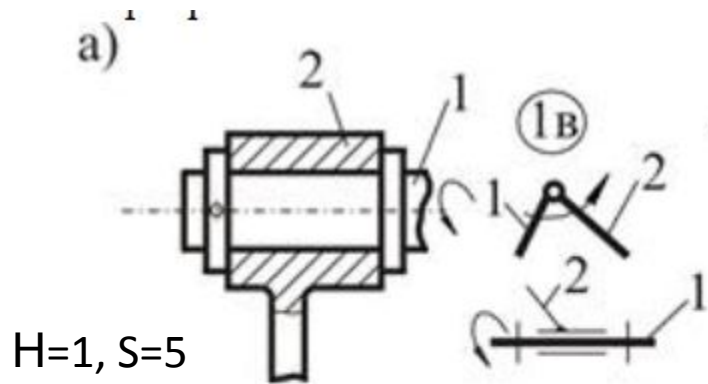
Степень свободы и классы кинематических пар



Степени свободы тела в пространстве

Для звеньев, вошедших в кинематическую пару, число степеней свободы всегда меньше шести, так как кинематическая пара уменьшает число возможных перемещений и накладывает число условий связи S на относительное движение каждого звена, зависящих от способа соединения звеньев в пары. В таком случае число степеней свободы N кинематической пары равно

$$N = 6 - S$$



пара требует силового замыкания.

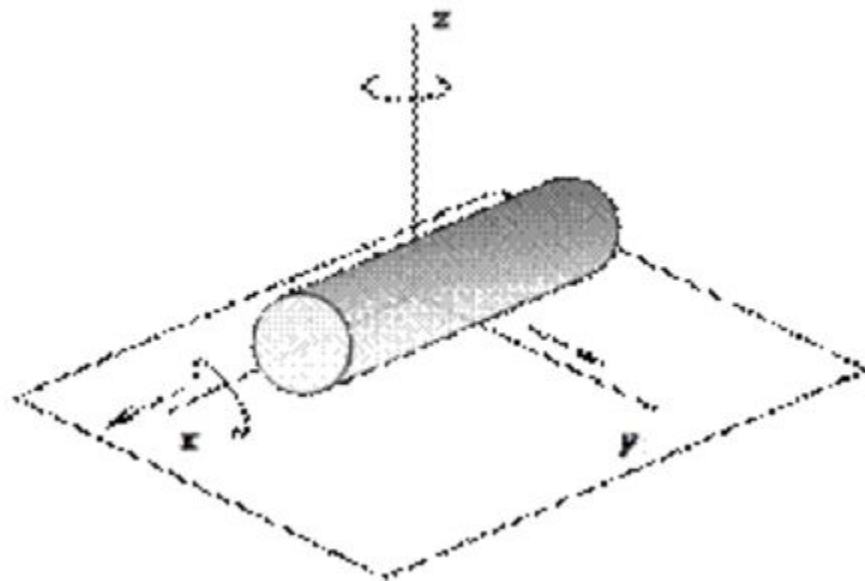
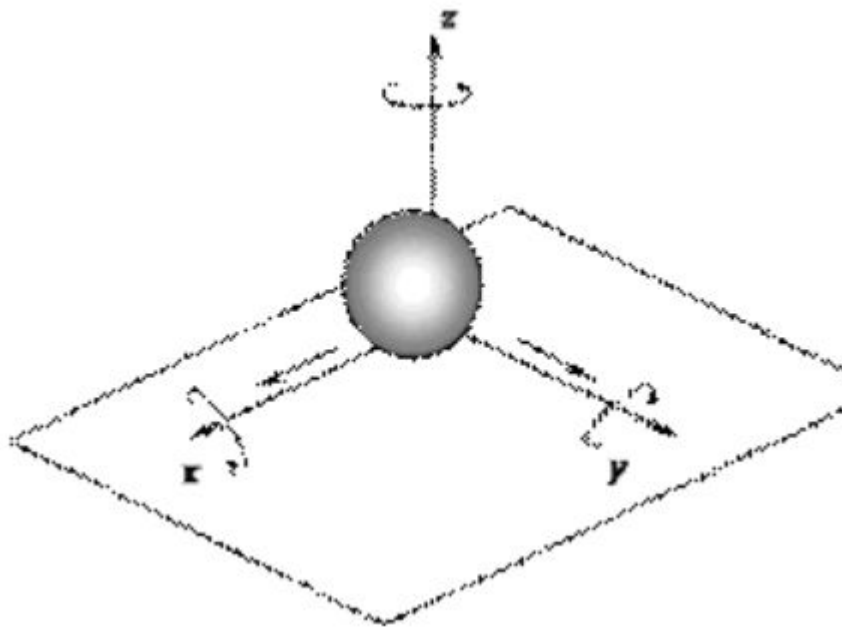
Класс кинематической пары может быть определен из зависимости :

$$S = 6 - H.$$

Классификация кинематических пар и степеней подвижности

Класс, число связей	Соединение	Условное графическое изображение и обозначение	
		Кинематическая пара	Степень подвижности
5	Одноподвижное (вращательное)	  В	  В
	Одноподвижное (поступательное)	  П	  П
	Одноподвижное (винтовое)	  Ви	  Ви
	Одноподвижное (шарико-винтовое)	  Вш	  Вш
4	Двухподвижное (цилиндрическое)	  Ц	  Ц
	Двухподвижное (сферическое)	 Сп	 Сп
3	Трехподвижное (сферическое)	 С	 С
2	Четырехподвижное (линейное)	 Л	 Л
1	Пятиподвижное (точечное)	 Т	 Т

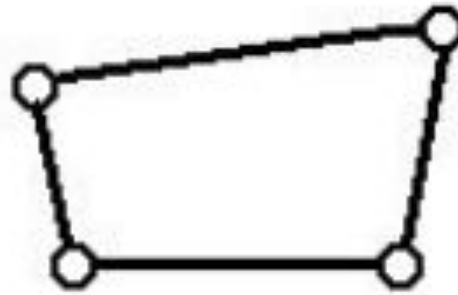
Примеры



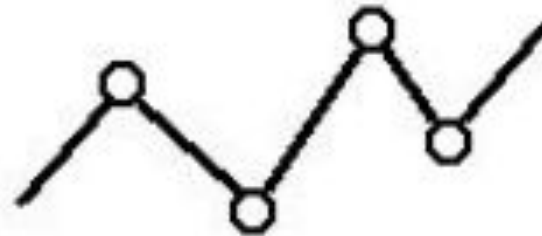
Кинематическая цепь

Кинематической цепью называют систему звеньев, связанных кинематическими парами. Различают замкнутые цепи, в которых каждое звено входит не менее чем в две кинематические пары, и незамкнутые цепи, в которых есть звенья, входящие только в одну кинематическую пару.

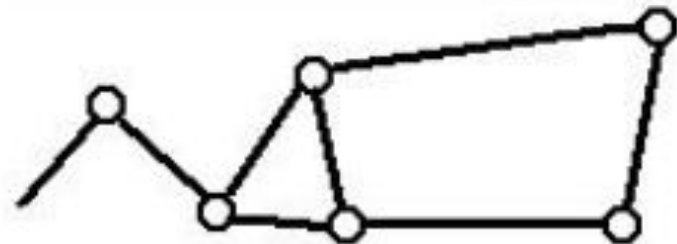
Замкнутой кинематической цепью называется кинематическая цепь, звенья которой образуют один или несколько замкнутых контуров.



Незамкнутой кинематической цепью называют такую, в которой имеются звенья, входящие только в одну кинематическую пару. Простейшая незамкнутая цепь является двухзвенной.



Сложной кинематической цепью называется цепь, в которой имеется хотя бы одно звено, входящее более чем в две кинематические пары.



Механизмы

Определения

- Первое: Механизмом называется система твердых тел, предназначенная для передачи и преобразования заданного движения одного или нескольких тел в требуемые движения других твердых тел.
- Второе: Механизм - кинематическая цепь, в состав которой входит неподвижное звено (стойка) и число степеней свободы которой равно числу обобщенных координат, характеризующих положение цепи относительно стойки.
- Третье: Механизмом называется устройство для передачи и преобразования движений и энергий любого рода.
- Четвертое: Механизм - система твердых тел, подвижно связанных путем соприкосновения и движущихся определенным, требуемым образом относительно одного из них, принятого за неподвижное.

Механизмом называется система, состоящая из звеньев и кинематических пар, образующих замкнутые или разомкнутые цепи, которая предназначена для передачи и преобразования перемещений входных звеньев и приложенных к ним сил в требуемые перемещения и силы на выходных звеньях.

Механизм

- Механизм – это кинематическая цепь, в которой при заданном движении одного или нескольких звеньев относительно одного из них все остальные звенья совершают однозначно определяемые движения.
- Ведущим звеном называется звено, для которого сумма элементарных работ внешних сил, приложенных к нему, является положительной. Ведомым звеном называется звено, для которого сумма элементарных работ всех внешних сил, приложенных к нему, является отрицательной или равна нулю.
- Входное звено может быть как ведущим, так и ведомым.
- В зависимости от вида кинематической цепи механизмы делятся на плоские и пространственные.
- Чтобы изучить движение механизма, недостаточно знать его структуру, необходимо также знать размеры отдельных звеньев, взаимное положение звеньев. Поэтому при изучении движения звеньев механизма обычно составляют так называемую кинематическую схему механизма. Кинематическая схема механизма строится в выбранном масштабе с точным соблюдением всех размеров и форм.
- Чтобы из кинематической цепи получить механизм, необходимо:
 - одно звено сделать неподвижным, т.е. образовать станину (стойку);
 - одному или нескольким звеньям задать закон движения (сделать ведущими) таким образом, чтобы все остальные звенья совершали требуемые целесообразные движения.

Степень свободы и структурная формула механизма

- Число степеней свободы механизма – это число степеней свободы всей кинематической цепи относительно неподвижного звена (стойки).
- Если число звеньев кинематической цепи равно k , то общее число степеней свободы, которым обладают k звеньев до их соединения в кинематические пары, равно $6k$
- Соединение звеньев в кинематические пары накладывает различное число условий связи S на относительное движение звеньев, зависящее от класса пар.

Формула Малышева

- число пар I класса, у которого $S_1=1$, а $H_1=5$, равно p_1 ,
- число пар II класса, у которого $S_1=2$, а $H_1=4$ – p_2 ,
- число пар III класса, у которого $S_1=3$, а $H_1=3$ – p_3 ,
- число пар IV класса, у которого $S_1=4$, а $H_1=2$ – p_4 ,
- число пар V класса, у которого $S_1=5$, а $H_1=1$ – p_5 ,

из $6k$ степеней свободы, которыми обладали звенья до вхождения в кинематические пары, необходимо исключить те степени свободы, которые отнимаются вхождением звеньев в кинематические пары

Число степеней свободы H кинематической цепи равно

$$H = 6k - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1.$$

формула Малышева, получена П.И. Сомовым в 1887 году и развита А.П. Малышевым в 1923 году

Формула подвижности

При изучении движения механизма рассматриваем абсолютные перемещения, происходящие относительно одного из звеньев, принятого за неподвижное (стойку). Так как одно звено неподвижно, то число степеней свободы цепи уменьшится на шесть и число степеней свободы W механизма относительно неподвижного звена будет равно

$$W = H - 6 \text{ или } W = 6(k-1) - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1$$

или

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1,$$

где $n=k-1$ – число подвижных звеньев кинематической цепи

Величина W показывает, сколько должно быть у механизма ведущих звеньев (если $W = 1$ – одно, $W = 2$ – два ведущих звена и т.д.).

Если механизм обладает одной степенью свободы, то одному из звеньев механизма можем предписать относительно стойки какой-либо определенный закон движения (одну обобщенную координату механизма), например вращательное, поступательное или винтовое движение с заданными скоростями. При этом все остальные звенья механизма получат вполне определенные движения, являющиеся функциями заданного. Если механизм обладает двумя степенями свободы, то необходимо задать одному из звеньев два независимых движения (две обобщенные координаты механизма) относительно стойки или двум звеньям по одному независимому движению относительно стойки.

Обзор основных видов механизмов и их классификация

Механизмы классифицируются по следующим признакам:

1. области применения
2. функциональному назначению
3. виду передаточной функции
4. виду преобразования движения
5. движению и расположению звеньев в пространстве
6. виду траекторий точек звеньев
7. изменяемости структуры механизма
8. числу подвижностей механизма
9. виду кинематических пар
10. структуре кинематической цепи
11. в зависимости от физических свойств звеньев
12. форме, конструктивному исполнению и движению звеньев и кинематических пар

По области применения

- - механизмы летательных аппаратов;
- - механизмы станков;
- - механизмы кузнечных машин и прессов;
- - механизмы двигателей внутреннего сгорания;
- - механизмы промышленных роботов (манипуляторы);
- - механизмы компрессоров;
- - механизмы насосов и т.д.

По функциональному назначению

- - направляющие механизмы - для воспроизведения заданной траектории точки звена, образующего кинематические пары только с подвижными звеньями, обычно являются рычажными или комбинированными;
- - передаточные механизмы - для воспроизведения заданной функциональной зависимости между перемещениями звеньев, образующих кинематические пары со стойкой. С помощью передаточных механизмов реализуется необходимый закон движения выходных звеньев. К передаточным механизмам обычно относятся кулачковые, зубчатые, винтовые, фрикционные, клиновые, а также механизмы с гибкой связью и часть рычажных механизмов

По виду передаточной функции

- с постоянной передаточной функцией;
- с переменной передаточной функцией:
- с нерегулируемой (синусные, тангенсные);
- с регулируемой:
- со ступенчатым регулированием (коробки передач);
- с бесступенчатым регулированием (вариаторы).

По виду преобразования движения

- вращательное во вращательное:
- редукторы $N_{\text{вых}} < N_{\text{вх}}$;
- мультипликаторы $N_{\text{вх}} < N_{\text{вых}}$;
- муфты ;
- вращательное в поступательное;
- поступательное во вращательное;
- поступательное в поступательное

По движению и расположению звеньев в пространстве

- пространственные;
- плоские;
- сферические

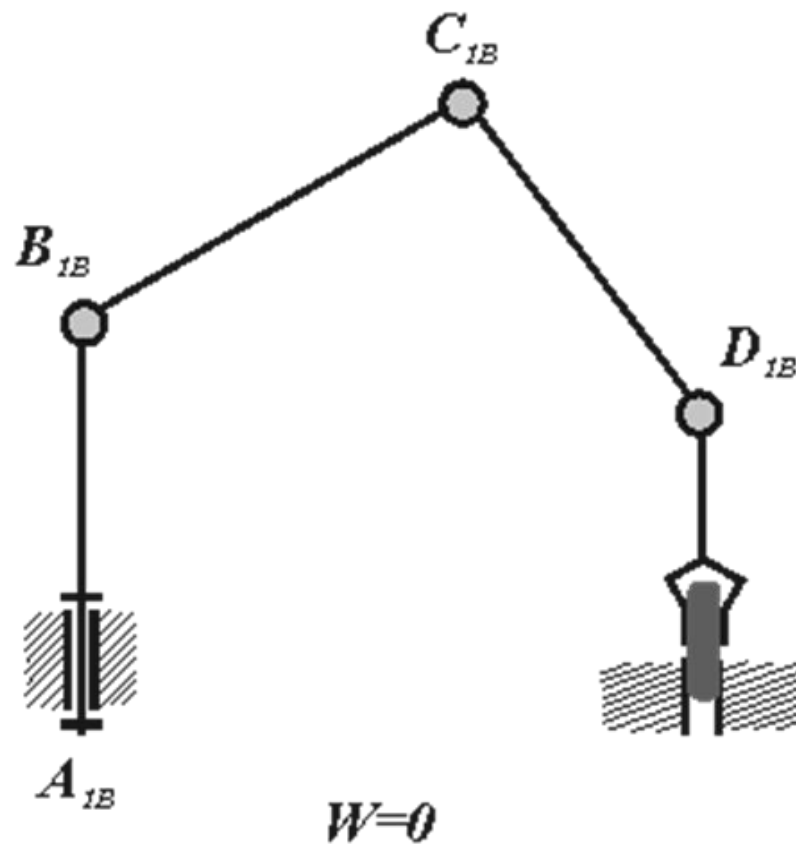
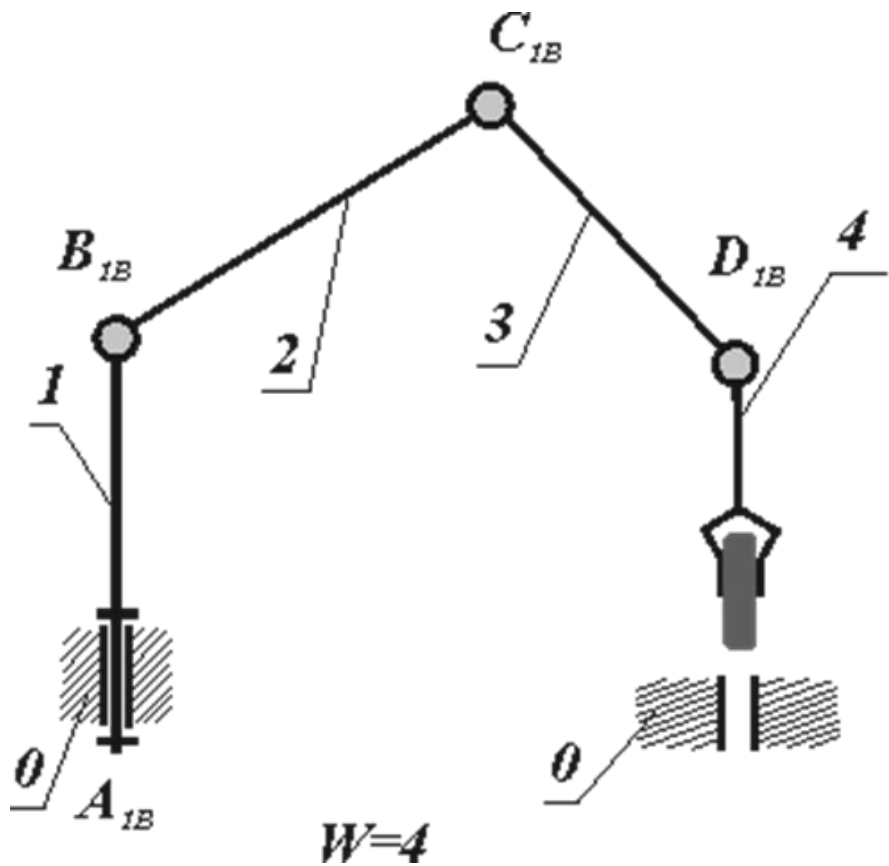
По виду траекторий точек звеньев

- - объемные;
- - поверхностные (плоские, сферические и цилиндрические).

По изменяемости структуры механизма на механизмы:

- с неизменяемой структурой;
- с изменяемой структурой

Изменение структуры



По числу подвижностей механизма

- с одной подвижностью $W=1$;
- с несколькими подвижностями $W>1$;
- суммирующие (интегральные);
- разделяющие (дифференциальные).

Направляющие

Направляющими называют конструктивные элементы устройства, обеспечивающие заданное относительное движение элементов механизма.

В мехатронных модулях в основном применяют направляющие для поступательного движения.

Их используют при необходимости осуществления перемещения одной детали относительно другой с заданной точностью.

К направляющим предъявляют следующие требования: обеспечение плавности перемещения, малые силы трения, большой ресурс работы, износостойкость, способность к перемещению в широком температурном диапазоне.

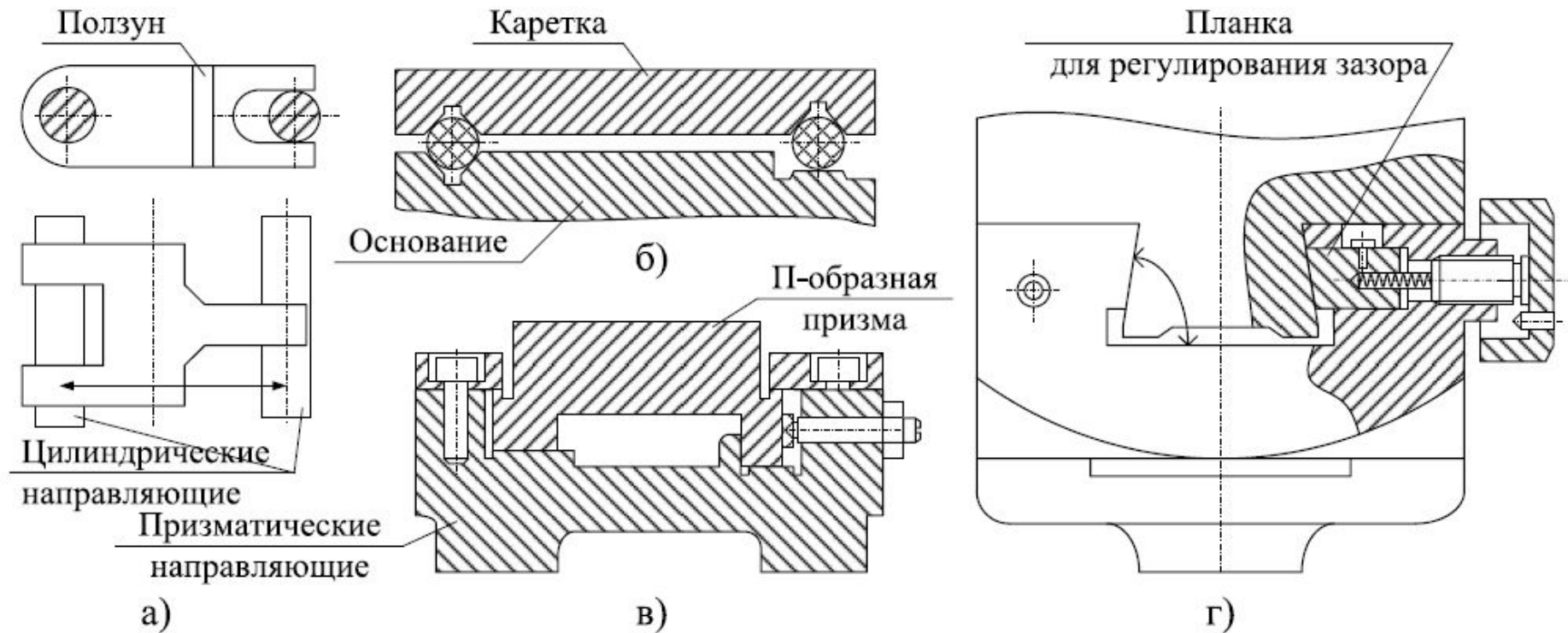
Классификация

- с трением скольжения
- с трением качения
- открытые (для замыкания используются прижимные усилия)
- закрытые (замыкание конструктивное)

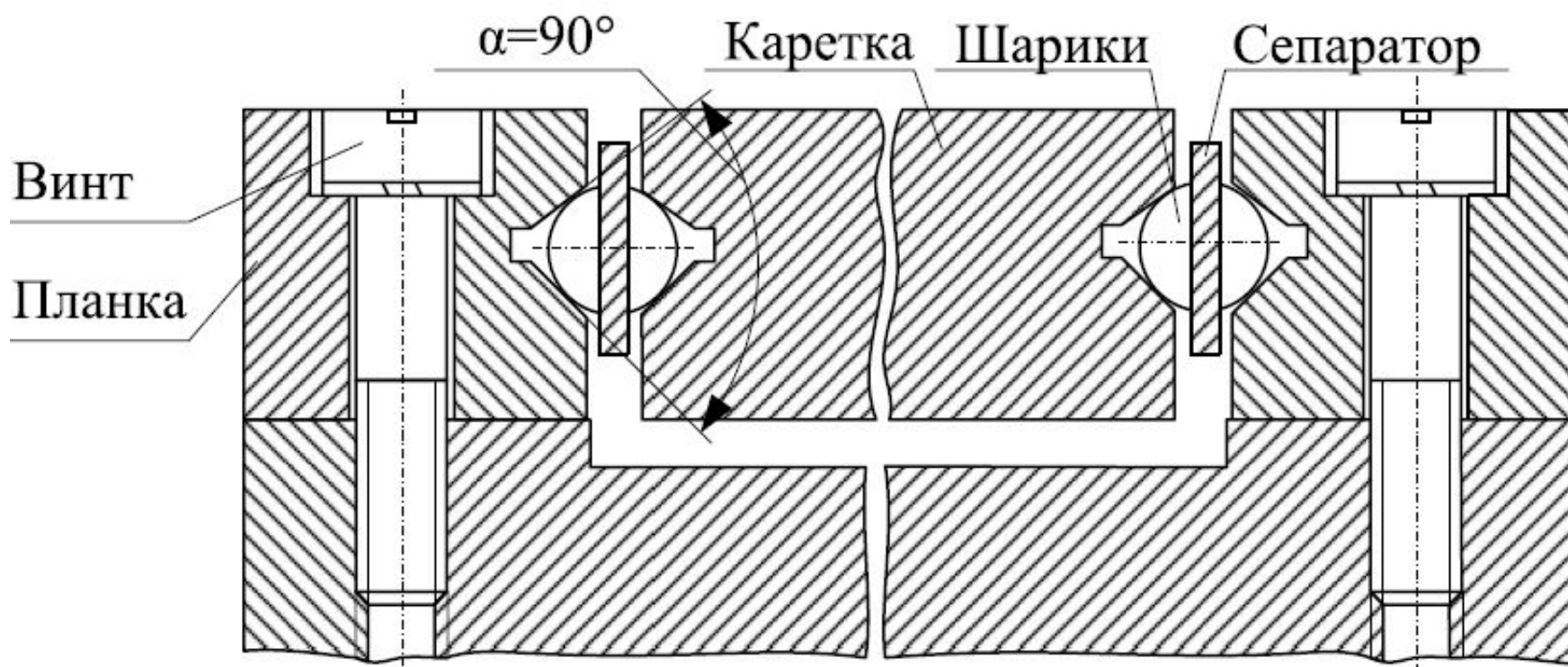
Направляющие в зависимости от формы выполнения рабочих поверхностей делят на цилиндрические, призматические (например,

- типа «ласточкин хвост»), Н-, П- и Т-образные

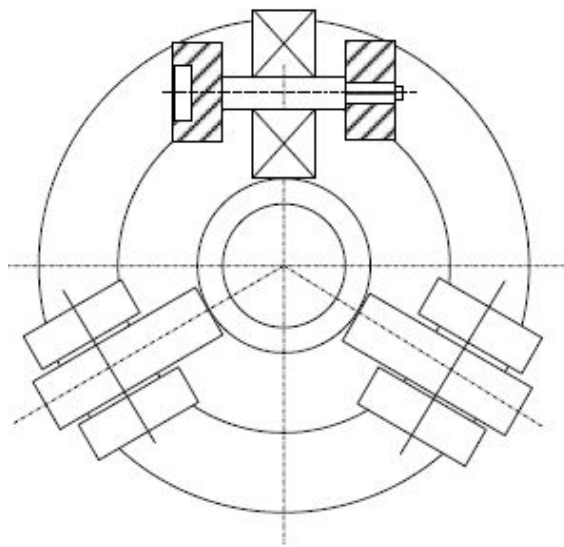
Направляющие с трением скольжения



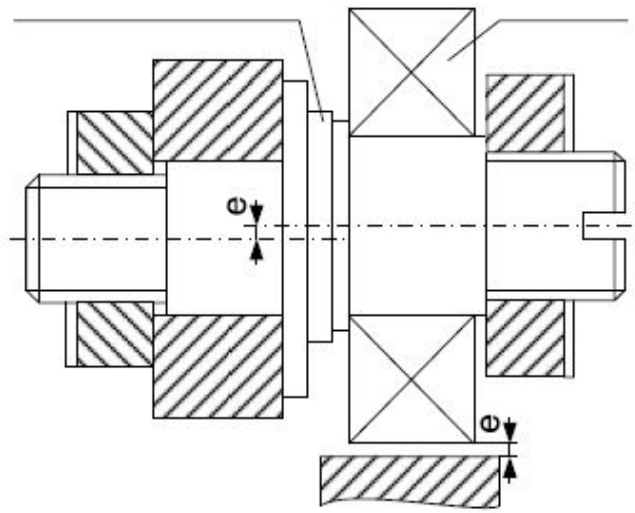
Направляющие с трением качения закрытого типа



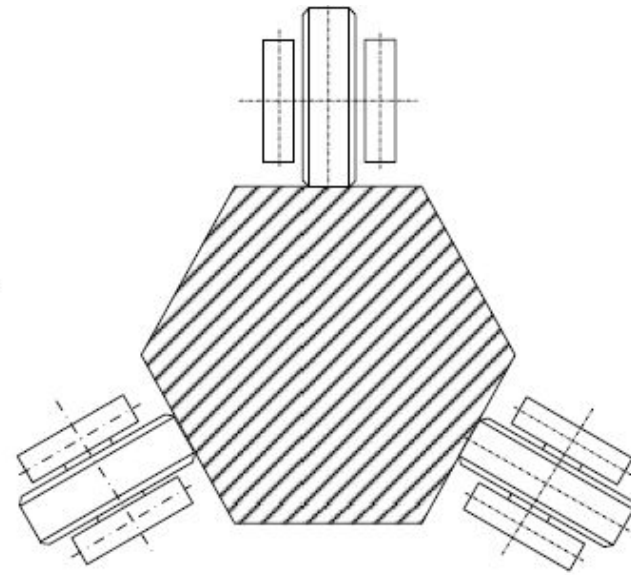
Направляющие с трением качения открытого типа



а



б



в

(Б) Ролик устанавливается на оси с эксцентриситетом e .

Тормозные устройства и механизмы

для выборки люфтов

Тормозными называют устройства, которыми снабжают мехатронные модули, для уменьшения скорости подвижного звена, остановки и фиксации его в определенной позиции.

Классификация по способам создания силы торможения

Механические тормозные устройства – пружинные, резиновые, эластомерные, инерционные и фрикционные.

Гидравлические – устройства дроссельного регулирования.

Пневматические – могут быть напорными и вакуумными.

К электрическим относят электромагнитные, индукционные и гистерезисные, а также порошковые тормозные устройства с сухим и жидким наполнителем фрикционного и дроссельного типов.

Комбинированные – включают в себя два или более типов устройств (например, пневмогидравлические или пружинно-пневматические)

Основные требования:

- обеспечение заданного закона торможения;
- безударный останов и фиксация подвижных элементов в точках
- позиционирования;
- высокая надежность и долговечность конструкции;
- высокое быстродействие; простота и компактность конструкции;
- стабильность характеристик при изменении условий работы;
- малая чувствительность к изменению температуры, влажности,
- тормозимой массы, скорости;
- возможность настройки и доступность регулирования;
- удобство осмотра и обслуживания;
- низкая стоимость,
- минимальные габариты и масса.

Механические тормозные устройства

Силу сопротивления движению подвижного звена создают деформацией рабочих элементов (упругие) или трением (фрикционные).

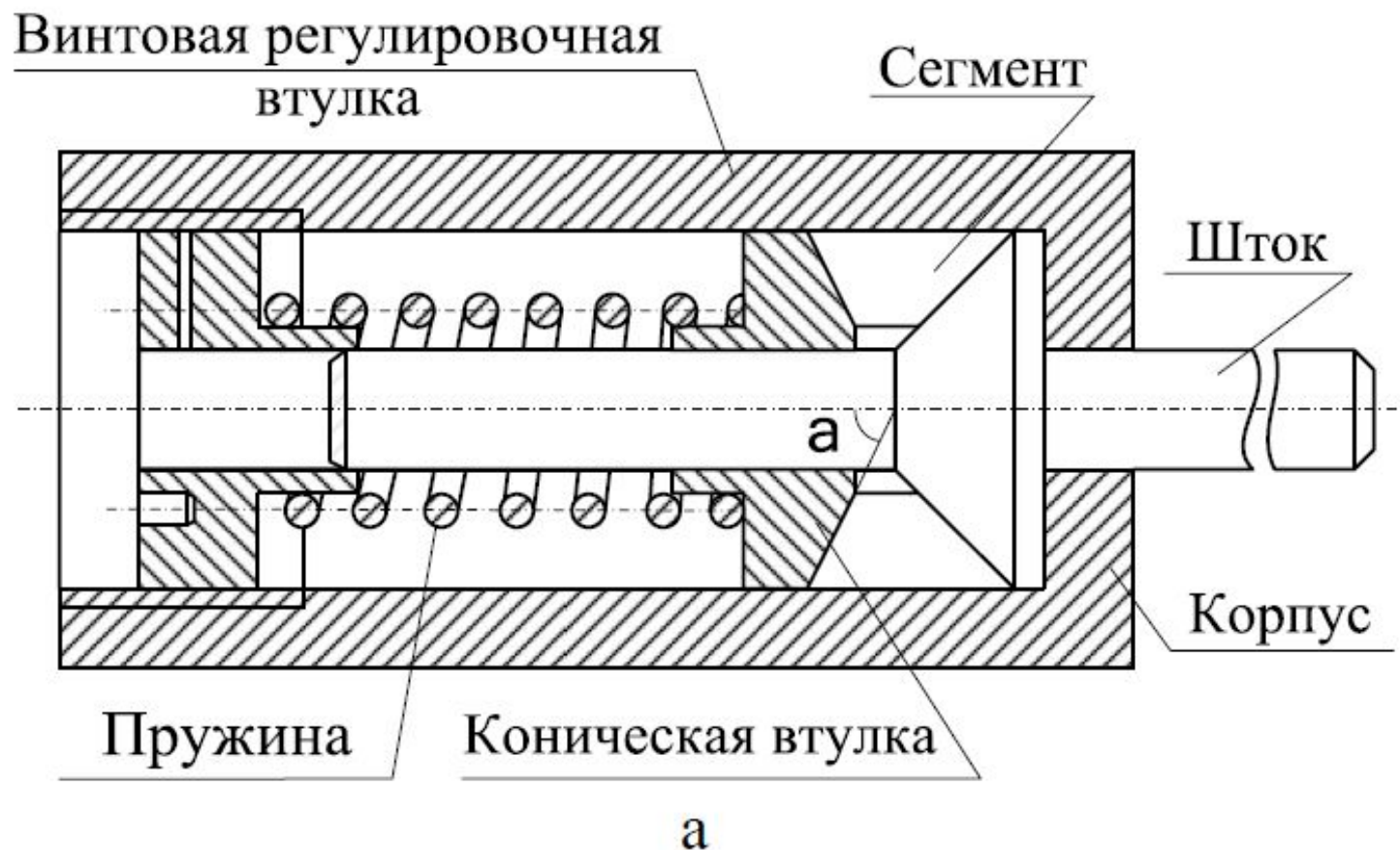
В качестве упругих элементов наиболее часто применяют цилиндрические пружины сжатия, реже – растяжения.

Распространение получили резиновые и резинометаллические упругие элементы различной конфигурации, а также пенополиуретановые упругие элементы.

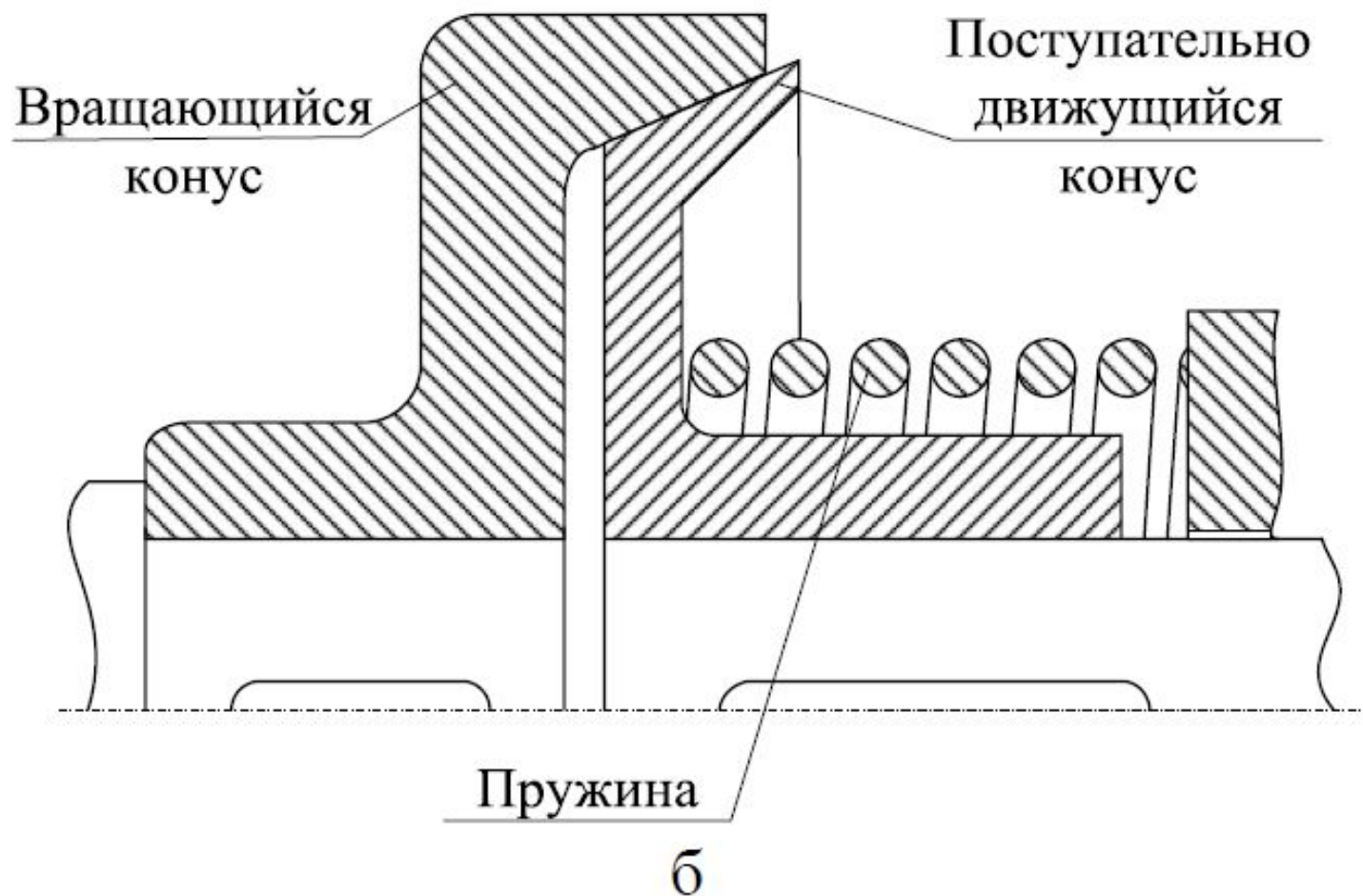
Делятся на

- автономные поступательного движения
- автономные вращательного движения,
- встроенные в пневмо- или гидродвигатель,
- управляемые и неуправляемые,
- нормально замкнутые и разомкнутые,
- одно- и двустороннего действия.

Упруго-фрикционный с цилиндрической пружиной и разрезной конической втулкой;



Фрикционный конусный тормоз



Электромагнитные тормозные устройства

В управляемых электромагнитных тормозных устройствах источником создания тормозящего момента или усилия является электромагнитное поле, воздействующее непосредственно на движущиеся элементы (электромагнитные, индукционные и гистерезисные тормоза) или косвенно через порошкообразный сухой или жидкий наполнитель (электромагнитные порошковые или с ферромагнитными жидкостями тормоза).

Действие электромагнитного порошкового тормоза фрикционного типа основано на свойстве сухого или взвешенного в масле ферромагнитного порошка увеличивать в магнитном поле свою вязкость и прочно прилипать к поверхности магнитной системы.

Механизмы для выборки люфтов

Точность работы мехатронных модулей определяется допусками на размеры сопрягаемых деталей и величиной мертвого хода (холостого, т. е. не передаваемого на ведомое звено движения ведущего звена механизма, возникающее в момент реверсирования движения).

Мертвый ход приводит к ошибкам перемещения, поэтому его стремятся уменьшить или устранить. Этого можно достичь с помощью специальных регулировочных устройств-механизмов выборки мертвого хода (люфтовыбирающих механизмов).

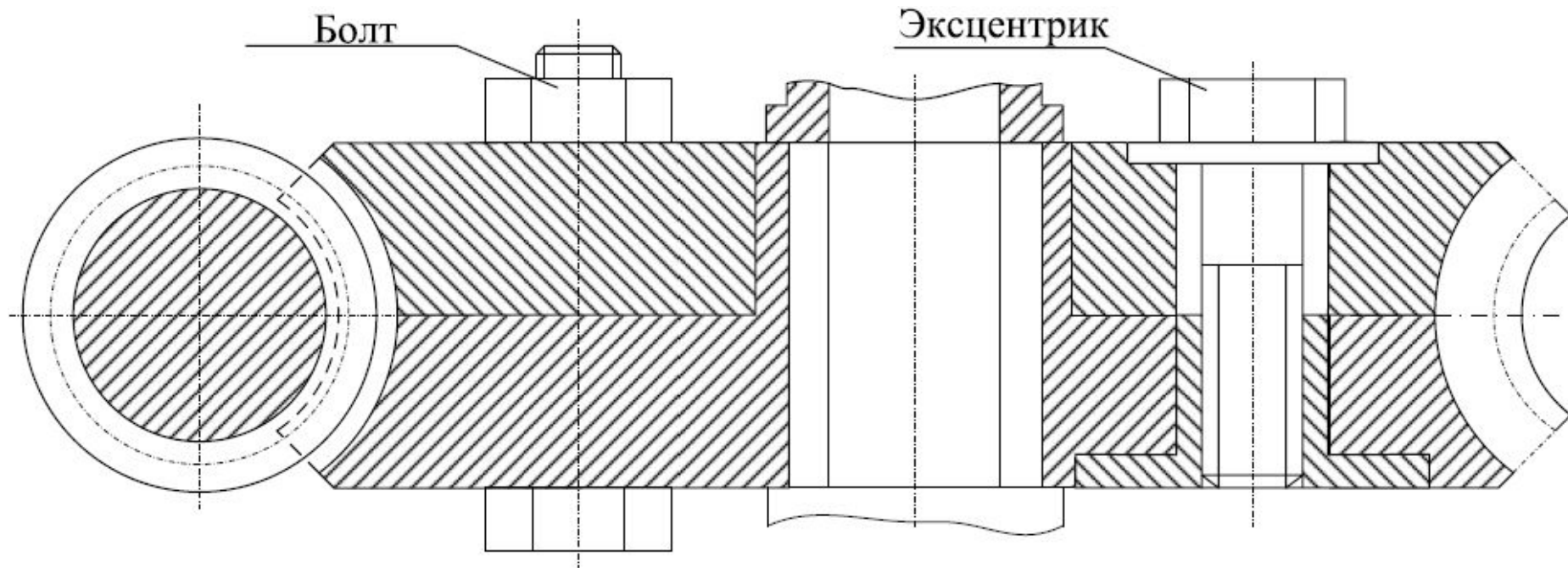
Способы и механизмы

В мехатронных модулях могут использовать механизмы выборки бокового зазора между зубьями колес зубчатых передач двух типов: автономные и с дополнительной кинематической цепью (замкнутым энергетическим потоком).

В автономных механизмах выборки мертвого хода используют метод раздвоения ведомого колеса, где в качестве силовых элементов используют пружины.

Кроме выборки мертвого хода при помощи пружин используют жесткую фиксацию, заключающуюся в предварительном относительном смещении половинок раздвоенного зубчатого колеса и их жестком закреплении при помощи винтов, болтов, клеммовых соединений и т. д.

Червячная передача с раздвоенным червячным колесом



Зубья половинок и червячного колеса прижимают поворотом эксцентрика к разным сторонам зубьев червяка и их жестко фиксируют, затягивая болт.

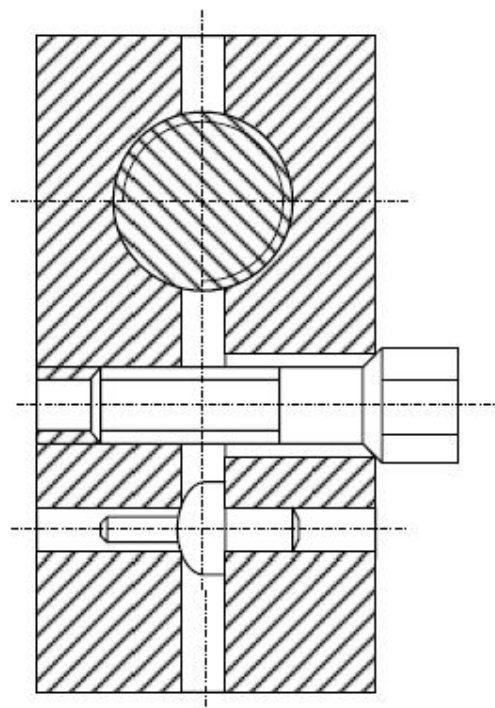
Способы выборки бокового зазора в винтовых механизмах

Радиальное и осевое смещение гайки относительно винта.

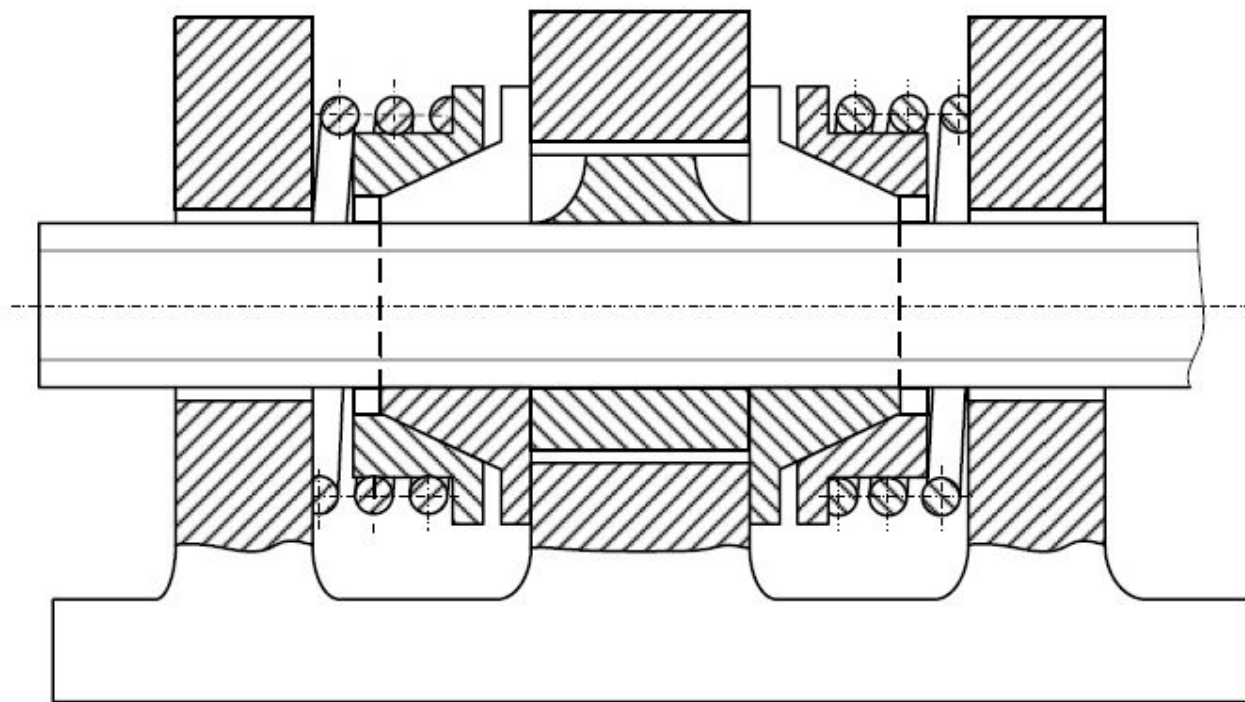
При радиальном способе осуществляют сжатие гайки в радиальном направлении.

При осевом – относительное смещение разрезной гайки в осевом направлении.

Радиальный зазор

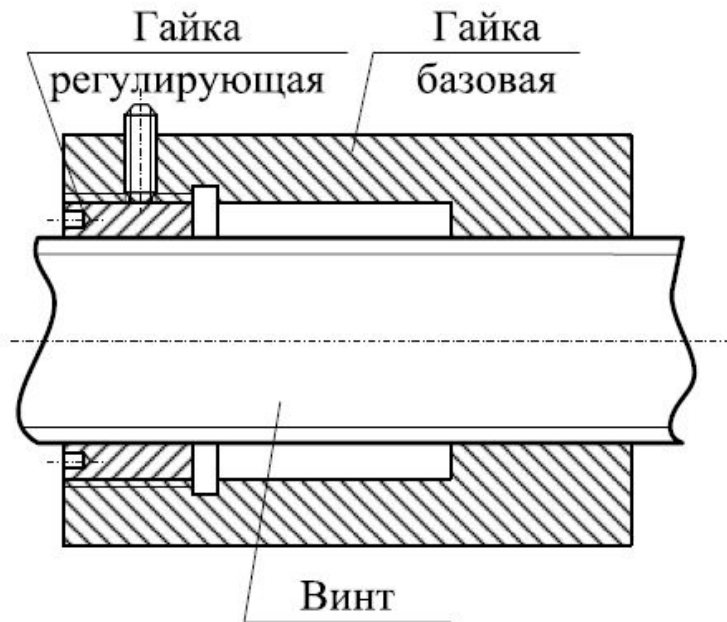


а

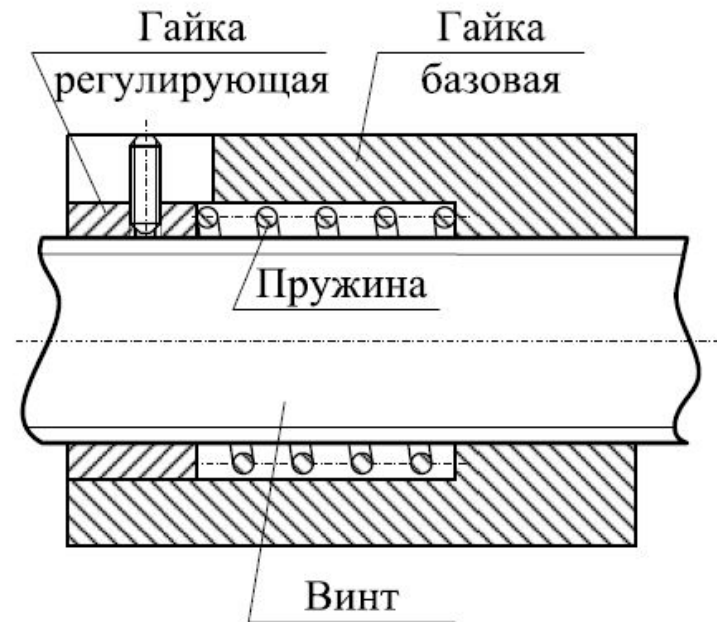


б

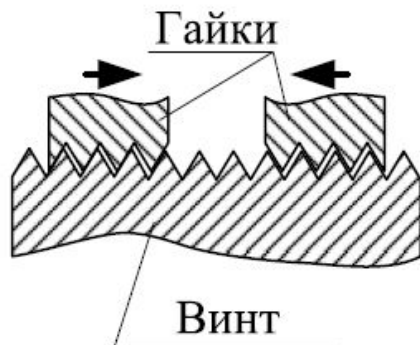
Осевой зазор



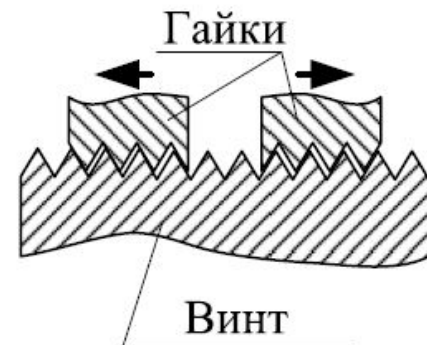
а



б



в

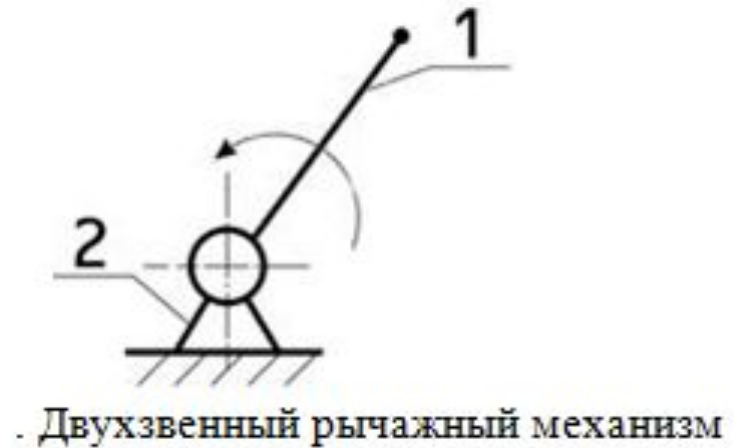
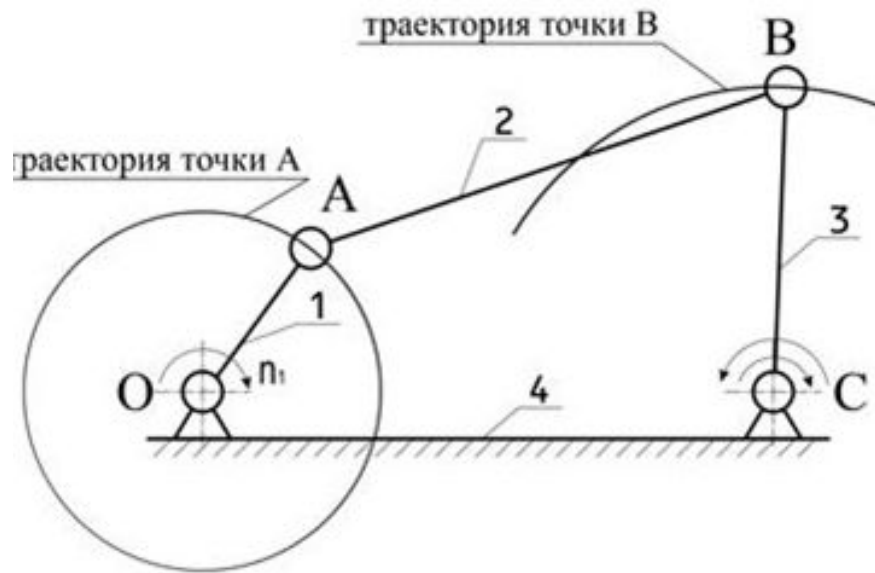


г

Преобразователи движения

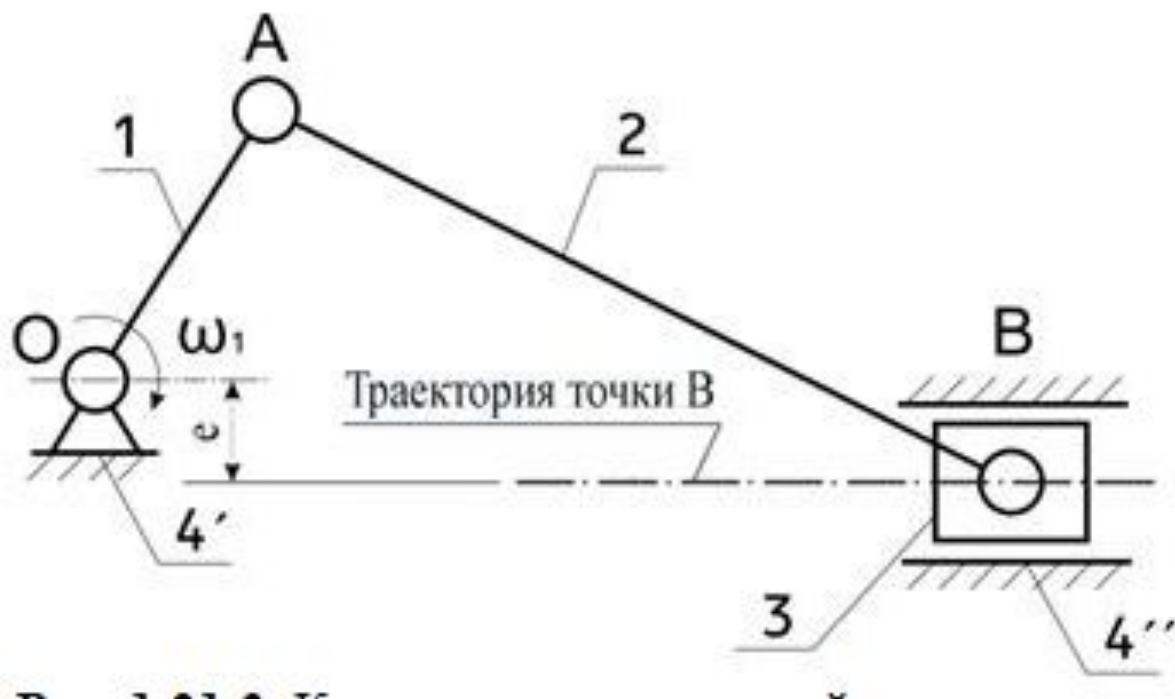
Рычажные механизмы

- шарнирные механизмы



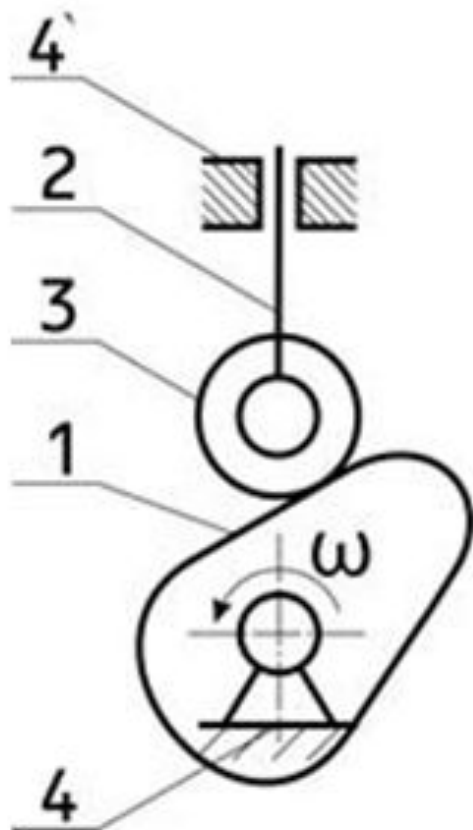
- Механизм шарнирного четырехзвенника

Кривошипно-ползунный механизм



Кривошип 1, вращаясь вокруг оси, через кулисный камень 2 заставляет кулису 3 совершать качательное движение.

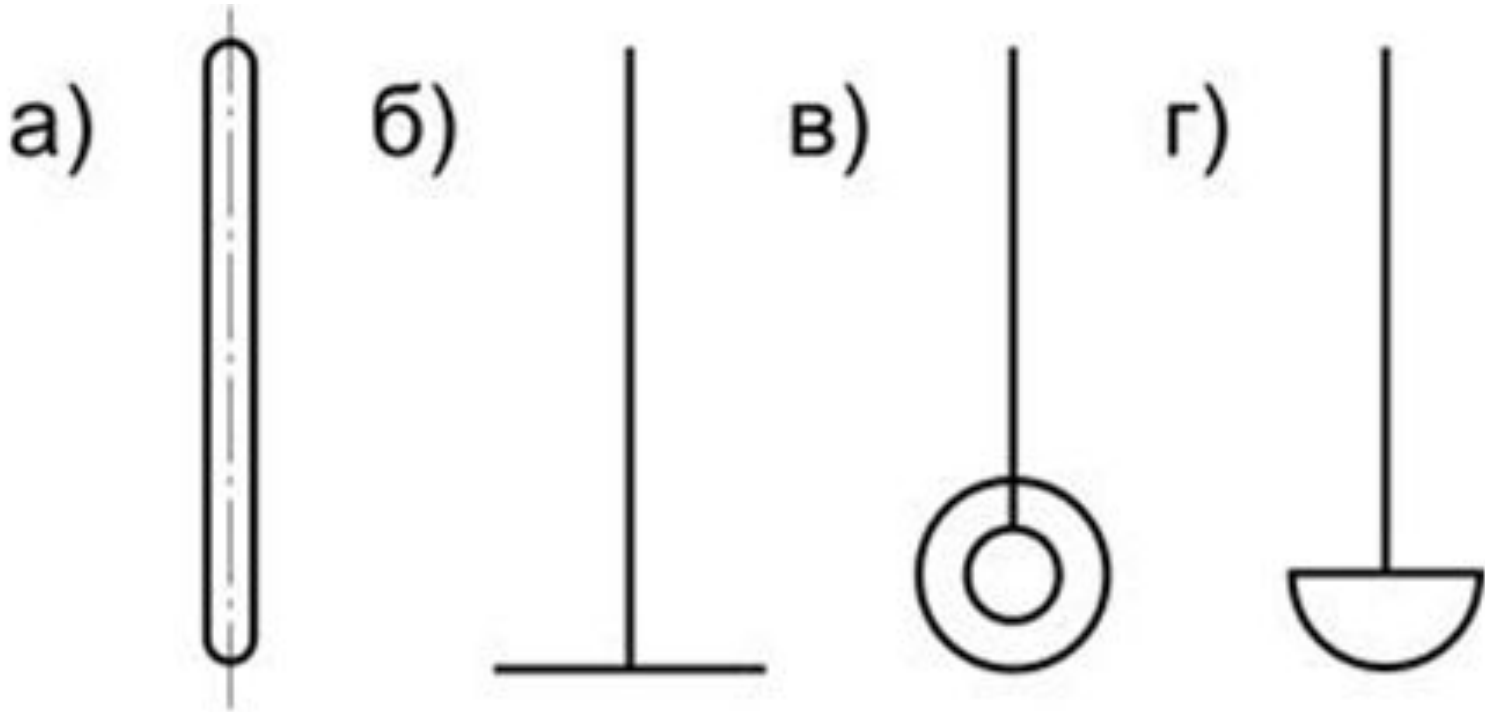
Кулачковые механизмы



Механизм с поступательным движущимся толкателем

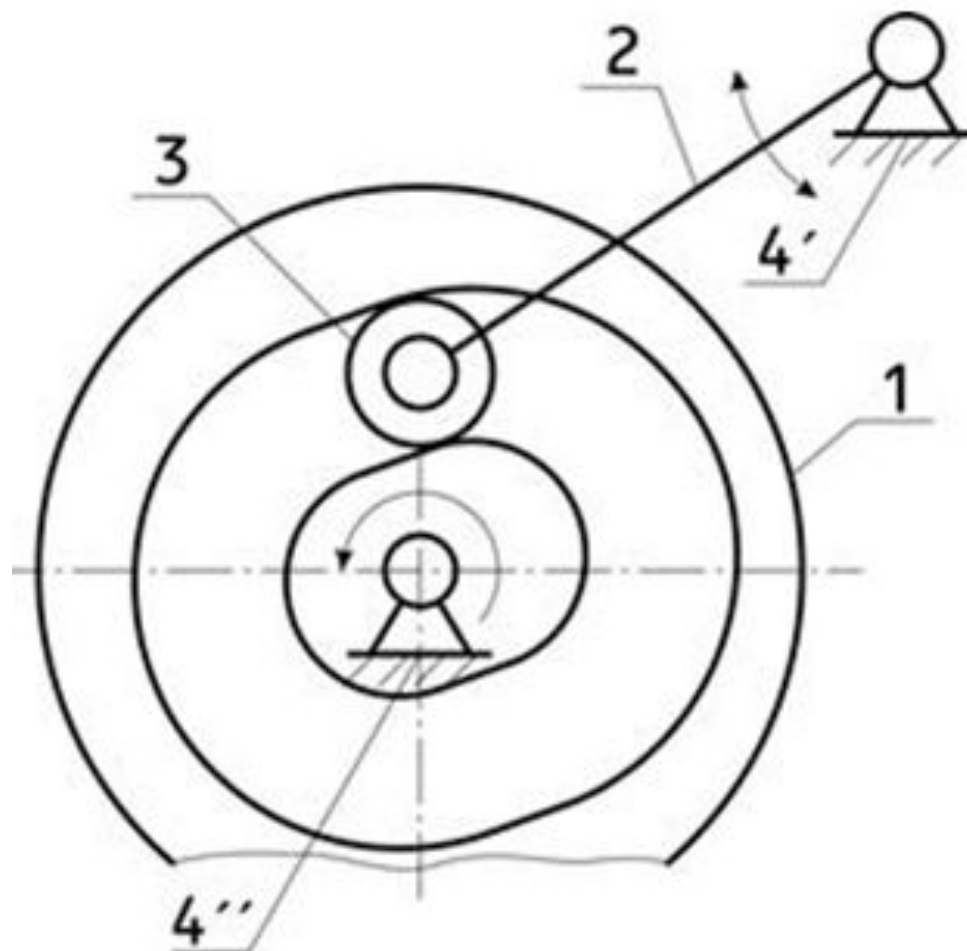
Кулачковые механизмы предназначены для преобразования вращательного движения ведущего звена (кулачка) в заведомо заданный закон возвратно-поступательного движения ведомого звена (толкателя). Широко применяются кулачковые механизмы в швейных машинах, двигателях внутреннего сгорания, автоматах и позволяют получить заведомо заданный закон движения толкателя, а также обеспечить временные остановки ведомого звена при непрерывном движении

Виды ведомых звеньев, применяемые для кулачковых механизмов с поступательно движущимся выходным звеном

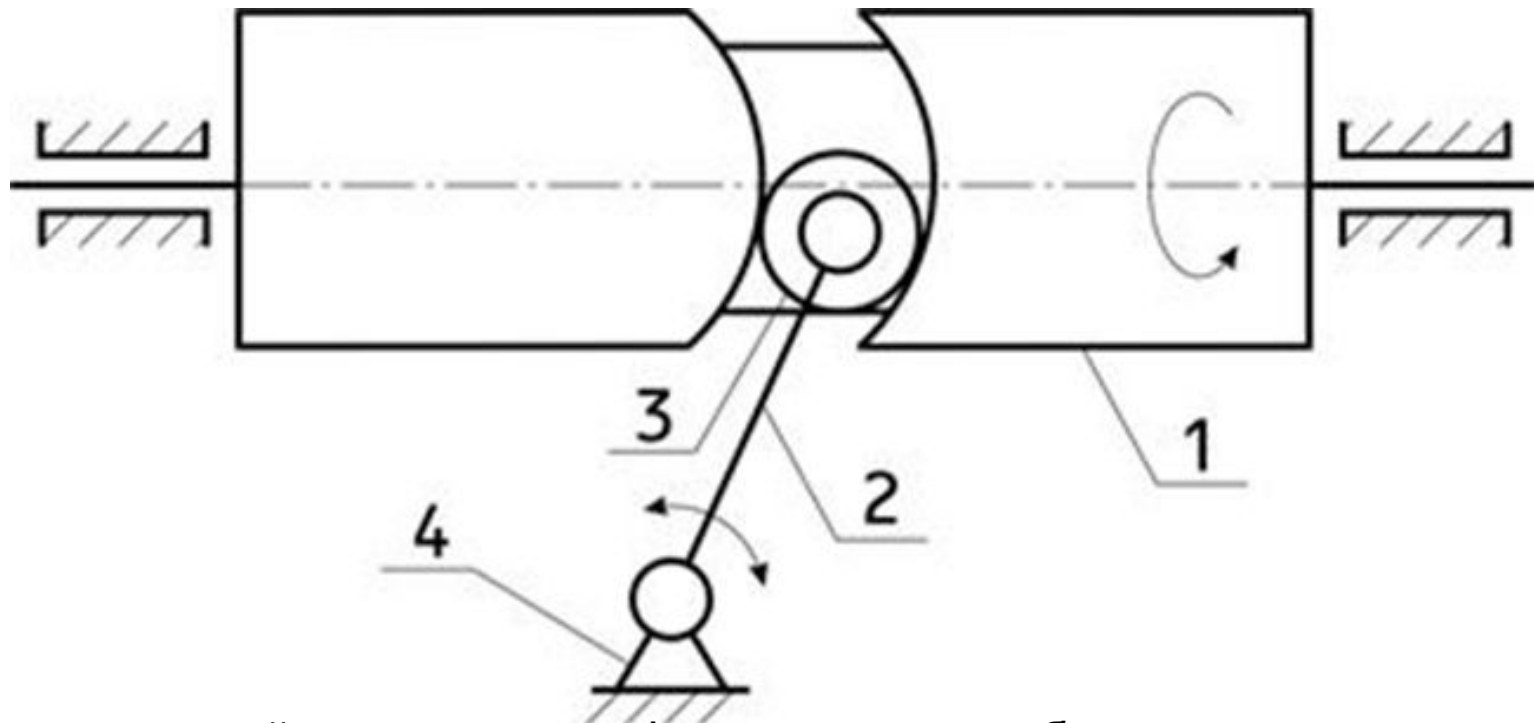


- а) толкатель с острием;
- б) с плоскостью;
- в) толкатель с роликом;
- г) толкатель со сферическим наконечником

Кулачковый механизм с геометрическим замыканием



Пространственный кулачковый механизм барабанного типа

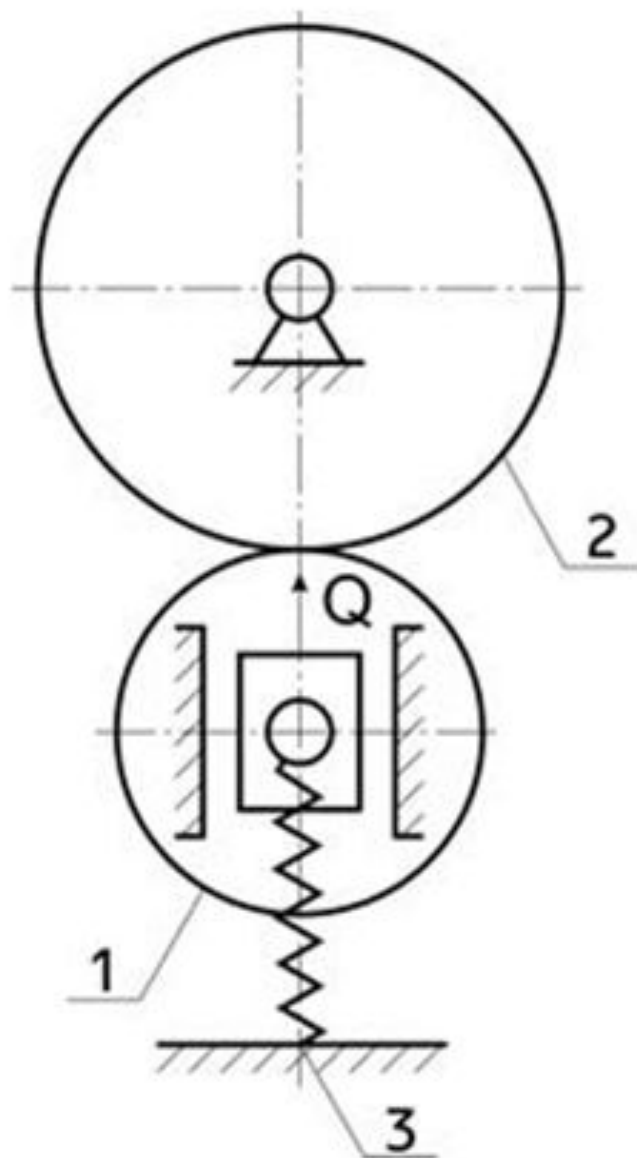


Цилиндрический кулачок 1 с профильным пазом, обеспечивающим кинематическое замыкание высшей пары, вращается с постоянной угловой скоростью и через ролик 3 сообщает качательное движение толкателю 2, закон изменения которого зависит от очертания паза.

Передачи вращения

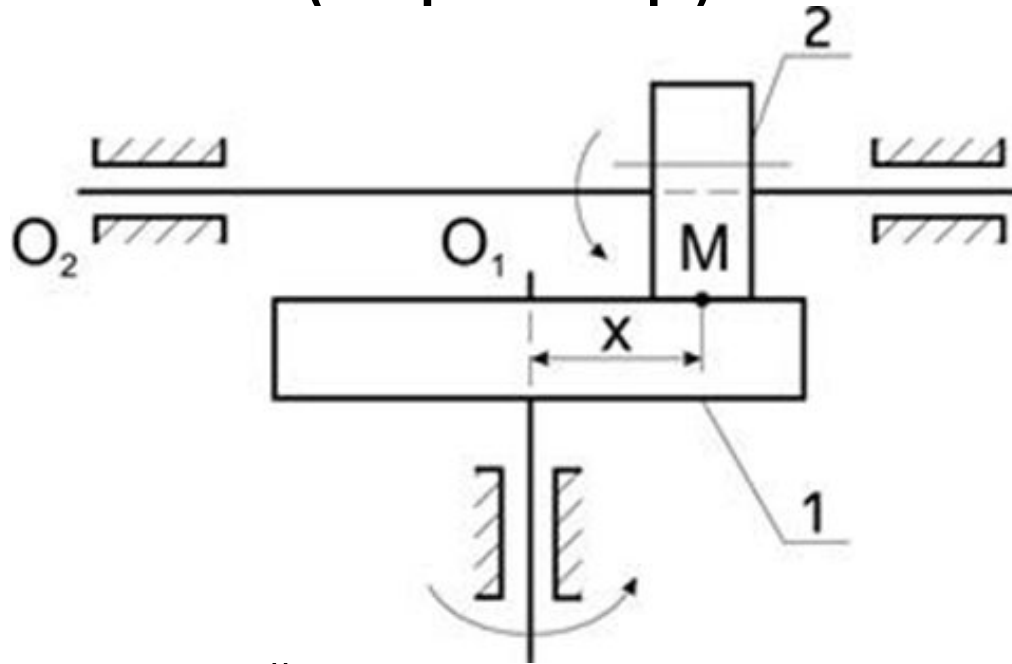
- 1) энергию целесообразно передавать при больших частотах вращения;
- 2) требуемые скорости движения рабочих органов машин, как правило, не совпадают с оптимальными скоростями двигателя; обычно ниже, а создание тихоходных двигателей вызывает увеличение габаритов и стоимости;
- 3) скорость исполнительного органа в процессе работы машины-орудия необходимо изменять (например, у автомобиля, грузоподъемного крана, токарного станка), а скорость машины-двигателя чаще постоянна (например, у электродвигателей);
- 4) нередко от одного двигателя необходимо приводить в движение несколько механизмов с различными скоростями;
- 5) в отдельные периоды работы исполнительному органу машины требуется передать вращающие моменты, превышающие моменты на валу машины-двигателя, а это возможно выполнить за счет уменьшения угловой скорости вала машины-орудия;
- 6) двигатели обычно выполняют для равномерного вращательного движения, а в машинах часто оказывается необходимым поступательное движение с определенным законом;
- 7) двигатели не всегда могут быть непосредственно соединены с исполнительными механизмами из-за габаритов машины, условий техники безопасности и удобства обслуживания.

Фрикционные передачи



На рис. рассмотрена фрикционная передача с цилиндрическими катками для передачи вращательного движения между параллельными валами. Передача движения от ведущего катка 1 к ведомому катку 2 осуществляется силой трения, возникающей под действием пружины с силой равной Q . В передачах же с пересекающимися осями применяют фрикционные передачи с коническими катками.

Лобовая фрикционная передача (вариатор)

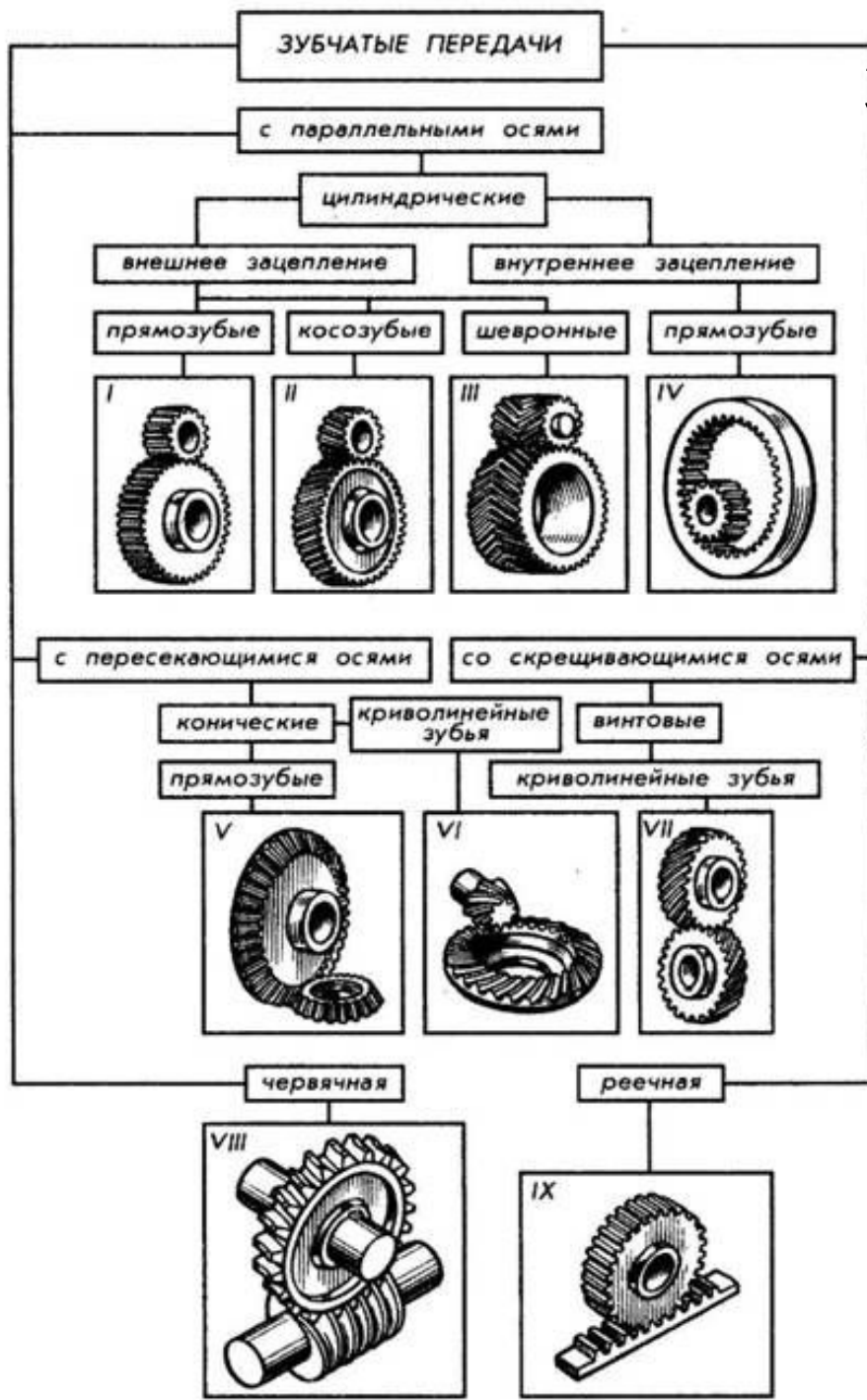


Достоинствами фрикционной передачи являются плавность работы, простота конструкции, невозможность поломки при резком изменении крутящего момента на одном из валов благодаря возможности проскальзывания катков и возможность осуществления бесступенчатого изменения передаточного отношения, а также реверсирования.

Недостатками являются:

необходимость прижимного устройства, невозможность передачи значительных крутящих моментов,

не обеспечивают постоянства передаточного отношения между ведущим и ведомым валами



Зубчатые передачи

Достоинства:

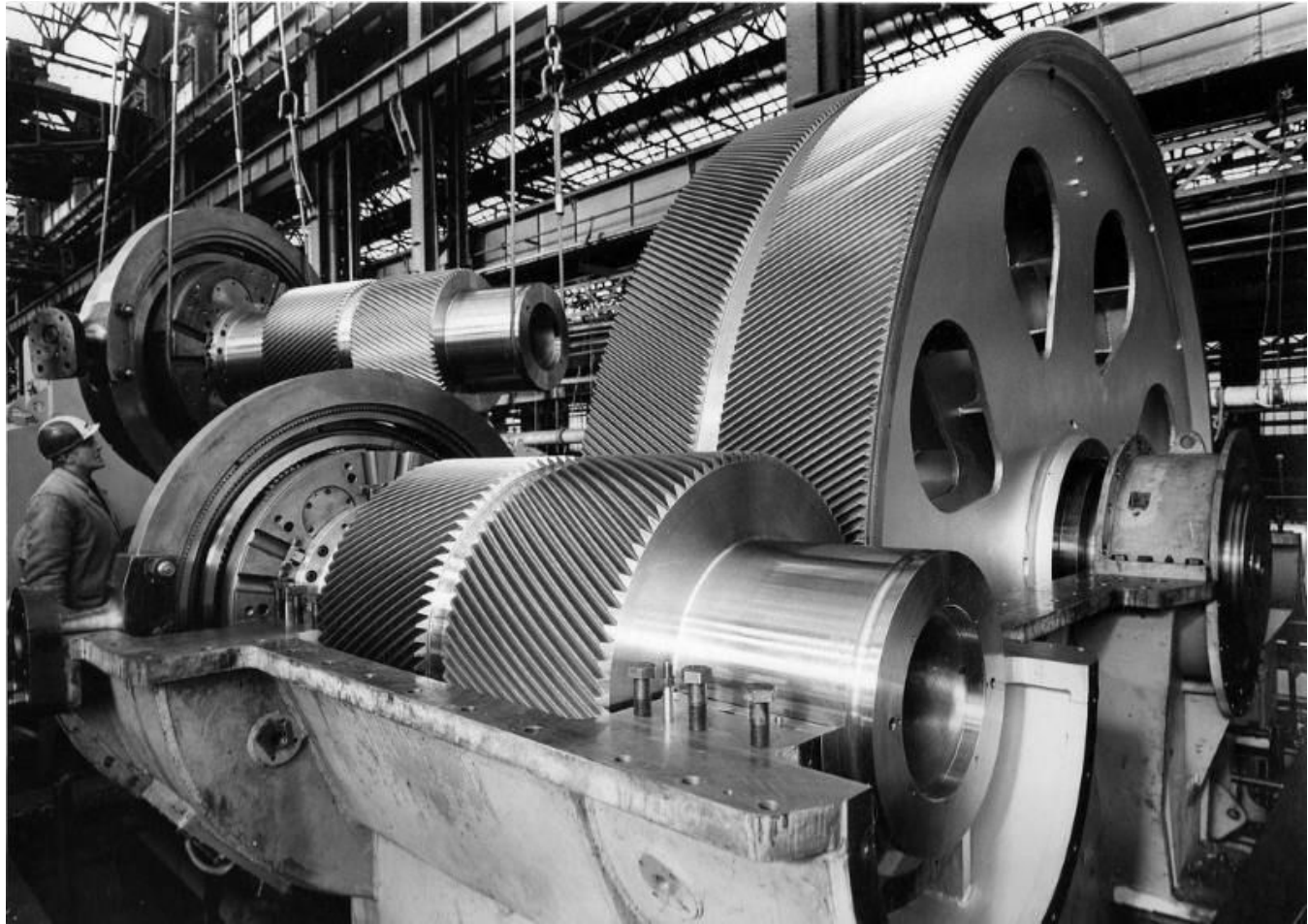
- а) практически неограниченная передаваемая мощность
- б) малые габариты и вес,
- в) стабильное передаточное отношение,
- г) высокий КПД, который составляет в среднем 0,97 - 0,98.

Недостаток

шум в работе на высоких скоростях

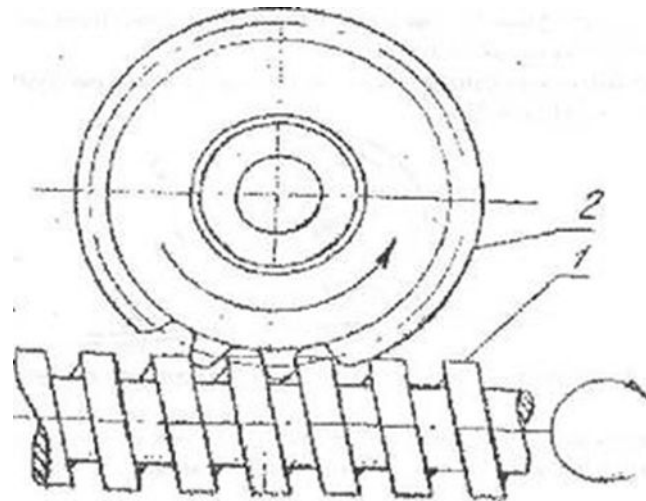
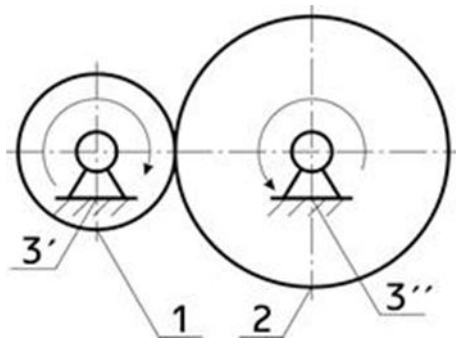
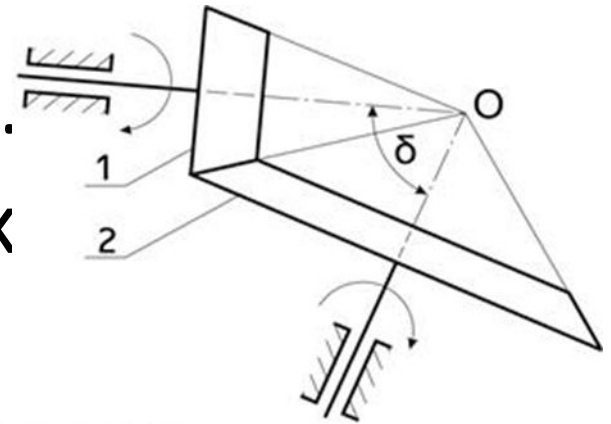
Применение ЗП





Зубчатые передачи

- При параллельных валах.
- При пересекающихся валах.
- При скрещивающихся валах



Цилиндрическая зубчатая передача



Зубчатая передача — это механизм или часть механизма механической передачи, в состав которого входят зубчатые колёса.

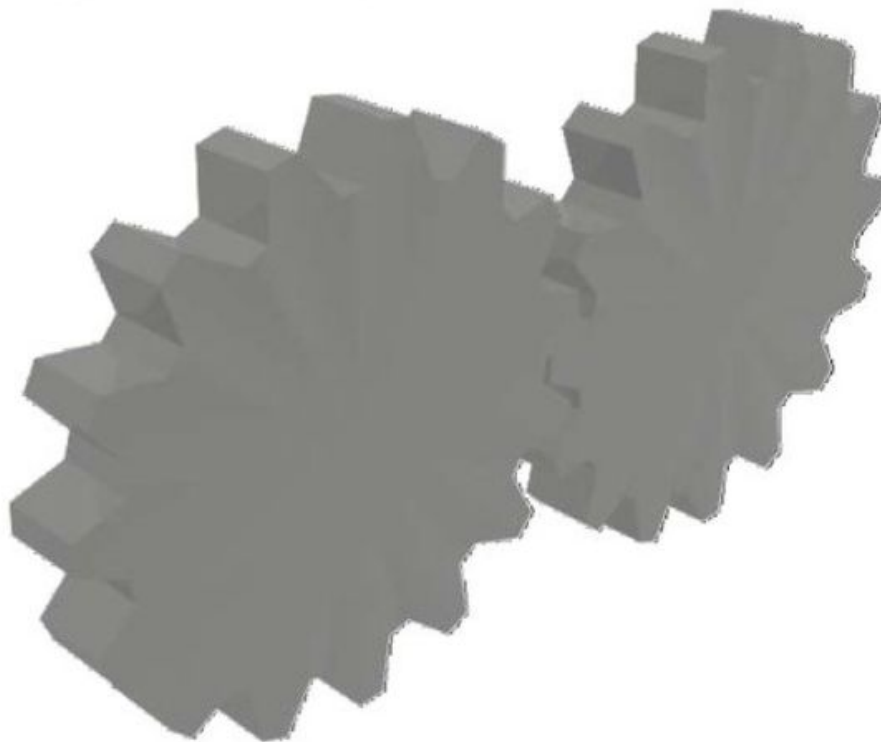
Назначение:

- ❖ передача вращательного движения между валами, которые могут иметь параллельные, пересекающиеся и скрещивающиеся оси.
- ❖ преобразование вращательного движения в поступательное и наоборот.

При этом усилие от одного элемента к другому передаётся с помощью зубьев. Зубчатое колесо передачи с меньшим числом зубьев называется **шестернёй**, второе колесо с большим числом зубьев называется **колесом**.

Пара зубчатых колёс имеющих одинаковое число зубьев — в этом случае ведущее зубчатое колесо называется **шестернёй**, а ведомое — **колесом**.

Прямозубые колёса

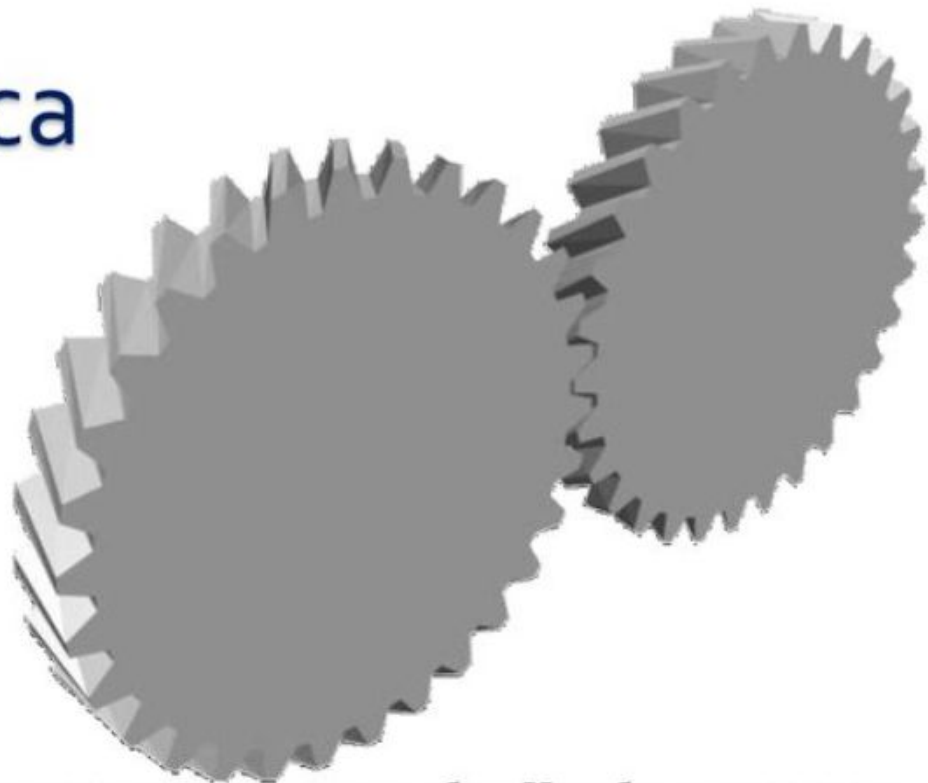


Прямозубые колёса — самый распространённый вид зубчатых колёс.

Зубья расположены в радиальных плоскостях, а линия контакта зубьев обеих шестерён параллельна оси вращения. При этом оси обеих шестерён также должны располагаться строго параллельно. Прямозубые колеса имеют наименьшую стоимость, но, в то же время, предельный крутящий момент таких колес ниже, чем косозубых и шевронных



Косозубые колёса



Косозубые колёса являются усовершенствованным вариантом прямозубых. Их зубья располагаются под углом к оси вращения, а по форме образуют часть спирали.

Достоинства:

Зацепление таких колёс происходит плавнее, чем у прямозубых, и с меньшим шумом.

Площадь контакта увеличена по сравнению с прямозубой передачей, таким образом, предельный крутящий момент, передаваемый зубчатой парой, тоже больше.

Недостатками косозубых колёс можно считать следующие факторы:

При работе косозубого колеса возникает механическая сила, направленная вдоль оси, что вызывает необходимость применения для установки вала упорных подшипников;

Увеличение площади трения зубьев (что вызывает дополнительные потери мощности на нагрев), которое компенсируется применением специальных смазок.

В целом, косозубые колёса применяются в механизмах, требующих передачи большого крутящего момента на высоких скоростях, либо имеющих жёсткие ограничения по шумности.

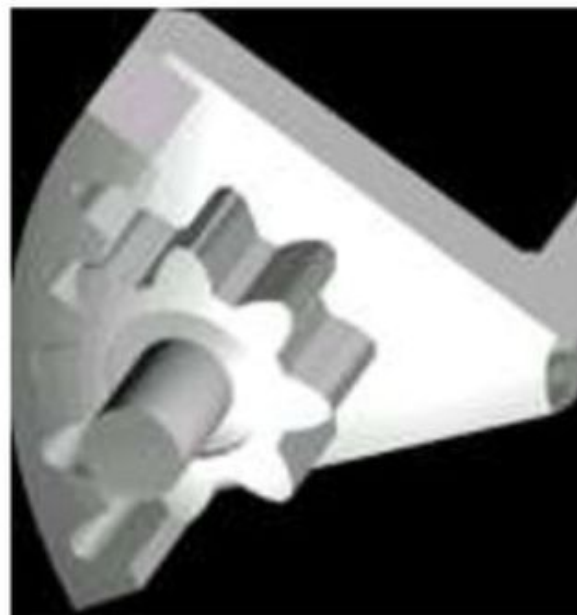
Шевронные колеса



Зубья таких колёс изготавливаются в виде буквы «V» (либо они получаются стыковкой двух косозубых колёс со встречным расположением зубьев). Передачи, основанные на таких зубчатых колёсах, обычно называют «шевронными».

Шевронные колёса решают проблему осевой силы. Осевые силы обеих половин такого колеса взаимно компенсируются, поэтому отпадает необходимость в установке валов на упорные подшипники. При этом передача является самоустанавливающейся в осевом направлении, по причине чего в редукторах с шевронными колёсами один из валов устанавливают на плавающих опорах (как правило — на подшипниках с короткими цилиндрическими роликами).

Передача с внутренним зацеплением



Зубчатые колёса с внутренним зацеплением

При жёстких ограничениях на габариты, в планетарных механизмах, в шестерённых насосах с внутренним зацеплением, в приводе башни танка, применяют колёса с зубчатым венцом, нарезанным с внутренней стороны. Вращение ведущего и ведомого колеса совершается в одну сторону. В такой передаче меньше потери на трение, то есть выше КПД.

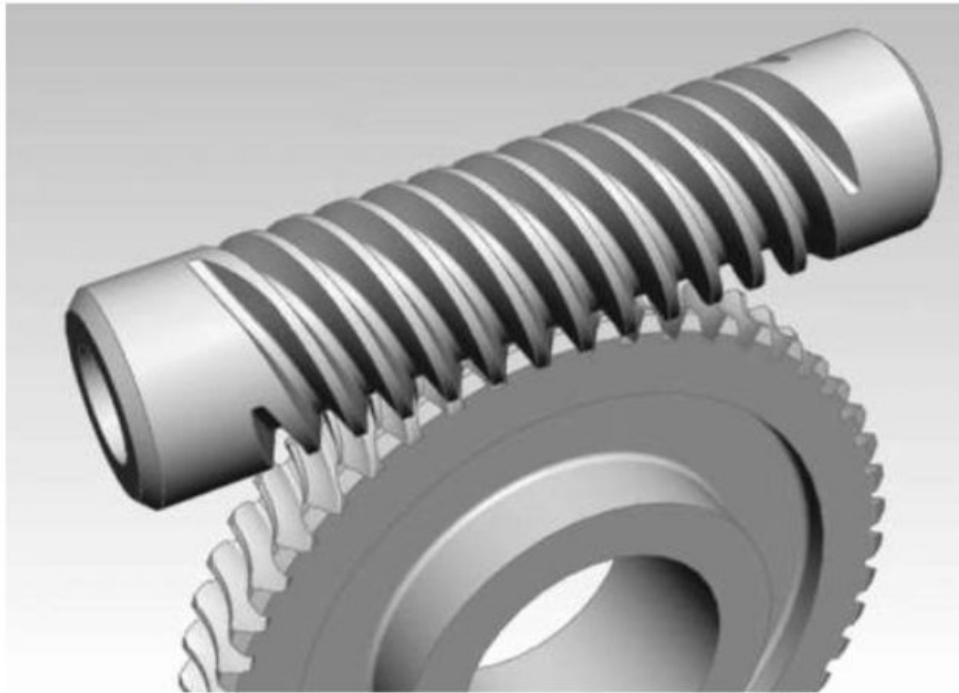
Конические зубчатые колёса



Главная передача в автомобиле

Во многих машинах осуществление требуемых движений механизма связано с необходимостью передать вращение с одного вала на другой при условии, что оси этих валов пересекаются. В таких случаях применяют коническую зубчатую передачу. Различают виды конических колёс, отличающихся по форме линий зубьев: с прямыми, тангенциальными, круговыми и криволинейными зубьями. Конические колёса с прямым зубом, например, применяются в автомобильных дифференциалах, используемых для передачи момента от двигателя к колёсам.

Червячная передача с четырёхзаходным червяком



Червячная передача (зубчато-винтовая передача) — механическая передача, осуществляющаяся зацеплением червяка и сопряжённого с ним червячного колеса. Передача предназначена для существенного увеличения крутящего момента и, соответственно, уменьшения угловой скорости. Ведущим звеном является червяк.

Гипоидная зубчатая передача



Гипоидная передача: 1—ведомая шестерня, 2—ведущая шестерня

Гипоидная передача (гиперболоидная) — вид винтовой зубчатой передачи, осуществляемой коническими колёсами (с косыми или криволинейными зубьями) со скрещивающимися осями (обычно 90°). Гипоидная передача имеет смещение по оси между большим и малым зубчатыми колесами. Данный тип передачи характеризуется повышенной нагрузочной способностью, плавностью хода и бесшумностью работы. Часто используется как главная передача в приводах ведущих колёс автомобилей, сельскохозяйственной техники, а также в качестве привода в станках и прочих промышленных машинах для обеспечения высокой точности при большом передаточном числе

Реечная передача



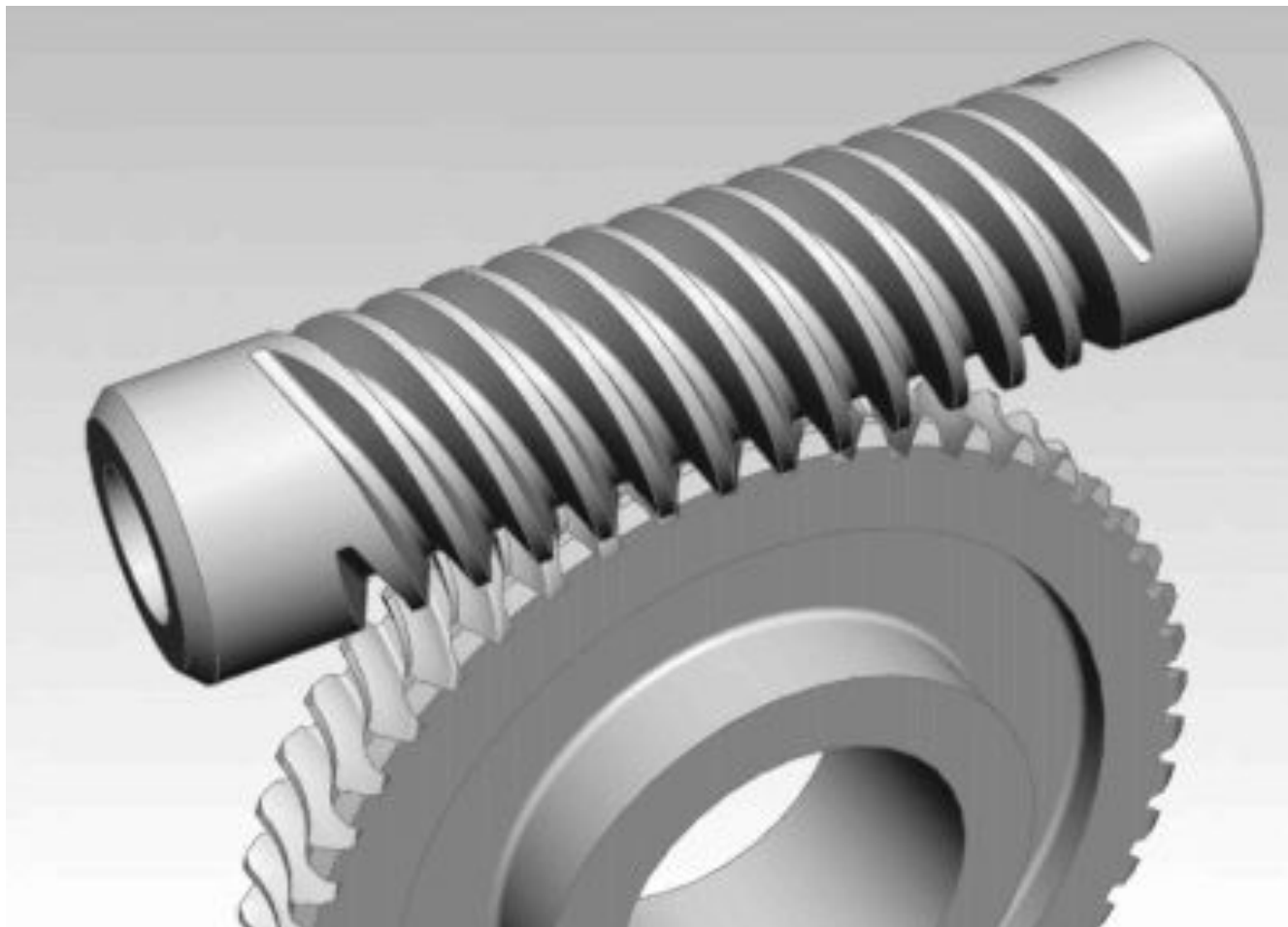
Рис. 5.2. Реечная передача



Зубчатая ременная передача



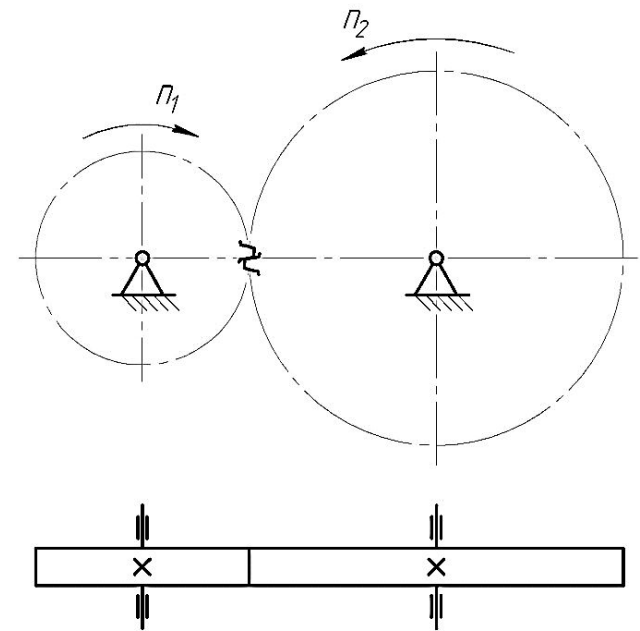
Червячная передача



Расчет зубчатых передач

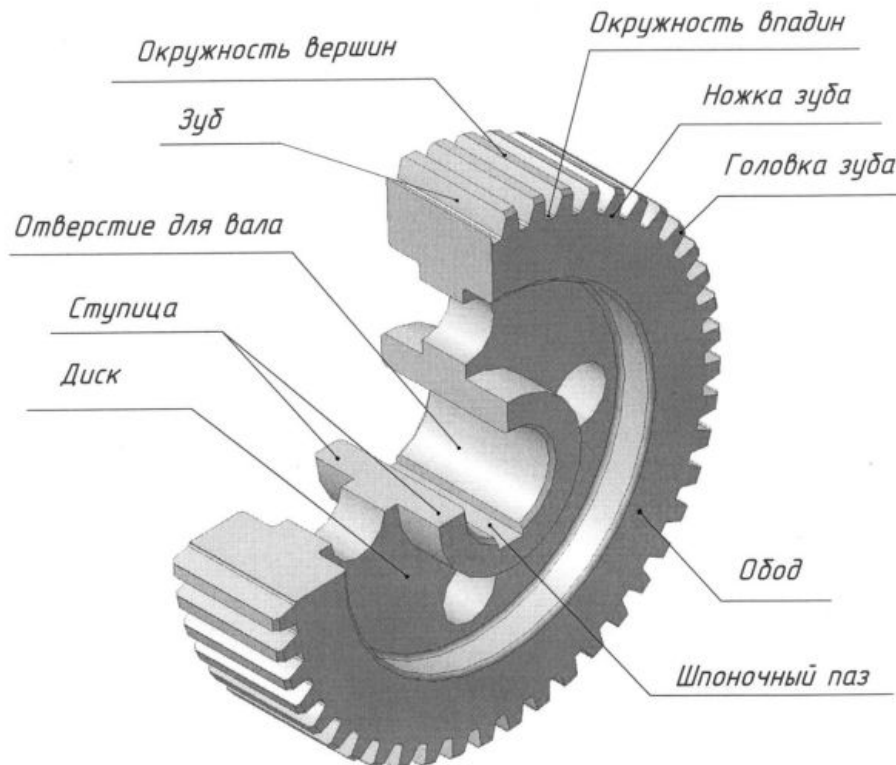
Зубчатыми называют механизмы (передачи), в которых движение между звеньями (зубчатыми колесами) передается с помощью последовательно зацепляющихся зубьев.

Меньшее зубчатое колесо принято называть **шестерней**, а большее - **колесом**.



Кинематическая схема

Геометрия зубчатых колес



Шаг зубчатой передачи (расстояние между одноименными сторонами двух соседних зубьев колеса, измеренное по делительной окружности):

$$p = \pi \cdot \frac{d}{z}$$

Отсюда можно определить **диаметр делительной окружности**:

$$d = \frac{p \cdot z}{\pi}$$

Геометрия зубчатых колес

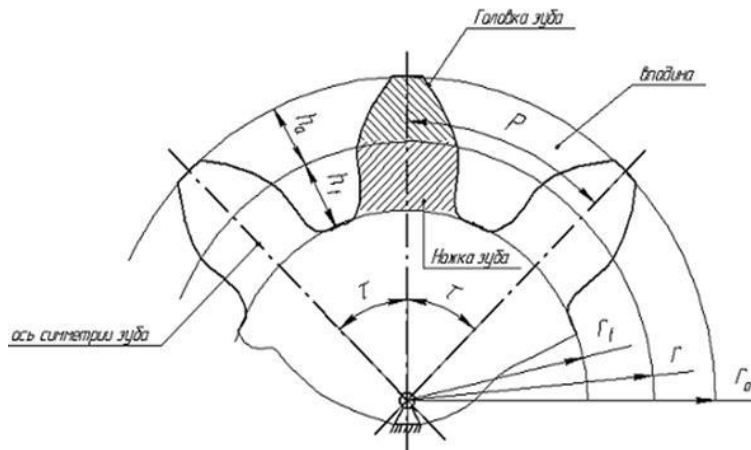
Основная геометрическая характеристика передачи – **модуль зубчатого колеса**

$$m = \frac{p}{\pi}$$

Для пары колес, находящихся в зацеплении, модуль должен быть одинаковым. Модули зубьев для цилиндрических и конических колес регламентированы ГОСТом.

m, мм	I ряд	1	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10	12
	II ряд	1,125	1,375	1,75	2,25	2,75	3,5	4,5	5,5	7	9	11	14

Геометрия зубчатых колес



Расстояние от делительной окружности до вершины зуба называется **высотой головки зуба h_a**

$$h_a = m;$$

Расстояние от делительной окружности до основания зуба - **высотой ножки зуба h_f**

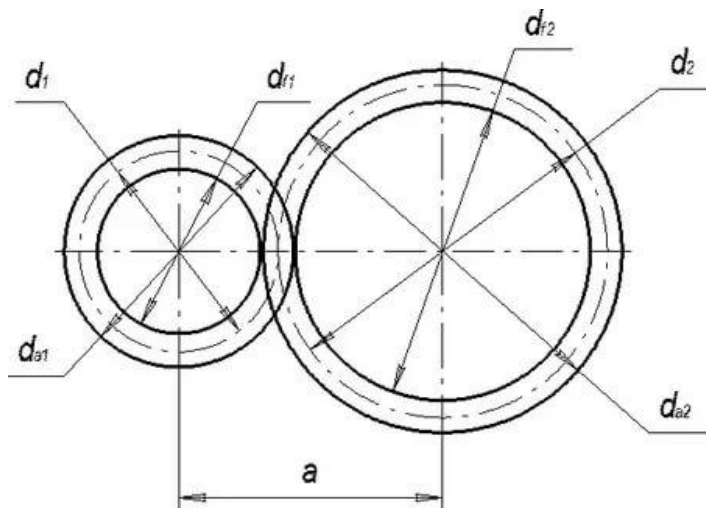
$$h_f = 1,25 m;$$

Диаметр делительной окружности $d = mz;$

Диаметр окружности вершин $d_a = d + 2 \cdot m = m \cdot (z + 2)$

Диаметр окружности впадин $d_f = d - 2,5 \cdot m = m \cdot (z - 2,5)$

Геометрия зубчатых колес



Расстояния между центрами колес

$$a_w = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m \cdot (z_1 + z_2)}{2}$$

Межосевые расстояния стандартных редукторов стандартизированы (40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 180, 200, ...).

Кинематика зубчатых передач

Основная кинематическая характеристика – **передаточное отношение** – отношение угловой скорости колеса 1 к угловой скорости колеса 2.

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Отношение числа зубьев большего колеса к числу меньшего колеса (шестерни) называют **передаточным числом u** .

$$u = \frac{\max(z_1, z_2)}{\min(z_1, z_2)} = |i_{12}|. \quad \text{Для понижающих передач (редукторов)}$$

$$u = \frac{\max(z_1, z_2)}{\min(z_1, z_2)} = \frac{1}{|i_{12}|}. \quad \begin{array}{l} \text{Для повышающих передач} \\ \text{(мультипликаторов)} \end{array}$$

Для многоступенчатой передачи, общее передаточное число равно произведению передаточных чисел ступеней:

$$u = u_{12} \cdot u_{34} \cdot \dots = \frac{\Pi u_{ред i}}{\Pi u_{мульт j}}$$

Мехатронная система

Таким образом, наличие трех обязательных частей – механической (электромеханической), электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками, является первичным признаком мехатронных систем.

Электромеханическая часть включает механические звенья и передачи, рабочий орган, электродвигатели, сенсоры и дополнительные электротехнические элементы (тормоза, муфты). Механическое устройство предназначено для преобразования движений звеньев в требуемое движение рабочего органа. Электронная часть состоит из микроэлектронных устройств, силовых преобразователей и электроники измерительных цепей. Сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии внешней среды и объектов работ, механического устройства и блока приводов с последующей первичной обработкой и передачей этой информации в устройство компьютерного управления. В состав этого устройства обычно входят компьютер верхнего уровня и контроллеры управления движением.

Устройство компьютерного управления

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации;
- организация управления функциональными движениями мехатронной системы, которая предполагает координацию управления механическим движением мехатронной системы и сопутствующими внешними процессами.
- взаимодействие с оператором через интерфейс в режимах автономного программирования (off-line) и непосредственно в процессе движения мехатронной системы (on-line).
- организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.

Задачей мехатронной системы является преобразование входной информации, поступающей с верхнего уровня управления, в целенаправленное механическое движение с управлением на основе принципа обратной связи.

Характерно, что электрическая энергия (реже гидравлическая или пневматическая) используется в современных системах как промежуточная энергетическая форма

Особенность мехатронного подхода

Особенность мехатронного подхода к проектированию заключается в интеграции в единый функциональный модуль двух или более элементов возможно даже различной физической природы.

Соответственно на стадии проектирования из традиционной структуры машины исключается как минимум один интерфейс при сохранении физической сущности преобразования, выполняемого данным модулем.

В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль, получив на вход информацию о цели управления, будет выполнять заданное функциональное движение с допустимой погрешностью.

Аппаратное объединение элементов в единые конструктивные модули обязательно сопровождается разработкой интегрированного программного обеспечения.

Программные средства обеспечивают непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением

Преимущества мехатронного подхода

- относительно низкая стоимость благодаря высокой степени интеграции, унификации и стандартизации элементов и интерфейсов;
- высокая точность сложных движений вследствие применения методов интеллектуального управления;
- высокая надежность, долговечность и помехозащищенность;
- конструктивная компактность модулей (вплоть до миниатюризации в микромашинах);
- улучшенные массогабаритные и динамические характеристики машин вследствие упрощения кинематических цепей;
- возможность комплексирования функциональных модулей в сложные системы и комплексы под конкретные задачи заказчика.

Плоские, поверхностные и пространственные механизмы роботов

Программа движения

Программой движения называются одно или несколько уравнений, связывающих координаты движущегося объекта, которые определяют цель движения.

Координатный базис, в котором задается программа движения управляемой машины, будем называть *базисом программирования движений (БПД)*.

Прямоугольная декартова система координат (декартова БПД)

- - базовая (мировая) система координат, единая для данной технологической системы;
- - система координат, связанная с рабочим органом (инструментом);
- - система координат, связанная с объектом работ (обрабатываемой деталью);
- - система координат, связанная с информационно-измерительной системой (например, системой технического зрения).

Базис исполнительных движений

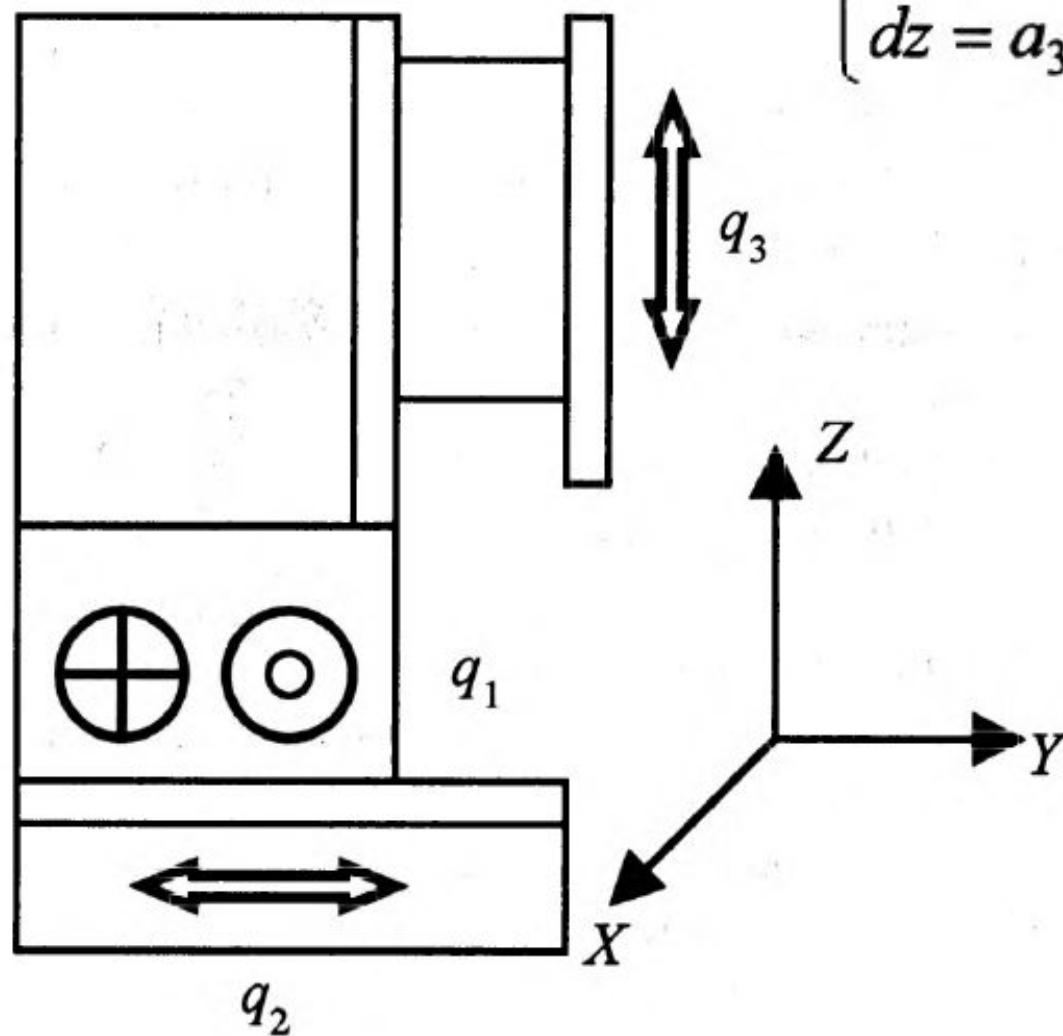
базис исполнительных движений (БИД)
систему независимых обобщенных
координат, однозначно связанных с
перемещениями кинематических пар,
которые выполняются соответствующими
приводами.

Декартовый БИД

Преимущества

- а) соответствие декартовой формы БПД и БИД, что удобно для проектирования стандартными средствами, и не требует высокого образовательного уровня персонала, обслуживающего станок на производстве;
- б) линейные свойства БПД и БИД, позволяющие, использовать относительно простые и, следовательно, дешевые системы управления станком.

$$\begin{cases} dx = a_1 dq_1; \\ dy = a_2 dq_2; \\ dz = a_3 dq_3, \end{cases}$$

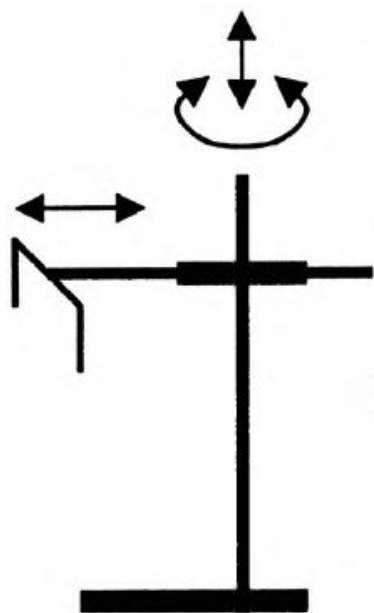


Недостатки декартового БИД

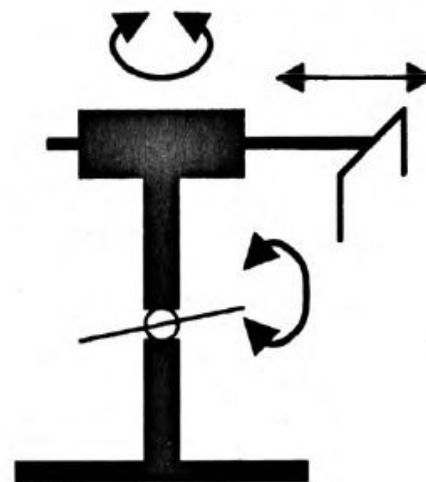
- 1) сложно обеспечить высокую взаимную перпендикулярность направляющих, особенно в крупногабаритных станках;
- 2) машины имеют большие габариты и массу, поскольку направляющие располагаются одна на другой;
- 3) направляющие подвергаются воздействию изгибающих моментов, которые вызывают дополнительные деформации, в результате ухудшается точность механической системы.

Нелинейные БИД

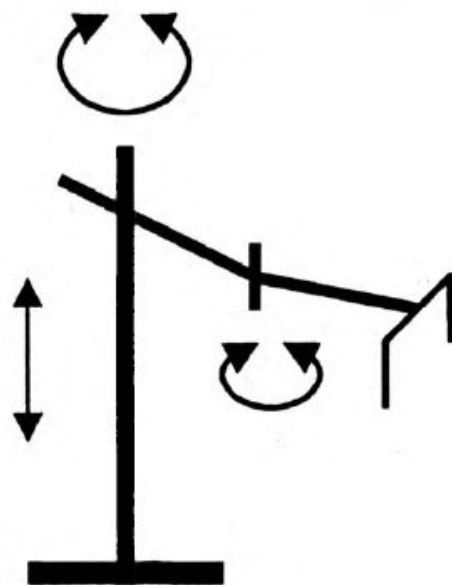
В нелинейных БИД движение привода одной кинематической пары ведет к перемещению рабочего органа сразу по нескольким декартовым осям, при этом связи между этими перемещениями описываются нелинейными функциями.



а)



б)



в)

**Рис. 1.12. Кинематические схемы
промышленных роботов:**
а – цилиндрическая система
координат; б – сферическая система
координат; в – кинематическая схема
типа "SCARA"

SCARA (Selective Compliance Articulated Robot Arm) - это кинематика, основанная на рычажной системе, обеспечивающей перемещение конечного звена в плоскости за счет вращательного привода рычагов механизма. Классический SCARA механизм состоит из двух рычагов, соединенных в одной точке, и 2-х независимых приводов, один из которых установлен в сочленении 2-х рычагов и вращает их друг относительно друга, а второй установлен в основании первого рычага и вращает его относительно рабочей

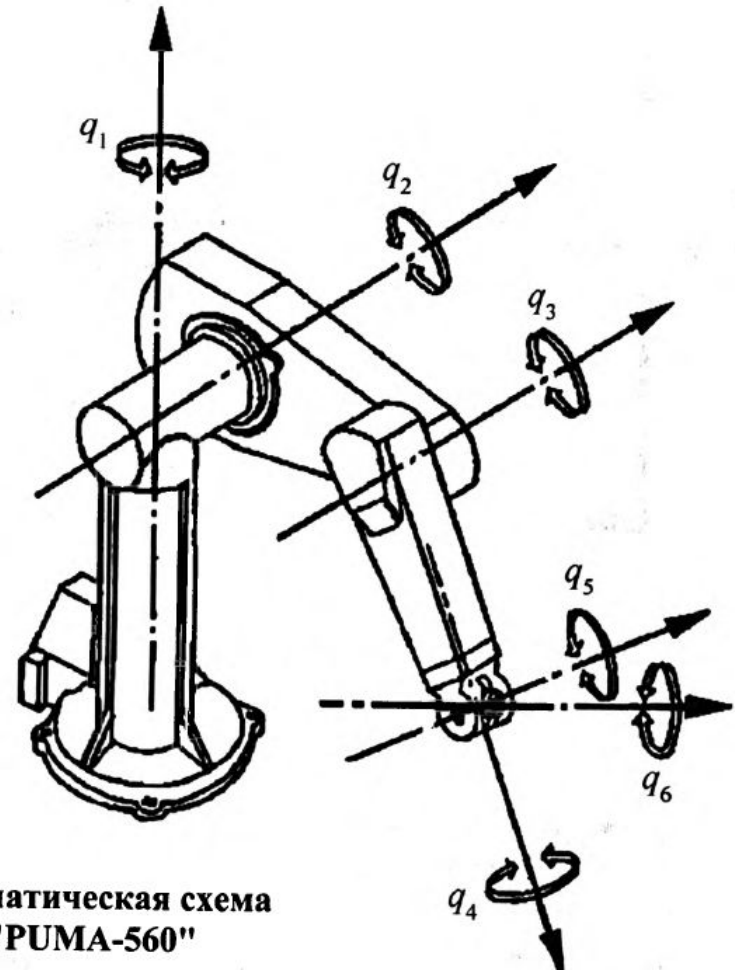
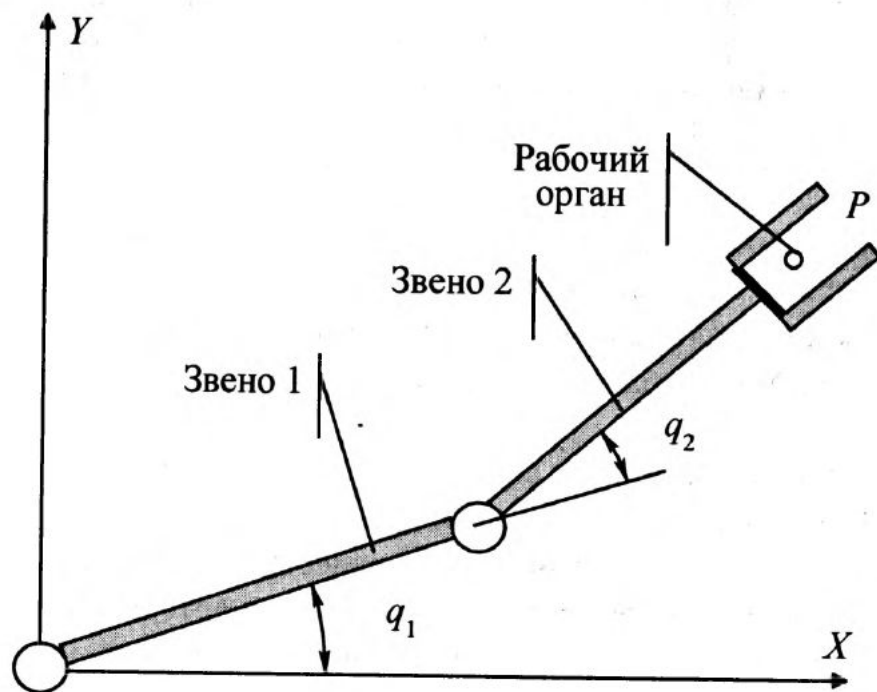


Рис. 1.13. Кинематическая схема манипулятора "PUMA-560"



Расчетная схема

$$\begin{cases} dx = a_{11}(q_1, q_2) dq_1 + a_{12}(q_1, q_2) dq_2; \\ dy = a_{21}(q_1, q_2) dq_1 + a_{22}(q_1, q_2) dq_2, \end{cases}$$

где

$$a_{11} = -L_1 \sin q_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2);$$

$$a_{12} = -L_2 \sin(q_1 + q_2);$$

$$a_{21} = L_1 \cos q_1 + L_2 \cos(q_1 + q_2), \quad a_{22} = L_2 \cos(q_1 + q_2).$$

Здесь L_1, L_2 — длины звеньев.

Особенности нелинейных БИД

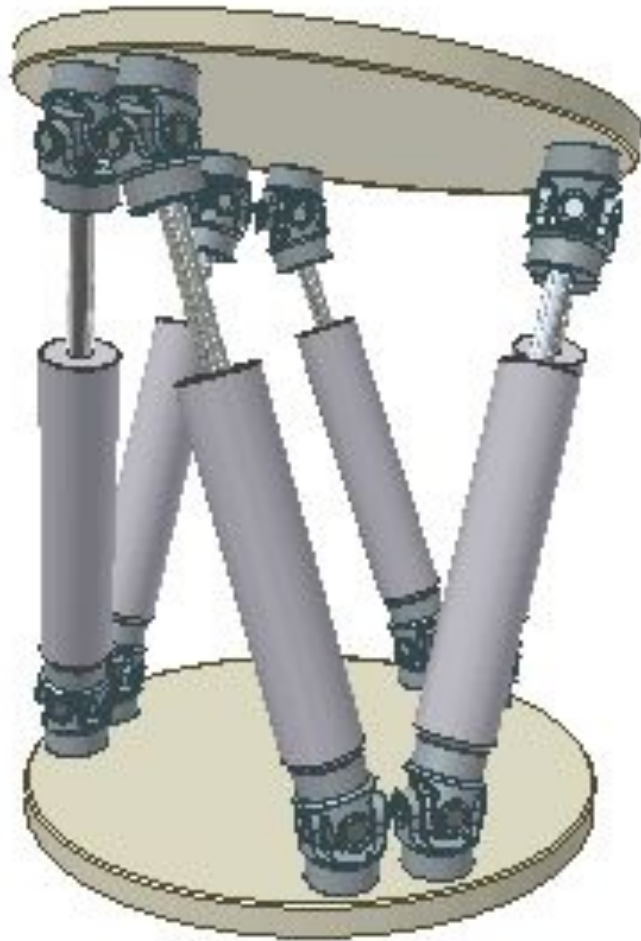
- *Анизотропия и неоднородность динамических, упругих и скоростных свойств машины.*
- *Переменность параметров в нелинейных уравнениях, что может приводить к потере управляемости системой в некоторых конфигурациях (сингулярных).*
- *Сложность задания движений манипуляторов в обобщенных координатах, связанных со степенями подвижности.*

- 1) *оси кинематических пар расположены параллельно либо перпендикулярно друг другу;*
- 2) *звенья соединены в последовательную кинематическую цепь.*

Недостатки последовательной схемы робота

- низкий показатель грузоподъемность/масса манипулятора, что обусловлено последовательной схемой соединения звеньев.
- погрешности в перемещениях всех шарниров суммируются на концевой точке манипулятора
- относительно низкая жесткость манипуляционных роботов

Машины с параллельной кинематикой (МПК).



Платформа Гью — Стюарта впервые упоминается в статье В. Е. Гью (англ. V.E. Gough) в 1956 году. Имя Стюарта ассоциируется с этим механизмом потому, что первоначальная работа Гью (и фотография его платформы) была упомянута в примечаниях рецензента к статье Д. Стюарта (англ. D. Stewart) в 1965 году. Сам Стюарт в той статье предложил другой гибридный трёхногий механизм, имевший по два мотора на каждой ноге

Преимущества МПК

- высокая точность исполнения движений;
- высокие скорости и ускорения рабочего органа;
- отсутствие традиционных направляющих и станины (в качестве несущих элементов конструкции используются приводные механизмы),
поэтому улучшенные массогабаритные параметры и низкая материалоемкость;
- высокая степень унификации мехатронных узлов, обеспечивающая технологичность изготовления и сборки машины и конструктивную гибкость.

Ключевые факторы МПК

1) здесь не происходит суперпозиции (наложения) погрешностей позиционирования звеньев при переходе от базы к рабочему органу, что

выгодно отличает гексаподы от кинематических схем с последовательной цепью звеньев;

2) стержневые механизмы обладают высокой жесткостью, так как при наличии двухступенных шарниров крепления стержни не подвержены изгибающим моментам и работают только на растяжение-сжатие;

3) применяются прецизионные датчики обратной связи и измерительные

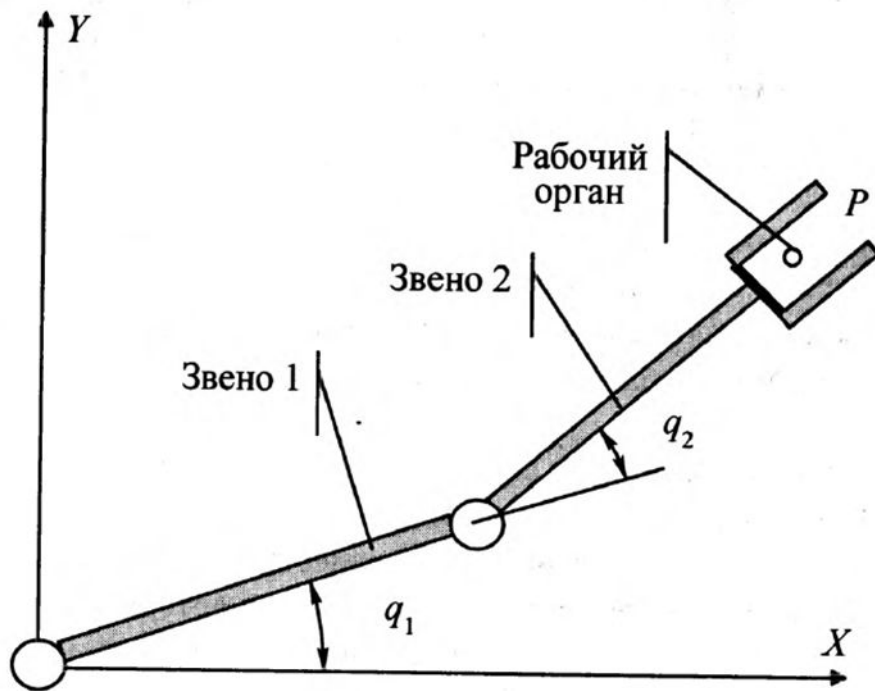
системы (например, лазерные), а также используются компьютерные

методы коррекции перемещений рабочего органа.

Свойства БИД

Мехатронные системы	Свойства координатного базиса исполнения движений		
	Линейность базиса	Взаимное расположение осей базиса	Цепь кинематических пар
Традиционные станки	Линейный (декартовый)	Ортогональное	Последовательная
Манипуляционные роботы	Нелинейный	Ортогональное и параллельное	Последовательная
Машины с параллельной кинематикой	Нелинейный	Косоугольный	Параллельная, гибридная

Решение 3ОК для SCARA

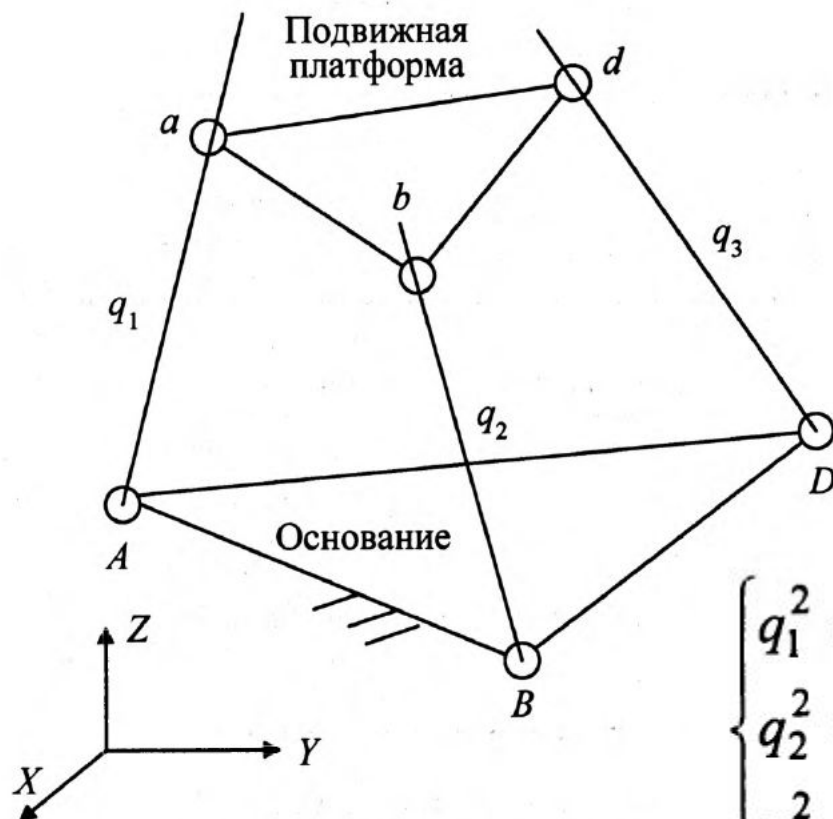


$$q_1 = \pm \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \pm \arcsin\left(\frac{L_2}{r} \sqrt{1 - \left[\frac{r^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right]^2}\right);$$

$$q_2 = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2}\right),$$

где $r^2 = x^2 + y^2$.

Решение 3ОК для трипода



$$\begin{cases} q_1^2 = (x_A - x_a)^2 + (y_A - y_a)^2 + (z_A - z_a)^2; \\ q_2^2 = (x_B - x_b)^2 + (y_B - y_b)^2 + (z_B - z_b)^2; \\ q_3^2 = (x_D - x_d)^2 + (y_D - y_d)^2 + (z_D - z_d)^2. \end{cases}$$

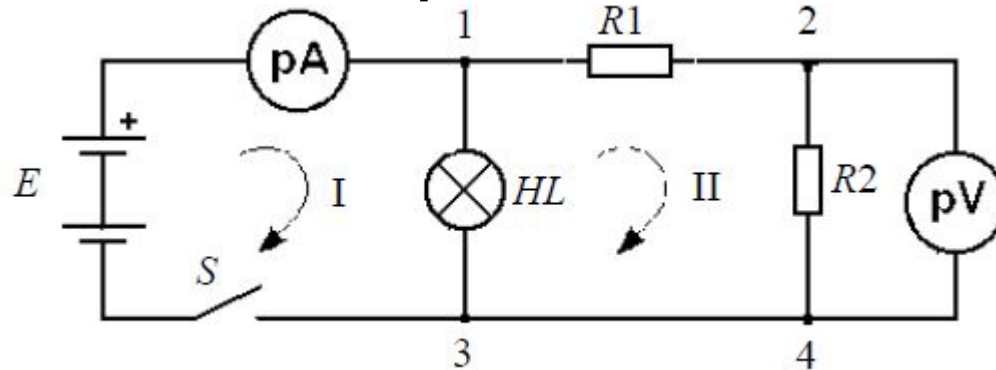
решение прямой задачи о положении для МПК является неординарной аналитической и вычислительной проблемой.

Электроника и электротехника

Основы электротехники

Электротехника как наука является областью знаний, в которой рассматриваются электрические и магнитные явления и их практическое использование. На базе электротехники начали развиваться электроника, радиотехника, электропривод и другие смежные науки.

Определения



Графическое изображение электрической цепи называется **схемой**. В сложных электрических цепях выделяют такие понятия, как ветвь, узел, контур.

Ветвь – участок электрической цепи с одним и тем же током, состоящий из последовательно соединенных элементов (ветвь 1–3 или 1–2, или 2–4).

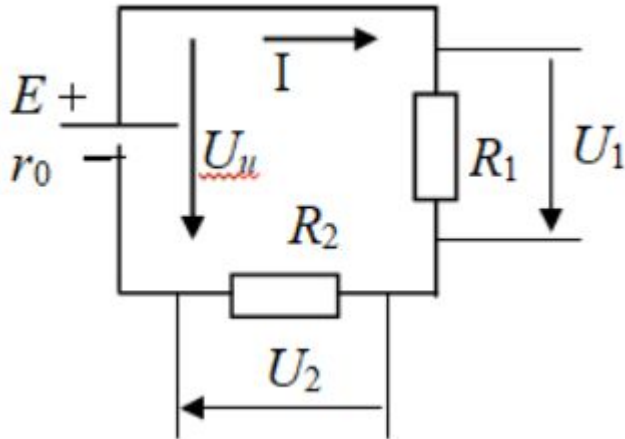
Узел – место соединения трех и более ветвей (узел 1, 2, 3, 4). Различают геометрический и потенциальный узлы. Узлы 1 и 2 – потенциальные, так как их потенциалы не равны из-за наличия падения напряжения на резисторе R_1 . Узлы 3 и 4 – геометрические, так как их потенциалы равны, таким образом, это будет один потенциальный узел.

Контур – замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям и узлам так, что ни одна ветвь и ни один узел не встречаются больше одного раза (например, контур 1–2–4–3 = 1).

Независимый контур – это такой контур, в который входит хотя бы одна новая ветвь (например, – контуры I и II).

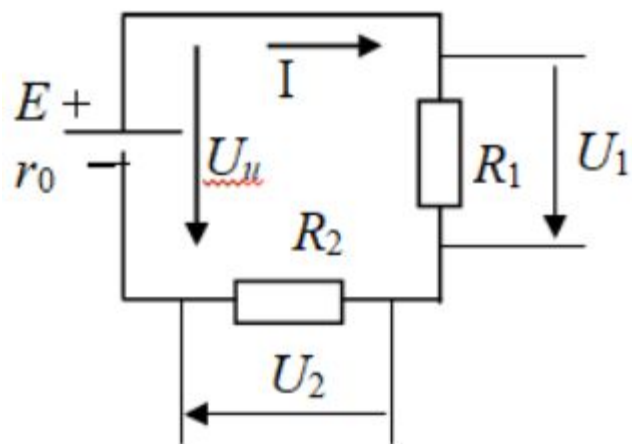
Электрическая цепь, ее элементы и параметры

На всех участках неразветвленной электрической цепи протекает один и тот же ток. Для замкнутой неразветвленной электрической цепи величина тока определяется по закону Ома



$$I = \frac{E}{R_1 + R_2 + r_0}$$

где E – ЭДС источника питания; R_1 и R_2 – сопротивления резисторов; r_0 – внутреннее сопротивление источника питания.



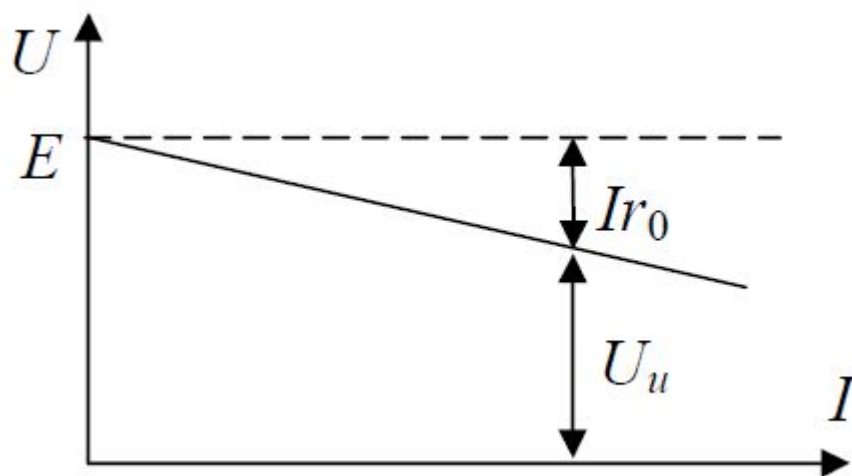
$$E = I \cdot (R_1 + R_2 + r_0) = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot r_0$$

$$E = U_1 + U_2 + U_0 = U_u + U_0$$

$$U_1 = I \cdot R_1;$$

$$U_2 = I \cdot R_2;$$

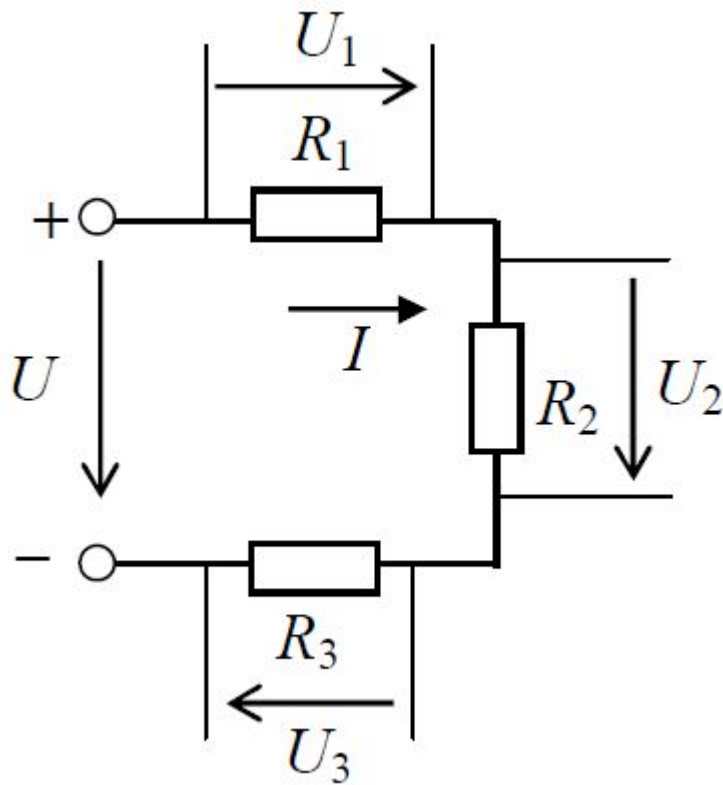
$$U_0 = I \cdot r_0,$$



$$U_u = E - I \cdot r_0$$

Внешняя характеристика
источника питания

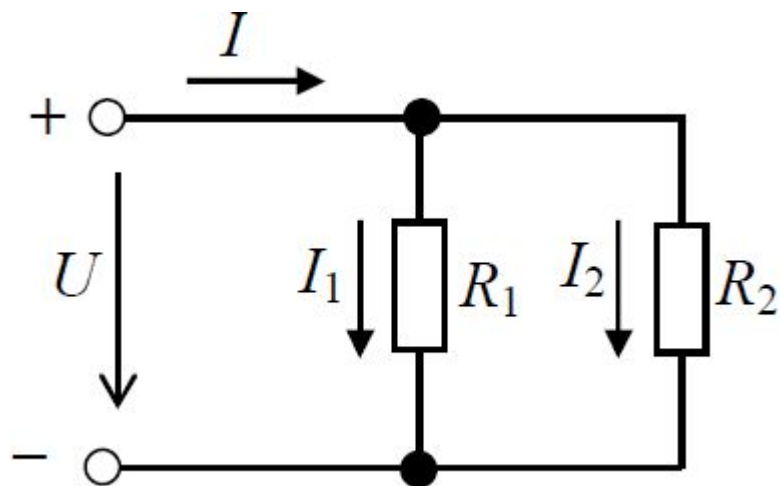
Способы соединения резисторов в электрических цепях



$$R = R_1 + R_2 + R_3;$$
$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3};$$
$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Последовательное
соединение резисторов

Параллельное соединение резисторов



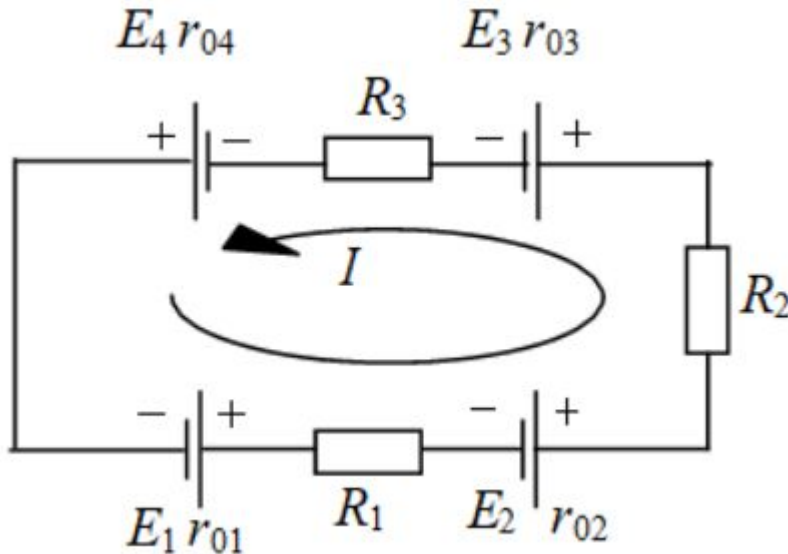
$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I = I_1 + I_2$$

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Режимы работы источников

питания



в режиме

ген $U = E - I \cdot r_0$

в режиме

нагрузки $U = E + I \cdot r_0$

Рассмотрим неразветвленную цепь с 4 источниками питания.

Источники ЭДС E_1, E_2, E_4 включены согласно друг с другом. Источник ЭДС E_3 по отношению к ним включен встречно.

Направление тока в такой цепи определяется направлением суммарной большей ЭДС, действующей в данном контуре.

Допустим, что $E_3 < E_1 + E_2 + E_4$, тогда ток в данной цепи будет направлен против часовой стрелки.

У источников в режиме генератора напряжение меньше ЭДС, а в режиме потребителя – больше ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника

Баланс мощностей электрической цепи

$$P = \frac{A}{t} = \frac{I \cdot U \cdot t}{t} = I \cdot U$$

A – работа, или электрическая энергия в джоулях [Дж]; P – мощность в ваттах [Вт]; t – время в секундах [с].

Практической единицей измерения электрической энергии является киловатт-час [кВт·ч],

$$\sum P_u = \sum P_n$$

$$\begin{aligned} E_1 \cdot I + E_2 \cdot I - E_3 \cdot I + E_4 \cdot I = \\ = I^2 \cdot R_1 + I^2 \cdot R_2 + I^2 \cdot R_3 + I^2 \cdot r_{01} + I^2 \cdot r_{02} + I^2 \cdot r_{03} + I^2 \cdot r_{04}. \end{aligned}$$

Для источника ЭДС, направление которой совпадает с направлением тока, мощность считается положительной

$$P = E \cdot I$$

Если направления ЭДС и тока противоположны, то

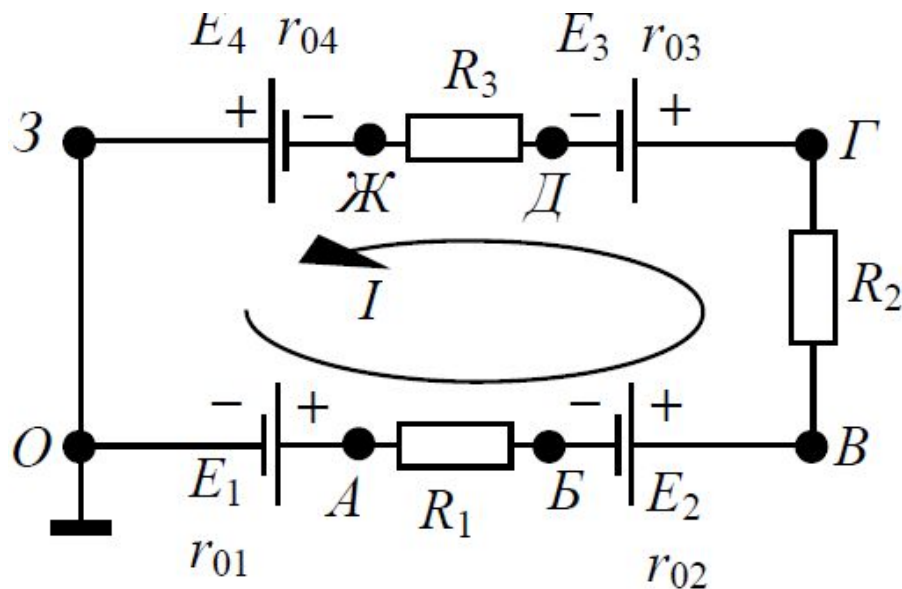
$$P = -E \cdot I$$

Для приемников электрической энергии

Алгебраическая $P = U \cdot I = I^2 \cdot R$ сумма мощностей всех источников энергии должна быть равна алгебраической сумме мощностей всех приемников электрической энергии

Потенциальная диаграмма

В любом замкнутом контуре можно рассчитать потенциалы точек электрической цепи и по их значениям определить напряжение на любом участке цепи. Источники ЭДС $E_1 + E_2 + E_4$ работают в режиме генератора, а источник ЭДС E_3 работает в режиме нагрузки.



В данной схеме за исходную взята точка O . Таким образом, $\varphi_O = 0$. Если на участке между двумя точками включен источник питания, работающий в режиме генератора, то потенциал последующей точки будет больше потенциала предыдущей на величину \mathcal{E} $\varphi_A = \varphi_O + (E - I \cdot r_{01})$ ика.

Если на участке между двумя точками включен приемник электрической энергии, то потенциал последующей точки будет меньше потенциала предыдущей на велич $\varphi_B = \varphi_A - I \cdot R_1$ кения на этом участке.

Для потенциалов
остальных точек
цепи

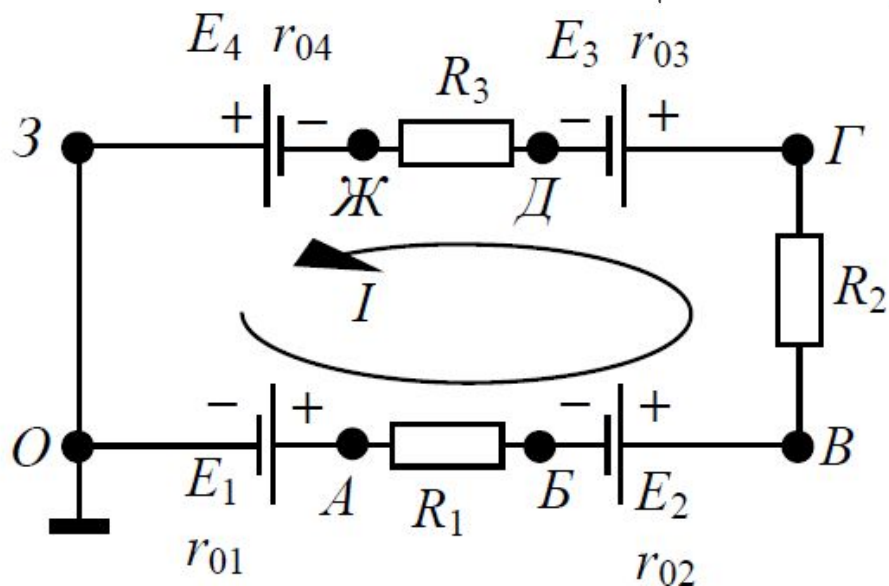
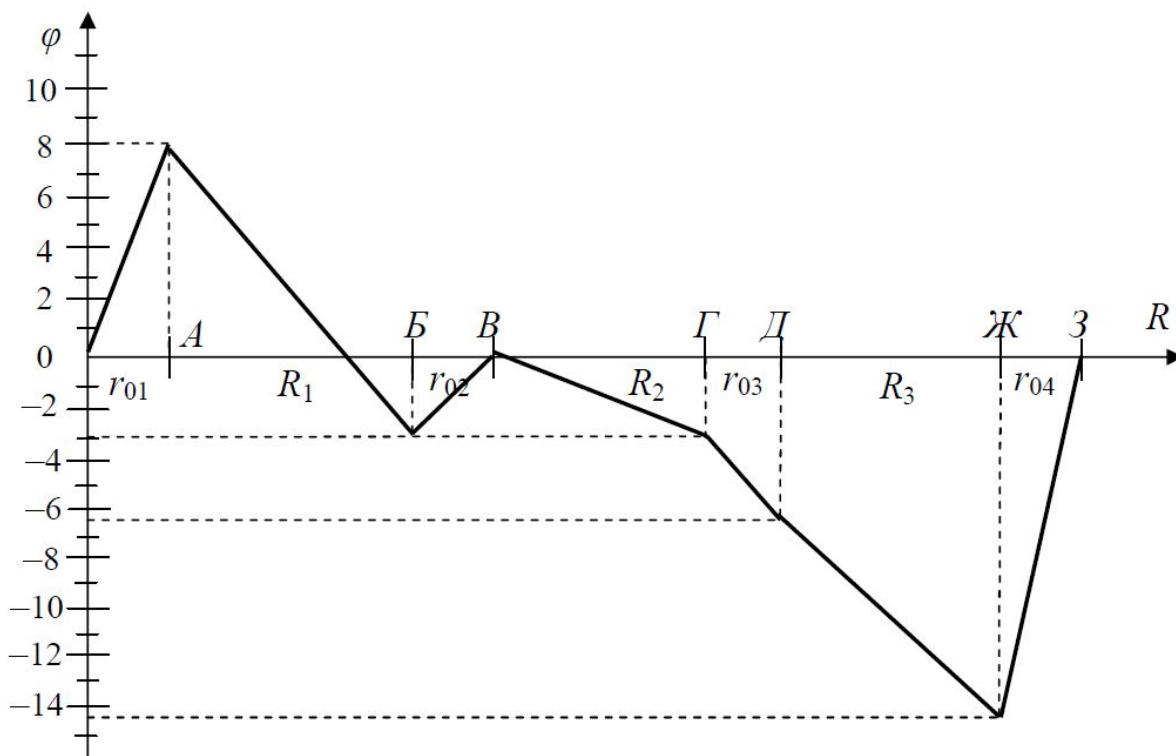
$$\varphi_B = \varphi_B + (E_2 - I \cdot r_{02});$$

$$\varphi_\Gamma = \varphi_B - IR_2;$$

$$\varphi_\Delta = \varphi_\Gamma - (E_3 + I \cdot r_{03});$$

$$\varphi_{\mathcal{K}} = \varphi_\Delta - I \cdot R_3;$$

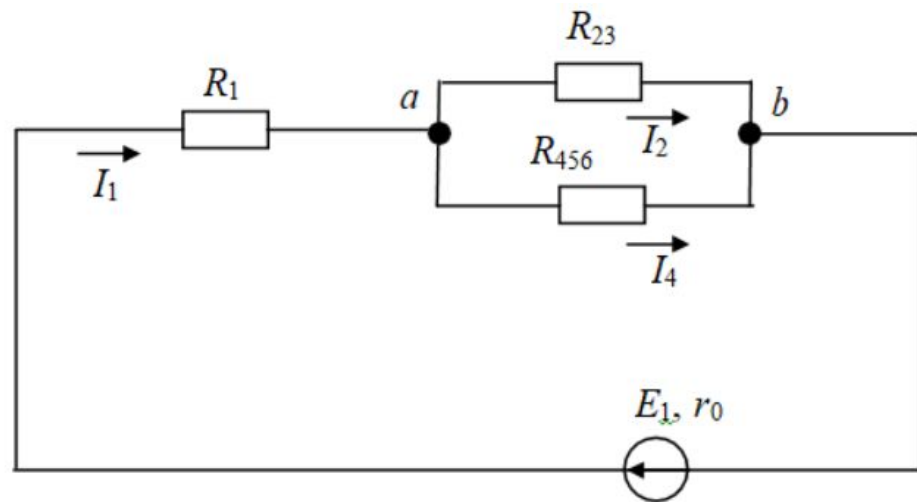
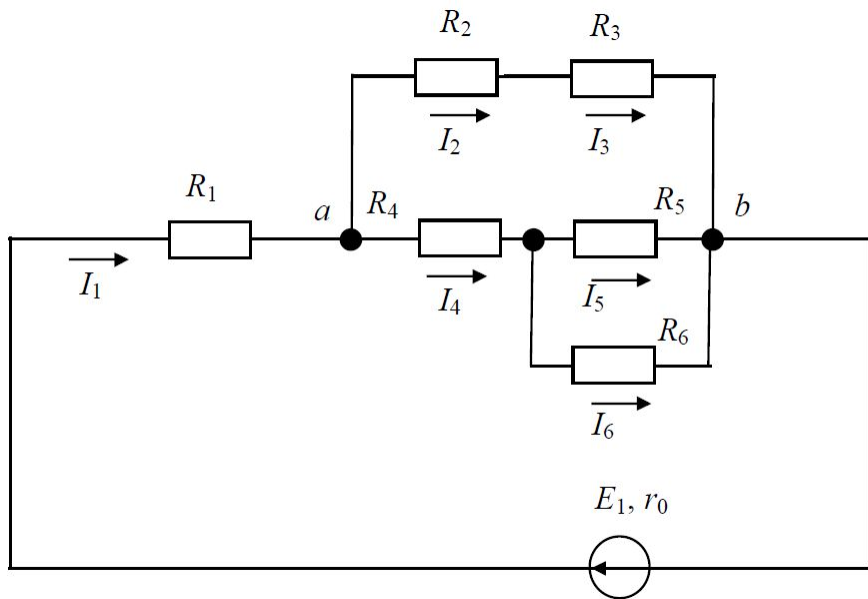
$$\varphi_3 = \varphi_{\mathcal{K}} + (E_4 - I \cdot r_{04}).$$



$$U_{BD} = \varphi_B - \varphi_\Delta = -3 - (-6,2) = 3,2 \text{ В.}$$

Анализ электрических цепей с одним ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ

При расчете электрических цепей известными (заданными) величинами являются электродвижущие силы (ЭДС) или напряжения и сопротивления резисторов, неизвестными (рассчитываемыми) величинами являются токи и напряжения приемников.

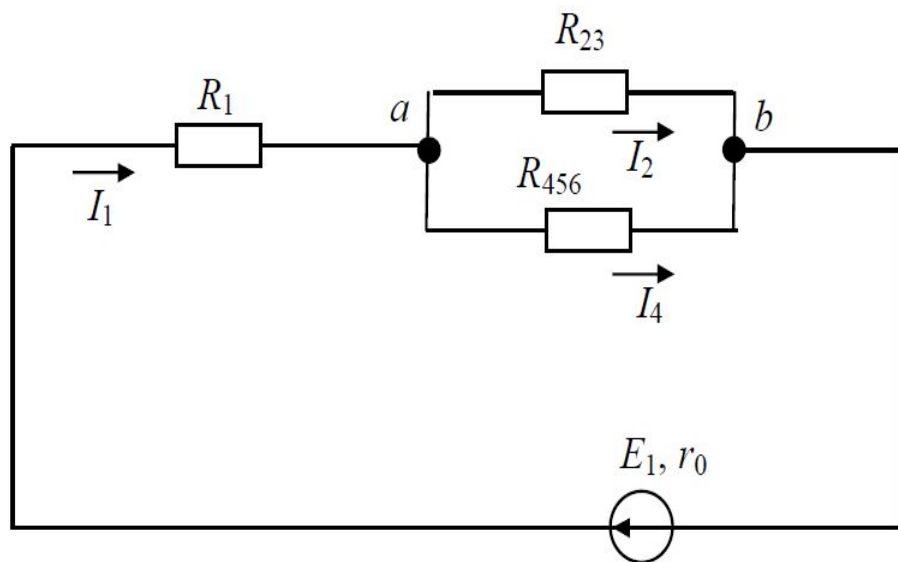


$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} \quad R_{456} = R_4 + R_{56}$$

$$R_{23} = R_2 + R_3$$

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_1 + \frac{R_{23} \cdot R_{456}}{R_{23} + R_{456}}$$

$$I_1 = \frac{E}{R_{\text{ЭКВ}} + r_0}$$



$$U_{ab} = I_1 \cdot R_{ab},$$

по первому закону
Кирхгофа

$$R_{ab} = \frac{R_{23} \cdot R_{456}}{R_{23} + R_{456}}$$

$$I_4 = I_1 - I_2$$

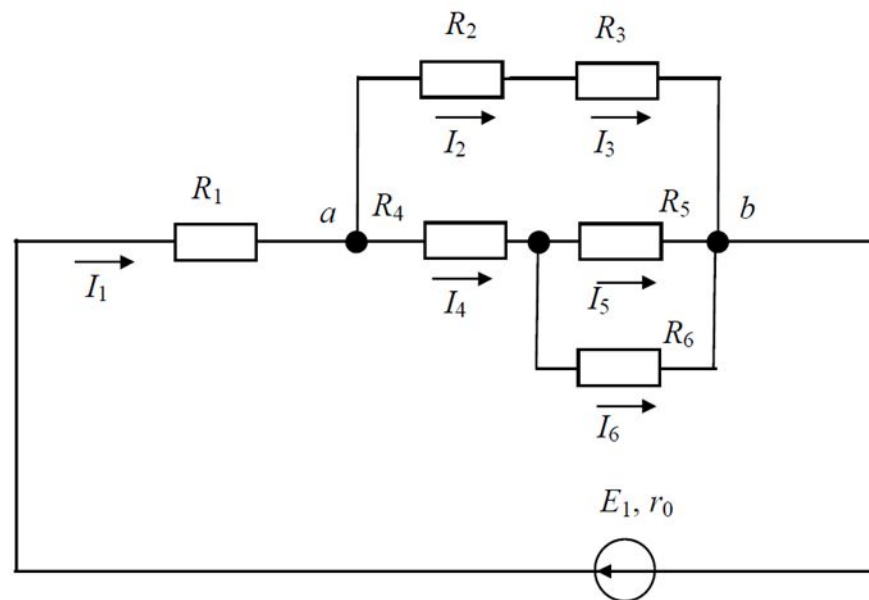
$$I_2 = I_3 = \frac{U_{ab}}{R_{23}};$$

$$I_4 = \frac{U_{ab}}{R_{456}}.$$

$$U_{56} = I_4 \cdot R_{56}.$$

$$I_5 = \frac{U_{56}}{R_5}$$

$$I_6 = \frac{U_{56}}{R_6}$$



$$I_6 = I_4 - I_5$$

Для проверки правильности решения
воспользуемся уравнением баланса
мощностей

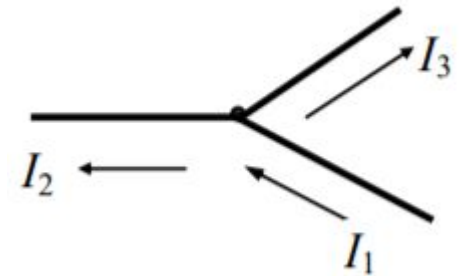
$$E \cdot I_1 = I_1^2 \cdot (r_0 + R_1) + I_2^2 \cdot (R_2 + R_3) + I_4^2 \cdot R_4 + I_5^2 \cdot R_5 + I_6^2 \cdot R_6$$

1 Закон Кирхгофа

- В любом узле электрической цепи заряд одного знака не может ни накапливаться, ни убывать. Согласно I закону Кирхгофа алгебраическая сумма токов ветвей, сходящихся в узле электрической цепи, равна нулю

или

- Алгебраическая сумма токов, втекающих в узел, равна сумме токов, вытекающих из него. При этом токи, направленные к узлу, берут с одним, произвольно выбранным знаком, а токи, направленные от узла, – с противоположным.

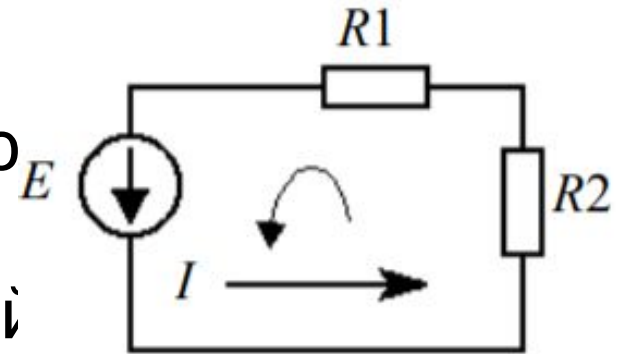


$$\sum_{k=1}^n I_k = 0,$$

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

II Закон Кирхгофа

- Алгебраическая сумма напряжений всех участков замкнутого контура равна нулю или



- Алгебраическая сумма падений напряжений на резистивных элементах замкнутого контура равна алгебраической сумме ЭДС источников, входящих в этот контур.

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0,$$

$$I(R_1 + R_2) = E.$$

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k$$

где m – число резистивных элементов; n – число источников ЭДС в контуре

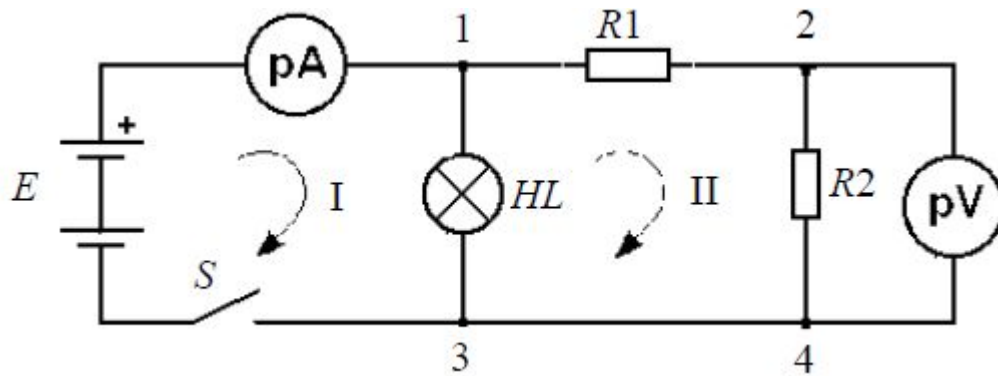
АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

- – метод непосредственного применения законов Кирхгофа;
- – метод контурных токов;
- – метод суперпозиции (наложения);
- – метод узловых потенциалов (метод двух узлов);
- – метод эквивалентного генератора.

Непосредственное применение законов Кирхгофа

порядок расчета:

- определить число узлов, ветвей, независимых контуров в схеме (число ветвей соответствует числу неизвестных токов);
- произвольно выбрать положительные направления токов в ветвях и обозначить их на схеме (удобнее, в тех ветвях, где есть источники ЭДС и указано их направление, направление тока взять совпадающим с направлением ЭДС);
- произвольно выбрать положительные направления обхода контуров для составления уравнений по II закону Кирхгофа;
- составить систему уравнений, количество которых должно быть равно количеству неизвестных токов, причем учесть, что число независимых уравнений, составленных по I закону Кирхгофа, должно равняться: $n = q - 1$, где q – число узлов в схеме;
- остальные недостающие уравнения составить по II закону Кирхгофа;
- решить полученную систему уравнений, определив, таким образом, все неизвестные токи.



по I закону Кирхгофа для этой схемы надо составить два независимых уравнения

- для узла 1: $I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$,
- для узла 2: $I_5 + I_2 - I_1 = 0$.

Добавляем три недостающих до замкнутой системы уравнения, составленных по II закону Кирхгофа, для контуров I, II, III:

- для контура I: $R_1 I_1 + R_2 I_2 = E_1 - E_2$,
- для контура II: $R_3 I_3 + R_6 I_5 - R_2 I_2 = E_2$,
- для контура III: $(R_4 + R_5) I_4 - R_3 I_3 = E_3$.

Решаем систему из пяти уравнений и определяем все пять не-известных токов I_1 ; I_2 ; I_3 ; I_4 ; I_5 . Если в результате решения этих уравнений получается отрицательное значение тока, это значит, что истинное направление тока в ветви противоположно.

Правильность расчета токов в ветвях электрической цепи проверяется с помощью уравнения баланса мощности

$$\sum EI = \sum RI^2$$

ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменным называется электрический ток, который периодически изменяется во времени как по величине, так и по направлению.

Мгновенное значение – это значение синусоидальной величины в любой момент времени. Мгновенные значения e , i , u определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} e &= E_m \sin \omega t; \\ i &= I_m \sin \omega t; \end{aligned}$$

где E_m , I_m , U_m – амплитудные (максимальные) значения соответственно

ЭДС, тока и напряжения; ω – круговая (циклическая) частота; ωt – угол или фаза (в системе СИ измеряется в радианах – величина

безразмерна):
 $\omega = 2\pi f$, $f = \frac{1}{T}$ f – линейная частота изменения синусоидальной величины (число периодов в единицу времени).

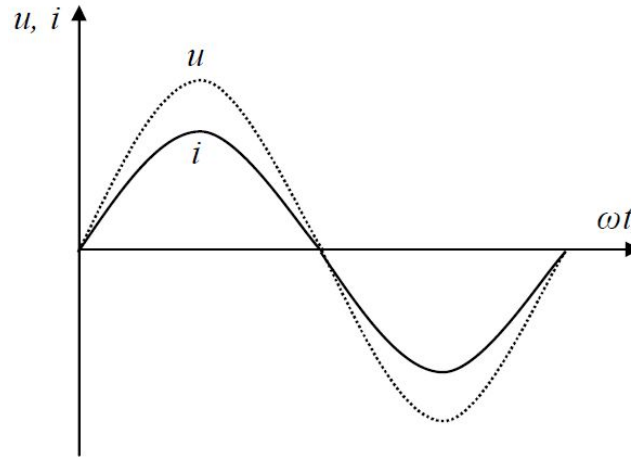
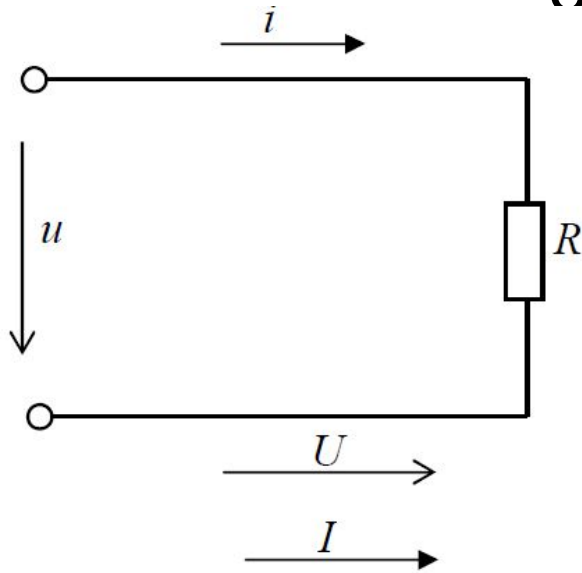
Действующим называется значение такого переменного тока, который производит тот же тепловой эффект, что и равный ему по величине постоянный ток.

Действующие значения синусоидальных величин меньше амплитудных значений этих величин в 2 раз. Номинальные величины тока, напряжения и ЭДС источников и потребителей переменного тока являются действующими значениями этих величин. Амперметры и вольтметры переменного тока измеряют преимущественно действующие значения тока и напряжения.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Амперметры и вольтметры переменного тока измеряют преимущественно действующие значения тока и напряжения

Цепь переменного тока с активным сопротивлением

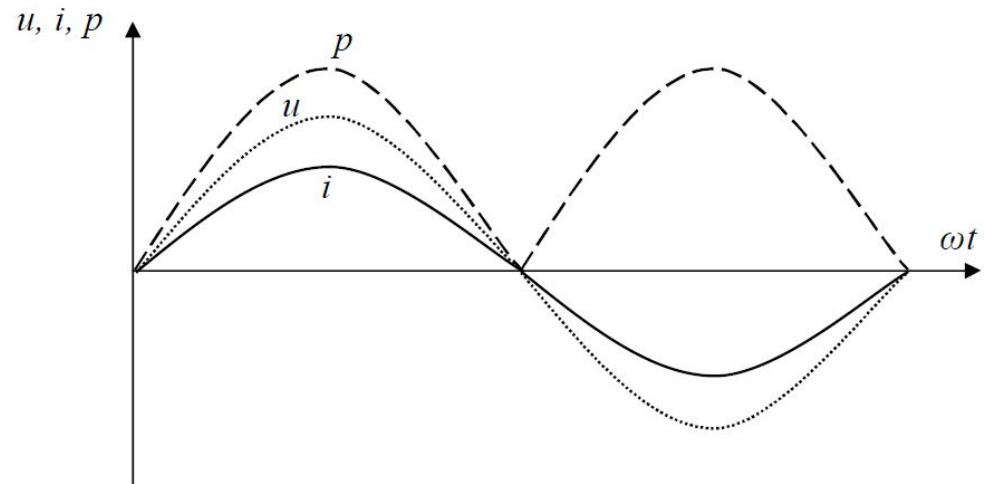


$$u = U_m \sin \omega t.$$

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = I_m \sin \omega t$$

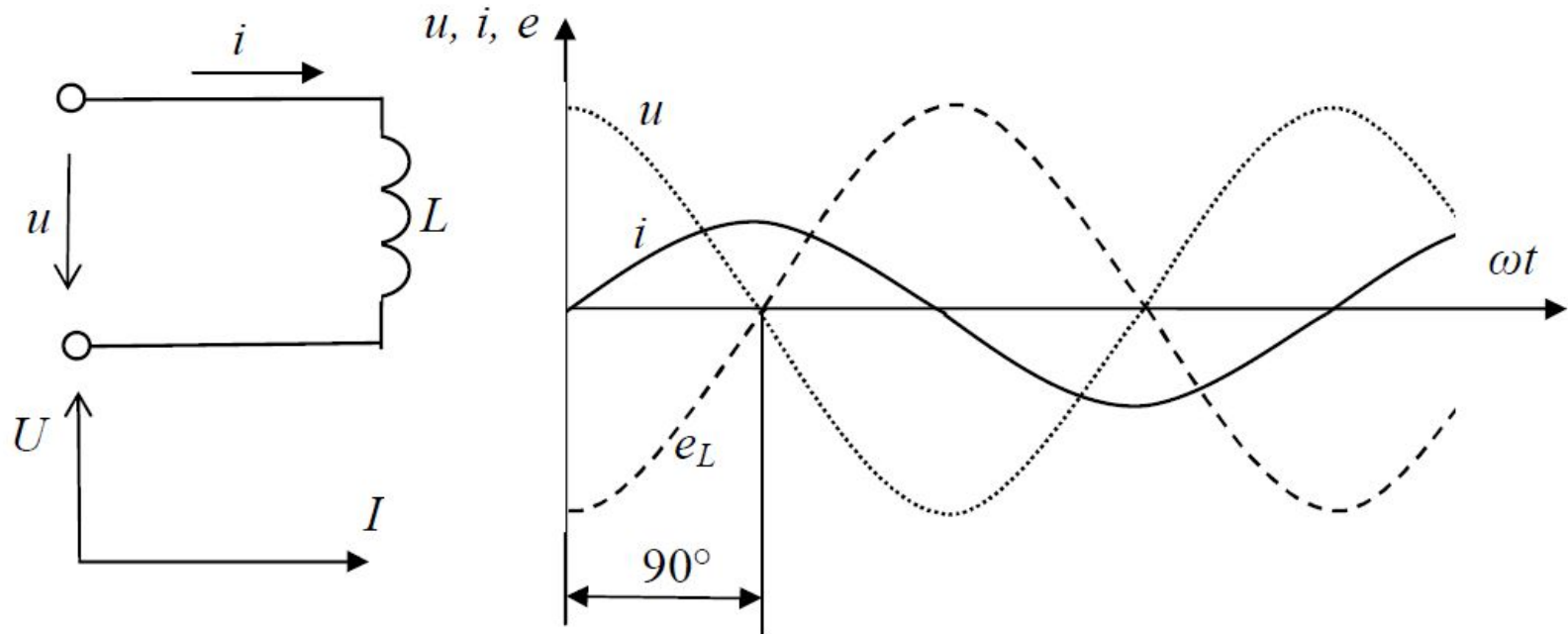
Мгновенная
мощность цепи

$$p = u \cdot i = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$



Активная мощность измеряется в ваттах
(Вт)

Цепь переменного тока с индуктивным элементом



Рассмотрим цепь переменного тока с идеальной катушкой с индуктивностью L . Активное сопротивление катушки равно нулю ($R=0$). В результате этого вокруг катушки возникает переменное магнитное поле и в катушке наводится ЭДС самоиндукции e_L .

$$i = I_m \sin \omega t$$

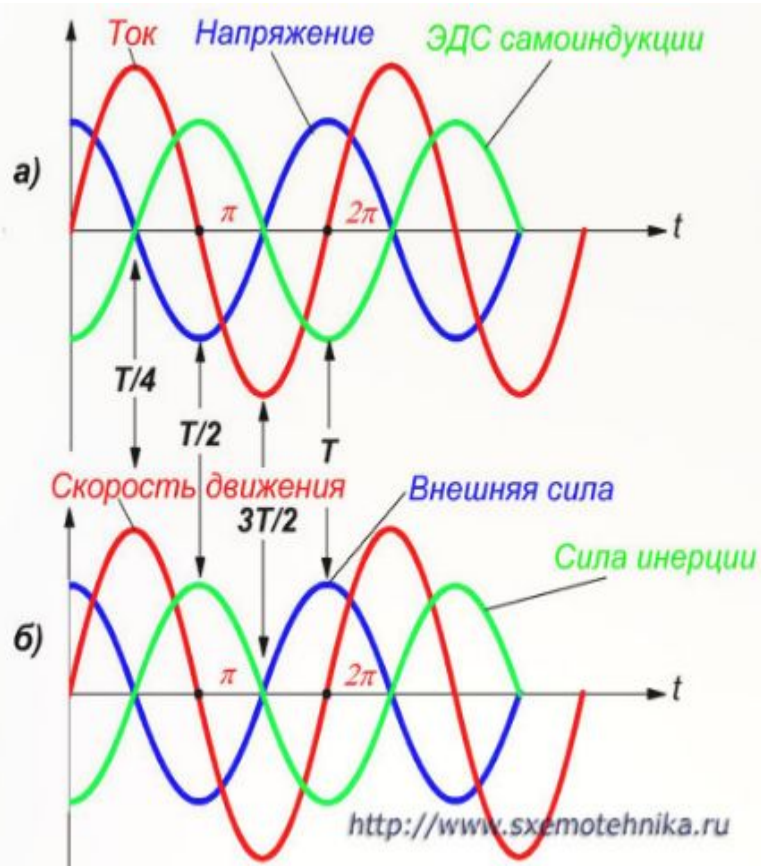
$$u = -e_L$$

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = -I_m L \omega \cos \omega t$$

Напряжение источника U целиком идет на уравнивание этой ЭДС

$$u = I_m L \omega \cos \omega t = U_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad i = I_m \sin \omega t$$

в цепи с индуктивным элементом ток отстает от напряжения по фазе на угол 90° , ЭДС находится в противофазе с приложенным напряжением



Представим себе, что мы толкаем вдоль по рельсам груженую вагонетку. В первый момент, когда вагонетка только начинает трогаться с места, мы прилагаем к ней максимум усилий, которые по мере увеличения скорости вагонетки будем постепенно уменьшать. При этом мы почувствуем, что вагонетка, обладая инерцией, как бы сопротивляется нашим усилиям. Это противодействие (реакция) вагонетки будет особенно сильным вначале, по мере же ослабления наших усилий будет ослабевать и противодействие вагонетки, она постепенно будет переставать «упрямиться» и покорно покатится по рельсам.

Затем мы вовсе перестанем толкать вагонетку и даже, наоборот, начнем понемногу тянуть ее в обратном направлении. При этом мы почувствуем, что вагонетка снова сопротивляется нашим усилиям. Если мы будем все сильнее и сильнее тянуть вагонетку назад, то и ее противодействие будет соответственно все более и более возрастать. Наконец, нам удастся остановить вагонетку и даже изменить направление ее движения. Когда вагонетка покатится обратно, мы будем постепенно ослаблять наши усилия, т. е. будем тянуть ее все слабее и слабее, однако, несмотря на это, скорость вагонетки будет все-таки увеличиваться (при слабом трении в подшипниках).

Когда вагонетка пройдет половину пути в обратном направлении, мы совсем перестанем тянуть ее и снова переменим направление наших усилий, т. е. начнем ее снова задерживать, постепенно увеличивая силу торможения до тех пор, пока вагонетка не остановится, заняв первоначальное (исходное) положение. После этого мы можем продолжать все наши действия сначала.

В этом примере наши усилия, прилагаемые к вагонетке, соответствуют внешней ЭДС, противодействие вагонетки, обусловленное ее инерцией, — ЭДС самоиндукции, а скорость вагонетки — электрическому току. Если изобразить графически изменение наших усилий, а также изменение противодействия вагонетки и ее скорости с течением времени, то мы получим графики (рис. 1б), в точности соответствующие графикам рис. 1а.

Катушка в цепи переменного тока оказывает этому току сопротивление, которое называется индуктивным и обозначается X_L . Это сопротивление имеет размерность Ом. Математическое выражение закона Ома для этой

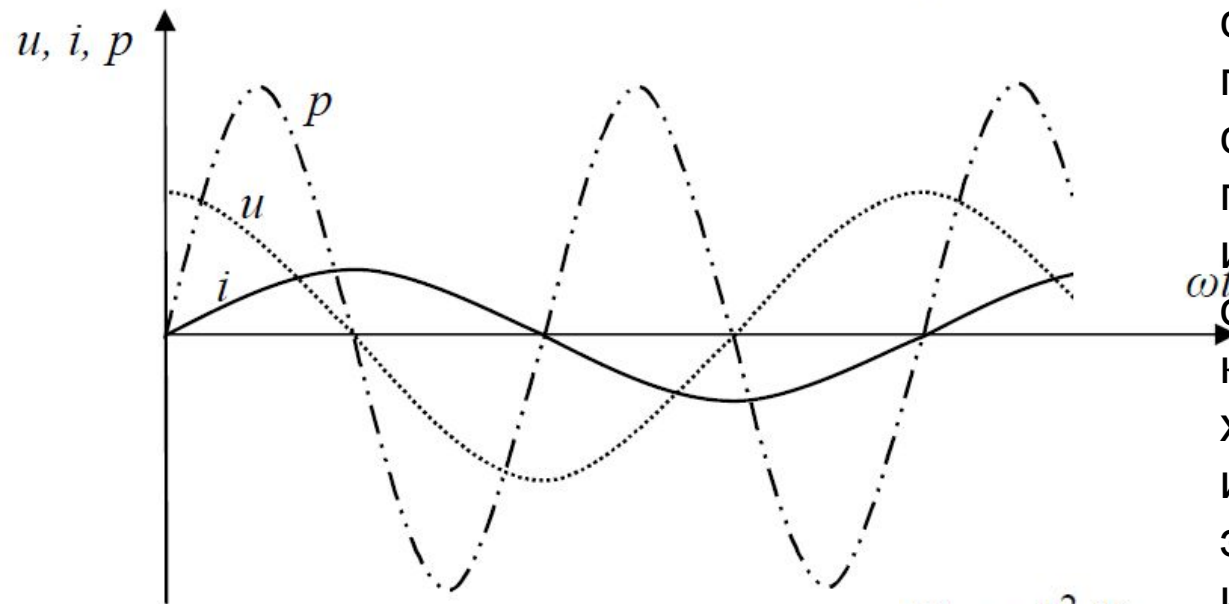
цѐ

$$I = \frac{U}{X_L}$$

Мгновенная мощность для цепи с индуктивным сопротивлением

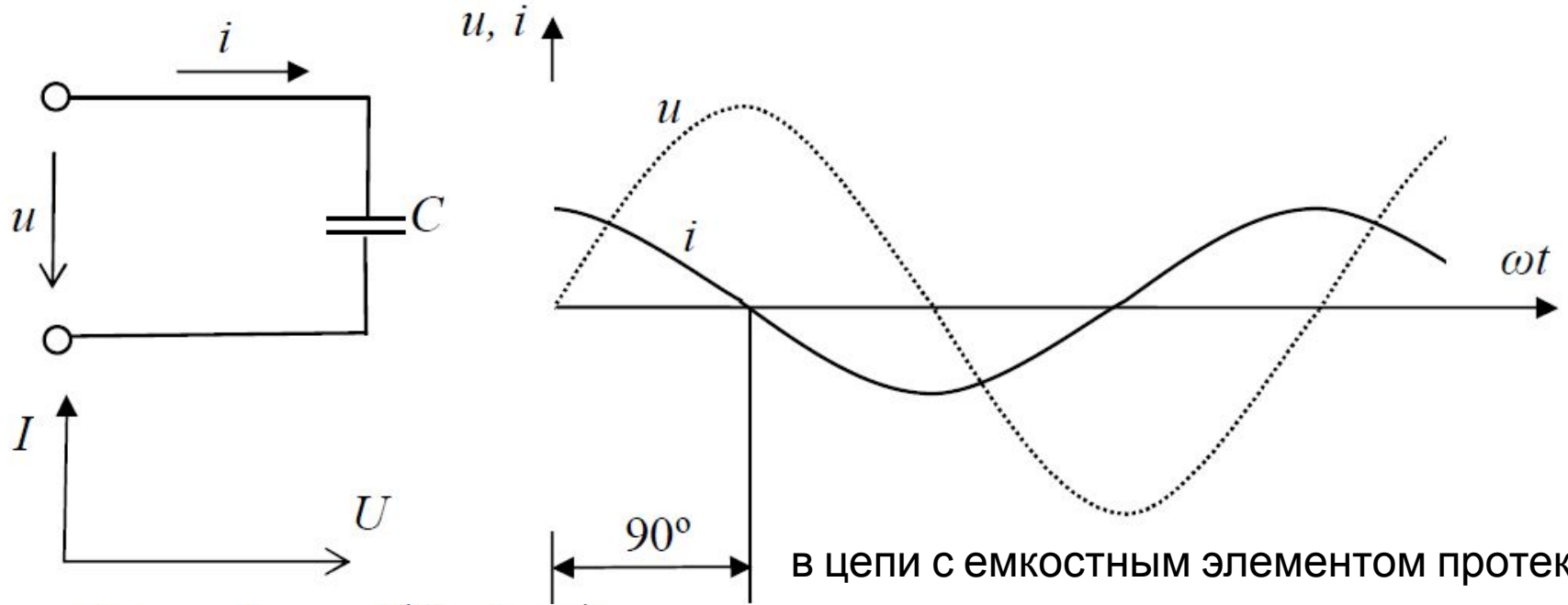
$$p = u \cdot i = U_m \sin(\omega t + 90^\circ) \cdot I_m \sin \omega t = \frac{1}{2} \cdot U_m \cdot I_m \sin 2\omega t$$

мощность в первую четверть периода забирается из сети и запасается в магнитном поле катушки, а в следующую четверть периода возвращается в сеть, т.е. происходит перекачивание энергии от источника к потребителю и обратно. Для количественной характеристики интенсивности обмена энергией между источником и катушкой служит реактивная мощность.



$$Q_L = I^2 X_L$$

Цепь переменного тока с емкостным элементом



в цепи с емкостным элементом протекает

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_m \sin \omega t)}{dt} = U_m C \omega \cos \omega t = U_m C \omega \sin(\omega t + 90^\circ)$$

где C – емкость; q – заряд на электродах емкостного элемента

$$i = U_m C \omega \sin(\omega t + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

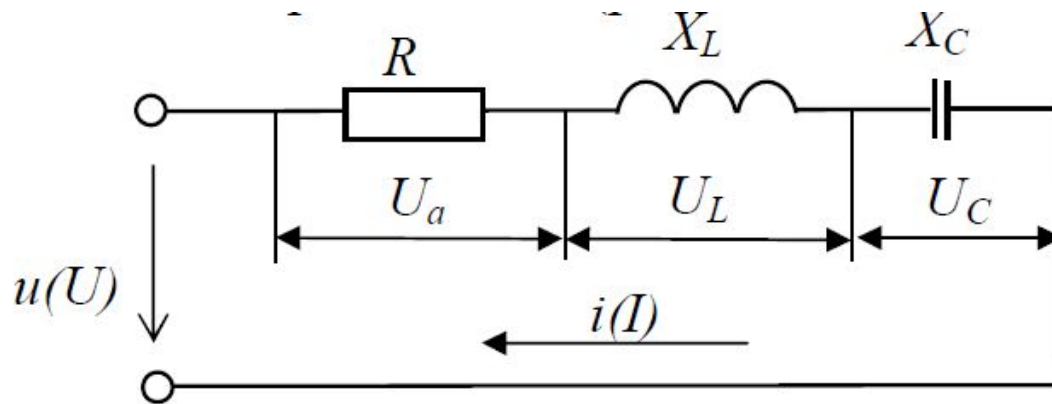
$$u = U_m \sin \omega t$$

в цепи с емкостным элементом ток опережает по фазе напряжение на угол 90°

Емкостное
сопротивление X_C
имеет размерность
Ом

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Анализ неразветвленной цепи переменного тока

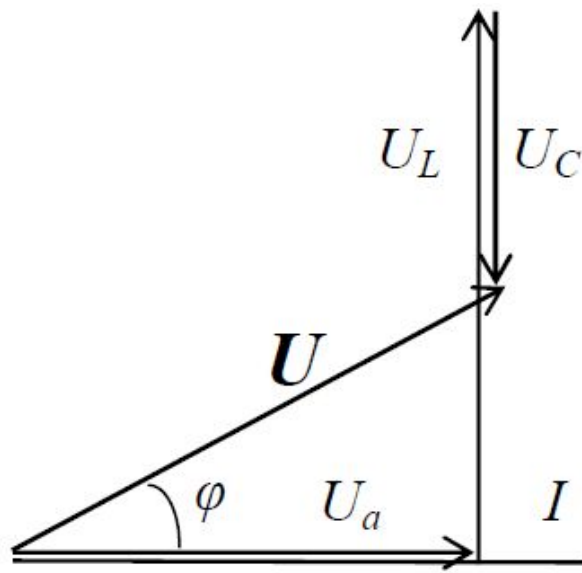


на каждом элементе
возникает падение
напряжения

$$\begin{aligned}U_a &= I \cdot R; \\U_L &= I \cdot X_L; \\U_C &= I \cdot X_C\end{aligned}$$

по второму закону Кирхгофа

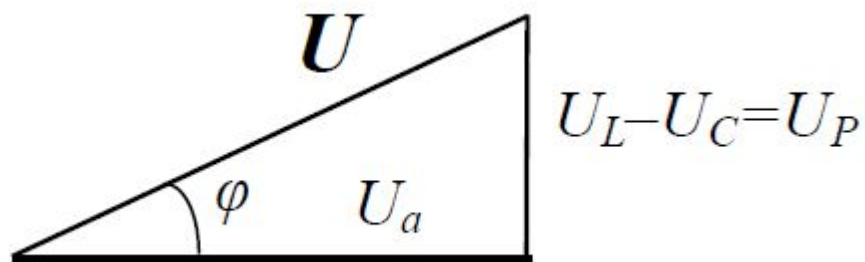
$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_C$$



Первым проводим вектор тока. Вектор напряжения на активном сопротивлении совпадает по фазе с током. Знак перед углом сдвига фаз ϕ зависит от режима цепи. Если в рассматриваемой цепи преобладает индуктивное сопротивление, то $U_L > U_C$.

напряжение U опережает по фазе ток I .
Если в цепи преобладает емкостное сопротивление, то

$$U_L < U_C$$



Закон Ома

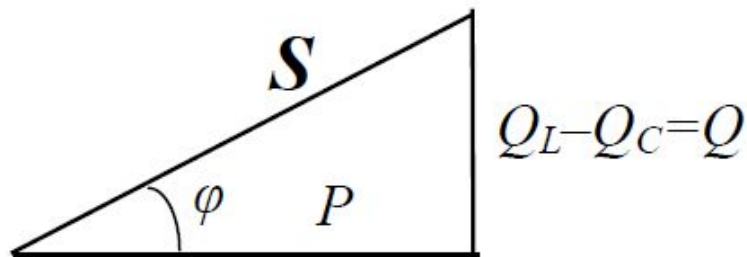
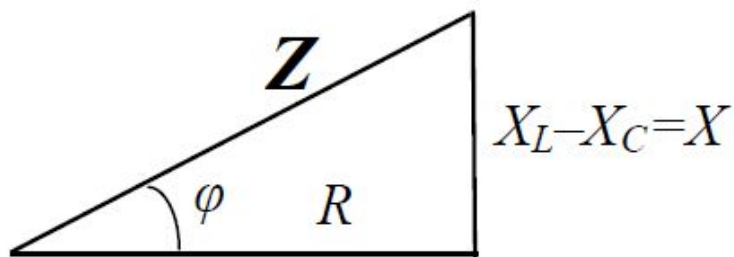
$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{Z}$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I^2 R^2 + (I X_L - I X_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Z – полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Треугольники сопротивлений и мощ



S – полная мощность; P – активная мощность;
 Q – реактивная мощность

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}.$$

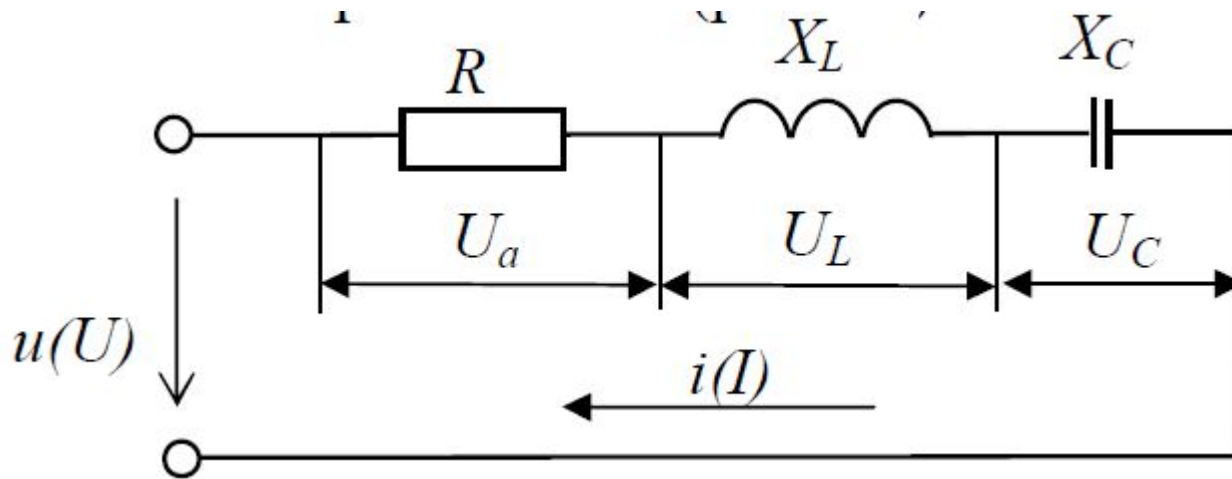
$$S = IU \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad \sin \varphi = \frac{Q}{S}.$$

$$P = S \cos \varphi = IU \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi = IU \sin \varphi$$

Резонанс напряжений



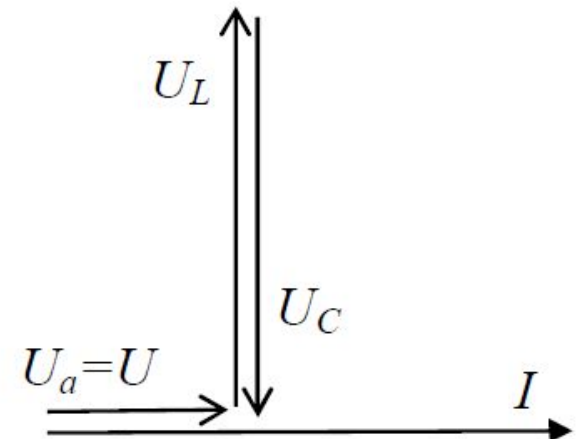
$$X_L = X_C$$

$$\omega_{рез} L = \frac{1}{\omega_{рез} C}$$

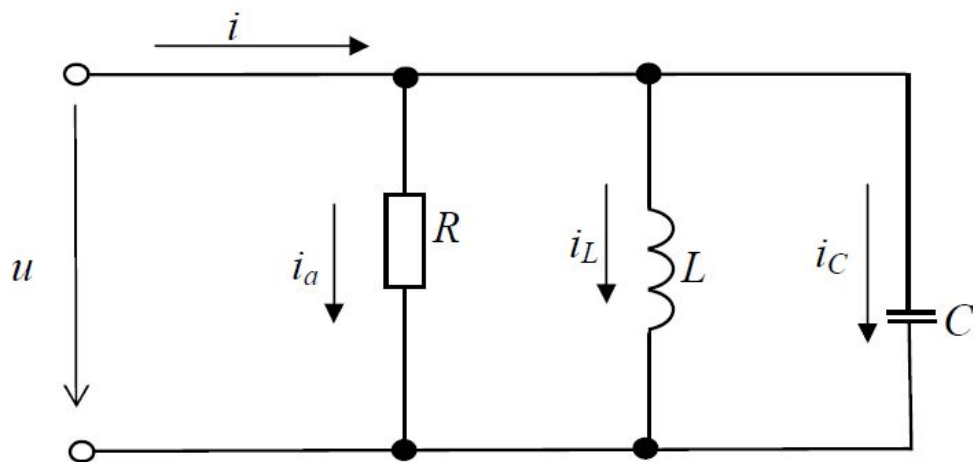
$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$$

$\omega_{рез}$ – частота питающего напряжения;
 ω_0 – частота собственных колебаний LC-контура

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + 0}} = \frac{U}{R}$$



Резонанс токов



индуктивная проводимость
равна емкостной

$$b_L = b_C$$

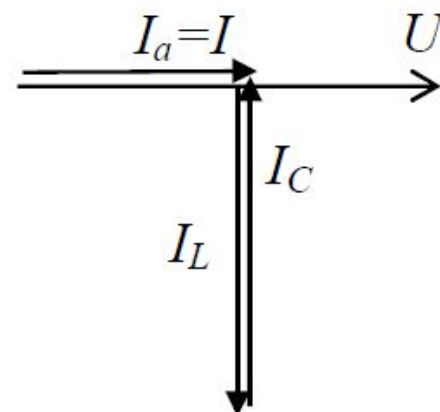
$$b_L = \frac{1}{\omega_{рез} L}; \quad b_C = \omega_{рез} C$$

$$\omega_{рез} C = \frac{1}{\omega_{рез} L}, \quad \omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

При резонансе

$$I = U \cdot g$$

При резонансе токи в параллельных ветвях i_L , i_C , равные между собой по величине, но противоположные по фазе, могут быть значительно больше общего тока I , равного активному току i_a , если $b_L = b_C > g$



Основные понятия трехфазной

цепи

Трехфазной цепью называется совокупность трех цепей, в которых ЭДС источников энергии имеют одинаковую частоту, но сдвинуты между собой по фазе на 120° .

Часть трехфазной электрической цепи, в которой протекает один из токов трехфазной системы, называется фазой.

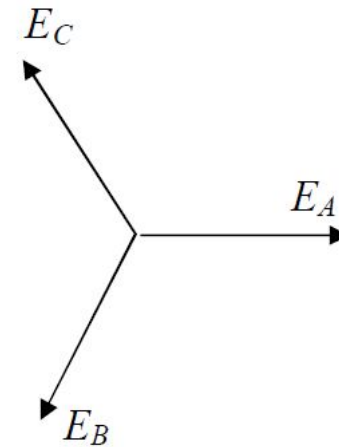
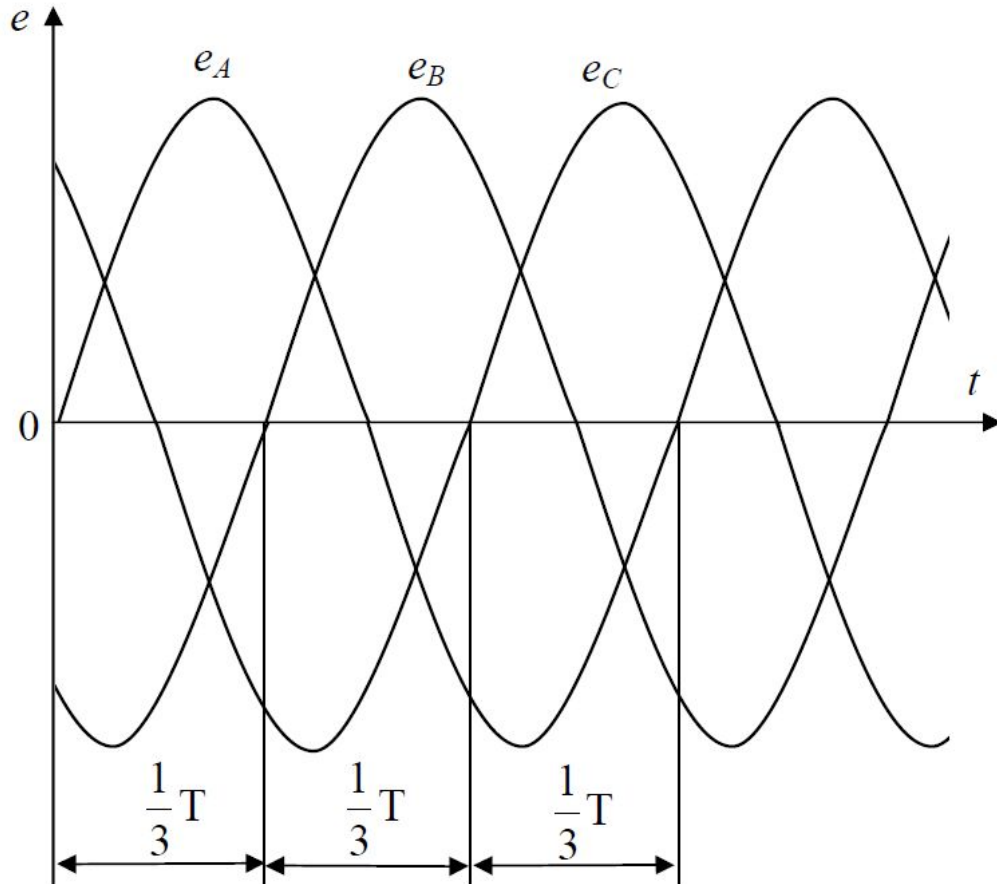
Трехфазная система ЭДС создается трехфазными генераторами. В неподвижной части генератора (статоре) размещают три обмотки, сдвинутые в пространстве на 120° . Это фазные обмотки, или фазы, начала которых обозначают буквами А, В, С; концы обмоток обозначают буквами Х, Y, Z. На вращающейся части генератора (роторе) располагают обмотку возбуждения, которая питается от источника постоянного тока. Ток обмотки возбуждения создает магнитный поток Φ_0 , постоянный (неподвижный) относительно ротора, но вращающийся вместе с ротором с частотой n . При вращении ротора вращающийся вместе с ним магнитный поток пересекает проводники обмоток статора (А–Х, В–Y, С–Z) и индуцирует в них синусоидальные ЭДС

$$e_A = E_m \sin \omega t;$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ),$$

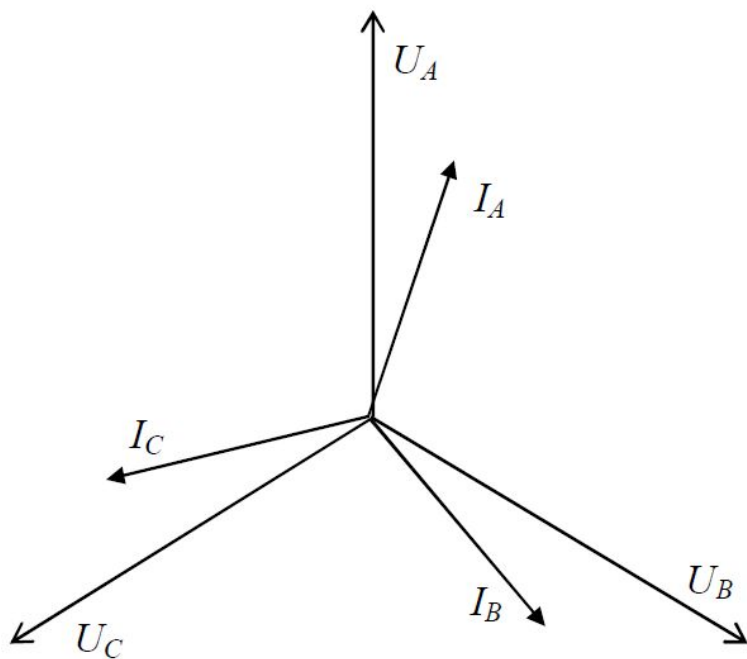
где E_m – амплитудное значение ЭДС каждой фазы.



Различают прямую и обратную последовательности фаз подводимого к нагрузке напряжения

$$\begin{aligned}u_A &= U_m \sin \omega t; \\u_B &= U_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\u_C &= U_m \sin(\omega t - 240^\circ)\end{aligned}$$

При прямой последовательности фаз напряжение каждой последующей фазы отстает от напряжения предыдущей на угол 120° :



$$\begin{aligned}u_A &= U_m \sin \omega t; \\u_B &= U_m \sin(\omega t + 120^\circ), \\u_C &= U_m \sin(\omega t + 240^\circ)\end{aligned}$$

При обратной последовательности фаз напряжение каждой последующей фазы опережает напряжение предыдущей на угол 120°

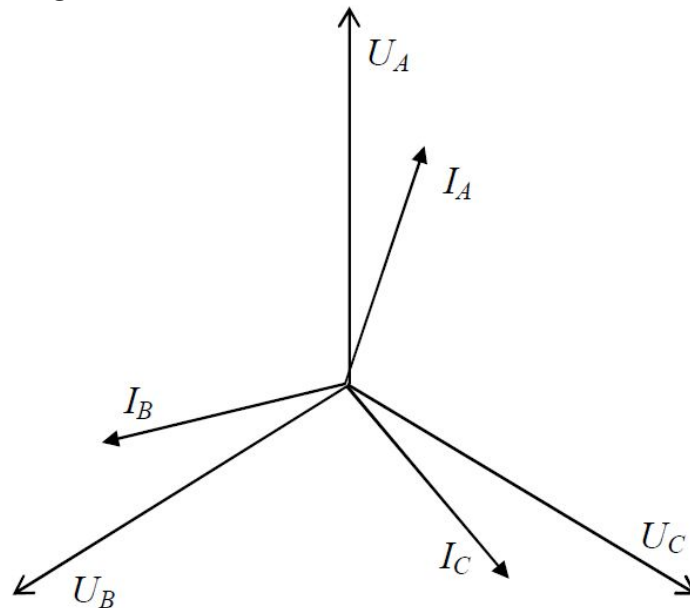
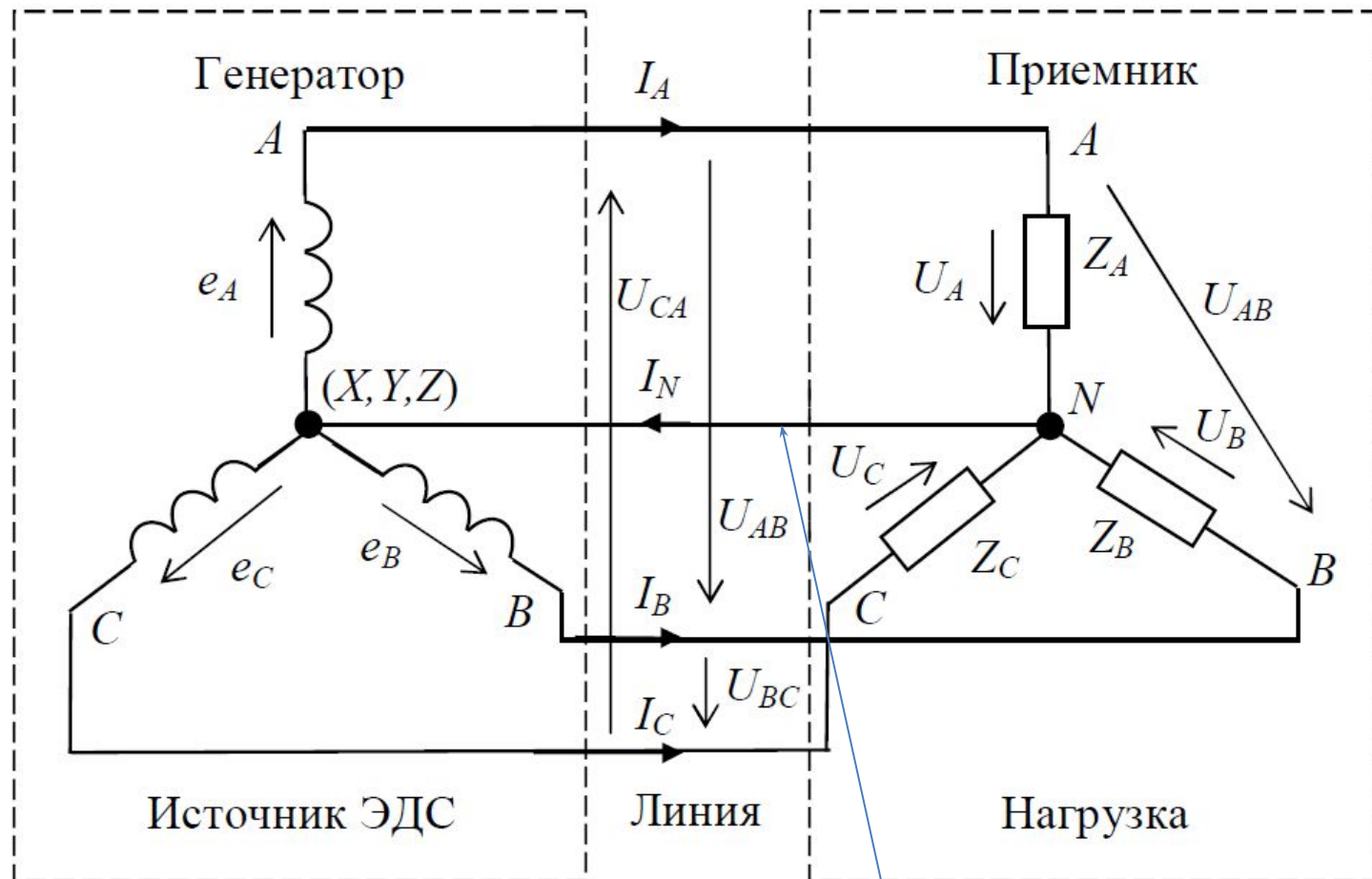


Схема соединения «звездой» в трехфазных цепях



Линейные провода AA, BB, CC, нейтральный или нулевой провод
Фазные напряжения U_A , U_B , U_C .

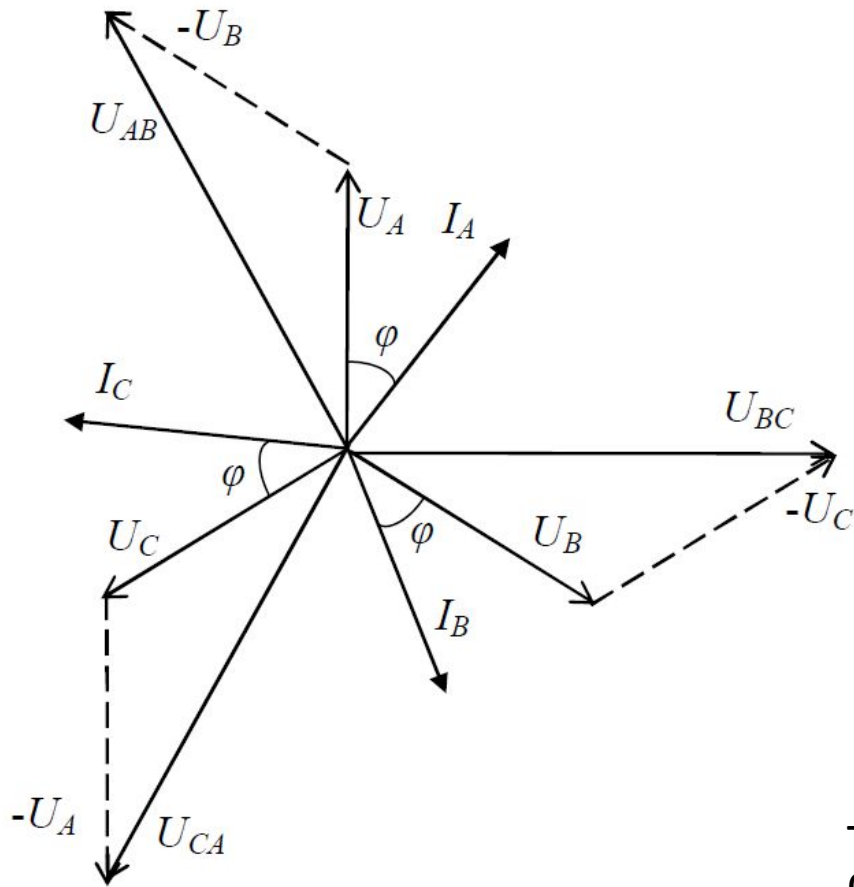
Линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B;$$

$$\bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C;$$

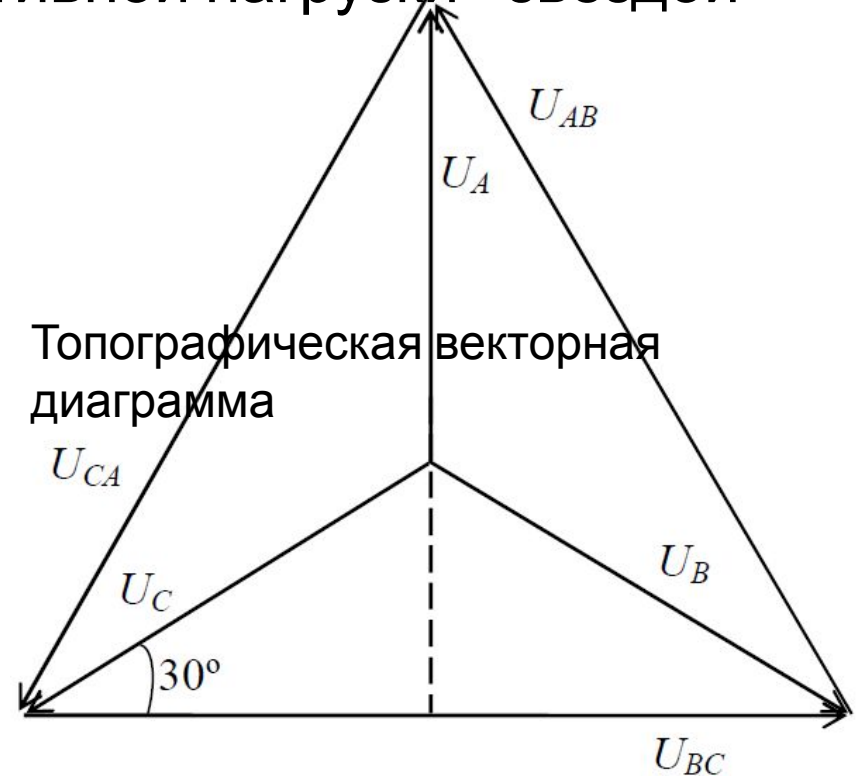
$$\bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A.$$

Векторная диаграмма трехфазной цепи при соединении симметричной активно-индуктивной нагрузки «звездой»



векторы токов, отстающих на угол φ от векторов соответствующих напряжений

Топографическая векторная диаграмма



$$U_{BC} = 2U_C \cos 30^\circ = 2U_C \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_C$$

$$U_{\Pi} = \sqrt{3}U_{\Phi}$$

- при наличии нейтрального провода при симметричной и несимметричной нагрузках;
- при отсутствии нейтрального провода только при симметричной нагрузке.

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C \quad I_A = \frac{U_A}{Z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{Z_C}$$

При симметричной
нагрузке

$$I_A = I_B = I_C; \quad \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C,$$

где $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ — углы сдвига по фазе между фазными напряжениями и фазными токами

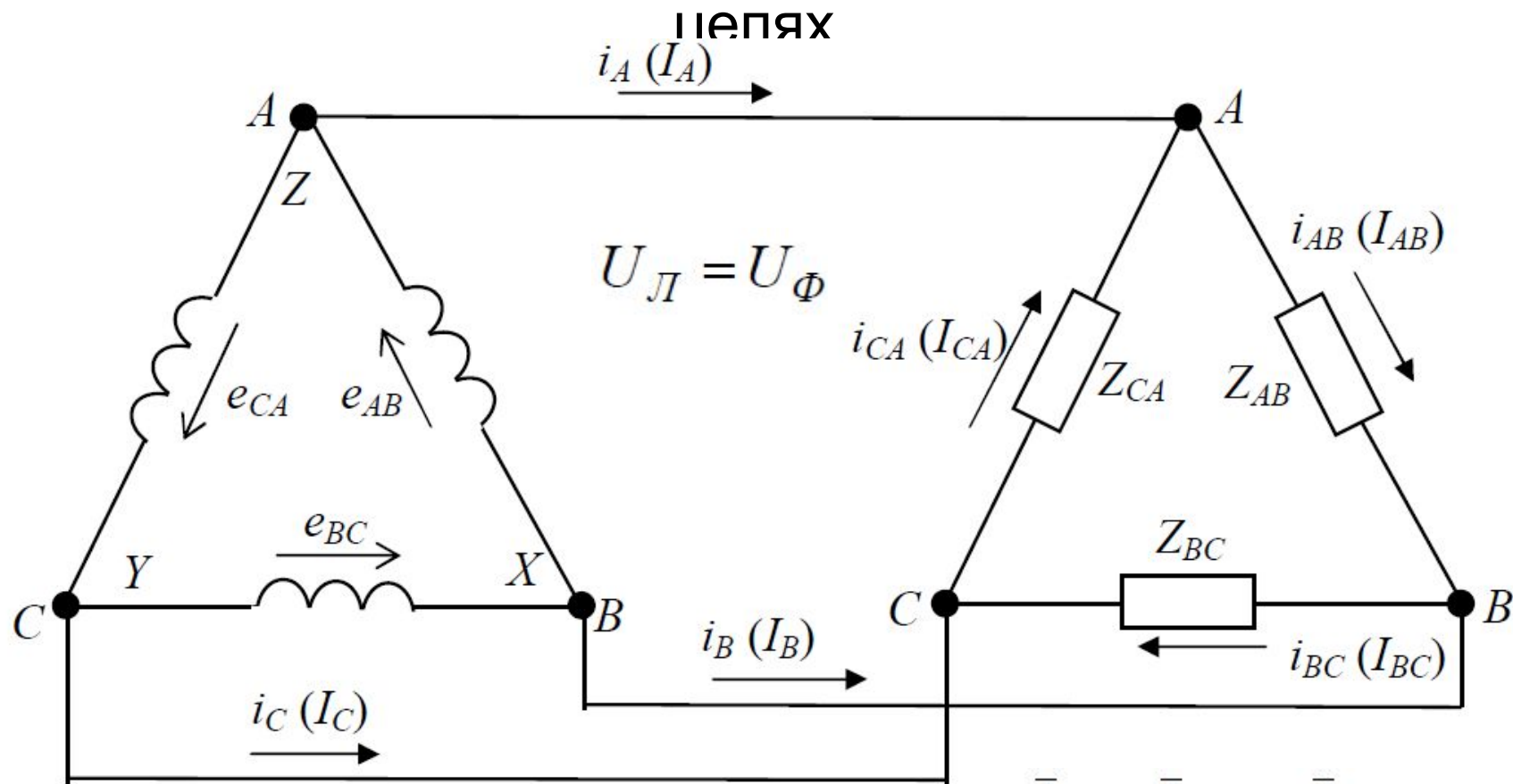
В соответствии с первым законом Кирхгофа для точки N

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0.$$

Нейтральный провод в этом случае не нужен, и схема из четырехпроводной превращается в трехпроводную.

При несимметричной нагрузке обрыв нейтрального провода вызывает значительное изменение фазных токов, а следовательно, и фазных напряжений, что в большинстве случаев недопустимо. Потребители, рассчитанные на фазное напряжение, при уменьшении фазного напряжения будут работать не в номинальном режиме, при увеличении фазного напряжения могут выйти из строя. Поэтому в цепь нейтрального провода предохранители и устройства защиты не устанавливаются. Таким образом, при несимметричной нагрузке наличие нейтрального провода обязательно.

Схема соединения «треугольником» в трехфазных



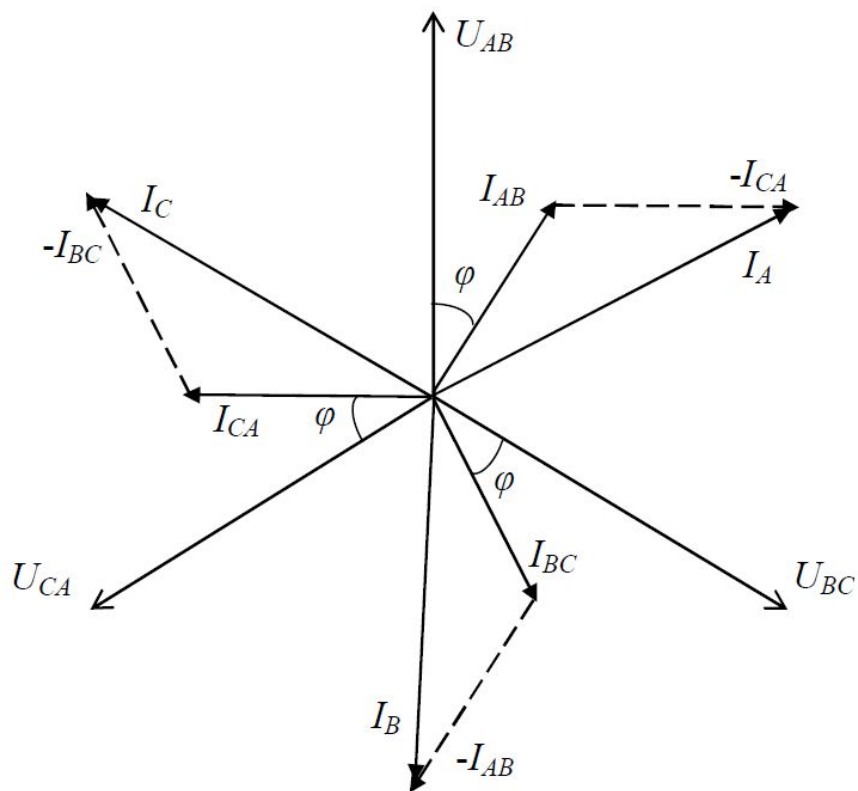
В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}$$

$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}$$

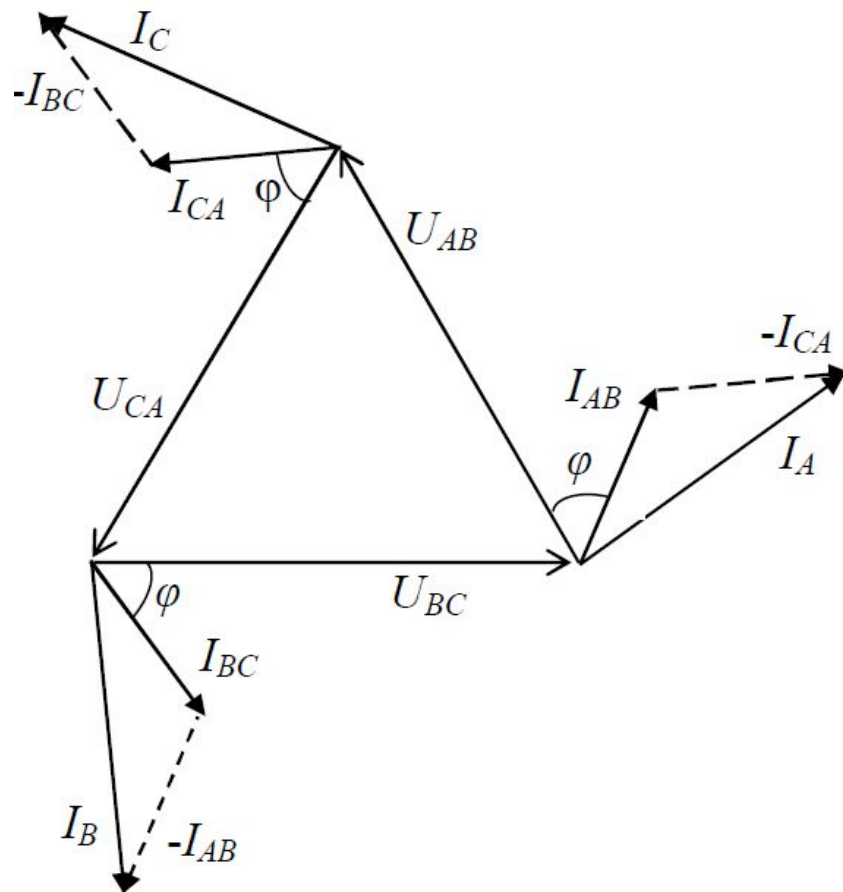
$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}$$

Векторы линейных и фазных токов выходят из одной точки



Топографическая векторная

диаграмма



При симметричной

нагрузке:

$$I_L = 2I_\phi \cos 30^\circ = 2I_\phi \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_\phi$$

$$I_A = I_B = I_C = I_L; I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_\phi$$

всегда

$$U_L = U_\phi$$

а

при симметричной
нагрузке

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

Мощность трехфазной цепи

Любую схему соединения нагрузки трехфазной цепи можно путем преобразований привести к эквивалентной схеме соединения «звездой». Трехфазная электрическая цепь состоит из трех однофазных цепей (фаз), поэтому мощности трехфазной цепи можно определить суммой мощностей отдельных фаз.

Активная мощность трехфазной цепи

$$P = P_A + P_B + P_C;$$

где P_A, P_B, P_C – активные мощности фаз A, B, C, $P_A = U_A I_A \cos \varphi_A$

При симметричной

$$P_B = U_B I_B \cos \varphi_B;$$

$$P_A = P_B = P_C = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi$$

$$P_C = U_C I_C \cos \varphi_C$$

$$U_L = U_\Phi, I_L = \sqrt{3} I_\Phi \text{ для } \Delta$$

$$I_L = I_\Phi, U_L = \sqrt{3} U_\Phi \text{ для } *$$

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$$

Реактивная мощность трехфазной

$$Q_A = U_A I_A \sin \varphi_A$$

$$Q_B = U_B I_B \sin \varphi_B;$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C;$$

$$Q_C = U_C I_C \sin \varphi_C$$

$$Q = 3U_\Phi I_\Phi \sin \varphi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi$$

Полная мощность трехфазной

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

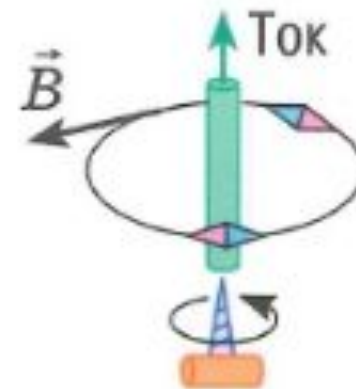
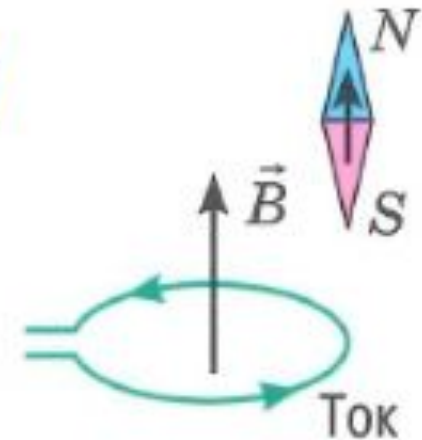
$$S = 3U_\Phi I_\Phi = \sqrt{3} U_L I_L$$

Электродвигатели

Областью науки и техники изучающей электрические машины является - электромеханика. Принято считать, что ее история начинается с 1821 года, когда был создан первый электродвигатель М. Фарадея.

Магнитное поле. Вектор магнитной индукции. Правило буравчика

- Вектор магнитной индукции B [Тл]: это силовая характеристика магнитного поля. Направление B это направление от южного полюса к северному полюсу магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле (совпадает с направлением положительной нормали к замкнутому контуру с током).
- Правило Буравчика: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением вектора B .
- B - это отношение максимальной силы F_m , действующей со стороны магнитного поля на участок проводника с током, к произведению силы тока I на длину этого участка Δl

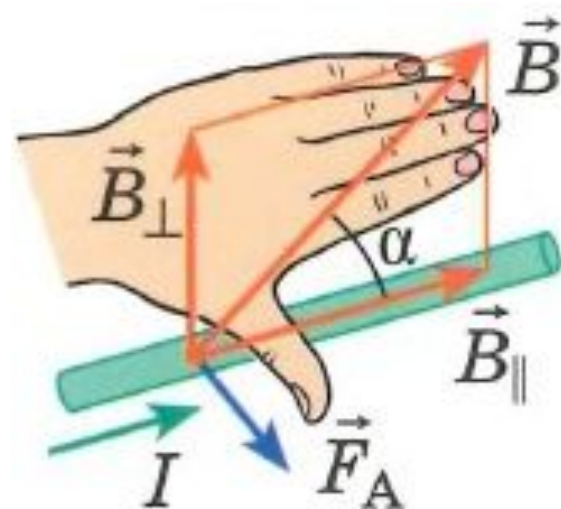


$$B = \frac{F_m}{I \Delta l}$$

Сила Ампера, Закон Ампера, правило левой руки

- Сила Ампера: это сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле
- Закон Ампера: сила Ампера равна произведению модуля вектора магнитной индукции на силу тока, длину участка проводника Δl и на синус угла α между магнитной индукцией и участком проводника:
- Закон Ампера: сила Ампера равна произведению модуля вектора магнитной индукции на силу тока, длину участка проводника ΔL и на синус угла α между магнитной индукцией и участком проводника

$$F_A = B |I| \Delta L \sin \alpha$$

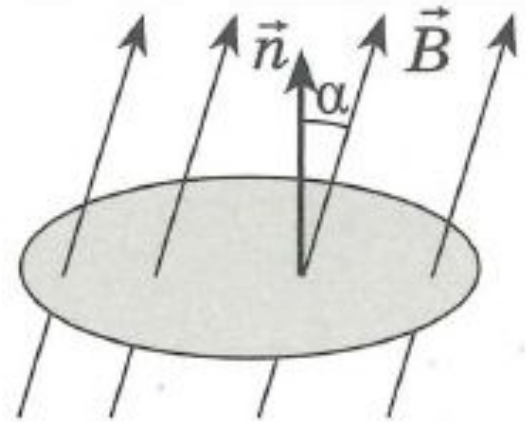


Явление электромагнитной индукции, магнитный поток, поток магнитной ИНДУКЦИИ

Электромагнитная индукция: это явление возникновения электрического тока в проводящем контуре, который либо покоится в переменном магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле таким образом, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется

Магнитный поток (=поток магнитной индукции) [Вб]: через поверхность площадью S это величина равная произведению модуля вектора магнитной индукции B на площадь и косинус угла между вектором B и нормалью к плоскости S

Магнитный поток (=поток магнитной индукции): через поверхность площадью S это величина равная произведению модуля вектора магнитной индукции B на площадь и косинус угла между вектором B и нормалью к плоскости S

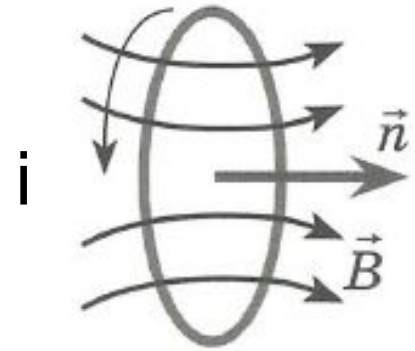


$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Индукция

Правило Ленца

Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного поля, которым он вызван.



Закон электромагнитной индукции:

ЭДС индукции в замкнутом контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком --

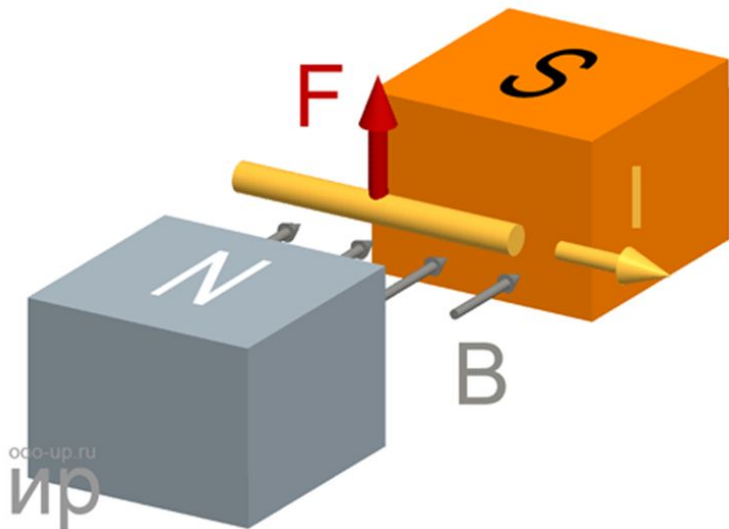
$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Самоиндукция:

Самоиндукция это частный случай электромагнитной индукции, при котором изменяющееся магнитное поле индуцирует ЭДС в том самом проводнике, по которому течет ток, создающий это поле (L-индуктивность)

$$\mathcal{E}_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Принцип работы электродвигателя



Согласно закону, установленному Ампером, на проводник с током в магнитном поле действует сила

$$F = IlB\sin\alpha$$

где F – сила, Н,

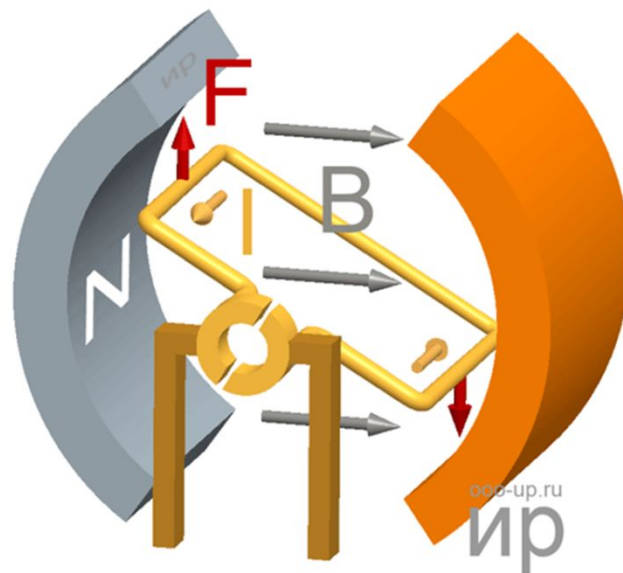
I – сила тока, А,

l – длина проводника, м,

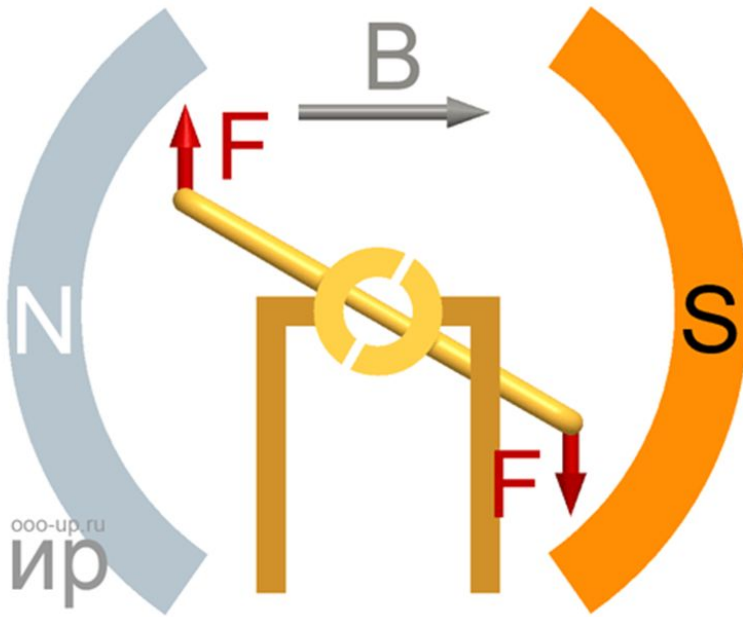
B – магнитная индукция, Тл,

α – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции, град.

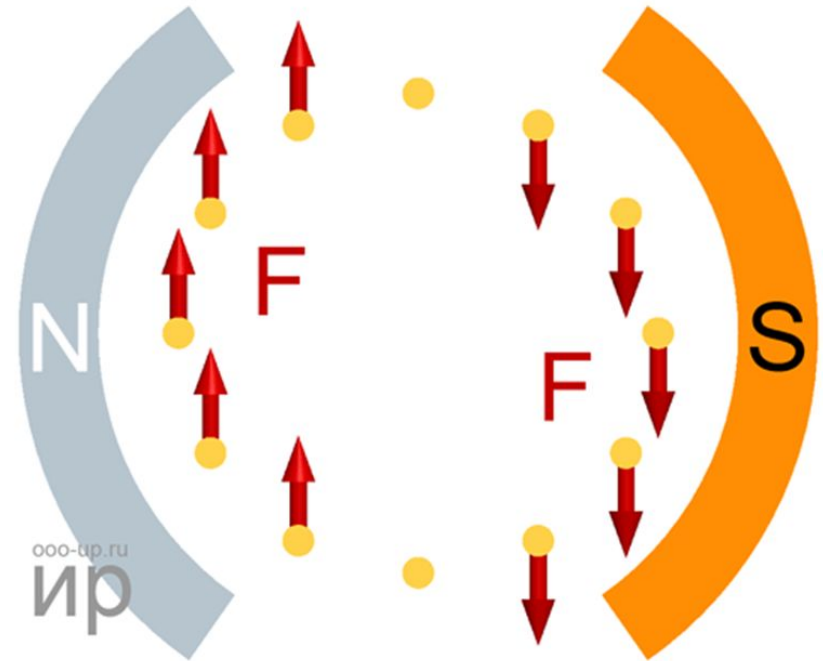
Направление этой силы определяется по правилу "левой руки".



Если проводник с током I согнуть в рамку и поместить в магнитное поле, то две стороны рамки, находящиеся под прямым углом к магнитному полю, будут испытывать противоположно направленные силы F

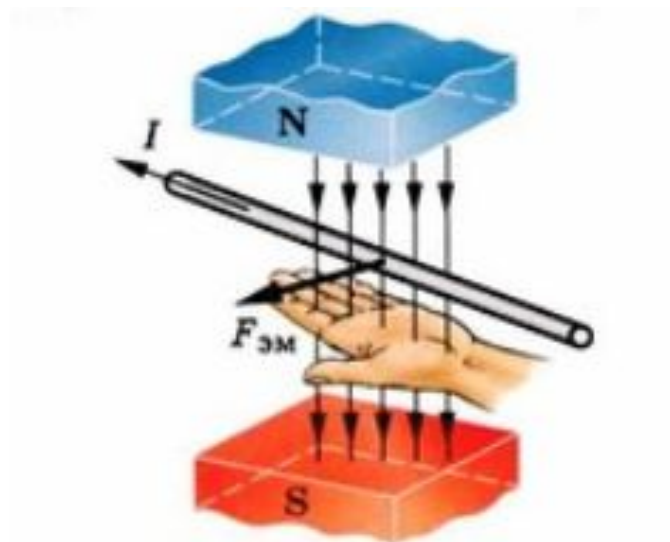


Силы, действующие на рамку, создают крутящий момент или момент силы, вращающий ее.



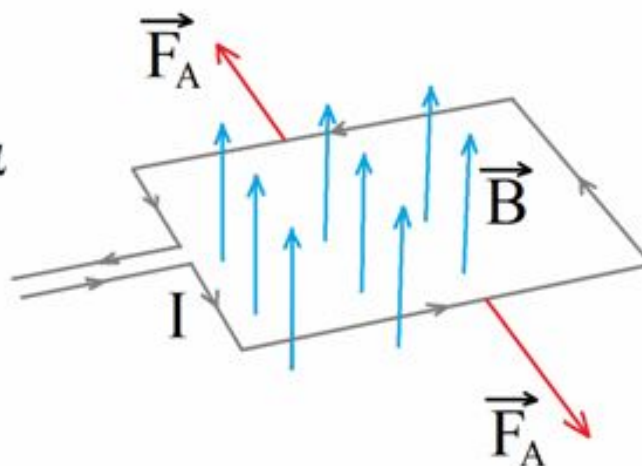
Производимые электродвигатели имеют несколько витков на якоре, чтобы обеспечить большой постоянный момент

Сила Ампера

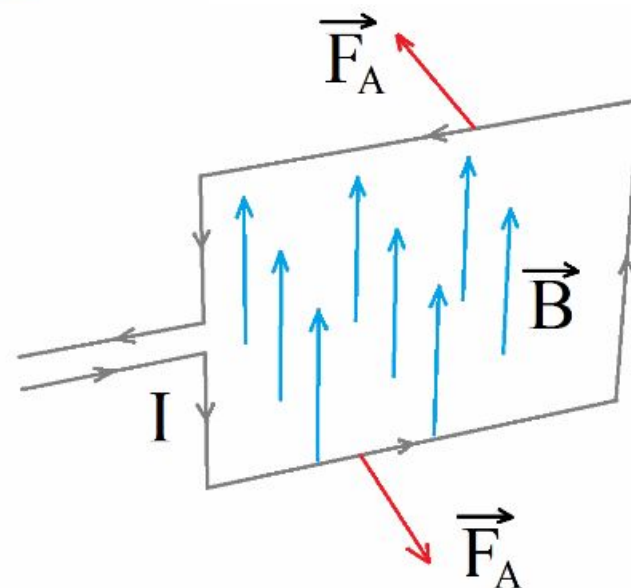


$$F = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha$$

α - угол между
векторами \vec{B} и \vec{I}

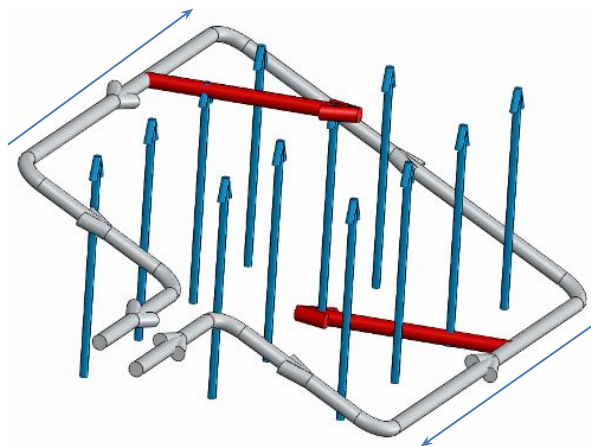
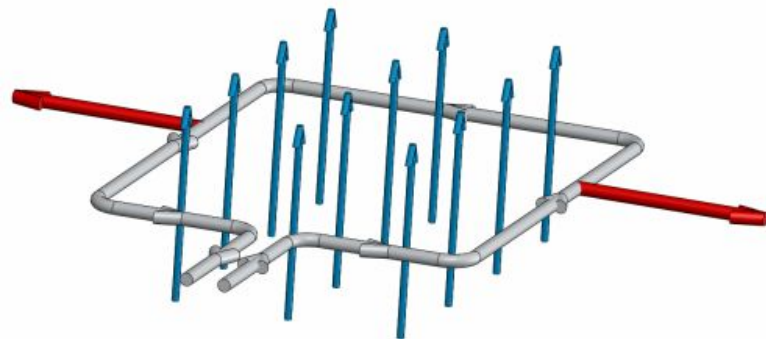
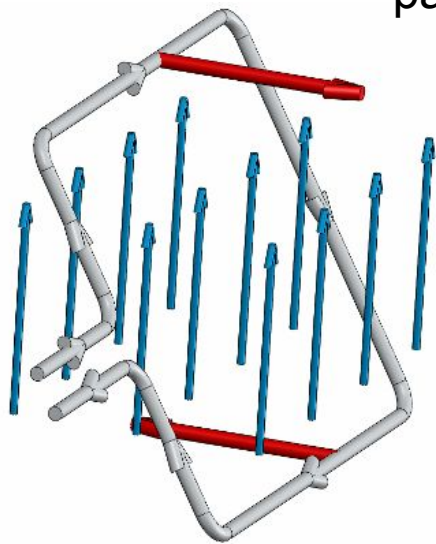


рамка в
равновесии

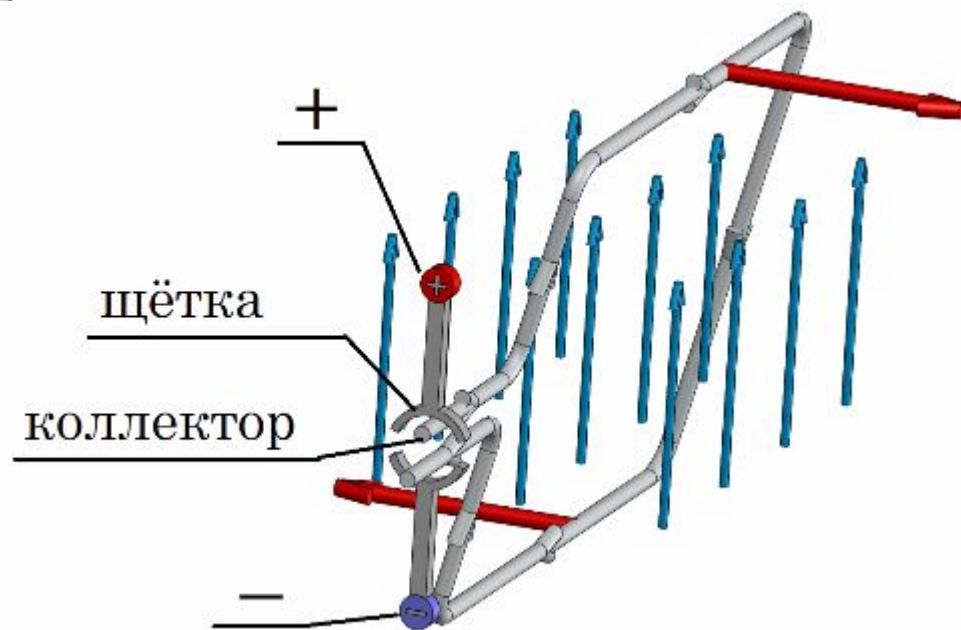


механическое

Способ 1. Смена направления тока в рамке

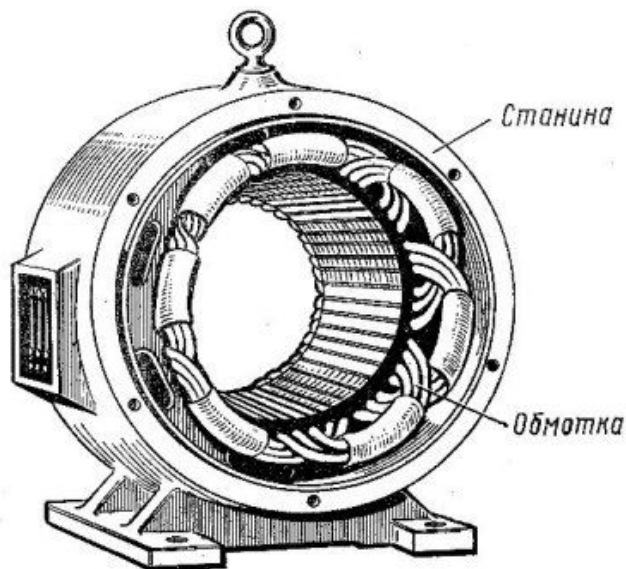


меняем направление
тока в рамке



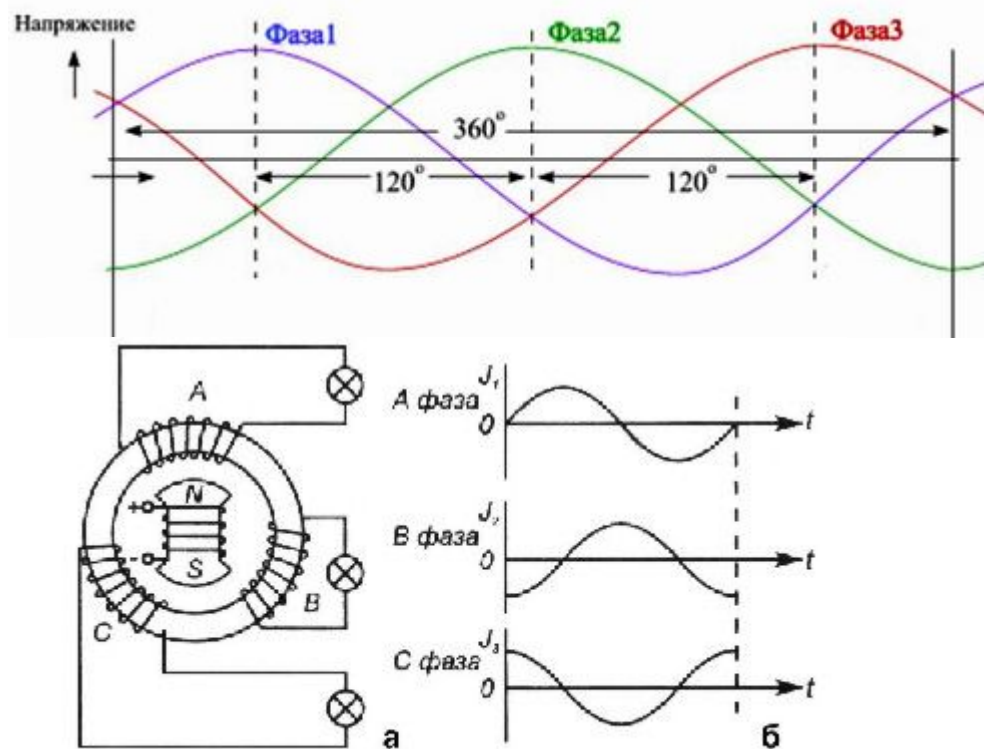
обеспечивает смену тока специальный
узел – щёточно-коллекторный узел

Способ 2. Вращается магнитный поток, т.е. магнитное поле.



Способ 2а. Рамка запитывается (синхронный двигатель).

Способ 2б. Рамка не запитывается (асинхронный двигатель).



Получение трёхфазного тока: а - генератор трёхфазного тока; б - графики изменения трёхфазного тока

Классификации ЭД

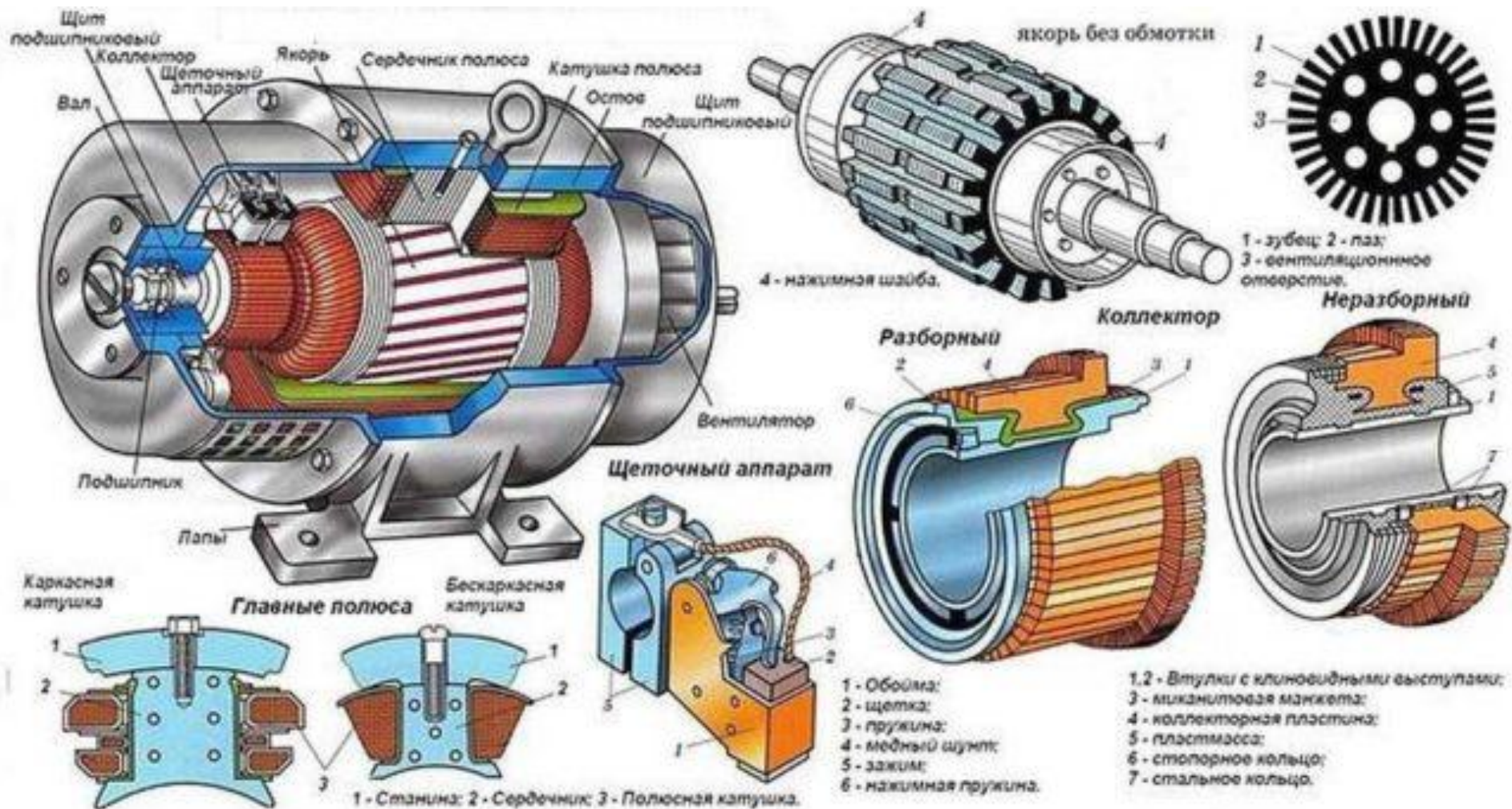
Вращающийся электродвигатель

Само коммутируемый		Внешне коммутируемый	
С механической коммутацией (коллекторный)		С электронной коммутацией ¹ (вентильный ^{2, 3})	
Переменного тока	Постоянного тока	Переменного тока ⁴	Переменного тока
<ul style="list-style-type: none"> Универсальный Репульсионный 	<ul style="list-style-type: none"> КДПТ с обмоткой возбуждения <p>Включение обмотки</p> <ul style="list-style-type: none"> Независимое Последовательное возбуждения Параллельное Комбинированное КДПТ с постоянными магнитами 	<ul style="list-style-type: none"> БДПТ (Бесколлекторный двигатель + ЭП + ДПР) ВРД (Реактивный двигатель с ротором с явно выраженными полюсами и сосредоточенной обмоткой статора + ЭП + ДПР) 	<ul style="list-style-type: none"> Трехфазный (многофазный) <ul style="list-style-type: none"> АДКР АДФР Двухфазный (конденсаторный) Однофазный с пусковой обмоткой С экранированными полюсами С асимметричным магнитопроводом
			<ul style="list-style-type: none"> СДОВ СДПМ <ul style="list-style-type: none"> СДПМВ СДПМП Гибридный СРД Гистерезисный Индукторный Гибридный СРД-ПМ Реактивно-гистерезисный Шаговый⁵

Аббревиатура:

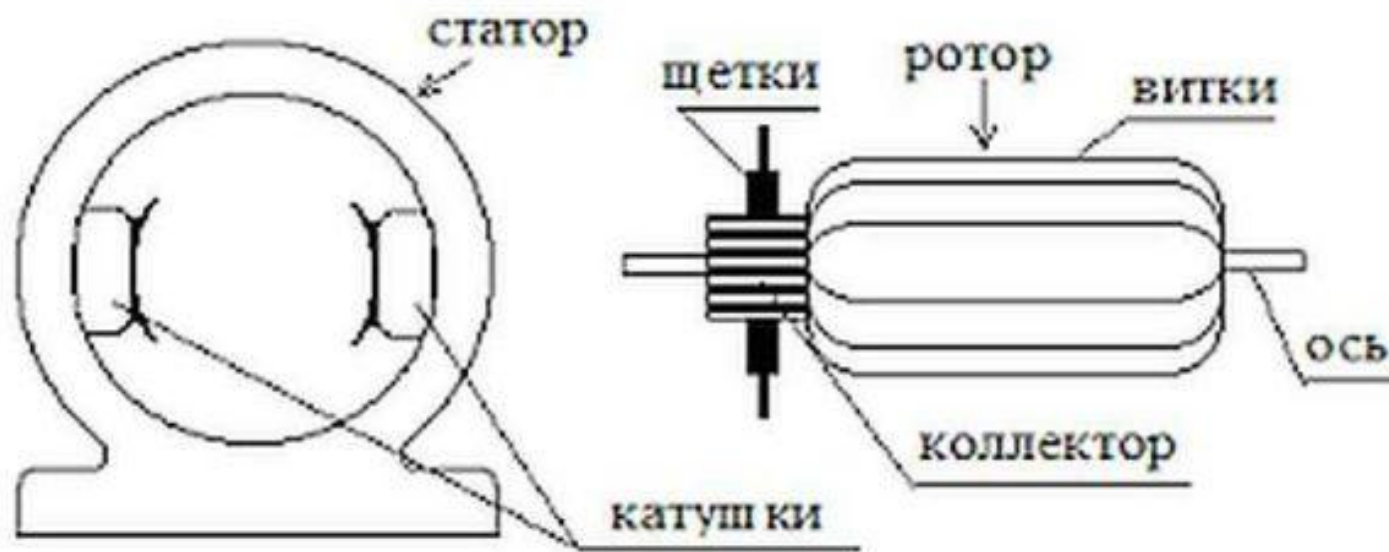
- КДПТ - коллекторный двигатель постоянного тока
- БДПТ - бесколлекторный двигатель постоянного тока
- ЭП - электрический преобразователь
- ДПР - датчик положения ротора
- ВРД - вентильный реактивный двигатель
- АДКР - асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором
- АДФР - асинхронный двигатель с фазным ротором
- СДОВ - синхронный двигатель с обмоткой возбуждения
- СДПМ - синхронный двигатель с постоянными магнитами
- СДПМП - синхронный двигатель с поверхностной установкой постоянных магнитов
- СДПМВ - синхронный двигатель со встроенными постоянными магнитами
- СРД - синхронный реактивный двигатель
- ПМ - постоянные магниты
- ЧП - частотный преобразователь

Коллекторные ЭД



- Ротор — вращающаяся часть электрической машины.
- Статор — неподвижная часть двигателя.
- Индуктор (система возбуждения) — часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, создающая магнитный поток для образования момента. Индуктор обязательно включает либо постоянные магниты либо обмотку возбуждения. Индуктор может быть частью как ротора так и статора.
- Якорь — часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, в которой индуцируется электродвижущая сила и протекает ток нагрузки. В качестве якоря может выступать как ротор так и статор. В двигателе, показанном на рис., ротор является якорем.
- Щетки — часть электрической цепи, по которой от источника питания электрический ток передается к якорю. Щетки изготавливаются из графита или других материалов. Двигатель постоянного тока содержит одну пару щеток или более. Одна из двух щеток соединяется с положительным, а другая — с отрицательным выводом источника питания.
- Коллектор — часть двигателя, контактирующая со щетками. С помощью щеток и коллектора электрический ток распределяется по катушкам обмотки якоря.
- По конструкции статора коллекторный двигатель может быть с постоянными магнитами и с обмотками возбуждения.

Схема коллекторного ЭД



Типы ЭДПТ

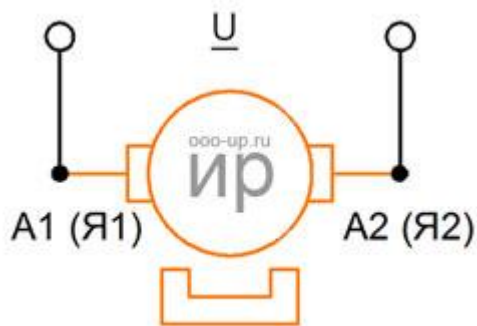


Схема коллекторного двигателя с постоянными магнитами

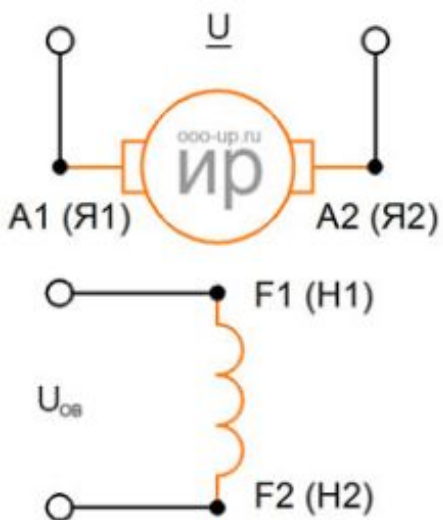


Схема независимого возбуждения

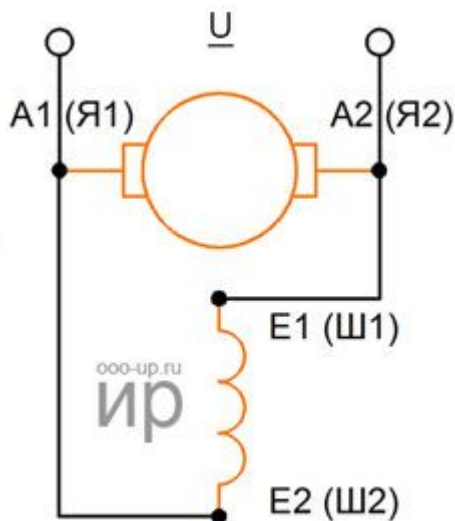


Схема параллельного возбуждения

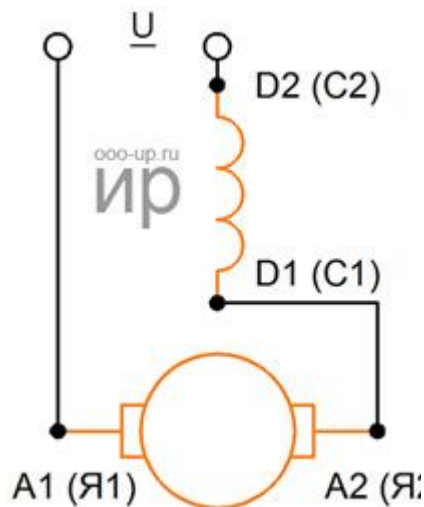


Схема последовательного возбуждения

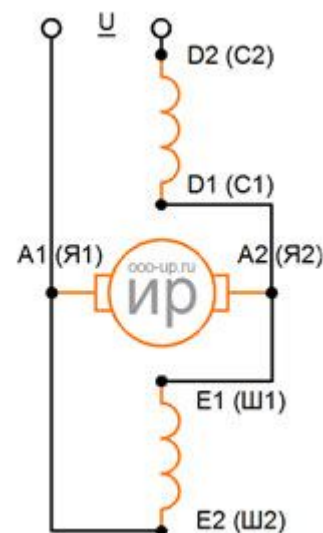
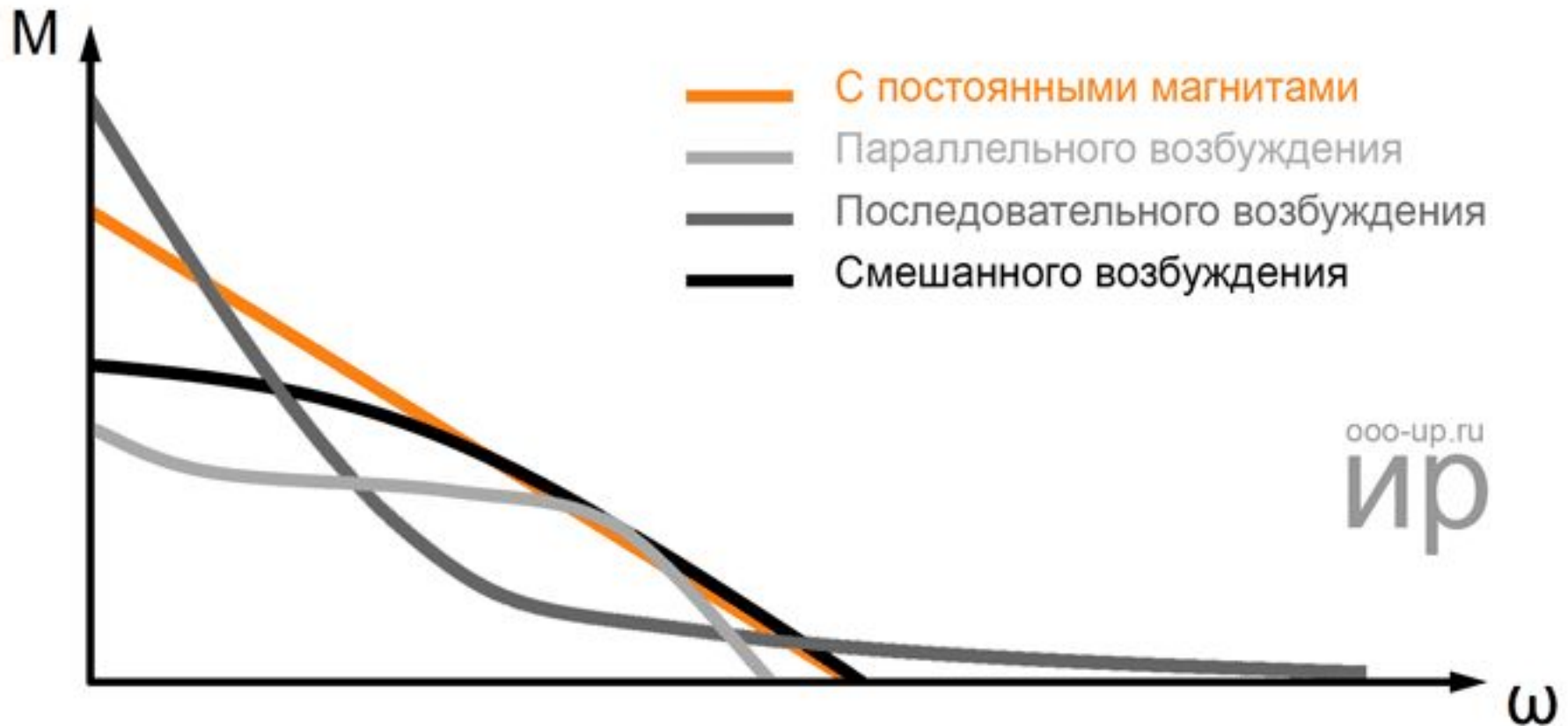


Схема смешанного возбуждения

Механические характеристики коллекторных двигателей постоянного тока



Управление коллекторными

электродвигателями постоянного тока

Из уравнения скорости электродвигателя постоянного тока видно, что частота вращения коллекторного электродвигателя постоянного тока напрямую связана с величиной напряжения питания прикладываемого к двигателю и момента нагрузки.

$$\omega = \frac{U}{K_E} - \frac{M}{\beta}$$

где ω - угловая частота, рад/с,

U - напряжение питания, В,

K_E – постоянная ЭДС, В·с/рад,

M - момент электродвигателя, Н·м,

β - механическая жесткость двигателя.

Таким образом скорость вращения коллекторного двигателя постоянного тока изменяется посредством изменения величины напряжения питания.

Сравнение ЭПТ

Двигатели независимого и параллельного возбуждения	Двигатель последовательного возбуждения	Двигатель смешанного возбуждения
Преимущества:		
практически постоянный момент на низких оборотах хорошие регулировочные свойства отсутствие потерь магнетизма со временем (так как нет постоянных магнитов)	высокий момент на низких оборотах отсутствие потерь магнетизма со временем	хорошие регулировочные свойства высокий момент на низких оборотах менее вероятен выход из под контроля отсутствие потерь магнетизма со временем
Недостатки:		
дороже КДПТ ПМ двигатель выходит из под контроля, если ток индуктора падает до нуля	низкий момент на высоких оборотах дороже КДПТ ПМ плохая управляемость скоростью из-за последовательного соединения обмоток якоря и индуктора двигатель выходит из под контроля, если ток индуктора падает до нуля	дороже других коллекторных двигателей

Основные параметры электродвигателя

Момент
электродвигателя

$$M = Fr$$

- где M – вращающий момент, Нм,
- F – сила, Н,
- r – радиус-вектор, м

Начальный пусковой момент - момент электродвигателя при пуске.

Механическая мощность. Мощность - физическая величина, показывающая какую работу механизм совершает в единицу времени.

$$P = \frac{dA}{dt}$$

- где P – мощность, Вт,
- A – работа, Дж,
- t - время, с

Работа - скалярная физическая величина, равная произведению проекции силы на направление F и пути s , проходимого точкой приложения силы.

$$dA = Fds$$

• где s – расстояние, м

Для вращательного движения

$$ds = r d\theta$$
$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

- где θ – угол, рад,
- где ω – угловая скорость, рад/с,

Таким образом можно вычислить значение механической мощности на валу вращающегося электродвигателя

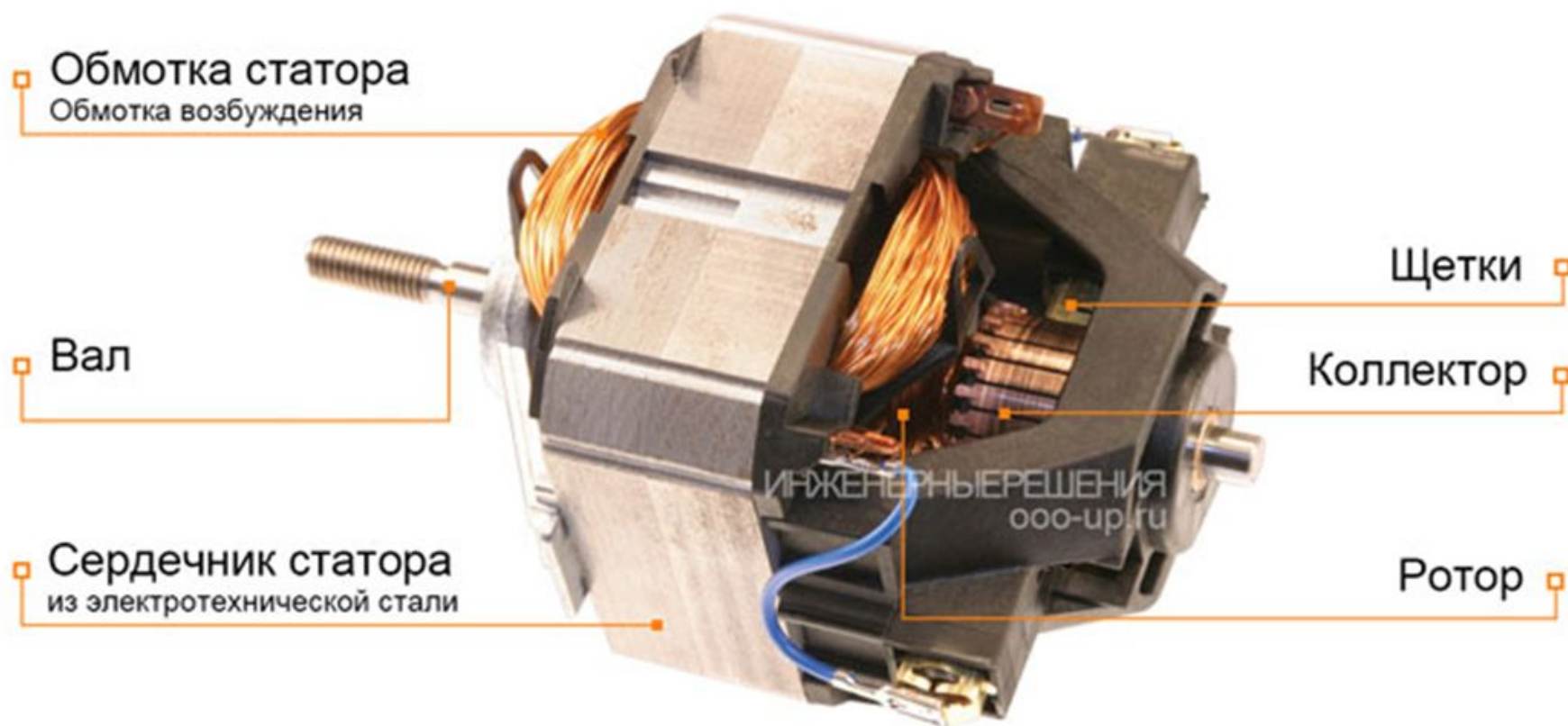
$$P = M\omega$$

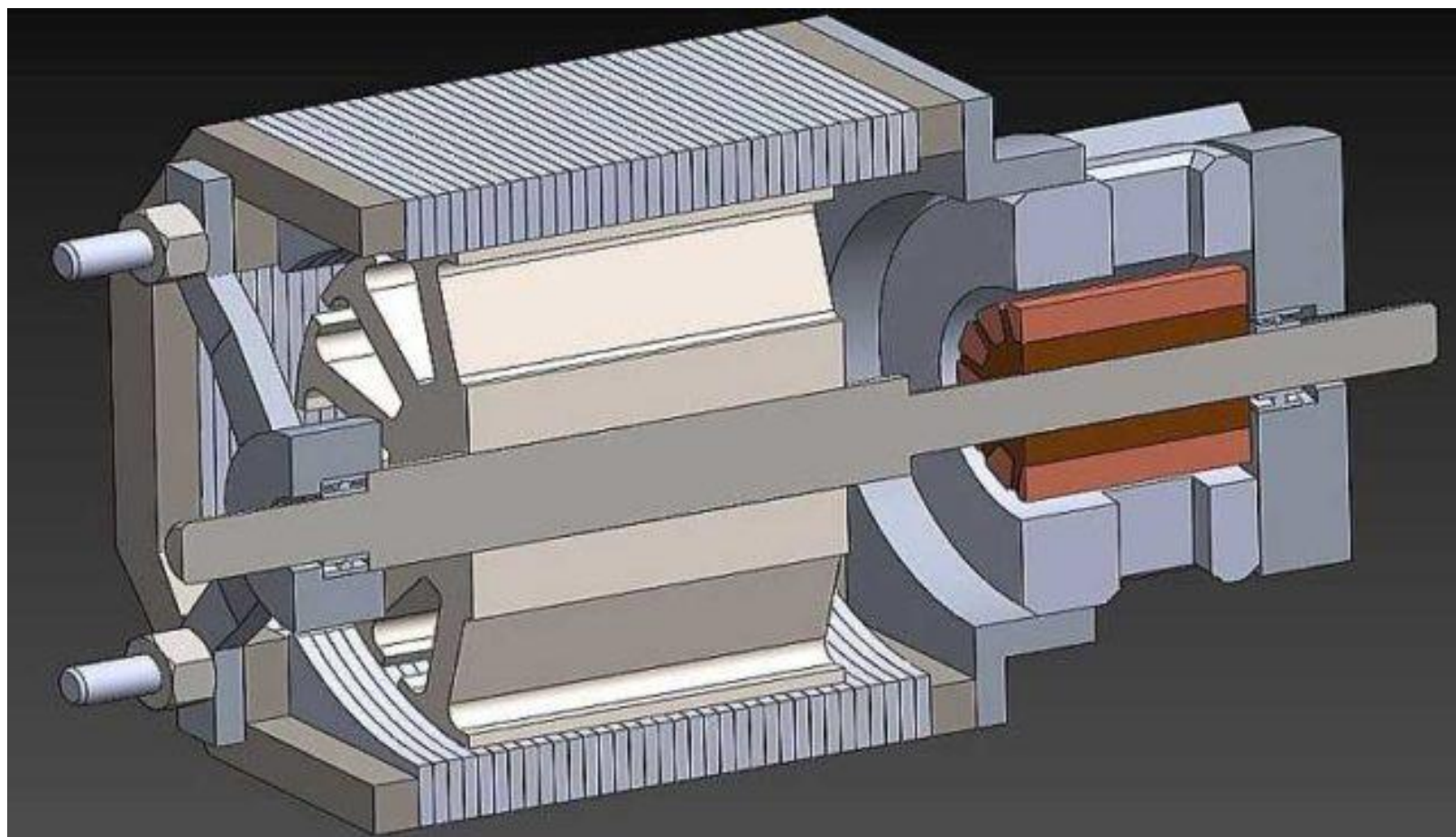
Универсальный двигатель

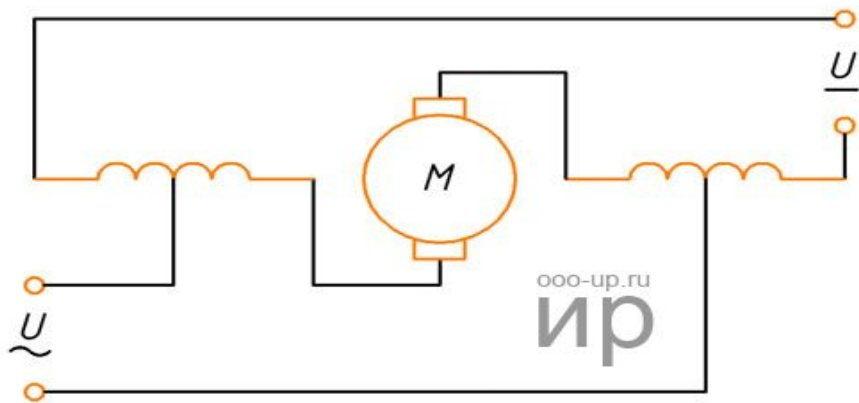
Универсальный двигатель – вращающийся электродвигатель, который может работать при питании от сети как постоянного, так и однофазного переменного тока.

Конструкция универсального коллекторного электродвигателя не имеет принципиальных отличий от конструкции коллекторного электродвигателя постоянного тока с обмотками возбуждения, за исключением того, что вся магнитная система (и статор, и ротор) выполняется шихтованной и обмотка возбуждения делается секционированной. Шихтованная конструкция и статора, и ротора обусловлена тем, что при работе на переменном токе их пронизывают переменные магнитные потоки, вызывая значительные магнитные потери.

Конструкция УЭД







Возможность работы универсального двигателя от сети переменного тока объясняется тем, что при изменении полярности подводимого напряжения изменяются направления токов в обмотке якоря и в обмотке возбуждения. При этом изменение полярности полюсов статора практически совпадает с изменением направления тока в обмотке якоря. В итоге направление электромагнитного вращающего момента не изменяется.

результатирующий электромагнитный момент при работе двигателя от сети переменного тока пульсирует. Пульсации электромагнитного момента практически не нарушают работу двигателя. Объясняется это тем, что при значительной частоте пульсаций электромагнитного момента и большом моменте инерции якоря вращение последнего оказывается равномерным. Коэффициент полезного действия универсального двигателя при его работе от сети переменного тока более низкий, чем при его работе от сети постоянного тока. Другой недостаток универсального двигателя — тяжелые условия коммутации, вызывающие интенсивное искрение на коллекторе при включении двигателя в сеть переменного тока.

Применение

Двигатели постоянного тока обладают следующими преимуществами:

- возможностью плавного регулирования частоты вращения;
- хорошими пусковыми качествами;
- устойчивостью;
- разнообразием механических характеристик и возможностью их изменения;
- при питании от сети переменного тока максимальная частота не ограничивается частотой сети.

Их широко используют в качестве тяговых двигателей на электротранспорте. Машины постоянного тока входят в состав автомобильного, судового и самолетного электрооборудования

Недостатком электрических машин постоянного тока является сложность их конструкции, связанная со щеточно-коллекторным механизмом, осуществляющим постоянную коммутацию цепей электрической машины, из-за которой возникает искрение. Это снижает надежность машин и ограничивает область их применения взрывобезопасными процессами

Асинхронный двигатель

Асинхронный электродвигатель - бесколлекторная машина переменного тока, у которой отношение частоты вращения ротора к частоте тока в цепи, подключенной к машине, зависит от нагрузок.

Типы асинхронных электродвигателей

Однофазный асинхронный электродвигатель

Однофазные асинхронные электродвигатели широко применяются в устройствах автоматики и различных бытовых приборах. Обычно изготавливаются на небольшую мощность, так как КПД однофазного асинхронного электродвигателя ниже, чем у трехфазного. Данный двигатель можно использовать в быту, где нет трехфазной сети питания, без частотного преобразователя. При этом по сравнению с коллекторными электродвигателями постоянного тока он дешевле и надежнее, но при одинаковых размерах имеет меньшую механическую мощность.

- С пусковой обмоткой
- С экранированными полюсами
- С асимметричным магнитопроводом статора

Конденсаторный электродвигатель

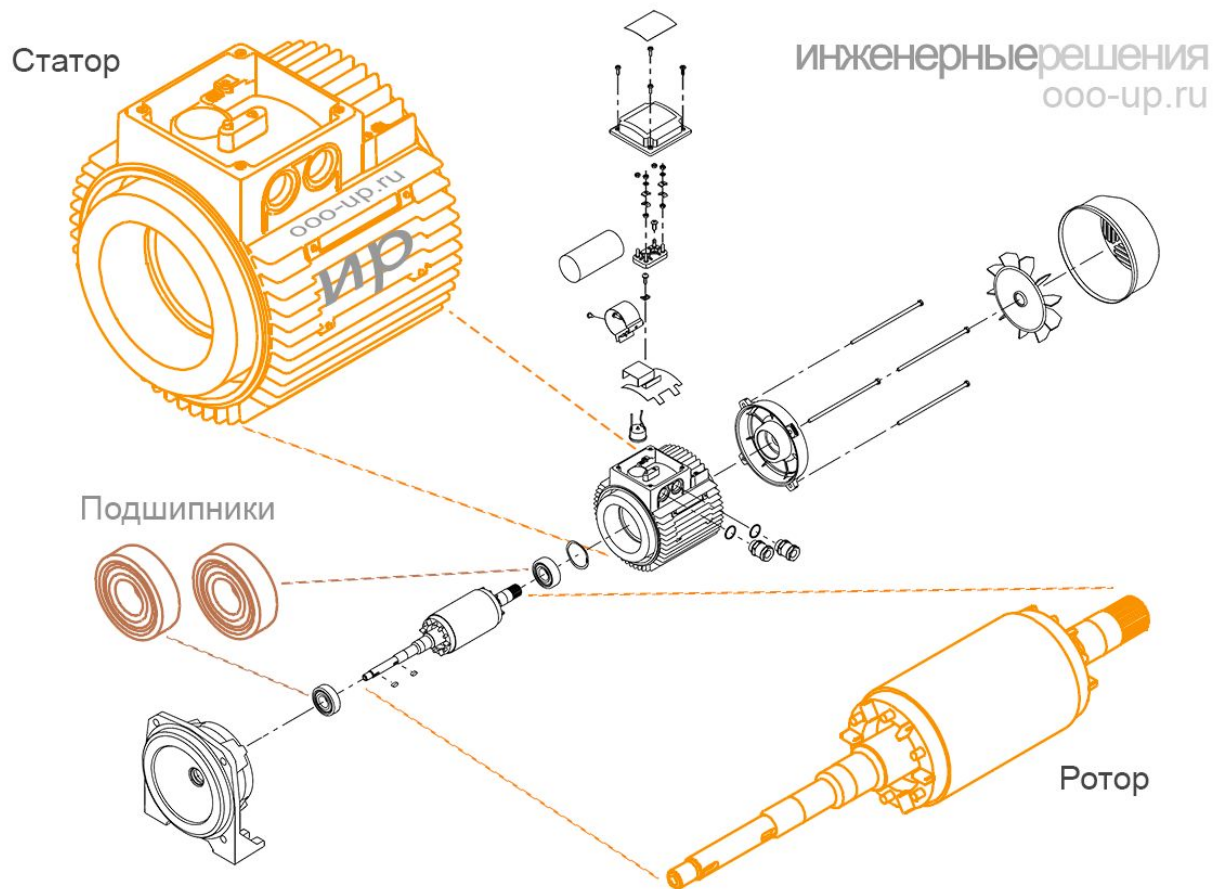
Конденсаторный электродвигатель представляет из себя двухфазный асинхронный электродвигатель, включаемый в однофазную электрическую сеть. Вращающееся магнитное поле статора создается за счет постоянно подключенного конденсатора к одной фазе двигателя. КПД конденсаторного двигателя (50-70%) значительно выше, чем у однофазных двигателей с пусковой обмоткой и почти такое же, как у трехфазного асинхронного двигателя. Коэффициент мощности конденсаторного двигателя (0,8-0,95) из-за наличия конденсатора выше, чем у трехфазных двигателей равной мощности. Недостатком данного двигателя является - более высокая стоимость из-за наличия конденсатора, небольшой пусковой момент при отсутствии дополнительного пускового конденсатора.

Трехфазный асинхронный электродвигатель

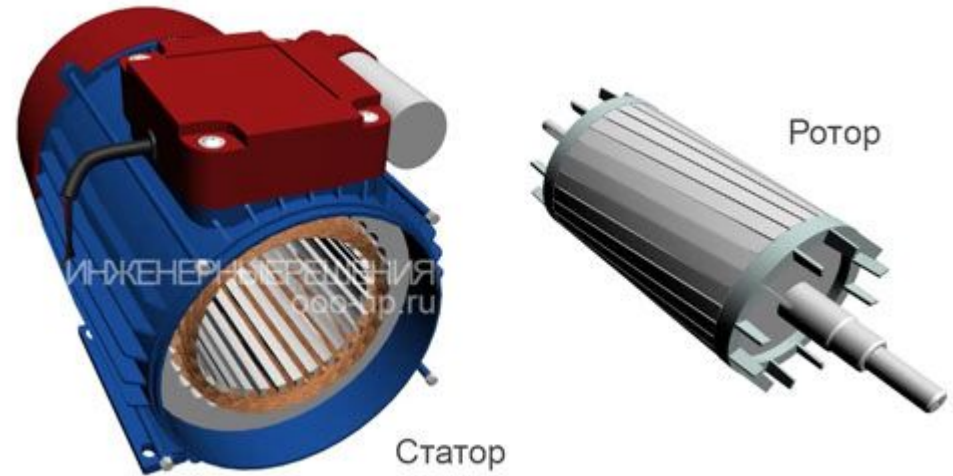
Трехфазные асинхронные электродвигатели - наиболее широко используемые электродвигатели в мире. Примерно 90% всех применяемых электродвигателей - асинхронные. Такое большое распространение эти электродвигатели получили благодаря простоте конструкции и надежной работе.

- С короткозамкнутым ротором
- С фазным ротором

Бесколлекторный ЭД



Однофазный асинхронный электродвигател ь

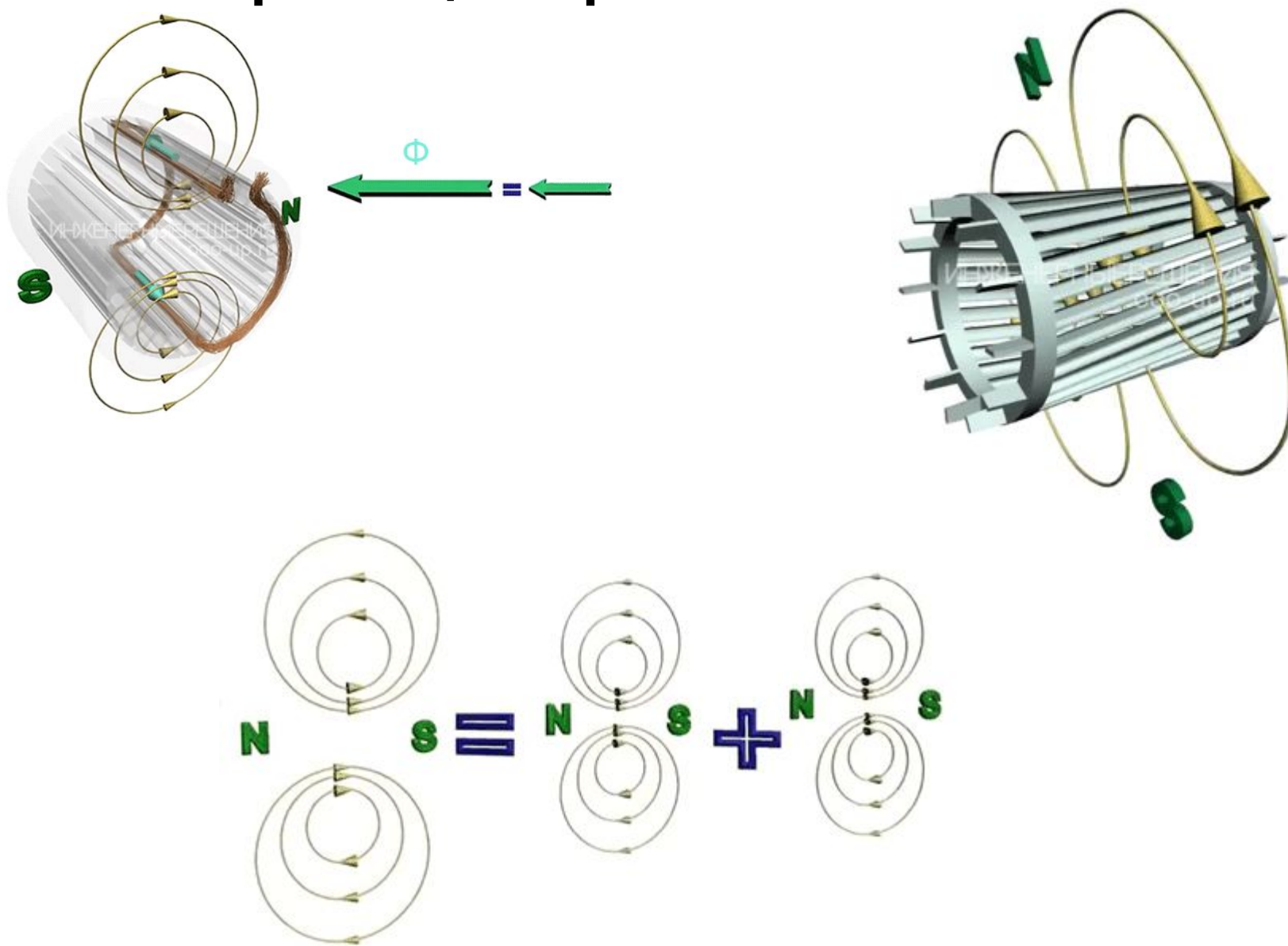


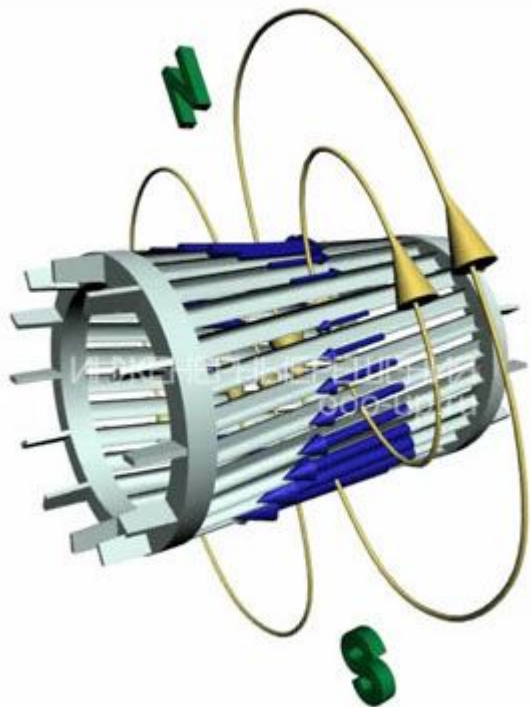
Однофазный асинхронный электродвигатель — это асинхронный электродвигатель, который работает от электрической сети однофазного переменного тока без использования частотного преобразователя и который в основном режиме работы (после пуска) использует только одну обмотку (фазу) статора.

Статор имеет две обмотки, расположенные под углом 90° относительно друг друга. Основная обмотка называется главной (рабочей) и обычно занимает $2/3$ пазов сердечника статора, другая обмотка называется вспомогательной (пусковой) и обычно занимает $1/3$ пазов статора.

Ротор обычно представляет из себя короткозамкнутую обмотку, также из-за схожести называемой "беличьей клеткой". Медные или алюминиевые стержни которого с торцов замкнуты кольцами, а пространство между стержнями чаще всего заливается сплавом алюминия. Так же ротор однофазного двигателя может быть выполнен в виде полого немагнитного или полого ферромагнитного цилиндра.

Принцип работы АДПТ





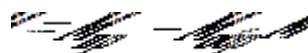
Ток индуцируемый в роторе переменным магнитным полем

Согласно закону Ампера, вращающий момент

$$M_{вр} = C_M \Phi_{вр} I_{вр} \cos \varphi_{вр}$$

тормозящий момент

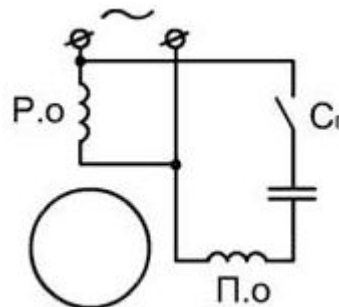
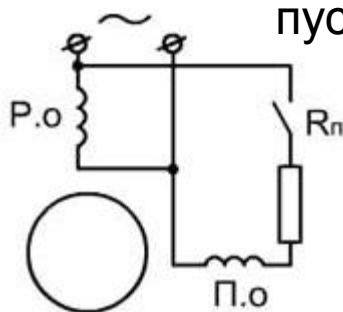
$$M_{твр} = C_M \Phi_{вр} I_{твр} \cos \varphi_{твр}$$



$$s_{пр} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = s$$

где $s_{пр}$ – скольжение ротора относительно прямого магнитного потока,
 n_1 - частота вращения магнитного потока
 n_2 – частота вращения ротора, об/мин,
 s – скольжение асинхронного двигателя

Использование пусковой обмотки



Трехфазный асинхронный электродвигатель

Трехфазный асинхронный электродвигатель, как и любой электродвигатель, состоит из двух основных частей - статора и ротора. Статор - неподвижная часть, ротор - вращающаяся часть. Ротор размещается внутри статора. Между ротором и статором имеется небольшое расстояние, называемое воздушным зазором, обычно 0,5-2 мм.

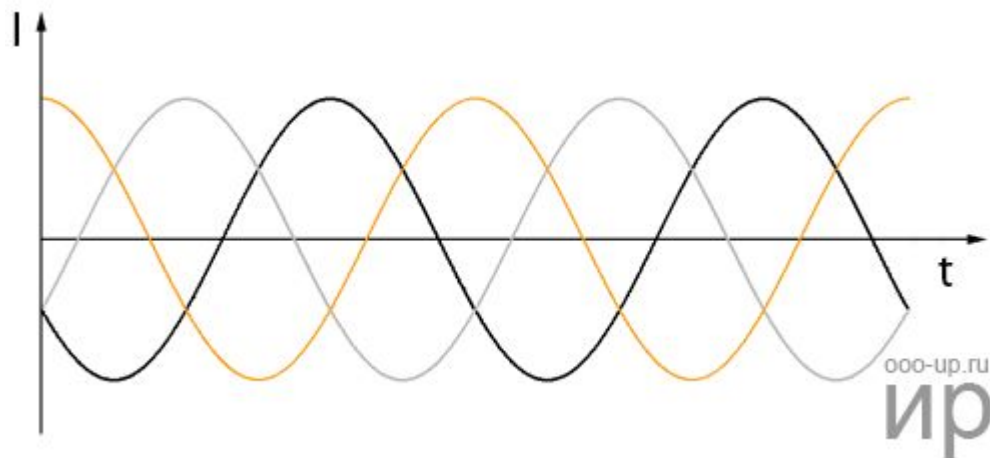
Статор состоит из корпуса и сердечника с обмоткой. Сердечник статора собирается из тонколистовой технической стали толщиной обычно 0,5 мм, покрытой изоляционным лаком.

Ротор состоит из сердечника с короткозамкнутой обмоткой и вала. Сердечник ротора тоже имеет шихтованную конструкцию.

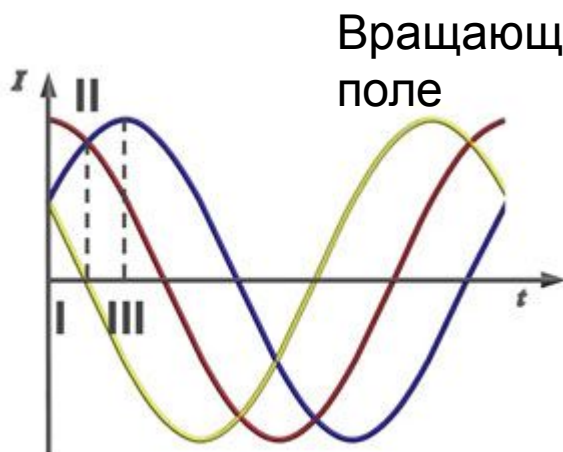
Конструкция



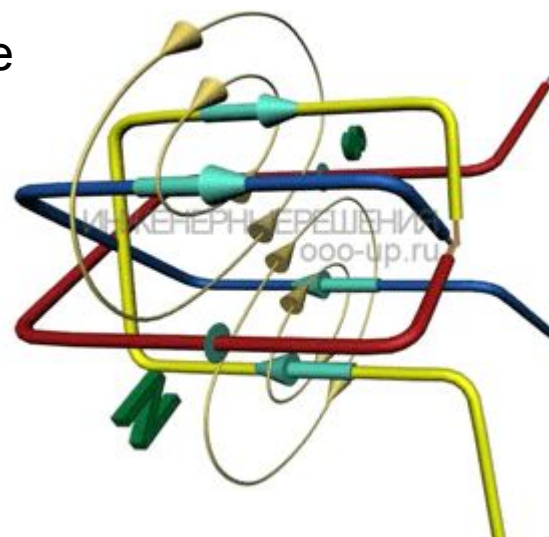
Принцип работы



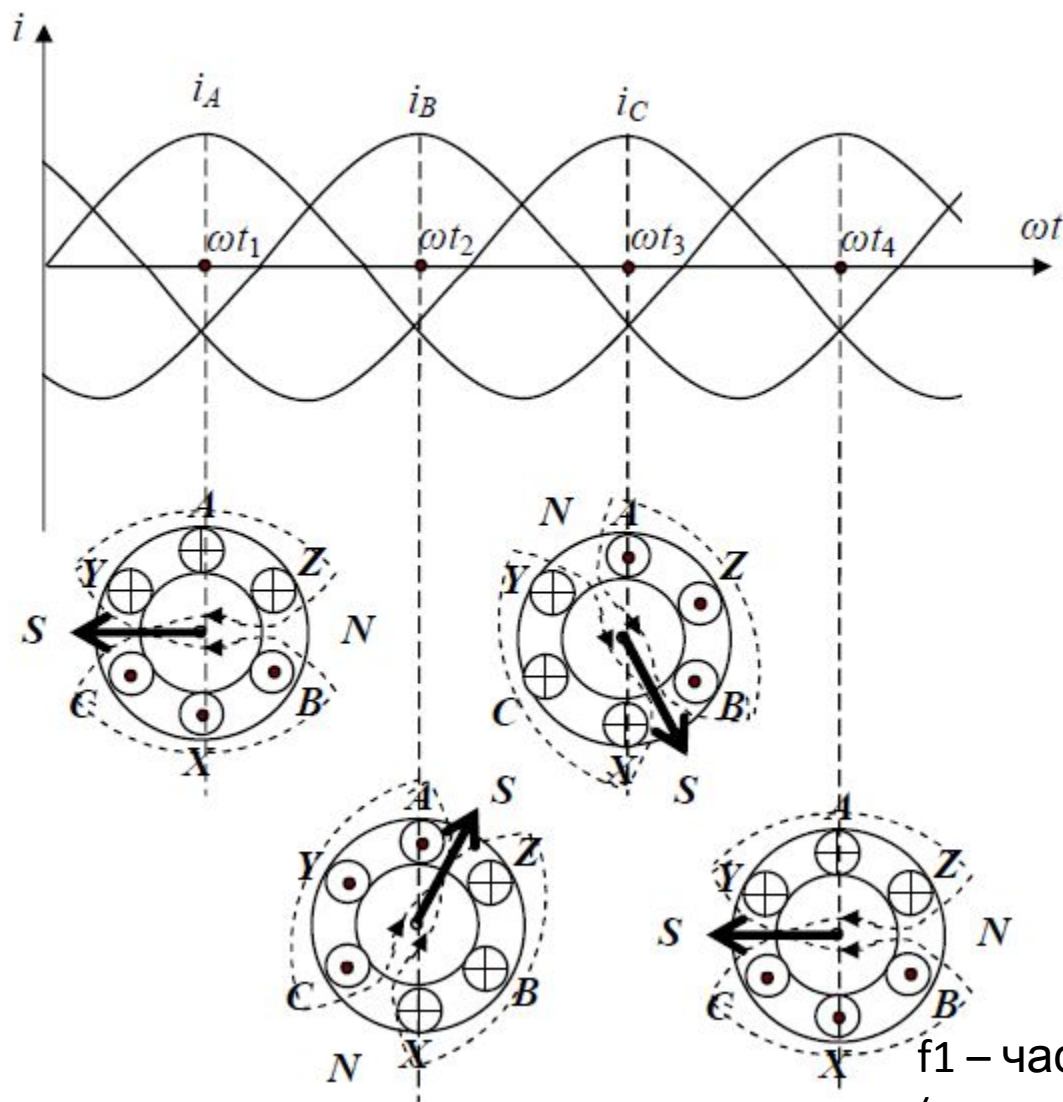
Трехфазный ток (разница фаз 120°)



Вращающееся магнитное поле



Вращающееся магнитное поле статора асинхронного двигателя



А, В, С – начала фаз обмотки статора; Х, Y, Z – концы фаз обмотки статора

За положительное направление токов принимается направление от начала к концу фазы обмотки статора.

При изменении токов происходит равномерное вращение всего спектра силовых линий магнитного поля, а конфигурация силовых линий при этом не изменяется. Такое поле принято называть

вращающимся магнитным полем

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}$$

f_1 – частота тока в обмотке статора (частота питающего напряжения); p – число пар полюсов

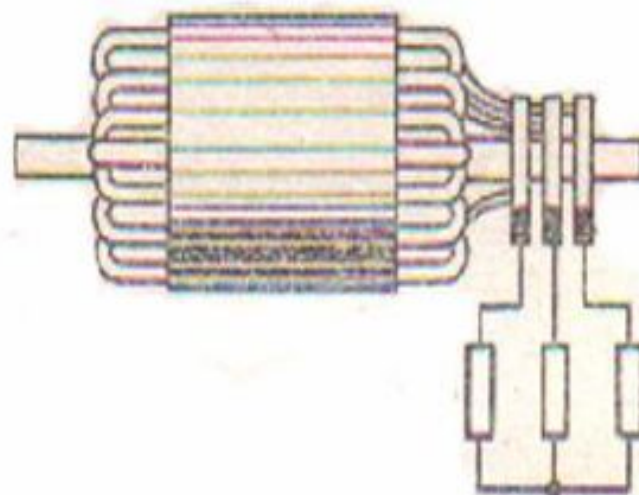
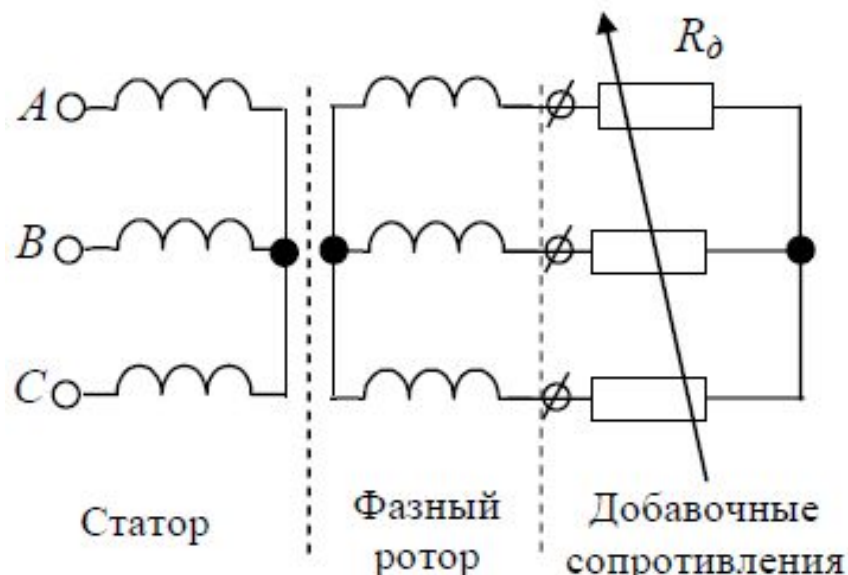
Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором

Конструктивно фазный ротор представляет из себя трехфазную обмотку (аналогичную обмотки статора) уложенную в пазы сердечника фазного ротора. Концы фаз такой обмотки ротора обычно соединяются в "звезду", а начала подключают к контактным кольцам, изолированным друг от друга и от вала. Через щетки к контактным кольцам обычно присоединяется трехфазный пусковой или регулировочный реостат. Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию, чем у двигателей с короткозамкнутым ротором, однако обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами



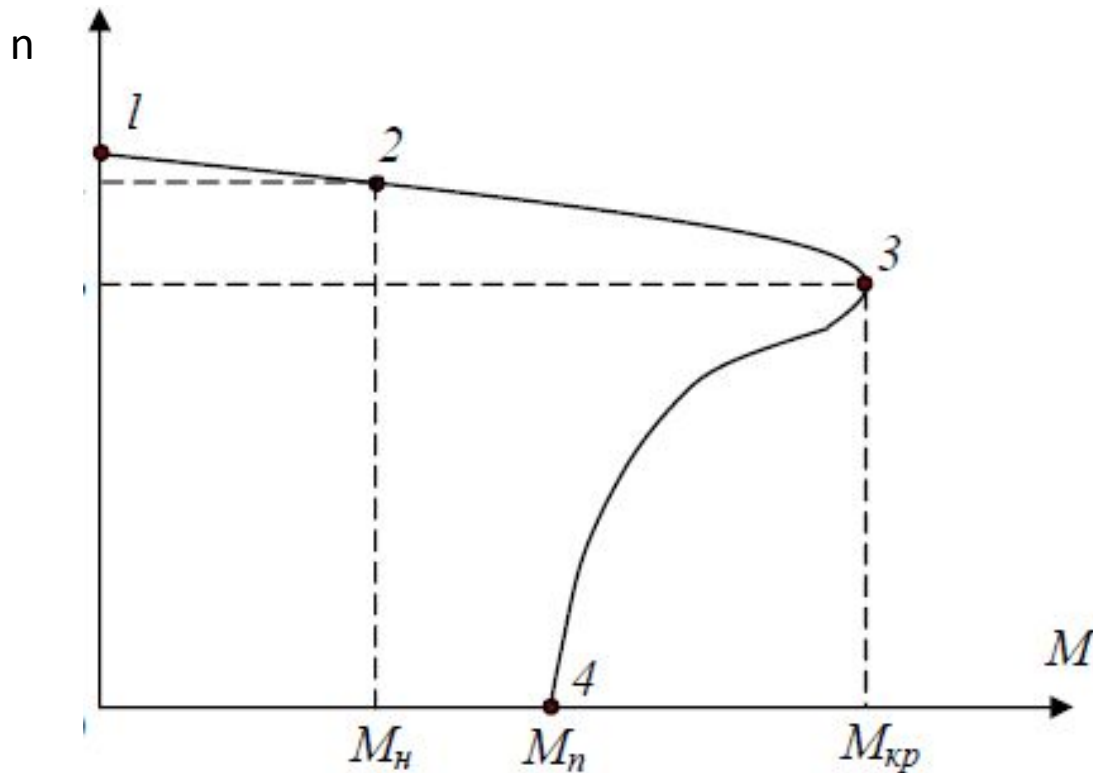
Статор асинхронного двигателя с фазным ротором по конструкции не отличается от статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Схема асинхронного фазного двигателя



Включение реостата в цепь ротора дает возможность существенно улучшить условия пуска двигателя: уменьшить пусковой ток и увеличить пусковой момент. Кроме этого, реостатом, включенным в цепь ротора, можно плавно регулировать частоту вращения двигателя.

Механические характеристики асинхронного двигателя

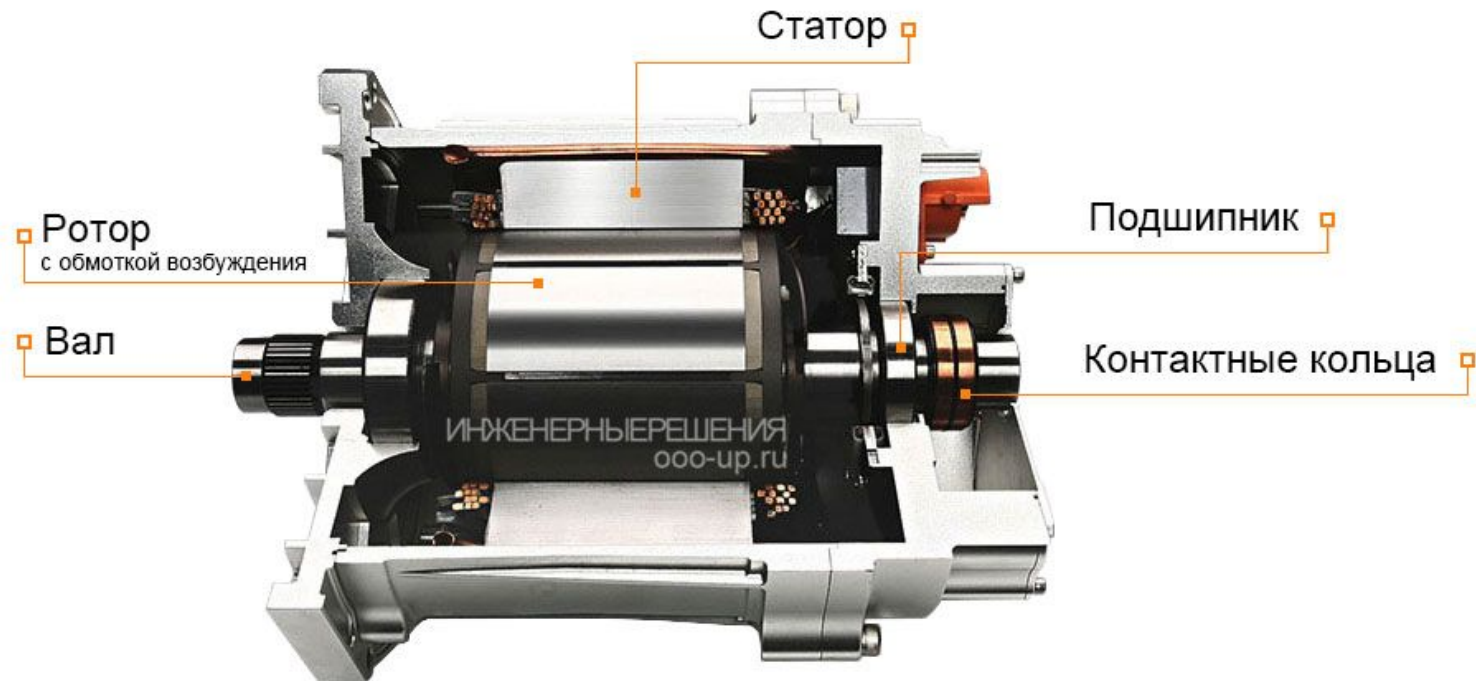


- 1 -режим идеального холостого хода, когда отсутствует момент сопротивления на валу двигателя
- 2 -номинальный режим работы двигателя.
- 3 -критический режиму когда двигатель развивает максимально возможный момент. При увеличении момента нагрузки двигатель выходит из рабочего режима и останавливается.
- 4 -пусковой режим двигателя.

Управление АДПТ

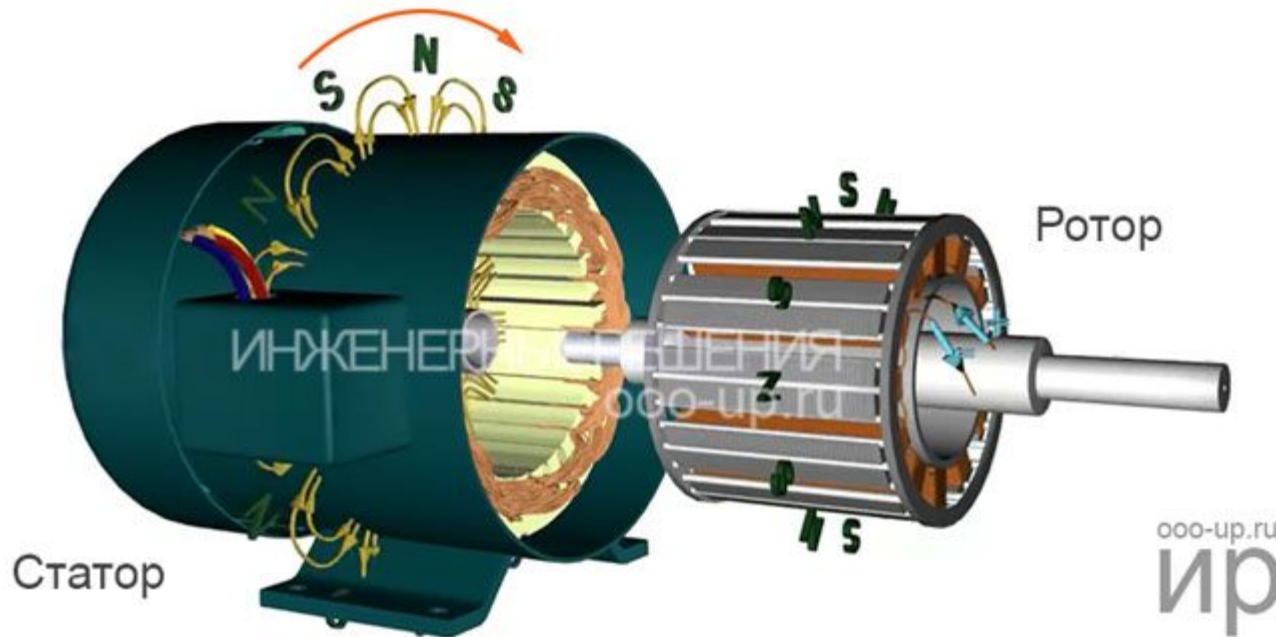
1. При введении в цепь ротора добавочных сопротивлений уменьшается частота вращения ротора, увеличиваются скольжение и пусковой момент двигателя с фазным ротором. Асинхронные двигатели имеют небольшой пусковой момент по сравнению с двигателями постоянного тока. Для увеличения пускового момента асинхронного двигателя в цепь ротора включают добавочные пусковые сопротивления, которые по мере увеличения частоты вращения выводят из цепи ротора.
2. Изменение числа пар полюсов двигателя с короткозамкнутым ротором, путем пересоединения катушек в каждой фазе обмотки статора

Синхронный электродвигатель с обмоткой возбуждения



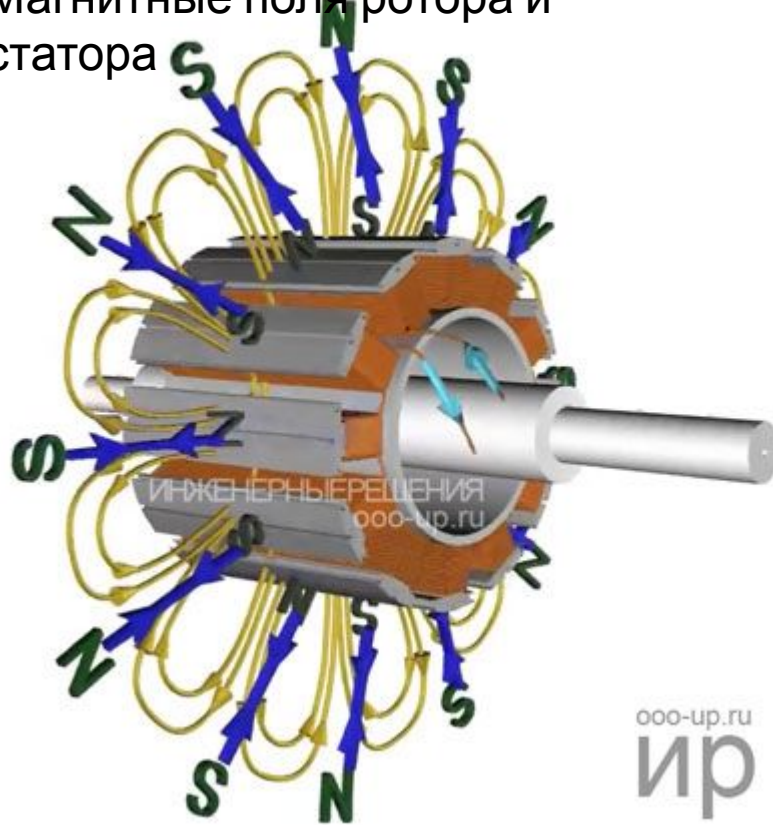
Работа синхронного электродвигателя основана на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора

Взаимодействие между вращающимся (у статора) и постоянным (у ротора) магнитными полями



ротор ведет себя как постоянный магнит, так как имеет такое же магнитное поле (в качестве альтернативы можно представить, что ротор сделан из постоянных магнитов).

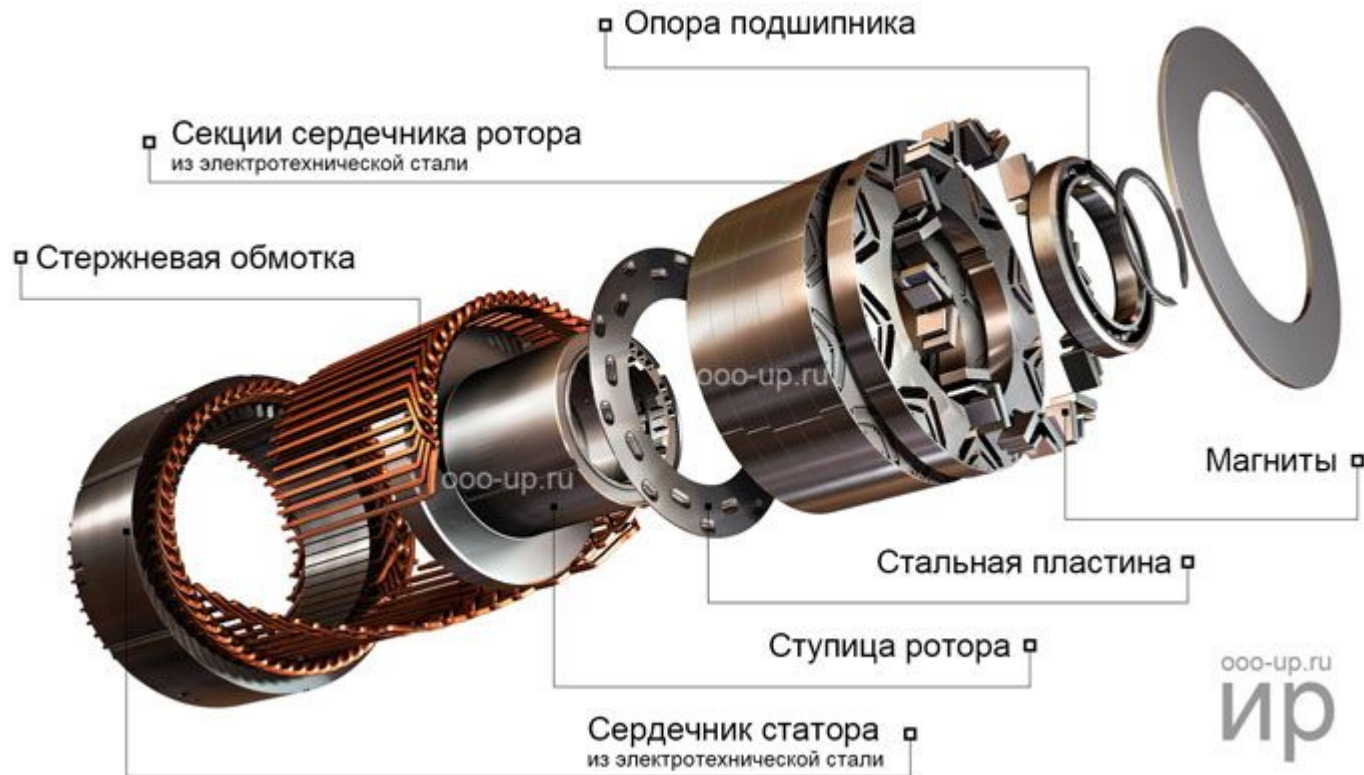
Магнитные поля ротора и статора



Если ротор не имеет начального вращения северный полюс магнитного поля ротора будет притягиваться к южному полюсу вращающегося магнитного поля, и начнет двигаться в том же направлении. Но так как ротор имеет определенный момент инерции, его стартовая скорость будет очень низкой. За это время южный полюс вращающегося магнитного поля будет замещен северным полюсом. Таким образом появятся отталкивающие силы. В результате чего ротор начнет вращаться в обратную сторону. Таким образом ротор не сможет запуститься.

Чтобы реализовать самозапуск синхронного электродвигателя без системы управления между концами ротора размещается "беличья клетка", которая также называется демпферной обмоткой. При запуске электродвигателя катушки ротора не возбуждаются. Под действием вращающегося магнитного поля, индуцируется ток в витках "беличьей клетки" и ротор начинает вращаться подобно тому, как запускаются асинхронные двигатели.

Синхронный двигатель с постоянными магнитами



Принцип действия

Принцип действия синхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и постоянного магнитного поля ротора. Концепция вращающегося магнитного поля статора синхронного электродвигателя такая же, как и у трехфазного асинхронного электродвигателя.

Постоянные магниты, расположенные на роторе СДПМ, создают постоянное магнитное поле. При синхронной скорости вращения ротора с полем статора, полюса ротора сцепляются с вращающимся магнитным полем статора. В связи с этим СДПМ не может сам запуститься при подключении его напрямую к сети трехфазного тока (частота тока в сети 50Гц).



Управление СДПМ

Для работы синхронного двигателя с постоянными магнитами обязательно требуется система управления, например, частотный преобразователь или сервопривод. При этом существует большое количество способов управления реализуемых системами контроля. Выбор оптимального способа управления, главным образом, зависит от задачи, которая ставится перед электроприводом.

Синхронный реактивный двигатель

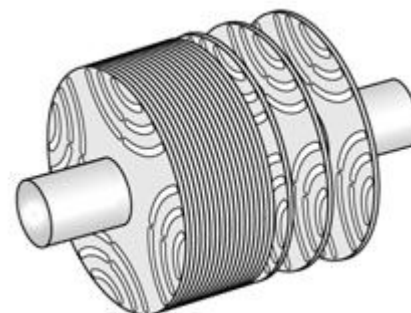
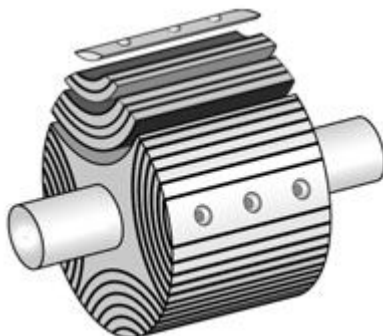
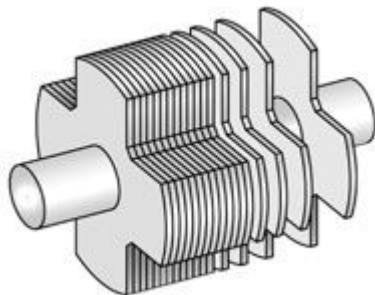
Синхронный реактивный электродвигатель - синхронный электродвигатель, вращающий момент которого обусловлен неравенством магнитных проводимостей по поперечной и продольной осям ротора, не имеющего обмоток возбуждения или постоянных магнитов



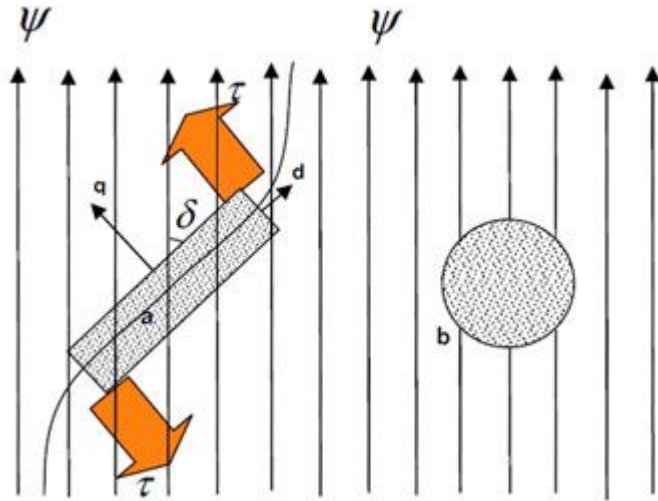
Конструкция



Три основных типа ротора реактивного двигателя



Принцип работы



Объект с анизотропной геометрией (a) и изотропной геометрией (b) в магнитном поле

Объект "a" состоящий из анизотропного материала имеет разную проводимость по оси d и оси q, в то время как изотропный магнитный материал объекта "b" имеет одинаковую проводимость во всех направлениях. В такой ситуации всегда будет существовать момент направленный на то, чтобы уменьшить полную потенциальную энергию системы, путем уменьшения искажения поля по оси q ($\delta \rightarrow 0$). Если угол delta сохранять постоянным, например путем контроля магнитного поля, тогда электромагнитная энергия будет непрерывно преобразовываться в механическую.

Преимущества:

Простая и надежная конструкция ротора:

ротор имеет простую конструкцию, состоящую из тонколистовой электротехнической стали, без магнитов и короткозамкнутой обмотки.

Низкий нагрев:

так как в роторе отсутствуют токи, он не нагревается во время работы, увеличивая срок службы электродвигателя.

Нет магнитов:

снижается конечная цена электродвигателя, так как при производстве не используются редко земельные металлы. При отсутствии магнитных сил упрощается содержание и техническое обслуживание электродвигателя.

Низкий момент инерции ротора:

так как на роторе отсутствует обмотка и магниты, момент инерции ротора ниже, что позволяет электродвигателю быстрее набирать обороты и экономить электроэнергию.

Возможность регулирования скорости:

в виду того, что синхронный реактивный электродвигатель для своей работы требует частотный преобразователь, имеется возможность управления скоростью вращения реактивного двигателя в широком диапазоне скоростей.

Недостатки:

Частотное управление:

для работы требуется частотный преобразователь.

Низкий коэффициент мощности:

из-за того, что магнитный поток создается только за счет реактивного тока. Решается за счет использования частотного преобразователя с коррекцией мощности.

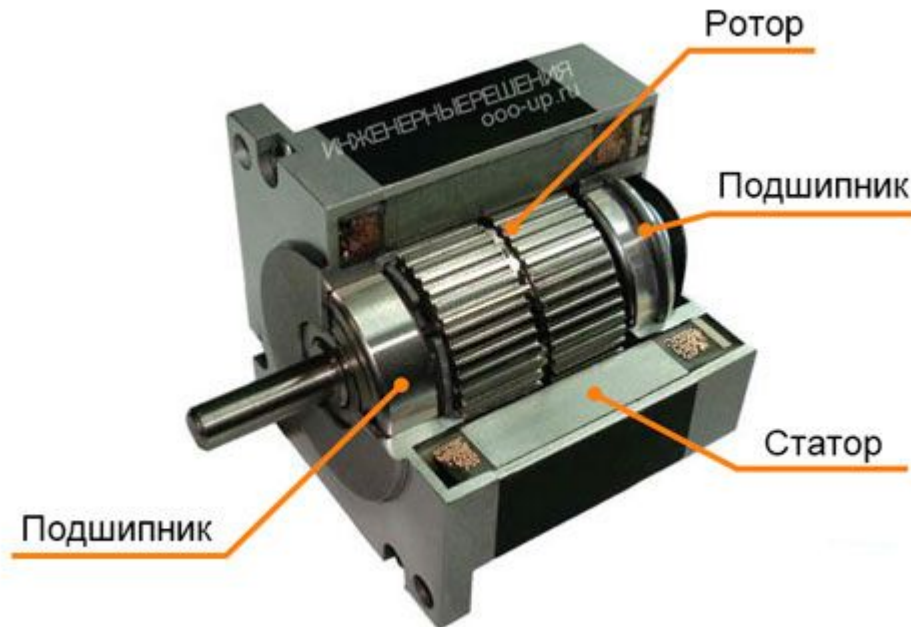
Шаговый двигатель

Шаговый электродвигатель - это вращающийся электродвигатель с дискретными угловыми перемещениями ротора, осуществляемыми за счет импульсов сигнала управления

Шаговые (импульсные) двигатели непосредственно преобразуют управляющий сигнал в виде последовательности импульсов в пропорциональный числу импульсов и фиксированный угол поворота вала или линейное перемещение механизма без датчика обратной связи.

В задачах, где требуются высокие характеристики (точность, быстродействие) используются серводвигатели. В остальных же случаях из-за более низкой стоимости, простого управления и неплохой точности обычно используются шаговые двигатели.

Конструкция

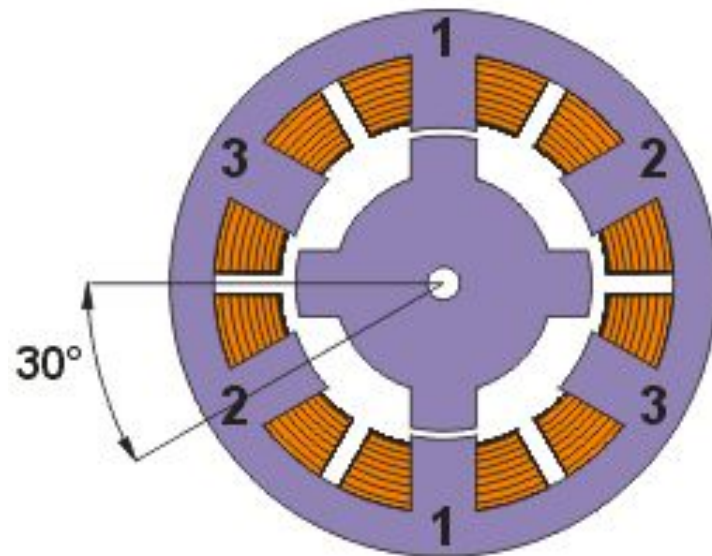


Шаговые двигатели надежны и недороги, так как ротор не имеет контактных колец и коллектора. Ротор имеет либо явно выраженные полюса, либо тонкие зубья. Реактивный шаговый двигатель - имеет ротор из магнитомягкого материала с явно выраженными полюсами. Шаговый двигатель с постоянными магнитами имеет ротор на постоянных магнитах. Гибридный шаговый двигатель имеет составной ротор включающий полюсные наконечники (зубья) из магнитомягкого материала и постоянные магниты. Определить имеет ротор постоянные магниты или нет можно посредством вращения обесточенного двигателя, если при вращении имеется фиксирующий момент и/или пульсации значит ротор выполнен на постоянных магнитах.

Двигатель с переменным магнитным сопротивлением

Шаговые двигатели с переменным магнитным сопротивлением имеют несколько полюсов на статоре и ротор зубчатой формы из магнитомягкого материала. Намагниченность ротора отсутствует. Для простоты на рисунке ротор имеет 4 зубца, а статор имеет 6 полюсов. Двигатель имеет 3 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель имеет шаг 30 град.

Двигатель с переменным магнитным сопротивлением. При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять положение, когда магнитный поток замкнут, т.е. зубцы ротора будут находиться напротив тех полюсов, на которых находится запитанная обмотка. Если затем выключить эту обмотку и включить следующую, то ротор поменяет положение, снова замкнув своими зубцами магнитный поток. Таким образом, чтобы осуществить непрерывное вращение, нужно включать фазы попеременно. Двигатель не чувствителен к направлению тока в обмотках. Реальный двигатель может иметь большее количество полюсов статора и большее количество зубцов ротора, что соответствует большему количеству шагов на оборот. Иногда поверхность каждого полюса статора выполняют зубчатой, что вместе с соответствующими зубцами ротора обеспечивает очень маленькие значения угла шага, порядка нескольких градусов. Двигатели с переменным магнитным сопротивлением довольно редко используют в промышленных применениях.



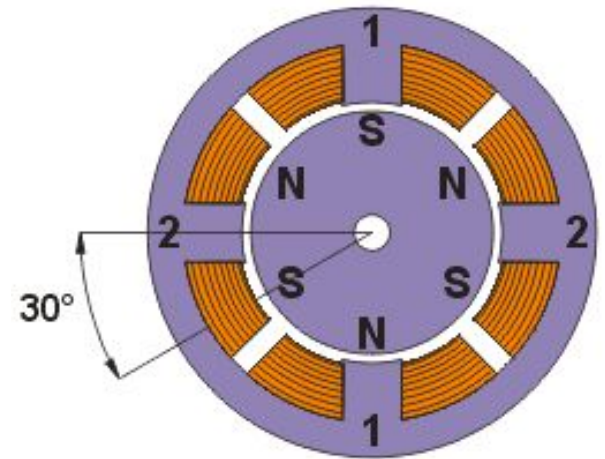
Двигатель с постоянными магнитами.

Двигатели с постоянными магнитами состоят из статора, который имеет обмотки, и ротора, содержащего постоянные магниты (рис. 1). Чередующиеся полюса ротора имеют прямолинейную форму и расположены параллельно оси двигателя. Благодаря намагниченности ротора в таких двигателях обеспечивается больший магнитный поток и, как следствие, больший момент, чем у двигателей с переменным магнитным сопротивлением.

Показанный на рисунке двигатель имеет 3 пары полюсов ротора и 2 пары полюсов статора. Двигатель имеет 2 независимые обмотки, каждая из которых намотана на двух противоположных полюсах статора. Такой двигатель, как и рассмотренный ранее двигатель с переменным магнитным сопротивлением, имеет величину шага 30 град. При включении тока в одной из катушек, ротор стремится занять такое положение, когда разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать фазы попеременно. На практике двигатели с постоянными магнитами обычно имеют 48 – 24 шага на оборот (угол шага 7.5 – 15 град).

Для удешевления конструкции двигателя магнитопровод статора выполнен в виде штампованного стакана. Внутри находятся полюсные наконечники в виде ламелей. Обмотки фаз размещены на двух разных магнитопроводах, которые установлены друг на друге. Ротор представляет собой цилиндрический многополюсный постоянный магнит.

Двигатели с постоянными магнитами подвержены влиянию обратной ЭДС со стороны ротора, которая ограничивает максимальную скорость. Для работы на высоких скоростях используются двигатели с переменным магнитным сопротивлением.



Гибридный двигатель

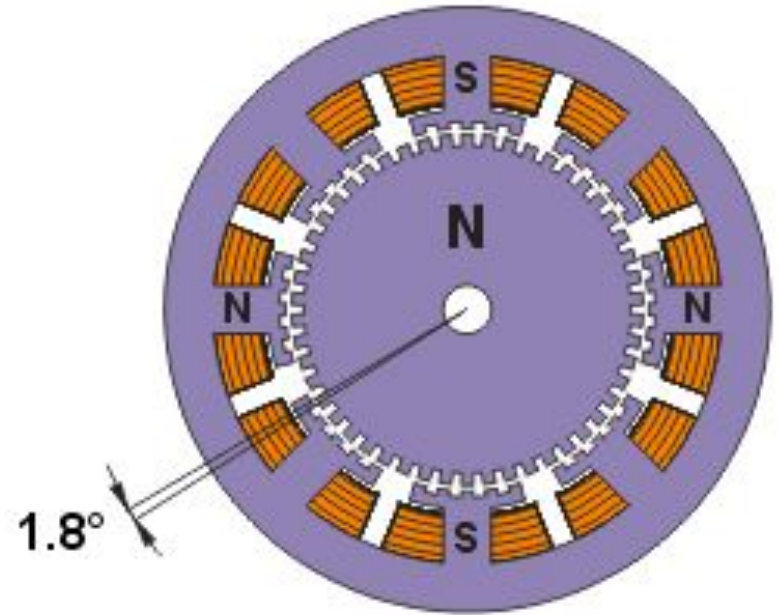
Гибридные двигатели являются более дорогими, чем двигатели с постоянными магнитами, зато они обеспечивают меньшую величину шага, больший момент и большую скорость. Типичное число шагов на оборот для гибридных двигателей составляет от 100 до 400 (угол шага 3.6 – 0.9 град.). Гибридные двигатели сочетают в себе лучшие черты двигателей с переменным магнитным сопротивлением и двигателей с постоянными магнитами. Ротор гибридного двигателя имеет зубцы, расположенные в осевом направлении (рис. 1).

Ротор разделен на две части, между которыми расположен цилиндрический постоянный магнит. Таким образом, зубцы верхней половинки ротора являются северными полюсами, а зубцы нижней половинки – южными. Кроме того, верхняя и нижняя половинки ротора повернуты друг относительно друга на половину угла шага зубцов. Число пар полюсов ротора равно количеству зубцов на одной из его половинок. Зубчатые полюсные наконечники ротора, как и статор, набраны из отдельных пластин для уменьшения потерь на вихревые токи. Статор гибридного двигателя также имеет зубцы, обеспечивая большое количество эквивалентных полюсов, в отличие от основных полюсов, на которых расположены обмотки. Обычно используются 4 основных полюса для 3.6 град. двигателей и 8 основных полюсов для 1.8- и 0.9 град. двигателей. Зубцы ротора обеспечивают меньшее сопротивление магнитной цепи в определенных положениях ротора, что улучшает статический и динамический момент. Это обеспечивается соответствующим расположением зубцов, когда часть зубцов ротора находится строго напротив зубцов статора, а часть между ними. Зависимость между числом полюсов ротора, числом эквивалентных полюсов статора и числом фаз определяет угол шага S двигателя:

$$S = 360 / (N_{ph} * P_h) = 360 / N,$$

где N_{ph} – число эквивалентных полюсов на фазу = число полюсов ротора,

P_h – число фаз,



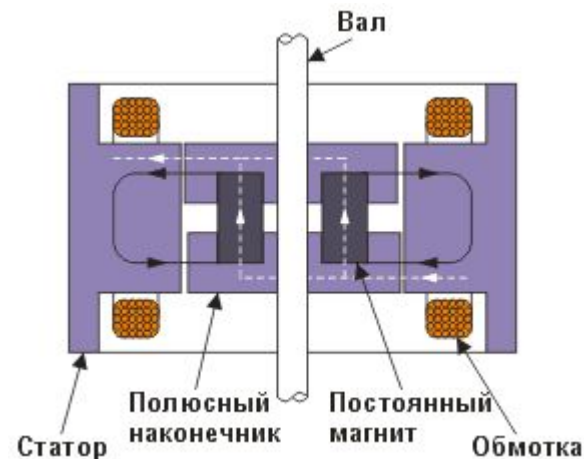
Ротор показанного на рисунке двигателя имеет 100 полюсов (50 пар), двигатель имеет 2 фазы, поэтому полное количество полюсов – 200, а шаг, соответственно, 1.8 град.

Продольное сечение гибридного шагового двигателя показано на рис. 2. Стрелками показано направление магнитного потока постоянного магнита ротора. Часть потока (на рисунке показана черной линией) проходит через полюсные наконечники ротора, воздушные зазоры и полюсный наконечник статора. Эта часть не участвует в создании момента.

Как видно на рисунке, воздушные зазоры у верхнего и нижнего полюсного наконечника ротора разные. Это достигается благодаря повороту полюсных наконечников на половину шага зубьев. Поэтому существует другая магнитная цепь, которая содержит минимальные воздушные зазоры и, как следствие, обладает минимальным магнитным сопротивлением. По этой цепи замыкается другая часть потока (на рисунке показана штриховой белой линией), которая и создает момент. Часть цепи лежит в плоскости, перпендикулярной рисунку, поэтому не показана. В этой же плоскости создают магнитный поток катушки статора. В гибридном двигателе этот поток частично замыкается полюсными наконечниками ротора, и постоянный магнит его «видит» слабо. Поэтому в отличие от двигателей постоянного тока, магнит гибридного двигателя невозможно размагнитить ни при какой величине тока обмоток.

Величина зазора между зубцами ротора и статора очень небольшая – типично 0.1 мм. Это требует высокой точности при сборке, поэтому шаговый двигатель не стоит разбирать ради удовлетворения любопытства, иначе на этом его срок службы может закончиться.

Чтобы магнитный поток не замыкался через вал, который проходит внутри магнита, его изготавливают из немагнитных марок стали. Они обычно обладают повышенной хрупкостью, поэтому с валом, особенно малого диаметра, следует обращаться с осторожностью.



Продольный разрез гибридного шагового двигателя.

Для получения больших моментов необходимо увеличивать как поле, создаваемое статором, так и поле постоянного магнита. При этом требуется больший диаметр ротора, что ухудшает отношение крутящего момента к моменту инерции. Поэтому мощные шаговые двигатели иногда конструктивно выполняют из нескольких секций в виде этажерки. Крутящий момент и момент инерции увеличиваются пропорционально количеству секций, а их отношение не ухудшается.

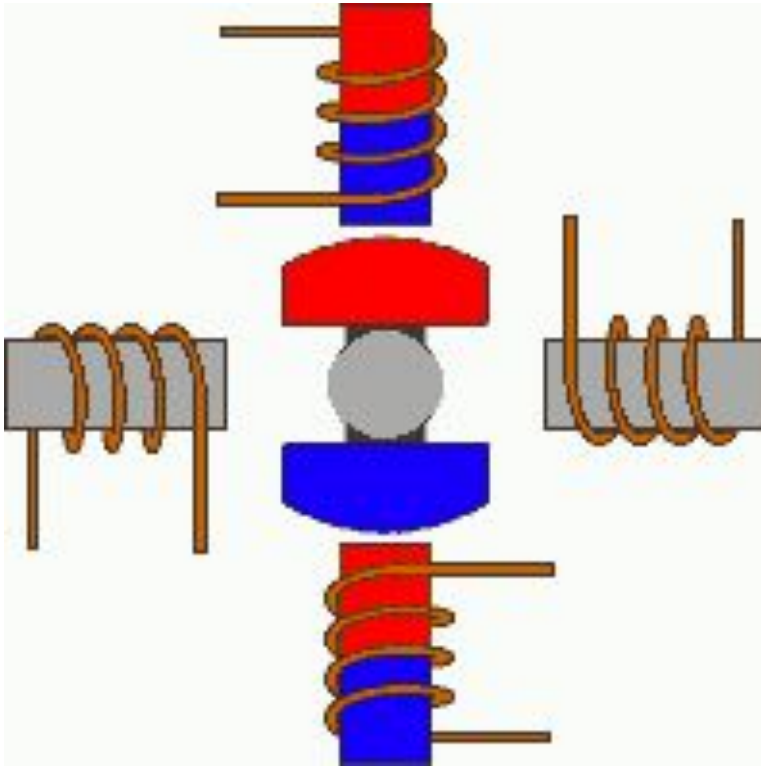
Большинство современных шаговых двигателей являются гибридными. По сути гибридный двигатель является двигателем с постоянными магнитами, но с большим числом полюсов. По способу управления такие двигатели одинаковы, дальше будут рассматриваться только такие двигатели. Чаще всего на практике двигатели имеют 100 или 200 шагов на оборот, соответственно шаг равен 3.6 грд или 1.8 грд. Большинство контроллеров позволяют работать в полушаговом режиме, где этот угол вдвое меньше, а некоторые контроллеры обеспечивают микрошаговый режим

Вентильные ЭД



Вентильный электродвигатель (ВД) — это разновидность электродвигателя постоянного тока, у которого щеточно-коллекторный узел (ЩКУ) заменен полупроводниковым коммутатором, управляемым датчиком положения ротора

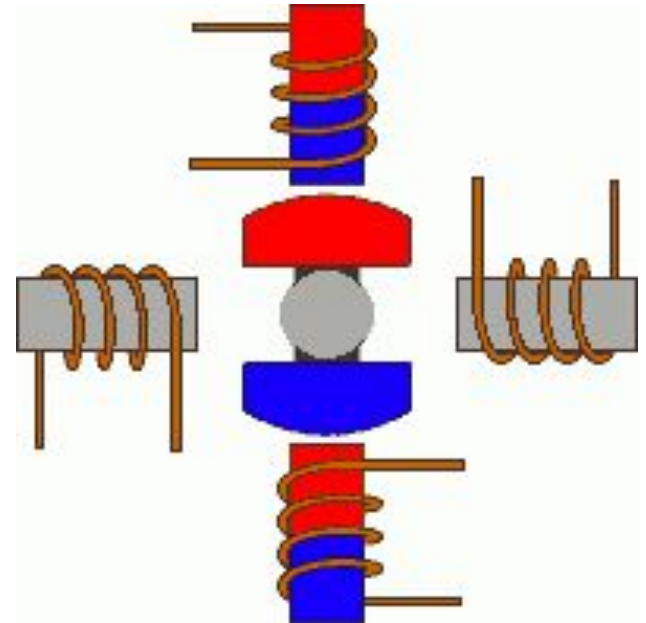
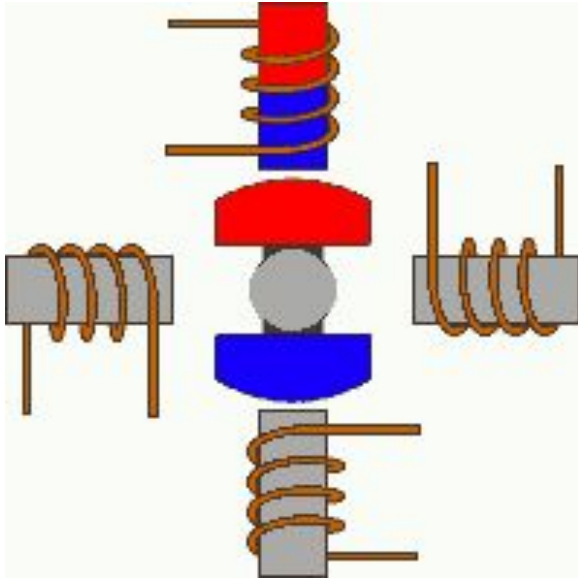
Полношаговый режим управления



Для реализации этого способа, напряжение на обмотки подается попарно. В зависимости от способа подключения обмоток (последовательно или параллельно), мотору потребуется двойное напряжение или двойной ток для работы по отношению к необходимому при возбуждении одной обмотки. Такой мотор имеет 4 шага на полный оборот,

Полушаговый режим

Используя этот метод, тот же самый мотор сможет дать удвоенное число шагов на оборот, что означает двойную точность для системы позиционирования. Например, этот мотор даст 8 шагов на оборот!

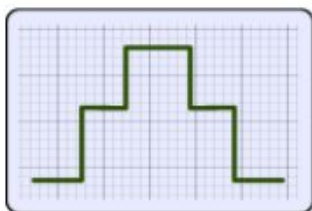


Режим микрошага

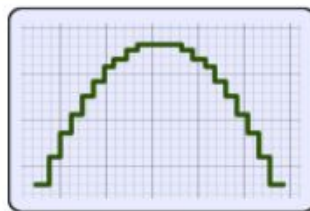
Микрошаговый режим наиболее часто применяемый способ управления шаговыми двигателями на сегодняшний день. Идея микрошага состоит в подаче на обмотки мотора питания не импульсами, а сигнала, по своей форме, напоминающего синусоиду. Такой способ изменения положения при переходе от одного шага к другому позволяет получить более гладкое перемещение, делая шаговые моторы широко используемыми в таких приложениях как системы позиционирования в станках с ЧПУ. Форма тока, протекающего через обмотку похожа на синусоиду. Также могут использоваться формы цифровых сигналов –



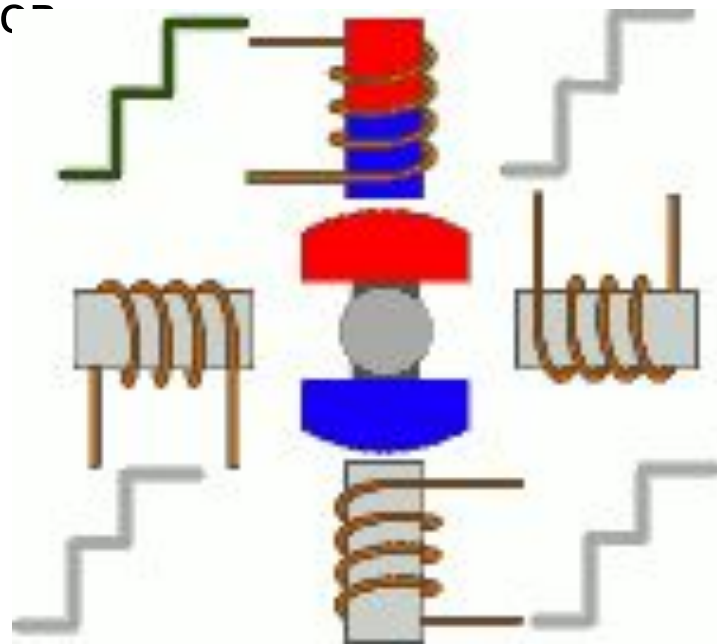
Синусоидальная волна



Цифровой сигнал

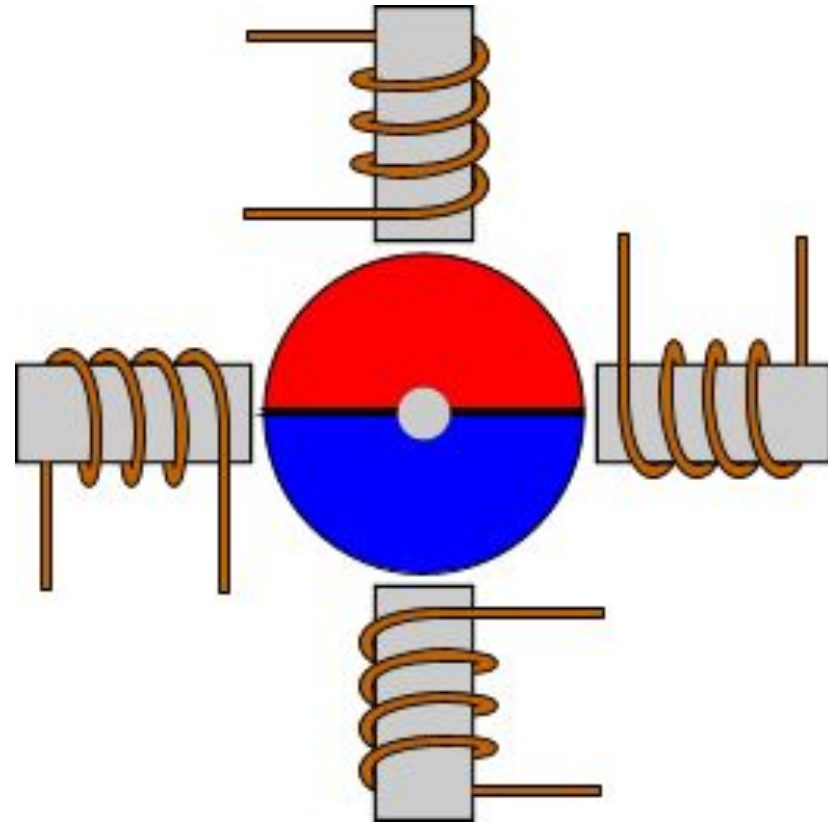


Цифровой сигнал
высокого разрешения



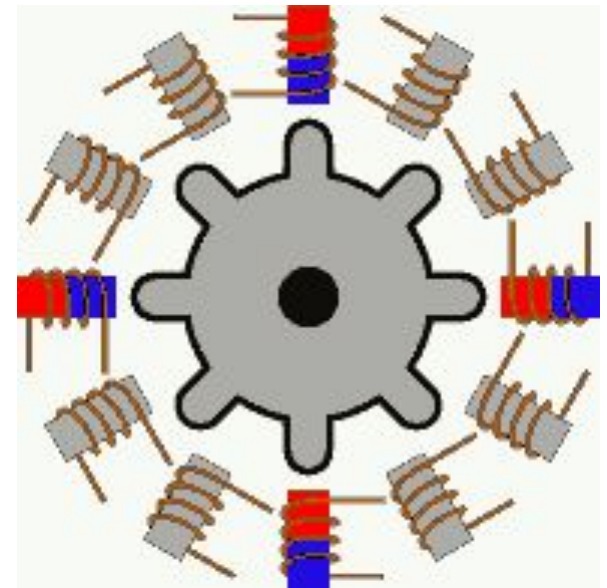
Шаговый двигатель с постоянным магнитом

Ротор такого мотора несет постоянный магнит в форме диска с двумя или большим количеством полюсов. Работает точно также как описано выше. Обмотки статора будут притягивать или отталкивать постоянный магнит на роторе и создавать тем самым крутящий момент. Обычно, величина шага таких двигателей лежит в диапазоне $45-90^\circ$



Шаговый двигатель с переменным магнитным сопротивлением

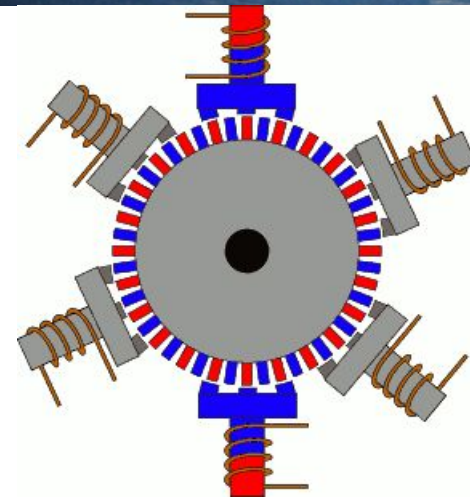
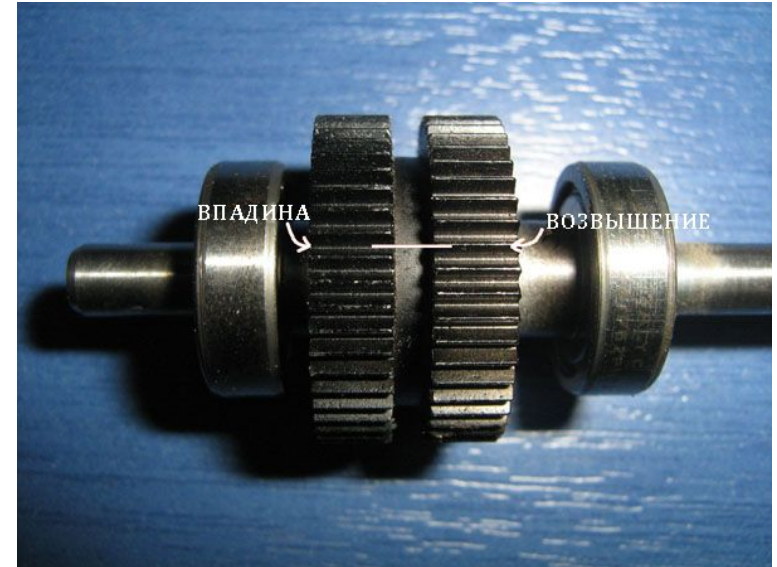
У двигателей этого типа на роторе нет постоянного магнита. Вместо этого, ротор изготавливается из магнитомягкого металла в виде зубчатого диска, типа шестеренки. Статор имеет более четырех обмоток. Обмотки запитываются в противоположных парах и притягивают ротор. Отсутствие постоянного магнита отрицательно влияет на величину крутящего момента, он значительно снижается. Но есть и большой плюс. У этих двигателей нет стопорящего момента. Шаговые двигатели с переменным магнитным сопротивлением обычно имеют шаг, лежащий в диапазоне 5-15°



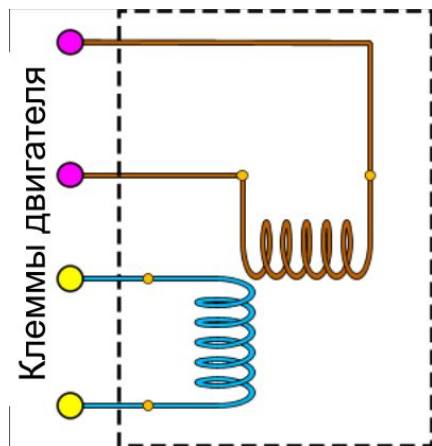
Шаговый двигатель с переменным магнитным сопротивлением

Данный тип шаговых моторов получил название «гибридный» из-за того, что сочетает в себе характеристики шаговых двигателей и с постоянными магнитами и с переменным магнитным сопротивлением. Они обладают отличными удерживающим и динамическим крутящим моментами, а также очень маленькую величину шага, лежащую в пределах $0.9-5^\circ$

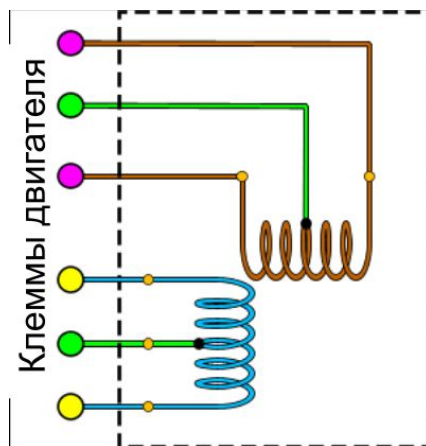
Берется два отдельных 50-зубых диска. Также используется цилиндрический постоянный магнит. Диски привариваются один к положительному, другой к отрицательному полюсам постоянного магнита. Таким образом, один диск имеет положительный полюс на своих зубьях, другой — отрицательный.



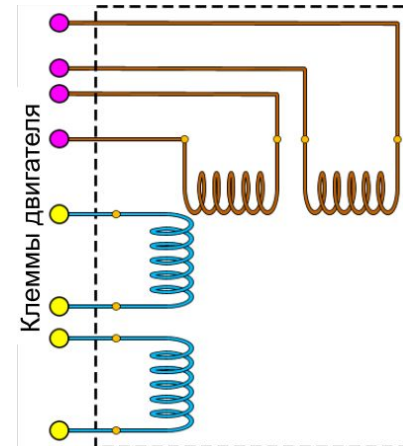
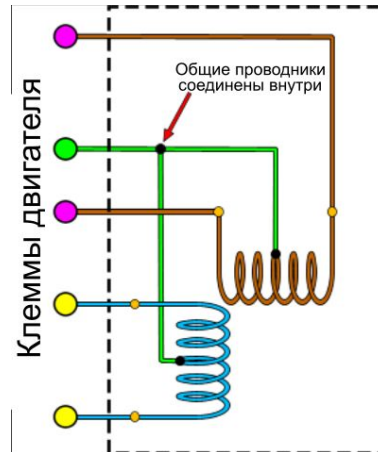
Подключение обмоток



Биполярный
двигатель

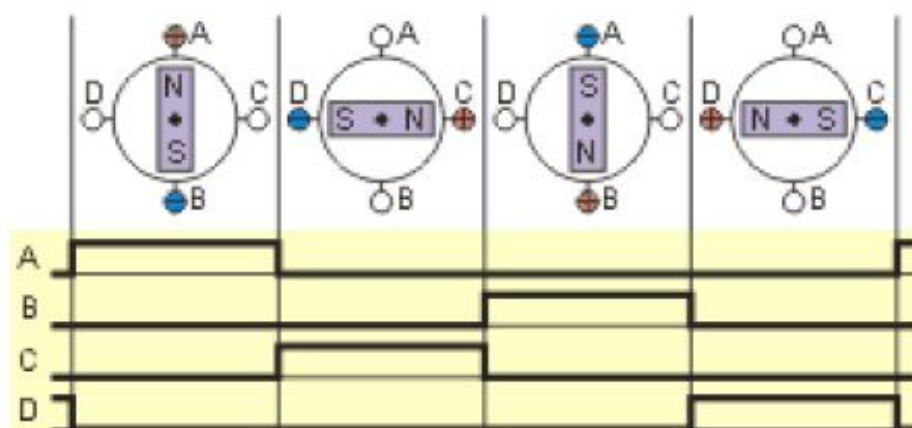


Униполярный двигатель

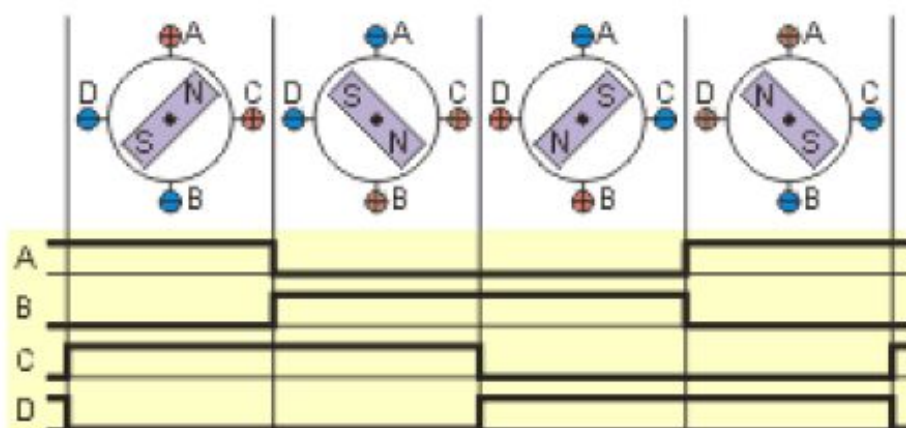


8-выводной
шаговый
двигатель

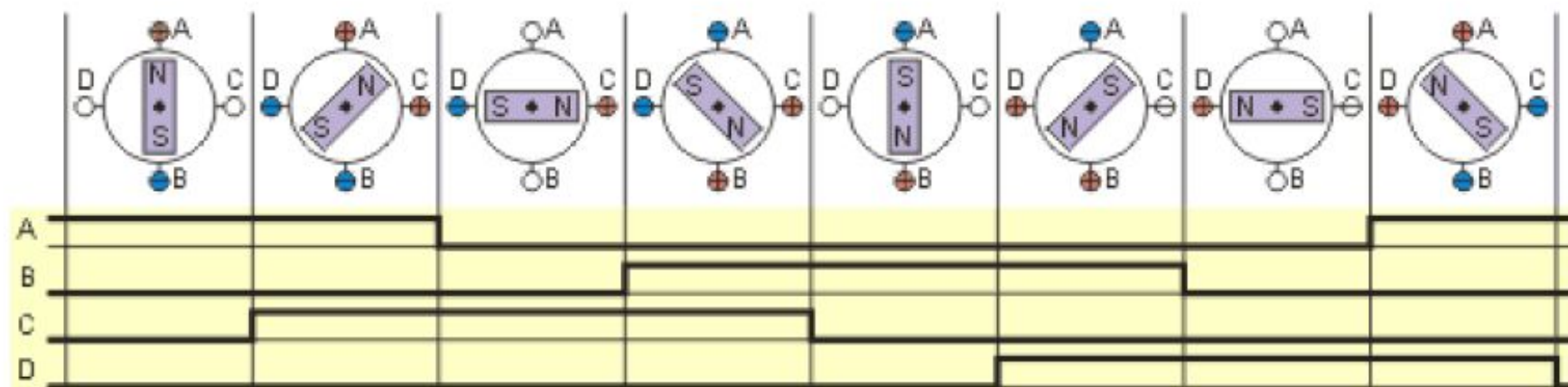
Временные диаграммы



а) полношаговый режим, включена одна фаза, "one phase on" full step (wave drive mode)



б) полношаговый режим, включены две фазы, "two-phase-on" full step (full step mode)

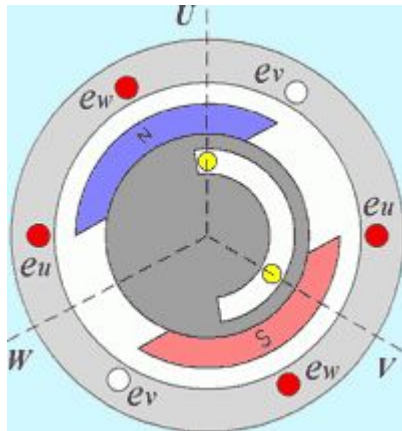


в) полушаговый режим, "one and two-phase-on" half step (half step mode)

Достоинства

- Небольшие потери энергии, благодаря малому магнитному сопротивлению.
- Высокая безопасность при работе на максимальных нагрузках.
- Широкий интервал рабочих скоростей.
- Высокая точность работы и динамика.
- Плавное переключение скоростей.
- Нет коллекторного щеточного узла, который требует техобслуживания.
- Возможность применения в агрессивной среде.
- Длительный срок службы.
- Высокая надежность.

Бесколлекторный электродвигатель (в англоязычной литературе BLDC)



Конструктивно они напоминают синхронные двигатели переменного тока: магнитный ротор вращается в шихтованом статоре с трехфазными обмотками. Но обороты являются функцией от нагрузки и напряжения на статоре. Эта функция реализована с помощью переключения обмоток статора в зависимости от координат ротора. БДПТ существуют в исполнении с отдельными датчиками на роторе и без отдельных датчиков. В качестве отдельных датчиков применяются датчики Холла. Если выполнение без отдельных датчиков, то в качестве фиксирующего элемента выступают обмотки статора.

В вентильном двигателе (ВД) индуктор находится на роторе (в виде постоянных магнитов), якорная обмотка находится на статоре (синхронный двигатель). Напряжение питания обмоток двигателя формируется в зависимости от положения ротора. Если в двигателях постоянного тока для этой цели использовался коллектор, то в вентильном двигателе его функцию выполняет полупроводниковый коммутатор (датчик положения ротора (ДПР) с инвертором).

Основным отличием ВД от синхронного двигателя является его самосинхронизация с помощью ДПР, в результате чего у ВД частота вращения поля пропорциональна частоте вращения ротора.

BLDC — Brushless DC electric motor (бесколлекторный электродвигатель постоянного тока).

PMSM — Permanent Magnet Synchronous Motor (синхронный двигатель с постоянными магнитами).

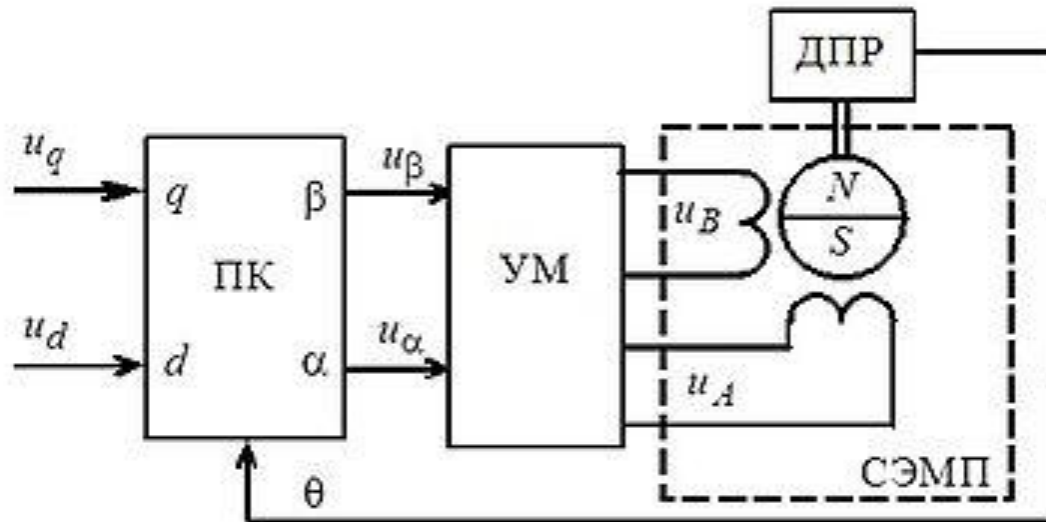
- Ротор изготавливается с использованием постоянных магнитов и имеет обычно от двух до восьми пар полюсов с чередованием северного и южного полюсов. Используют магниты из сплавов редкоземельных элементов, так как они позволяют получить высокий уровень магнитной индукции и уменьшить размер ротора
- Датчик положения ротора (ДПР) реализует обратную связь по положению ротора. Его работа может быть основана на разных принципах — фотоэлектрический, индуктивный, на эффекте Холла, и т. д. Наибольшую популярность приобрели датчики Холла и фотоэлектрические, так как они практически безынерционны и позволяют избавиться от запаздывания в канале обратной связи по положению ротора.
Фотоэлектрический датчик, в классическом виде, содержит три неподвижных фотоприёмника, которые поочерёдно закрываются шторкой вращающейся синхронно с ротором. Это показано на рисунке. Двоичный код, получаемый с ДПР, фиксирует шесть различных положений ротора. Сигналы датчиков преобразуются управляющим устройством в комбинацию управляющих напряжений, которые управляют силовыми ключами, так, что в каждый такт (фазу) работы двигателя включены два ключа и к сети подключены последовательно две из трёх обмоток якоря. Обмотки якоря U, V, W расположены на статоре со сдвигом на 120° и их начала и концы соединены так, что при переключении ключей создаётся вращающееся магнитное поле.

Статор имеет традиционную конструкцию и похож на статор асинхронной машины. Он состоит из корпуса, сердечника из электротехнической стали и медной обмотки, уложенной в пазы по периметру сердечника. Количество обмоток определяет количество фаз двигателя. Для самозапуска и вращения достаточно двух фаз — синусной и косинусной. Обычно ВД трёхфазные, реже- четырёхфазные.

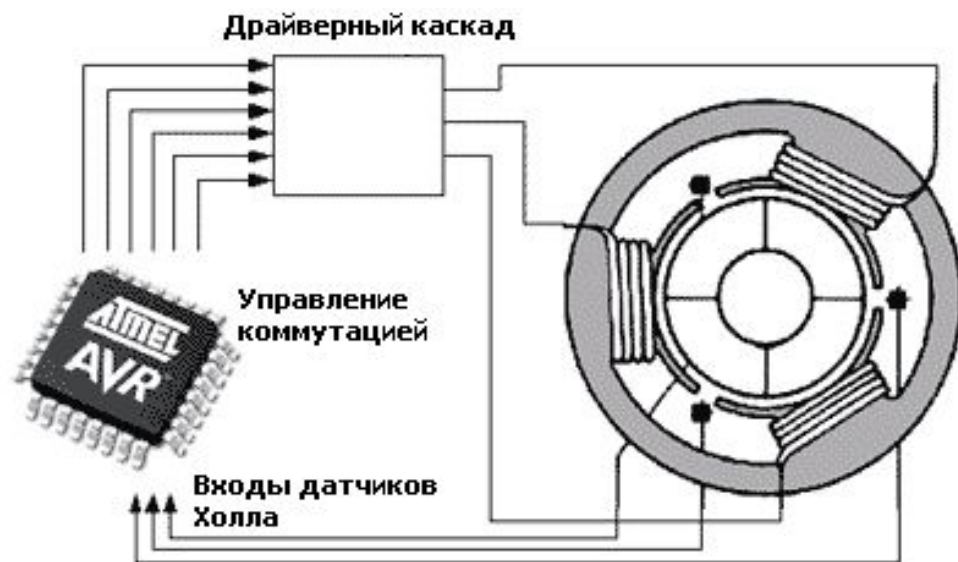
Система управления содержит силовые ключи. Из них собирается инвертор напряжения или инвертор тока. Система управления ключами обычно реализуется на основе использования микроконтроллера. Наличие микроконтроллера требует большое количество вычислительных операций по управлению двигателем.

Принцип работы ВД основан на том, что контроллер ВД коммутирует обмотки статора так, чтобы вектор магнитного поля статора всегда был ортогонален вектору магнитного поля ротора. С помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) контроллер управляет током, протекающим через обмотки ВД, т.е. вектором магнитного поля статора, и таким образом регулируется момент, действующий на ротор ВД. Знак угла между векторами определяет направление момента действующего на ротор.

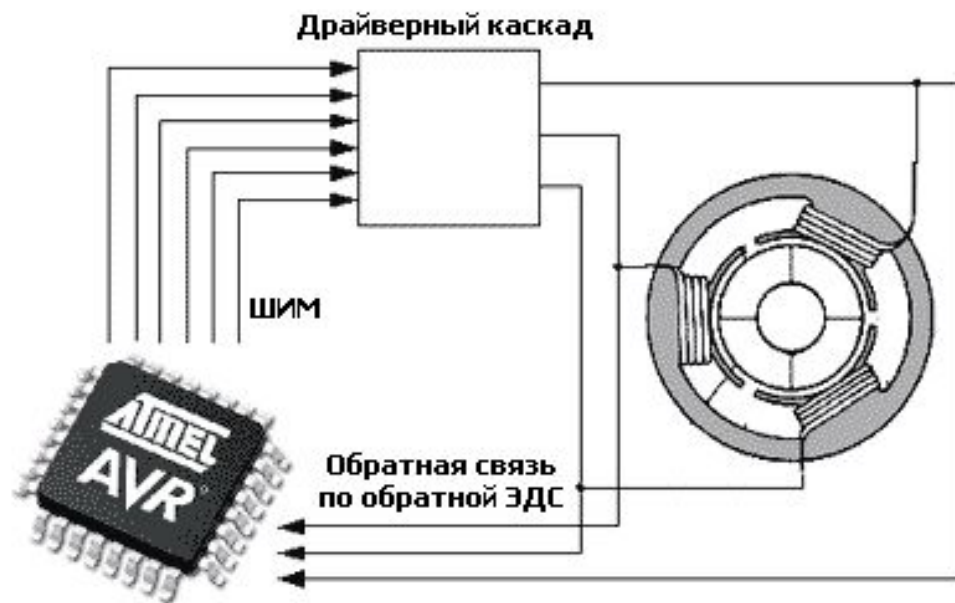
Структура двухфазного вентильного двигателя с синхронной машиной с постоянными магнитами на роторе.



ПК — преобразователь координат, УМ — усилитель мощности, СЭМП — синхронный электромеханический преобразователь (синхронная машина), ДПР — датчик положения ротора.

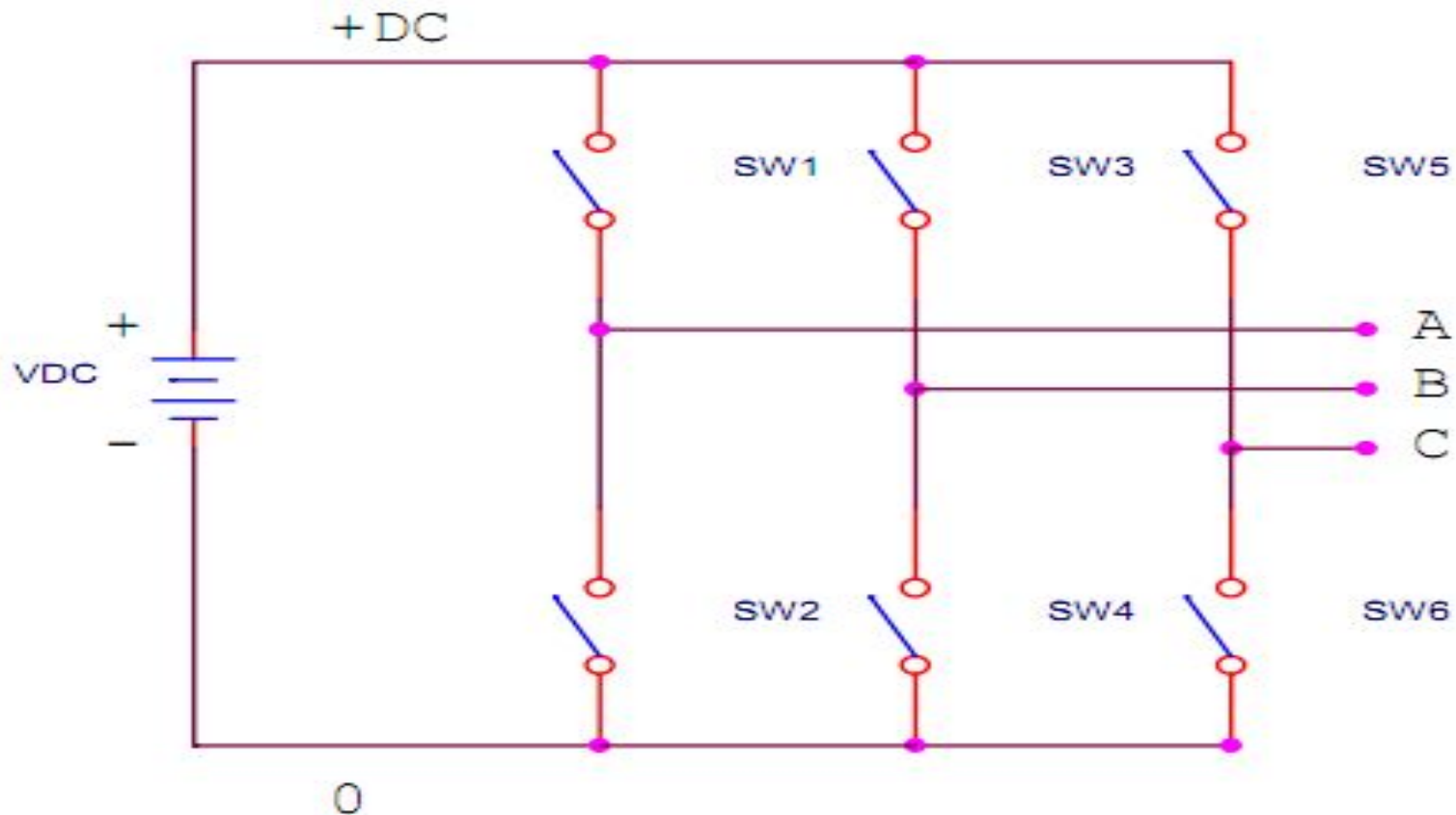


Управление трехфазным
бесколлекторным
электродвигателем
постоянного тока с датчиками
положения на основе
датчиков Холла



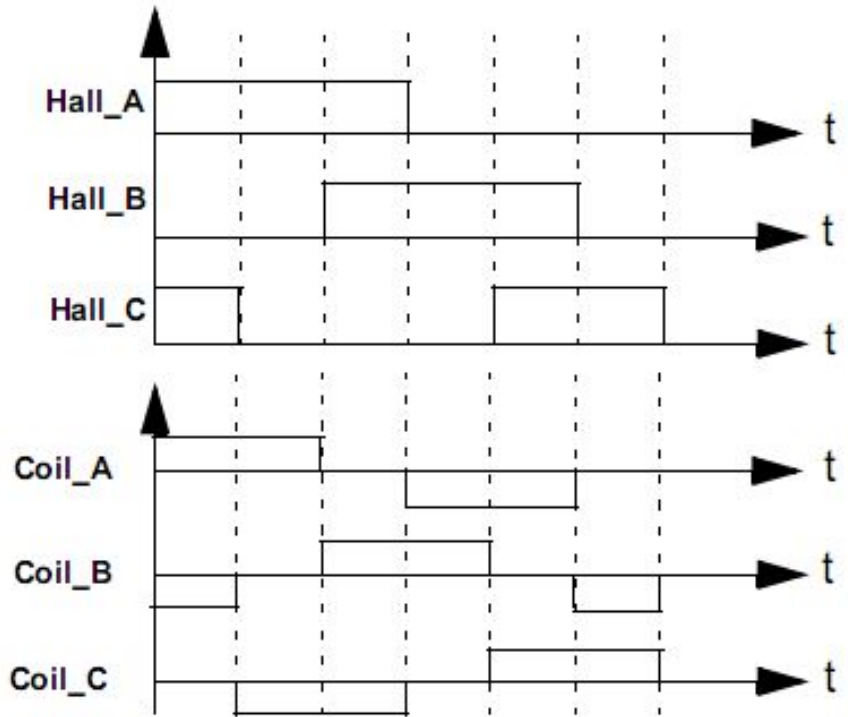
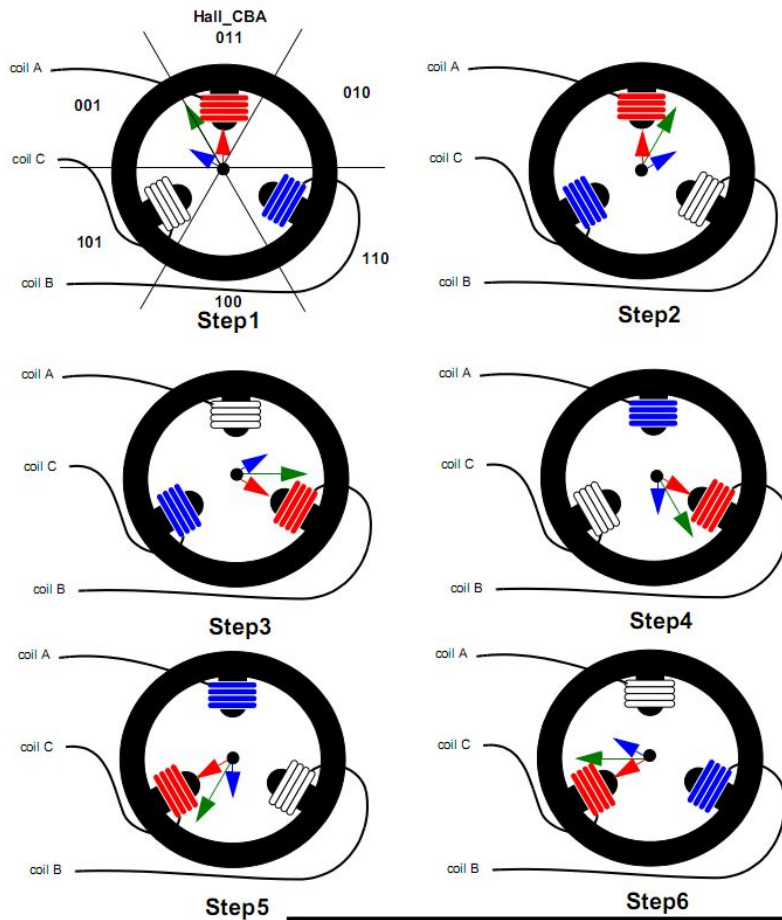
Управление трехфазным
бесколлекторным
электродвигателем
постоянного тока без
датчиков

Управление бесколлекторным двигателем с датчиками Холла

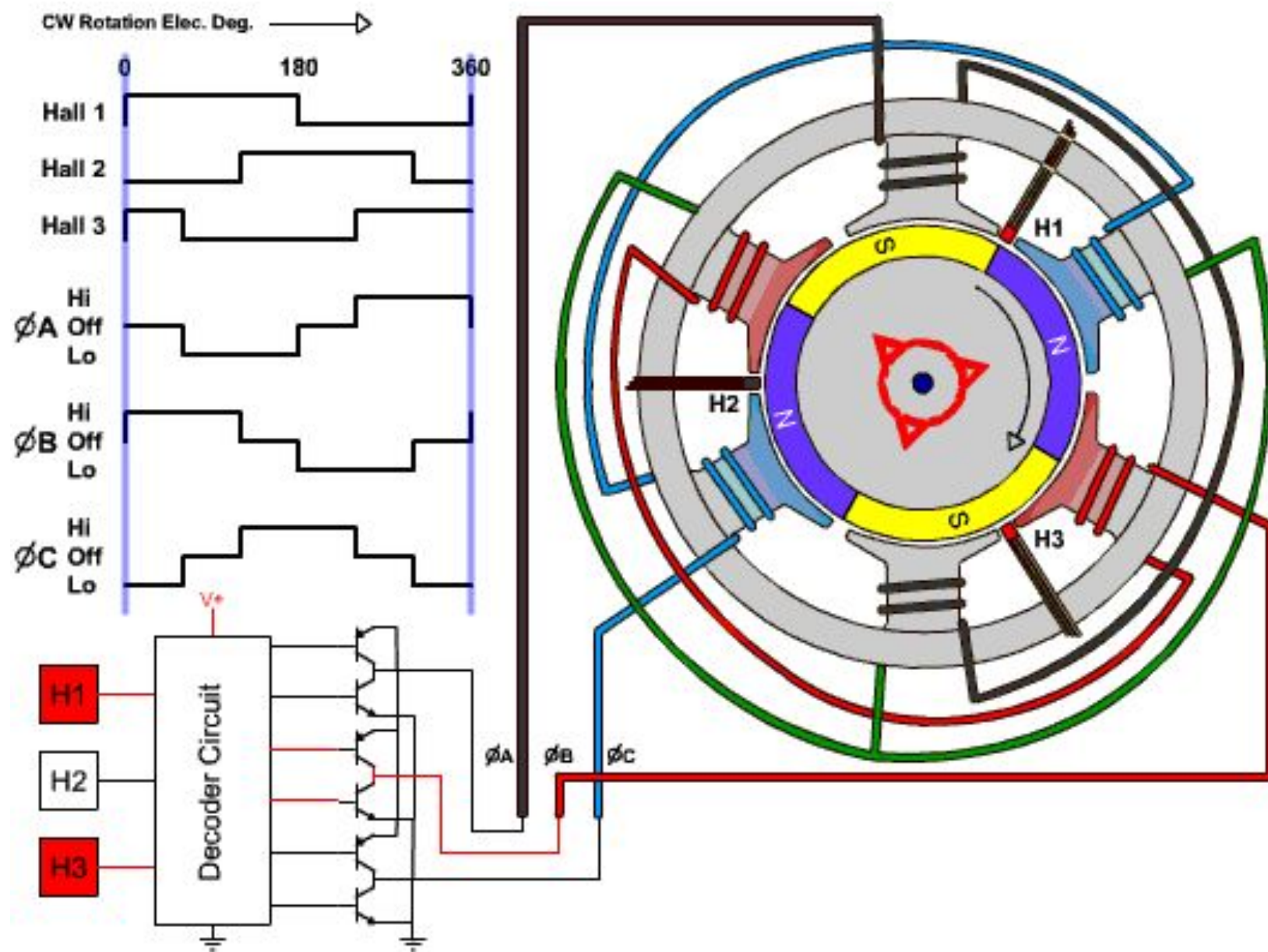


Двигатель имеет три вывода (три фазы) на которые нам придется подавать в разные моменты времени "+" или "-" питания. Это реализуется с помощью электронных ключей, включенных по мостовой схеме. Замыкая ключ $SW1$ подаем "+" на фазу A , а замыкая $SW6$ подаем "-" на фазу C . Таким образом, ток потечет от "+" батареи через фазы A и C . Для обеспечения обратного направления, открываем $SW5$ и $SW2$. В этом случае ток потечет от "+" батареи через фазы C и A в обратном направлении.

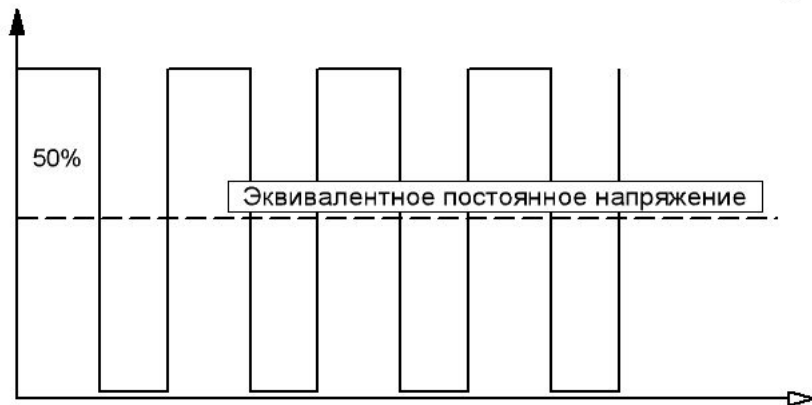
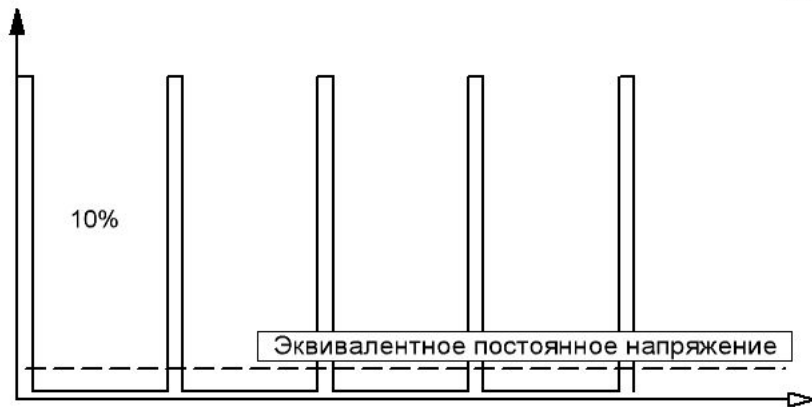
Диаграмма включения ключей



Hall Sensors Value (Hall_CBA)	Phase	Switches
101	A-B	SW1 ; SW4
001	A-C	SW1 ; SW6
011	B-C	SW3 ; SW6
010	B-A	SW3 ; SW2
110	C-A	SW5 ; SW2
100	C-B	SW5 ; SW4



ШИМ (PWM) для управления двигателем



Устройство



Вентильный электродвигатель (ВД) — это разновидность электродвигателя постоянного тока, у которого щеточно-коллекторный узел (ЩКУ) заменен полупроводниковым коммутатором, управляемым датчиком положения ротора

Варианты конструкции



- С внутренним ротором. Это более привычное представление электродвигателя, когда статор — это корпус, а вращается вал, расположенный в нём. Часто их называют английским словом «Inrunner». Такой вариант обычно применяют для высокооборотистых электродвигателей
- С внешним ротором. Здесь вращается внешняя часть двигателя с закреплённым на ней валом, в англоязычных источниках его называют «outrunner». Эту схему устройства используют, когда нужен высокий момент.

Достоинства:

- - Высокое быстродействие и динамика, точность позиционирования
- - Широкий диапазон изменения частоты вращения
- - Бесконтактность и отсутствие узлов, требующих техобслуживания — бесколлекторная машина
- - Возможность использования во взрывоопасной и агрессивной среде
- - Большая перегрузочная способность по моменту
- - Высокие энергетические показатели (КПД более 90 % и $\cos\varphi$ более 0,95)
- - Большой срок службы, высокая надёжность и повышенный ресурс работы за счёт отсутствия скользящих электрических контактов
- - Низкий перегрев электродвигателя, при работе в режимах с возможными перегрузками

Недостатки:

- - Относительно сложная система управления двигателем
- - Высокая стоимость двигателя, обусловленная использованием дорогостоящих постоянных магнитов в конструкции ротора

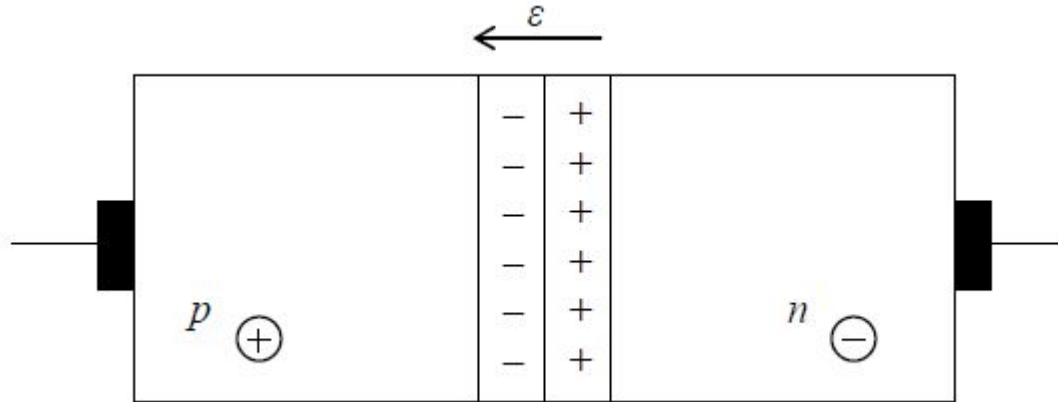
Применение

Они используются как для привода мелких механизмов: в дисководы CD, DVD-приводах, жёстких дисках, так и в мощных устройствах: аккумуляторе и сетевом электроинструменте (с питанием порядка 12В), радиоуправляемых моделях (например, квадрокоптерах), станках ЧПУ для привода рабочего органа (обычно моторчики с номинальным напряжением 24В или 48В).

Широкое применение БДПТ нашли в электротранспорте, почти все современные мотор-колеса электросамокатов, велосипедов, мотоциклов и автомобилей — это бесколлекторные двигатели. К слову, номинальное напряжение электродвигателей для транспорта лежит в широком диапазоне, например, мотор-колесо для велосипеда зачастую работает от 36В или от 48В, за редким исключением и больше, а в автомобилях, например, на Toyota Prius порядка 120В, а на Nissan Leaf — доходит до 400, при том что заряжается от сети 220В (это реализуется с помощью встроенного преобразователя).

ЭЛЕКТРОНИКА.

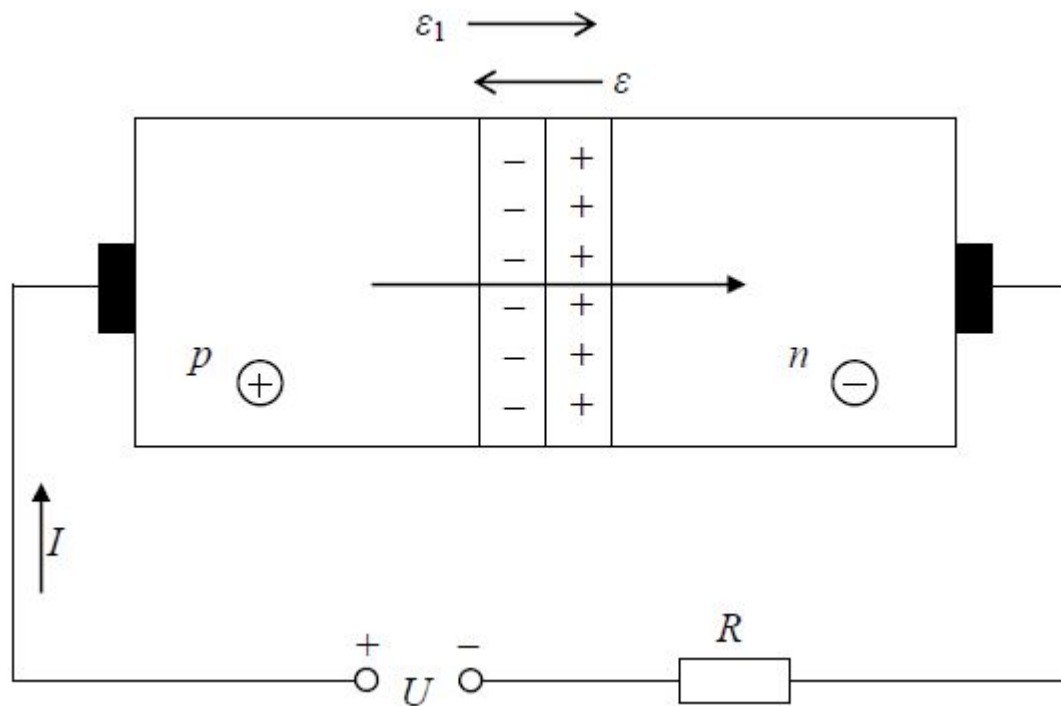
Полупроводниковые диоды



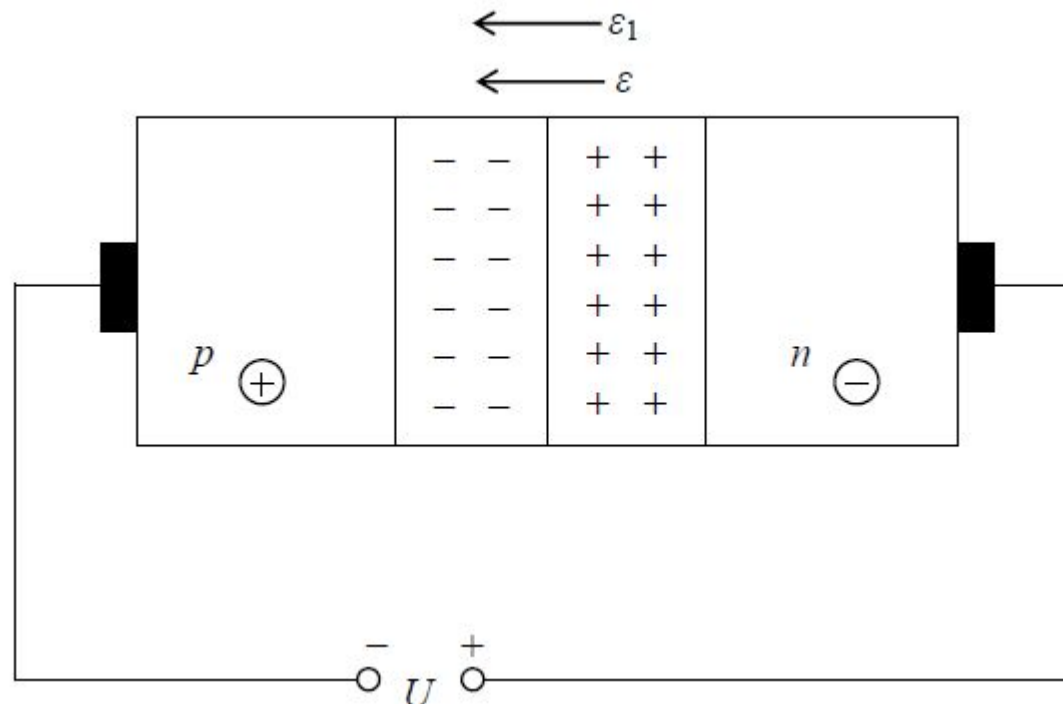
В полупроводниковых диодах используются специфические явления, возникающие на границе двух полупроводников с разным типом проводимости: p и n

В полупроводнике n-типа основными носителями зарядов являются электроны, а в полупроводнике p-типа – дырки. Вследствие разности концентраций свободных дырок и электронов по обе стороны от границы полупроводников при разомкнутой цепи источника энергии из полупроводника n-типа часть электронов диффундирует в полупроводник p-типа, а из полупроводника p-типа часть дырок диффундирует в полупроводник n-типа. В результате этого на границе полупроводников образуется слой из неподвижных отрицательных и положительных объемных зарядов, между которыми возникает электрическое поле напряженностью ϵ . При некотором значении напряженности электрического поля в p-n переходе диффузия через границу полностью прекращается, т.е. возникает запирающий слой.

Если к диоду приложить напряжение в прямом направлении (прямое напряжение), то под действием электрического поля напряженностью ε_1 , возникающего между электродами за счет действия внешнего источника напряжения, произойдет уменьшение напряженности электрического поля ε в области p-n перехода, что приведет к открыванию диода. При этом через диод будет протекать прямой ток, обусловленный основными носителями



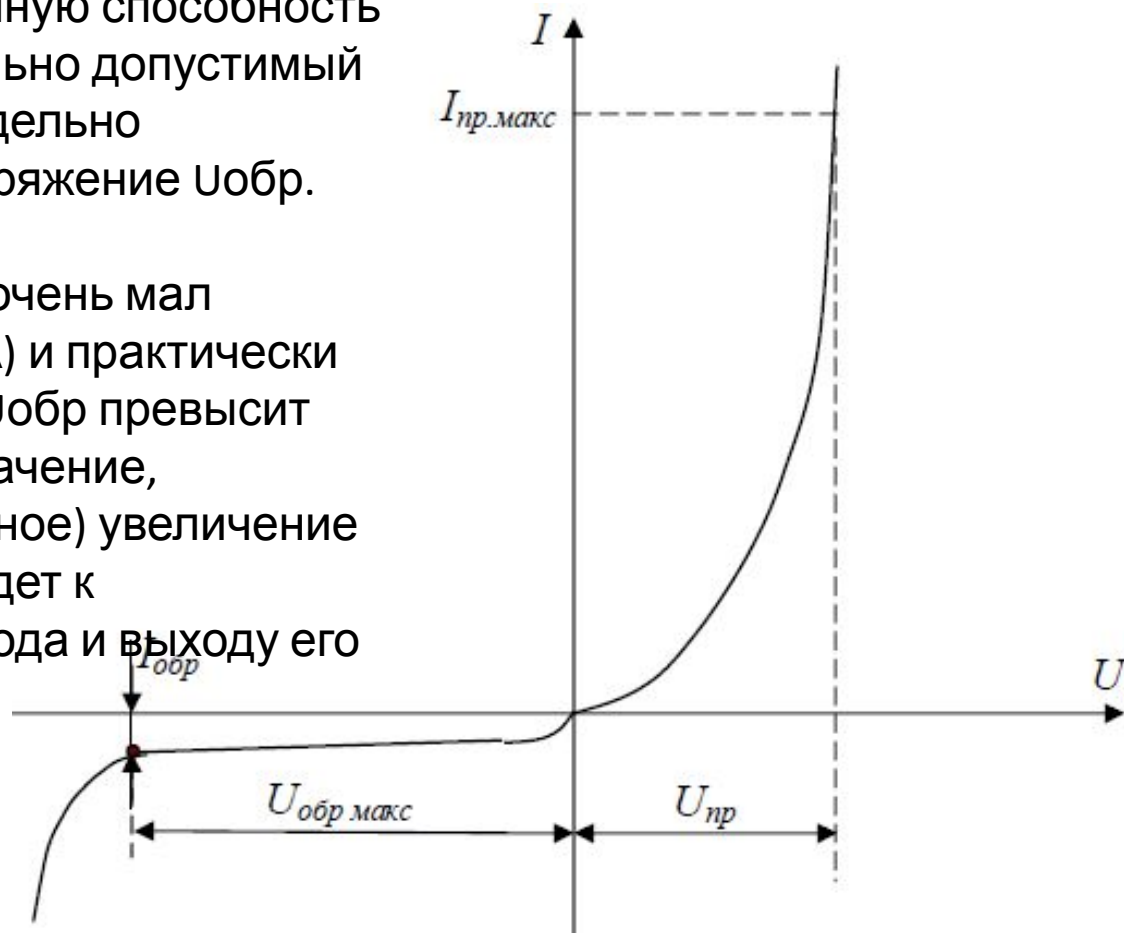
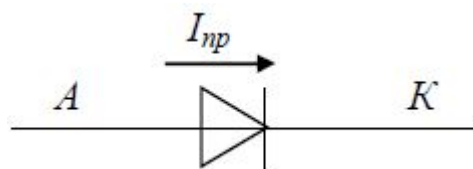
Если к диоду приложить напряжение в обратном направлении (обратное напряжение), то под действием электрического поля внешнего источника напряжения напряженностью ε_1 , возникающего между электродами за счет действия внешнего источника напряжения, произойдет увеличение напряженности электрического поля ε в области рп перехода, что приведет к увеличению запирающего слоя и к закрытию диода. При этом через диод будет протекать незначительный обратный ток, обусловленный неосновными носителями заряда



На электрической схеме графическое изображение диода указывает направление протекания прямого тока, который направлен от положительного электрода (типа p) к отрицательному электроду (типа n). Положительный электрод называется анодом (A), отрицательный – катодом (K).

Работа полупроводникового диода характеризуется вольт-амперной характеристикой. Нагрузочную способность диода определяют предельно допустимый прямой ток $I_{пр.макс}$ и предельно допустимое обратное напряжение $U_{обр.макс}$.

Обратный ток диода $I_{обр}$ очень мал (единицы или десятки мкА) и практически не учитывается. Если же $U_{обр}$ превысит предельно допустимое значение, произойдет резкое (лавинное) увеличение обратного тока, что приведет к необратимому пробое диода и выходу его из строя.



Применение диодов

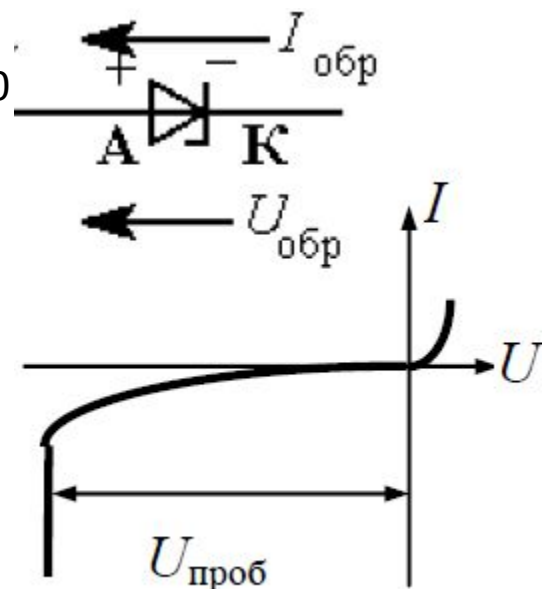
По функциональному назначению полупроводниковые диоды делятся на выпрямительные, импульсные, стабилитроны, фотодиоды, светоизлучающие диоды и т. д.

По способу изготовления различают сплавные диоды, диоды с диффузионной базой и точечные диоды. В диодах двух первых типов р-п переход создается на значительной площади (до 1000 мм²), они применяются в основном в автоматике и приборостроении. В точечных диодах площадь перехода меньше 0,1 мм². Они применяются главным образом в аппаратуре сверхвысоких частот при значении прямого тока 10–20 мА.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в постоянный и выполняются по сплавной или диффузионной технологии.

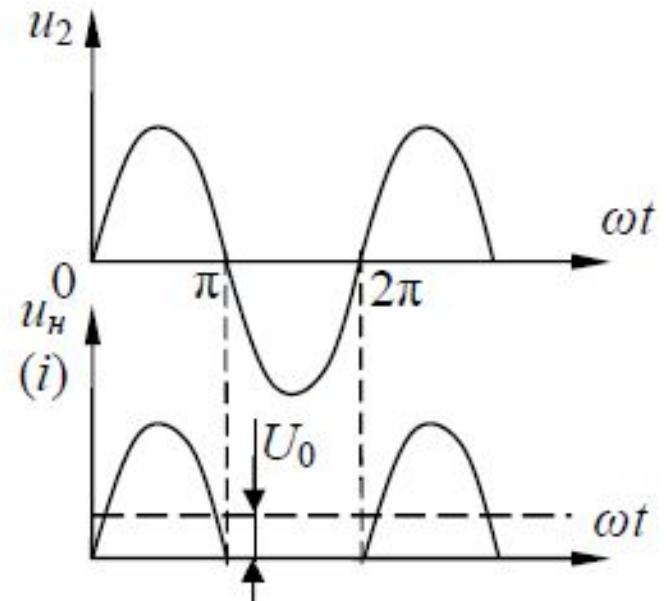
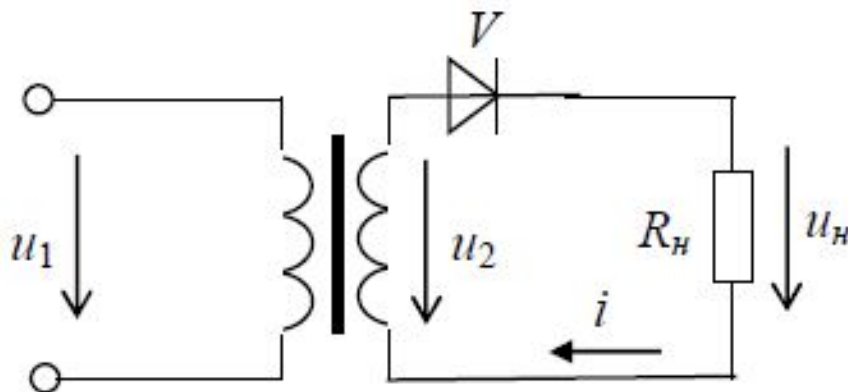
Импульсные диоды предназначены для работы в цепях формирования импульсов напряжения и тока. Это – точечные диоды.

Стабилитроны, называемые также опорными диодами, предназначены для стабилизации напряжения. В этих диодах используется явление неразрушающего электрического пробоя (лавинного пробоя) р-п перехода при определенных значениях обратного напряжения $U_{обр} = U_{проб}$

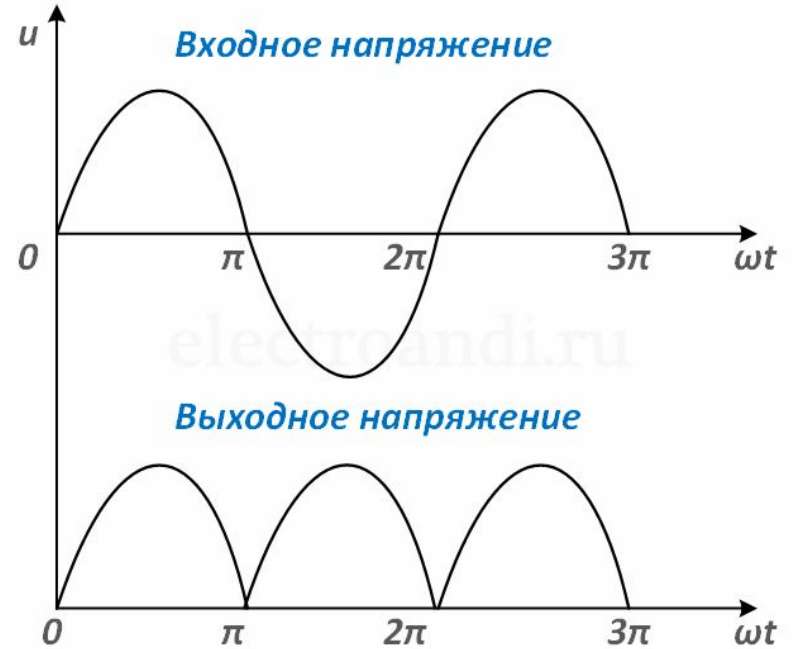
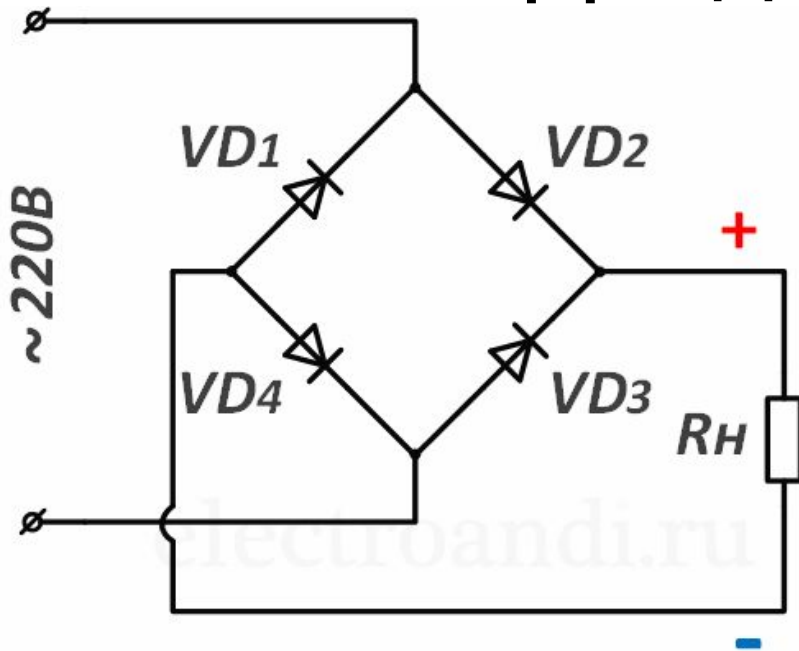


Однополупериодный выпрямитель

Ток через диод и сопротивление нагрузки протекает только в течение одной половины периода, когда к диоду приложено напряжение в прямом направлении. При обратном напряжении на диоде в течение второй половины периода (от π до 2π) диод закрыт. Таким образом, с выхода выпрямителя снимаются импульсы, создающие напряжение u_H и ток i , пульсирующие с частотой питающего напряжения u_1 . Выпрямленное пульсирующее напряжение можно представить как сумму переменной и постоянной составляющих этого напряжения. Постоянная составляющая выпрямленного напряжения U_0 равна среднему значению u_H за период.



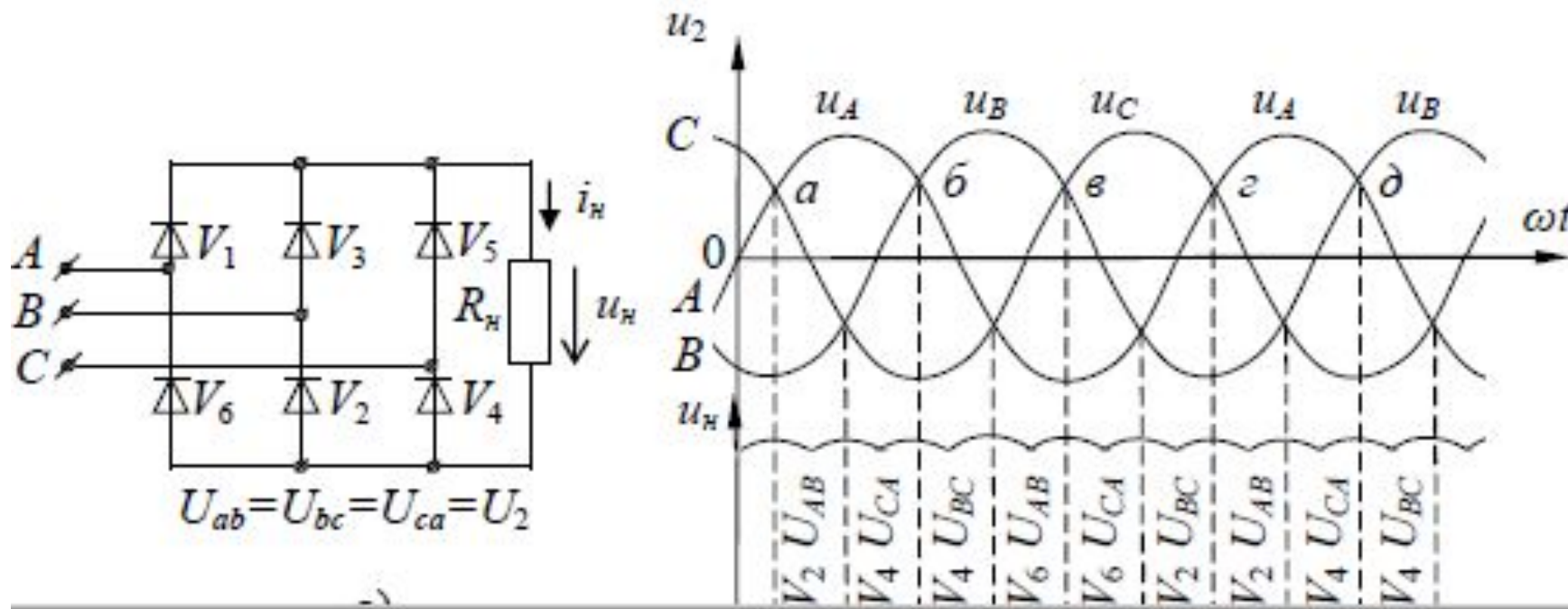
Диодный мост



Переменное напряжение на входе меняется по величине и по знаку. При прохождении положительной полуволны (от 0 до π) к анодам диодов $VD2$ и $VD4$ приложено положительное напряжение относительно их катодов, что вызывает прохождение тока I_n через диоды и нагрузку R_H . В этот момент диоды $VD1$ и $VD3$ заперты и не пропускают ток, так как напряжение положительной полуволны для них является обратным.

В момент, когда входное напряжение пересекает точку π , оно меняет свой знак. В этом случае диоды $VD1$ и $VD3$ начинают пропускать ток, так как к их анодам приложено положительное напряжение относительно катодов, а диоды $VD2$ и $VD4$ оказываются запертыми. Это продолжается до точки 2π , где переменное входное напряжение снова меняет свой знак и весь процесс повторяется заново.

Трехфазная мостовая схема

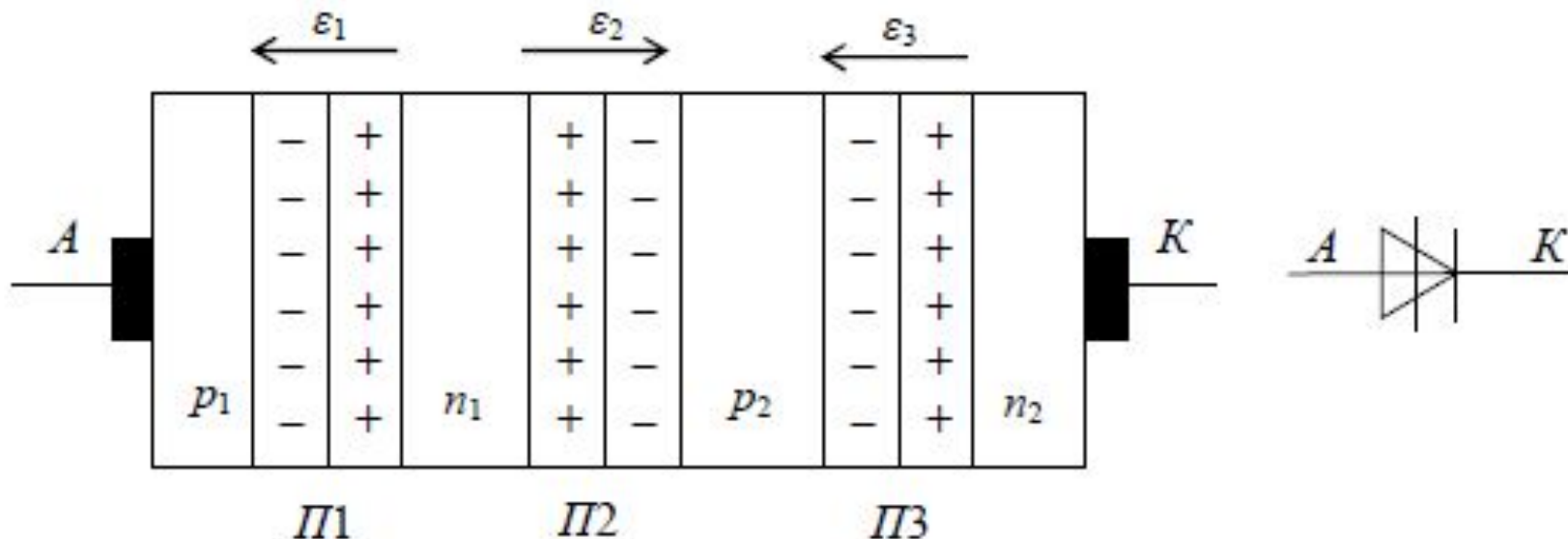


Выпрямитель состоит из шести диодов. В любой момент времени ток проводят два диода, на анодах которых в данный момент времени будет максимальный положительный потенциал, а на катодах – максимальный отрицательный потенциал (см. рис. 119). Из приведенной временной диаграммы видно, что каждый диод проводит ток в течение одной трети периода.

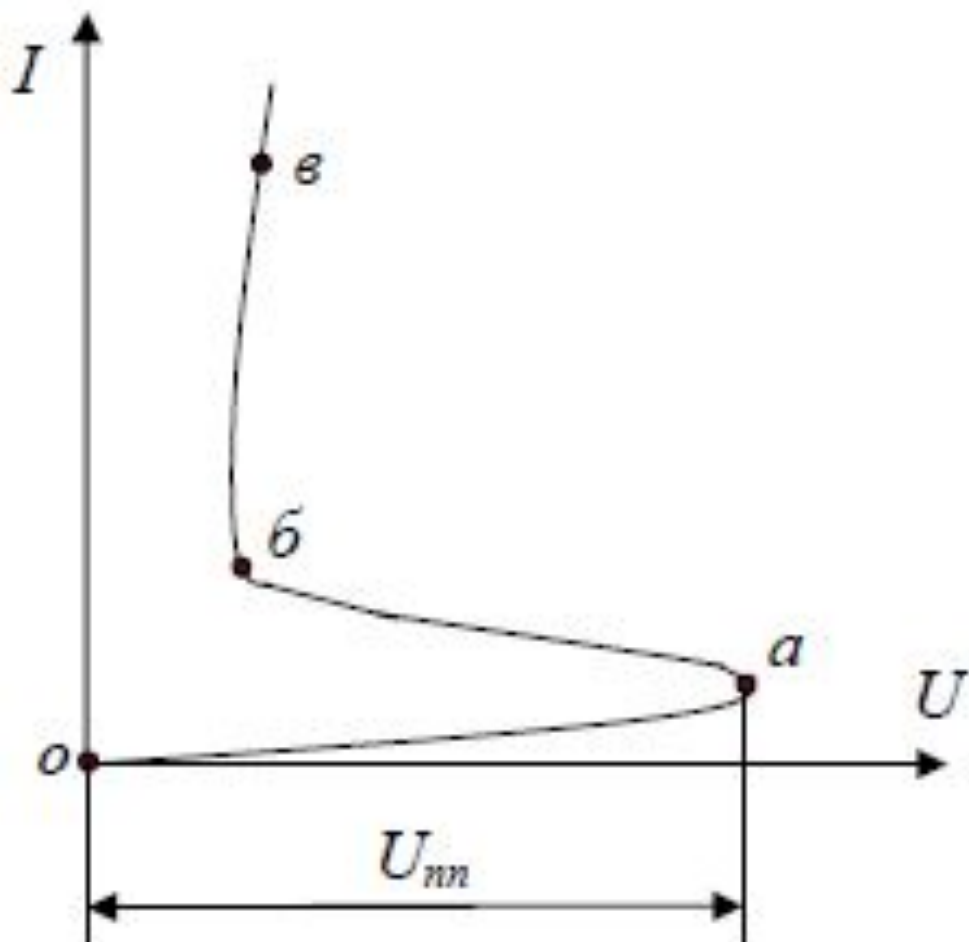
Диодный тиристор

Если между анодом и катодом тиристора приложить небольшое постоянное напряжение в прямом направлении, то р-п переходы П1 и П3 окажутся открытыми и их сопротивление будет мало. Для р-п перехода П2 приложенное напряжение является обратным, поэтому электрическое поле в области перехода П2 возрастет, его сопротивление будет велико. Таким образом, все приложенное к тиристорному напряжению окажется приложено к переходу П2 и ток в цепи практически равен нулю. При повышении напряжения на тиристоре ток в цепи

)

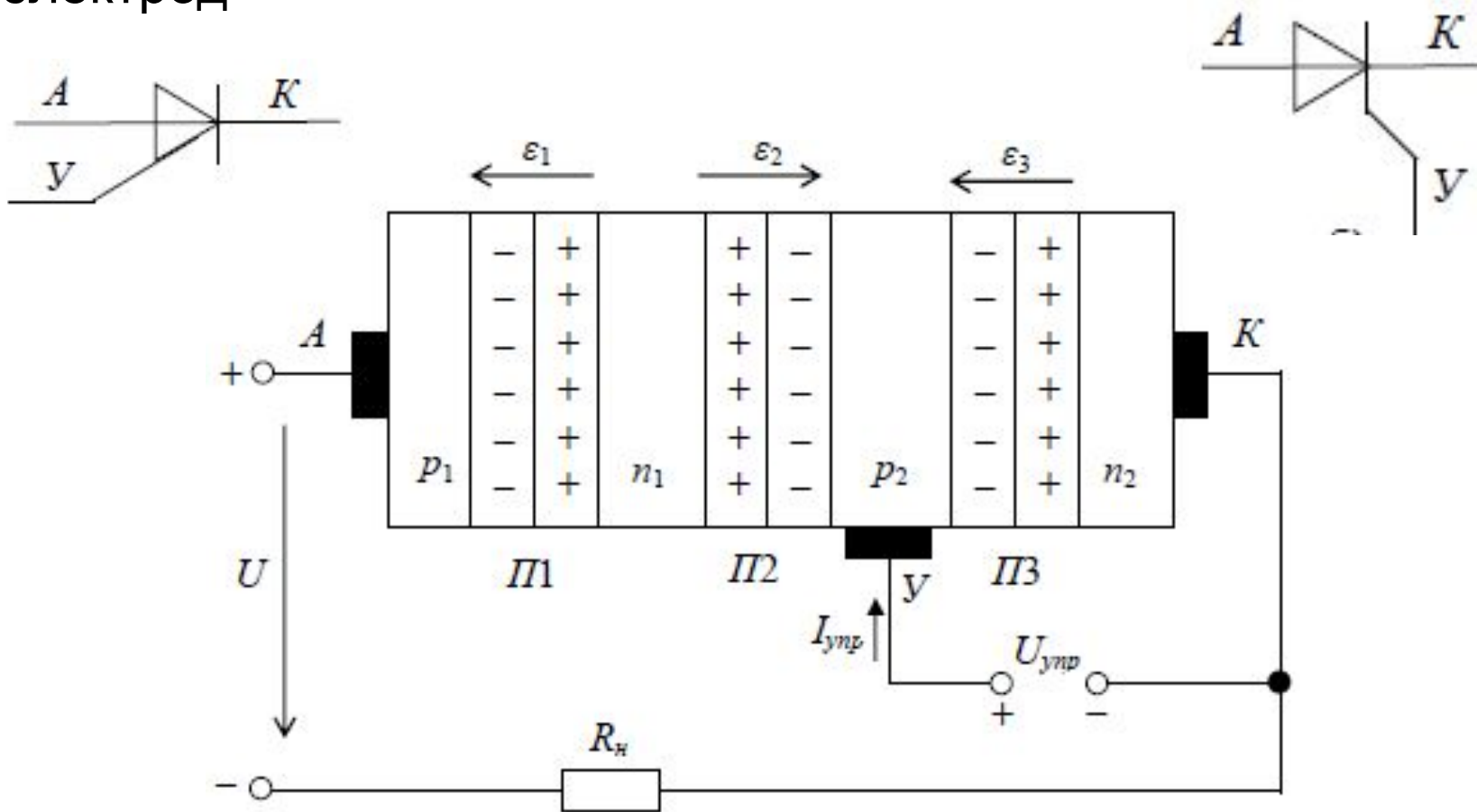


При достижении напряжением определенного значения, называемого напряжением пробоя $U_{пп}$, в переходе П2 напряженность электрического поля становится достаточной для ионизации и образования новых свободных носителей зарядов, при этом сопротивление перехода П2 резко уменьшается и тиристор открывается

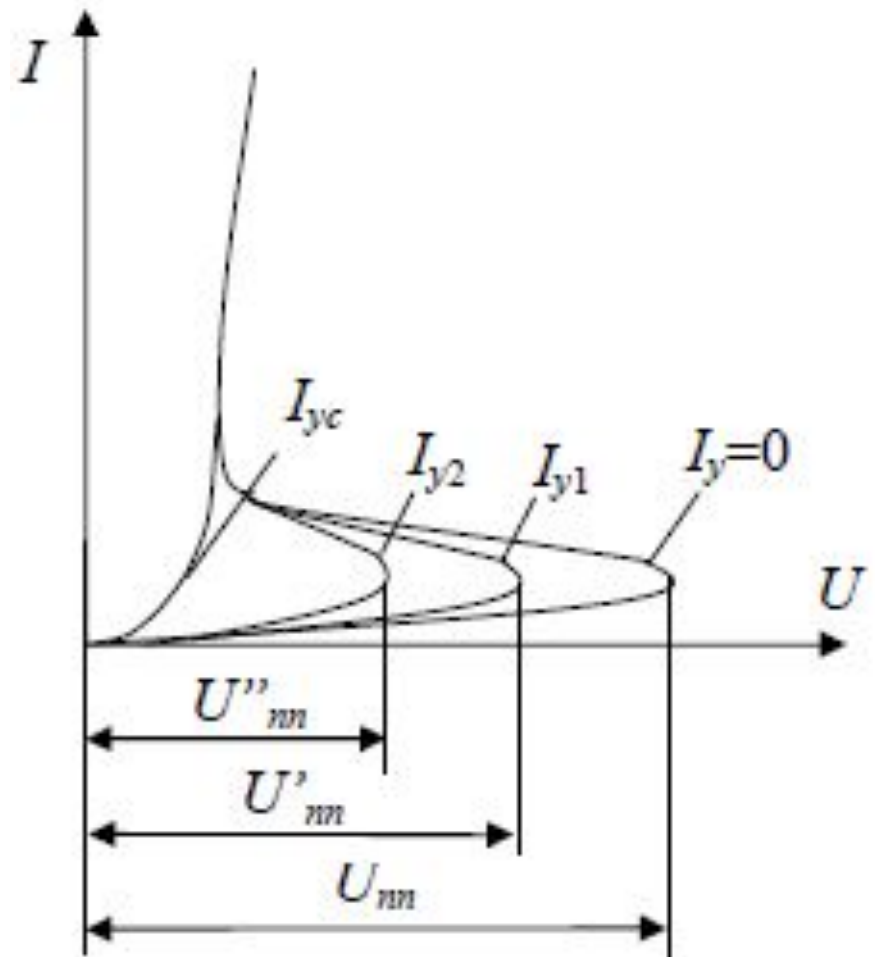


Триодный тиристор

имеет три электрода: А – анод, К – катод и У – управляющий электрод



Между анодом и катодом тиристора подается напряжение U питания нагрузки R_n , величина которого меньше напряжения прямого пробоя $U_{пп}$ (напряжения включения). При этом тиристор закрыт. При подаче на управляющий электрод положительного потенциала $U_{упр}$ от источника управления в p-n переходе ПЗ возникает ток управления $I_{упр}$ и появляются дополнительные носители зарядов, которые проникают в область закрытого p-n перехода П2 и вызывают ионизацию, что приводит к открыванию перехода П2, в результате чего через тиристор протекает ток. Чем больше ток управления I_u , тем больше дополнительных носителей зарядов появляется в области перехода П2, что способствует открыванию тиристора при меньшем напряжении $U_{пп}$ между анодом и катодом.



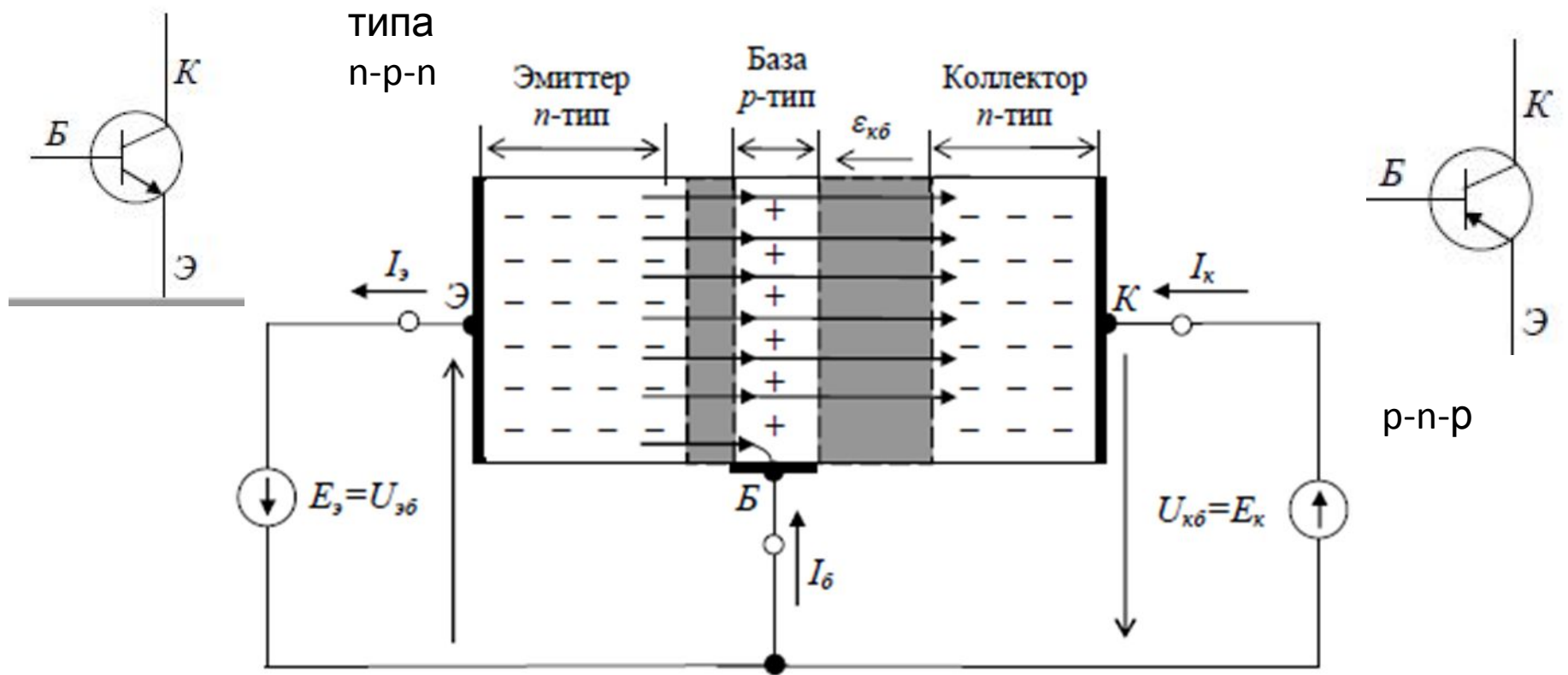
При определенном значении тока управления I_{yc} , называемом током сглаживания, тиристор будет работать как неуправляемый диод. Таким образом, тиристор может

открываться двумя способами: - подачей между анодом и катодом напряжения пробоя $U_{пп}$; - при напряжении, меньшем $U_{пп}$, током I_u управления достаточной величины. Так как управляющий электрод после открытия тиристора перестает оказывать влияние на его работу, то в цепь управляющего электрода обычно подается короткий импульс длительностью около 10 мкс.

Биполярные транзисторы

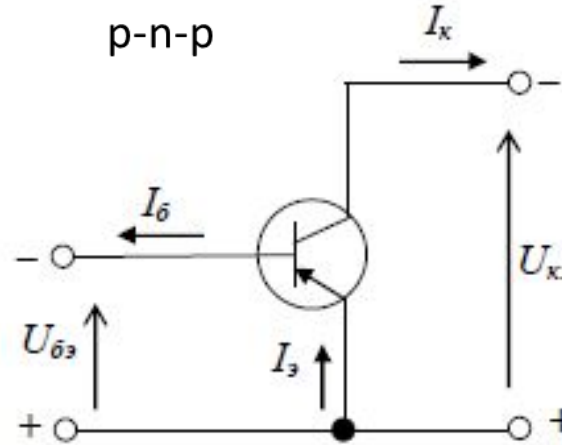
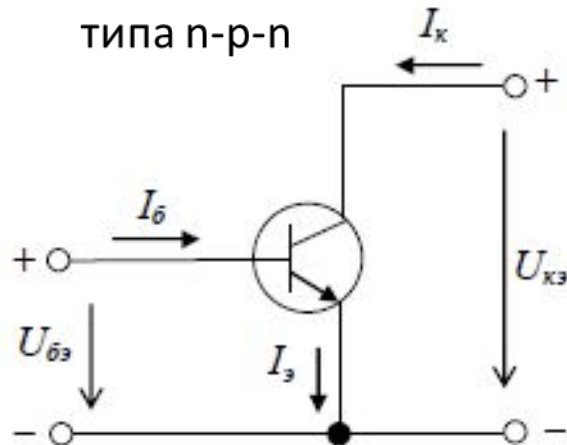
Работа биполярных транзисторов основана на явлениях взаимодействия двух близко расположенных р-п переходов. Различают плоскостные и точечные биполярные транзисторы. Плоскостной биполярный транзистор представляет собой трехслойную структуру типа р-п-р или типа п-р-п. Транзистор называется биполярным потому, что физические процессы в нем связаны с движением носителей заряда обоих знаков (свободных дырок и электронов).

Средний слой транзистора называется базой Б, один крайний слой – коллектором К, а другой крайний слой – эмиттером Э. Каждый слой представляет собой электрод и имеет вывод.

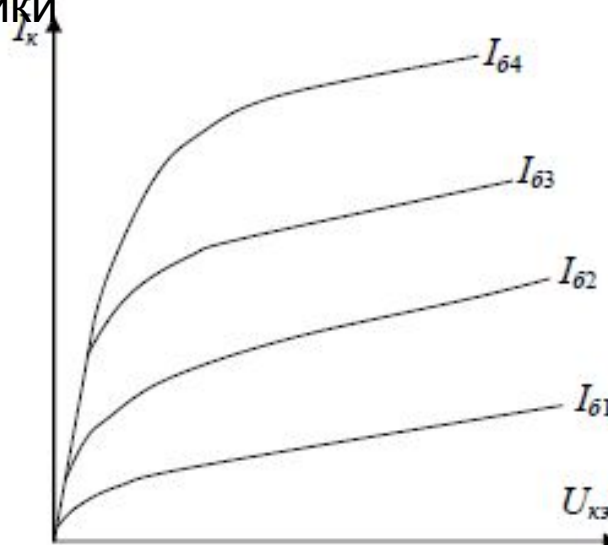
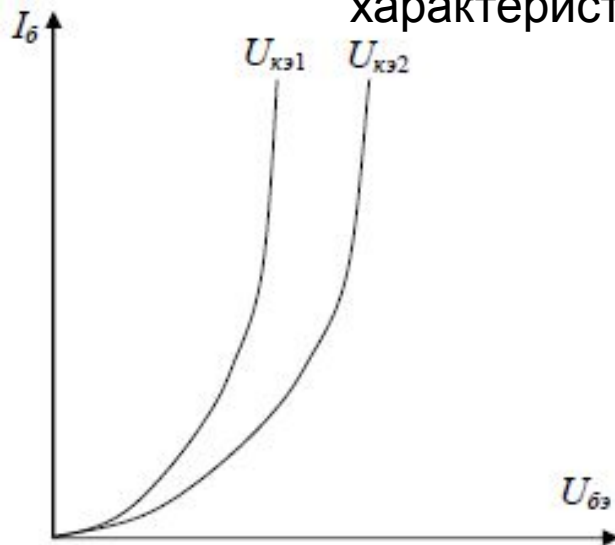


В схемах транзисторных усилителей полярность напряжения E_k должна быть такой, чтобы коллекторный $p-n$ переход был закрыт для основных носителей заряда. Таким образом, напряжение E_k является обратным для коллекторного $p-n$ перехода. Полярность напряжения E_z должна быть такой, чтобы эмиттерный $p-n$ переход был открыт. Свободные электроны диффундируют из эмиттера в базу, создавая ток эмиттера I_z . Если между коллектором и базой включен источник питания E_k , то большая часть электронов, поступивших из эмиттера в базу, втягивается сильным электрическим полем с напряженностью $\epsilon_{кб}$ коллекторного $p-n$ перехода, создавая ток цепи коллектора I_k .

Входные и выходные характеристики схемы с общим эмиттером



Статические характеристики



Входные

$I_{к2} > I_{к1}$

Выходные

$I_{б4} > I_{б3} > I_{б2} > I_{б1}$

Биполярные транзисторы характеризуются h -параметрами.

Сопротивление со стороны входа

$$h_{11} = \frac{dU_{бэ}}{dI_б} \text{ при } U_{кэ} = \text{const}$$

Коэффициент передачи по напряжению

$$h_{12} = \frac{dU_{бэ}}{dU_{кэ}} \text{ при } I_б = \text{const.}$$

Коэффициент усиления

$$h_{21} = \frac{dI_к}{dI_б} \text{ при } U_{кэ} = \text{const}$$

Проводимость со стороны выхода

$$h_{22} = \frac{dI_к}{dU_{кэ}} \text{ при } I_б = \text{const.}$$

Эти параметры можно рассчитать по заданным статическим характеристикам.

Моделирование мехатронных систем

Scilab

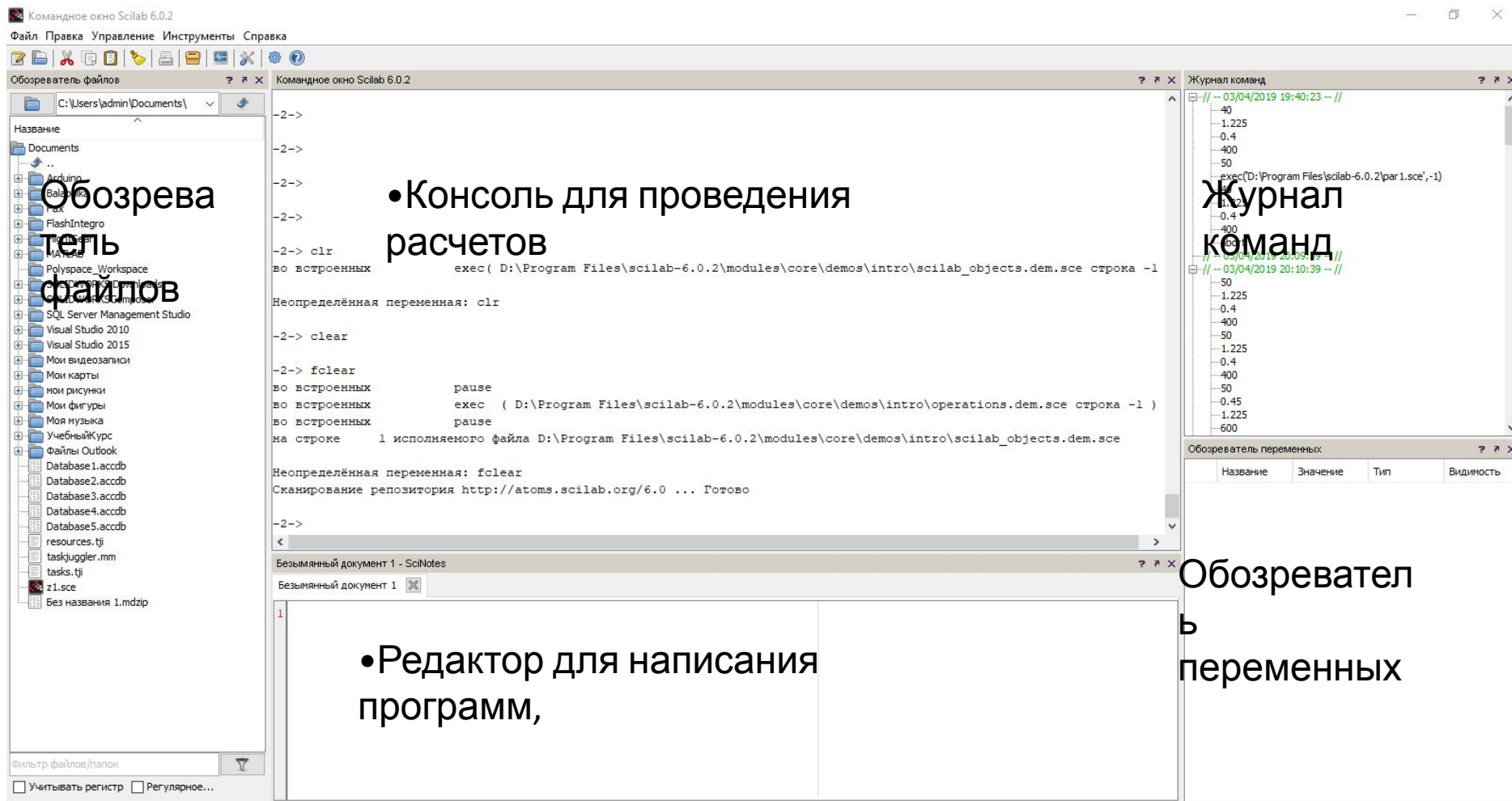
Ресурсы

Scilab является программным обеспечением, которое любой может свободно скачать. Доступен под Windows, Linux и Mac OS X,

1. Scilab можно загрузить по следующему адресу: <http://www.scilab.org/>
2. Scilab – Киберфорум <http://www.cyberforum.ru/scilab/?search=scilab>
3. Scilab/Программирование.
<https://ru.wikibooks.org/wiki/Scilab/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5>
4. Введение в Scilab - MOODLE КНИТУ
<https://moodle.kstu.ru/course/view.php?id=2622>
5. Scilab Control Engineering.
<https://scilabdotninja.wordpress.com/scilab-control-engineering-basics/>
6. Официальная страница для RTSX (Robotic Tools for Scilab / Xcos)
<https://scilabdotninja.wordpress.com/rtsx/>
7. Справка Scilab online https://help.scilab.org/docs/6.0.2/ru_RU/index.html
8. ATOMS : Homepage <https://atoms.scilab.org/>
9. Сайт SCICOS <http://www.scicos.org/history.html>

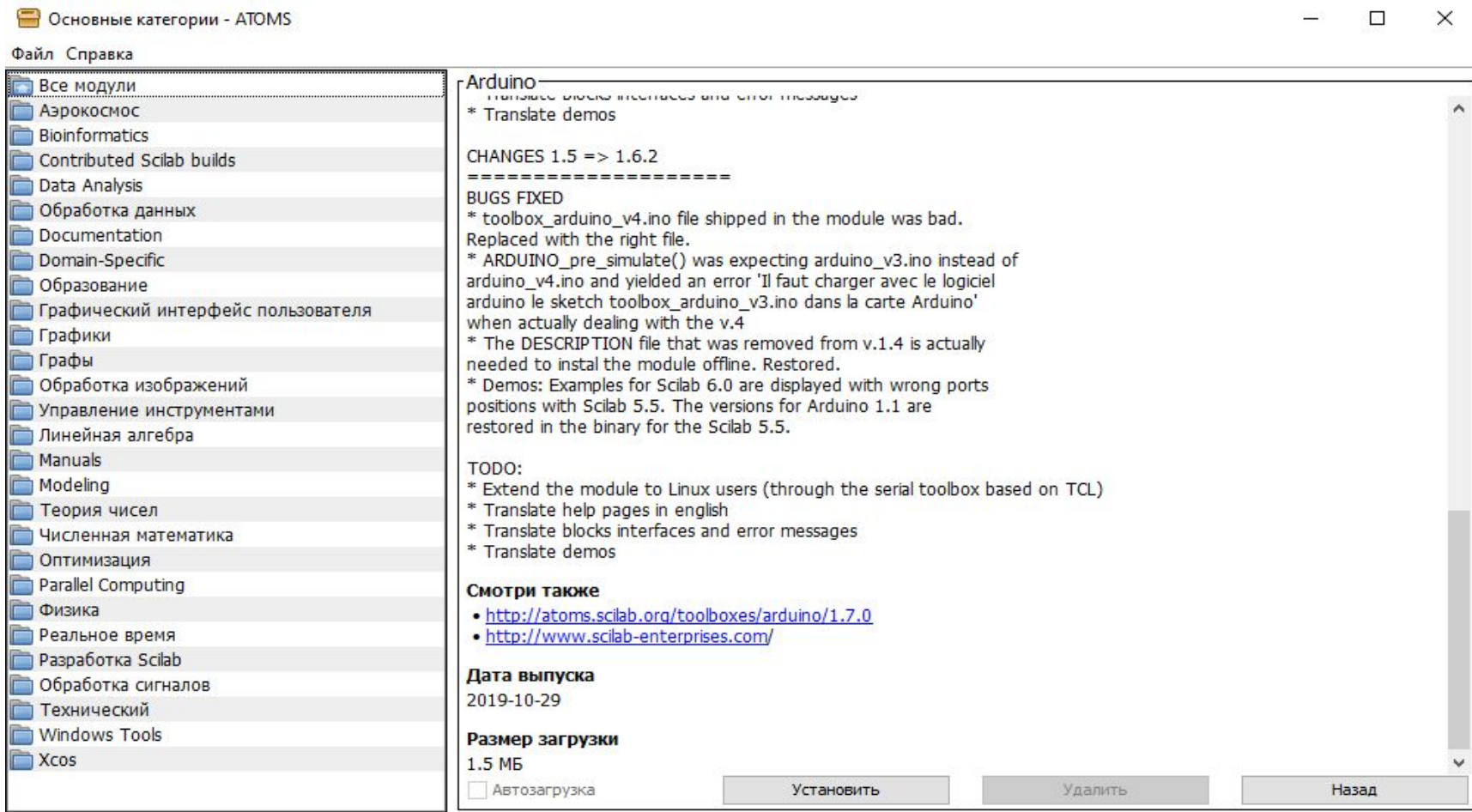
Начало работы

рабочая область в Scilab состоит из нескольких окон



,
Графические окна для отображения графики,
Встроенная помощь
Палитры блоков XCOS

Дополнительные функции SCILAB. ATOMS



- ATOMS (AuTomatic mOdules Management для Scilab) - это хранилище для упакованных модулей расширения («Наборы инструментов»). Сообщество Scilab создало множество дополнительных модулей, называемых «Toolboxes». Они перечислены на веб-сайте ATOMS <https://atoms.scilab.org/>

Наборы инструментов ATOMS (некоторые)

- Панель инструментов дизайна обработки изображений - эта панель инструментов реализует функции для обнаружения объектов.
- Набор инструментов Scilab для обработки изображений и видео - SIVP намерен выполнять задачи по обработке изображений и видео
- MinGw toolbox - динамическая связь с MinGW для Scilab в Windows
- CPGE - Системы управления подготовительными классами по французскому языку - выделенные блоки Xcos CPGE
- Arduino - Arduino Связь через последовательный порт
- Coselica - Стандартные открытые блоки Modelica
- Apifun - проверка входных аргументов в макросах
- GUI Builder - построитель графического интерфейса пользователя
- iodelay toolbox - манипулирование и частотный анализ линейных динамических систем с задержками на вход или выход
- Time Frequency Toolbox - Набор инструментов, разработанный для анализа нестационарных сигналов с использованием частотно-временных распределений.
- CelestLab - Набор инструментов космической механики CNES для анализа миссии
- Scilab Wavelet Toolbox - набор инструментов для имитации вейвлетов Matlab
- Обработка изображений и Computer Vision Toolbox - модуль обработки изображений и Computer Vision Toolbox для Scilab 6.0
- SIMM - SIMM - преподавание наук для инженера с Xcos
- Библиотека черчения - Matlab-подобная библиотека черчения
- Distfun - Функции распределения
- Последовательная связь - связь через последовательный порт RS-232 со Scilab в Windows и Linux
- Specfun - коллекция специальных математических функций

Scilab Connected Object Simulator (SCICOS)

Scicos - это инструмент для моделирования и графического отображения динамической системы. Пользователи могут создавать блок-схемы для моделирования и симуляции динамики гибридных динамических систем (как с непрерывным, так и с дискретным временем) и компилировать эти модели в исполняемый код. Приложения включают обработку сигналов, системы управления, системы массового обслуживания, а также изучение физических и биологических систем.

Графическое моделирование, компиляция и моделирование динамических систем

Объединение непрерывных и дискретных систем в одной модели

Выбор элементов модели из палитр стандартных блоков

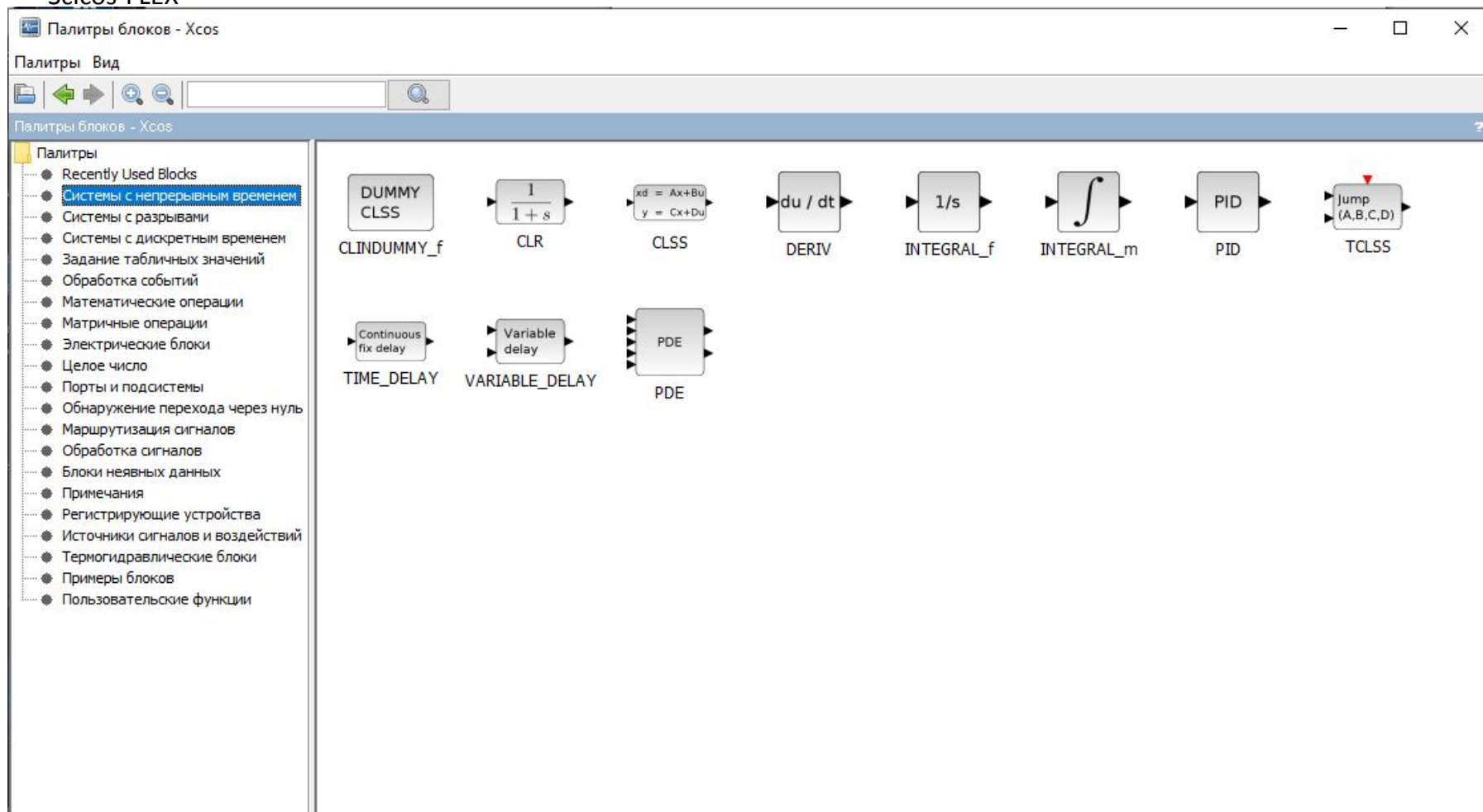
Программирование новых блоков на C, Fortran или Scilab Language

Запуск симуляции в пакетном режиме из среды Scilab

Генерация кода C из модели Scicos с использованием Code Generator

Запускайте симуляции в реальном времени на реальных устройствах

Создание жестких управляющих исполняемых файлов в реальном времени с помощью Scicos-RTAI и Scicos-FLEX



Демонстрация интерфейсов SCILAB

- Справка на русском языке (частично)
- Изменение текущей рабочей директории
- Управление окнами инструментов
- Проверка версии (команда ver)
- Очистка окна команд (cls)
- Вызов редактора SCINOTE через меню
- стек команд (стрелка вверх)

Работа в командной строке

В командном окне

```
-->2+2
```

```
ans =
```

```
-->ans
```

```
ans =
```

```
4
```

Что происходит в окне переменных,
журнале команд?

Работа с файлами Scilab

написании сценария (другими словами, набор нескольких команд) в виде файла. Scilab предоставляет два вида файлов сценариев. Два формата, .sci и .sce, дифференцировать их в явном виде:

- .sci файлы содержат Scilab и / или определяемые пользователем функции. Выполнение такие файлы просто загружает их в среде Scilab, но не выполняет их.
- .sce файлы содержат обе функции Scilab и исполняемые команды. Когда эти файлы вызываются, они выполняются. Для того, чтобы запустить этот файл, вы можете просто нажать на значок воспроизведения на панели меню в окне SciNotes. В качестве альтернативы, можно отметить полный путь к файлу, чтобы запустить его. Если вы работаете в том же каталоге, что и файл, вы просто должны напечатать имя файла, без упоминания его расширения в командной `exec('D:\dwork\hello.sce')`

Математический калькулятор

Scilab эффективно работают как калькулятор с математическими операторами, включая умножение (символ *), деление (символ /), сложение (символ +), вычитание (символ -) и возведение в степень (символ ^)

```
-->a = 2
```

```
a =
```

```
2.
```

```
-->b = 3
```

```
b =
```

```
3.
```

```
-->a+b
```

```
ans =
```

```
5.
```

```
-->a-b
```

```
ans =
```

```
-1.
```

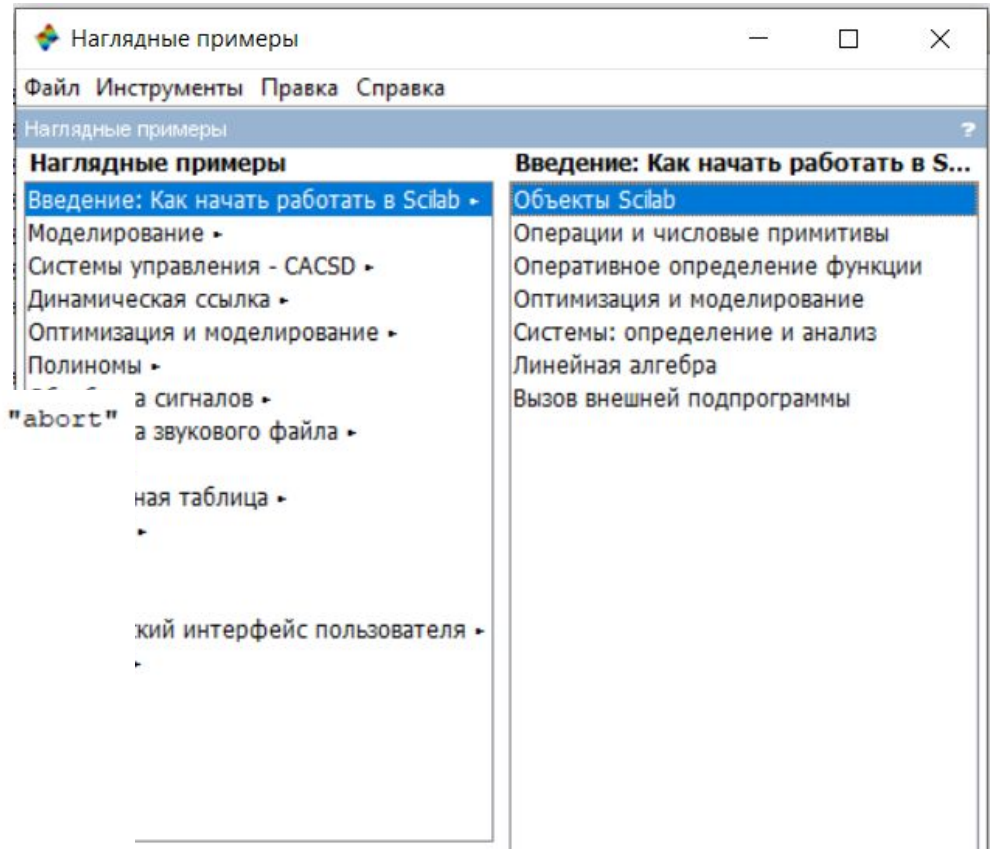
Вводятся целые числа, которые воспринимаются как число с плавающей точкой (см. окно обозревателя переменных)

Демонстратор. Примеры

Выберите Справка.
Примеры.

В левом столбце выберите тему. В правом-пример.

В командном окне можно посмотреть примеры, вводя пустые строки (нажимая



```
>> //To quit this demo, enter CTRL+C, then type "abort"

>> //
// SCILAB OBJECTS

>> //
// 1. SCALARS

>> a=1 //real constant
a =

1.

>>

>> l==1 //boolean
ans =

т
```


Форматирование командной строки

Отображение чисел в командной строке могут быть отформатированы двумя способами: в научных нотации (также известный как использование экспоненциальной записи) или в обычных обозначениях.

Например:

```
-->format e
```

```
-->2/4.2
```

```
ans =
```

```
4.762D-01
```

```
-->format v
```

```
-->2/4.2
```

```
ans =
```

```
8 0.4761905
```

Экспоненциальное представление

Знак мантиссы

Значение мантиссы

Десятичный разделитель

символ экспоненты

Знак экспоненты

Значение экспоненты

Примеры:

```
-->format('e',10)
```

```
-->2/4.2
```

```
ans =
```

```
4.762D-01
```

```
-->format('e',20)
```

```
-->2/4.2
```

```
ans =
```

```
4.7619047619048D-01
```

```
-->format('v',20)
```

```
-->2/4.2
```

```
ans =
```

```
0.4761904761904762
```

Математические операции имеют порядок приоритета

Любое выражение в скобках решаются в первую очередь. Сначала внутренние скобки, а затем последовательно внешние скобки.

Деление, умножение, сложение, вычитание

--> $2+3*2$

ans =

8.

--> $2+1-2^2$

ans =

-1.

--> $2+(1-2)^2$

ans =

3.

--> $2*2^{(4-1)}$

ans =

16.

Удаление переменных

```
disp("Define three variables  
named a,b,c")  
a = 10;  
b = 12.2;  
c = a*b;  
disp("Checking if variables have  
been defined as a,b,c")  
disp(isdef("a"))  
disp(isdef("b"))  
disp(isdef("c"))  
disp("After clearing the variable  
a")  
clear a  
disp(isdef("a"))  
disp(isdef("b"))  
disp(isdef("c"))
```

```
--> exec('D:\dwork\clear.sce', -1)  
Define three variables named a,b,c  
Checking if variables have been defined  
as a,b,c  
T  
T  
T  
After clearing the variable a  
F  
T  
T
```

Команда --> clear очищает память от введенных переменных

Обозреватель переменных				
	Название	Значение	Тип	Видимость

Комментарии

Scilab использует двойную косую черту (//) для этой цели. Все, что написано перед комментарием не выполняется интерпретатором. Комментарии используются в качестве пояснительных текстов и для маркирования информации в определенных местах в программе.

Текст между /* и */ также не воспринимается транслятором и используется для временной блокировки части текста программы.

Предопределенные константы

1 disp("value of pi:")	-->	
2 disp(%pi)	exec('D:\dwork\constant.sce')	1
3 disp("value of eps:")	value of pi:	Значение числа Пи:
4 disp(%eps)	3.1415927	2 3.1415927
5 disp("Value of inf inity:")	value of eps:	3 значение числа Эйлера:
6 disp(%inf)	2.220D-16	4 2.220D-16
7 disp("Value of e:")	Value of inf inity:	5 Значение бесконечности:
8 disp(%e)	Inf	6 Inf
9 disp("Value of imaginary number i:")	Value of e:	7 Значение e:
10 disp(%i)	2.7182818	8 2.7182818
11 disp("value of boolean True:")	Value of imaginary number i:	9 Значение мнимого числа
12 disp(%t)	i	10 i
13 disp("Value of boolean False:")	value of boolean True:	11 Значение булевой True:
14 disp(%f)	T	12 T
15 disp("value of Not-a-number variable i.e. nan:")	Value of boolean False:	13 Значение булевой False:
16 disp(%nan)	F	14 F
	value of Not-a-number variable i.e. nan:	15 Результат неопределенной операции
	Nan	16 nan

Основные математические функции

```
1 -->abs(%i) // absolute value of sqrt(-1)
2 ans =
3 1.
4 -->abs(%pi) // absolute value of pi
5 ans =
6 3.1415927
7 -->abs(-%pi)
8 ans =
9 3.1415927
10 -->log(10) // logarithmic value to the
    base e
11 ans =
12 2.3025851
13 -->log(-10)
14 ans =
15 2.3025851 + 3.1415927i
16 -->log(%e)
17 ans =
18 1.
19 -->log(-%e)
20 ans =
21 1. + 3.1415927i
```

```
22 -->log10(10) // logarithmic value to the base 10
23 ans =
24 1.
25 -->log10(-10)
26 ans =
27 1. + 1.3643764i
28 -->sin(45) // sine value
29 ans =
30 0.8509035
31 -->sin((45*%pi)/180) // argument converted to degrees
32 ans =
33 0.7071068
34 -->sqrt(2) // square root
35 ans =
36 1.4142136
37 -->acos(1) // inverse cosine
38 ans =
39 0.
```

Переменные

Переменные используются для хранения значений временно в местах памяти компьютера. Они на самом деле ссылки на ячейки памяти, в которых хранятся данные. Они адресуются с помощью буквенно-цифровой символ или набор символов.

Присваивание значений осуществляется знаком =
Знак == используется для проверки значений по обе стороны, результат T или F

```
1 -->1==2
2 ans =
3 F
4 -->1==1.0
5 ans =
6 T
7 -->a=1
8 a =
9 1.
10 -->b=2
11 b =
12 2.
13 -->a==b
14 ans =
15 F
```

Модификации оператора присваивания

1. --> a1=10 //одиночное присваивание с отображением

a1 =
10.

2--> a1=10, a2=20, a3=30 //множественное присваивание с отображением

a1 =
10.
a2 =
20.
a3 =
30.

--> a1=10; //одиночное присваивание без отображения

--> a1=10; a2=20; a3=30; //множественное присваивание без отображения

Правила присвоения имен переменным

- Имена не должны начинаться с цифры; тем не менее, номера могут быть использованы в любом месте позже.
- Имена переменных чувствительны к регистру.
- Ключевые слова не могут быть использованы в качестве имен.
- Имена могут включать символ подчеркивания (_), но не может включать в себя пробелы

Глобальные и локальные переменные

Переменная, объявленная на глобальном уровне известна как глобальной переменной, в то время как переменная объявлена локально в пределах функции называется локальной переменной. Глобальные переменные доступны для всех функций, в то время как локальные переменные доступны только для определенных функций. Они определяются с помощью глобального оператора объявления. После определения, они остаются теми же, независимо от любого нового определения, если ясно, команда не выдается для имен переменных клиринговых и значений из памяти. Команда, `clearglobal`, выполняет задачу очистки глобальных переменных выборочно. Чтобы проверить, является ли переменная глобальной, пользователи могут использовать функцию `isglobal` (). Глобальные переменные используются для определения констант при численных расчетах.

Логический тип

Переменная логического типа может хранить значения истина или ложь. В Scilab истина представляется литералами %t или %T, а ложь - %f или %F.

Логические операторы и операторы сравнения	
a & b	логическое 'И' (конъюнкция)
a b	логическое 'ИЛИ' (дизъюнкция)
sa	логическое отрицание
a == b	истина, если a равно b
a s= b или a <> b	истина, если a и b различаются
a < b	истина, если a меньше b
a > b	истина, если a больше b
a <= b	истина, если a меньше либо равно b
a >= b	истина, если a больше либо равно b

Пример

```
--> a = %T
```

```
a =
```

```
T
```

```
--> b = ( 0 == 1 )
```

```
b=
```

```
F
```

```
--> a & b ans =
```

```
F
```

Операторы сравнения принимают на вход данные любого из основных типов (вещественные, комплексные и целые числа, строки)

Комплексные числа

Комплексные числа в Scilab представляются в виде пары вещественных чисел. Предопределенная константа `%i` содержит значение мнимой единицы. Все элементарные функции, рассмотренные выше, работают с комплексными числами. В этом случае возвращаемое значение также будет комплексным.

```
--> x = 1 + %i
x = 1. + i
--> isreal ( x )
ans = F
--> x '
ans =
1. - i
--> y = 1 - %i
y =
1. - i
--> real ( y )
ans =
1.
--> imag ( y )
ans =
-1.
--> x * y
ans =
2.
```

Целые числа

Data type	Meaning	Range
int8	Signed integer of 8 bits	$\pm 2^7 - 1$
uint8	Unsigned integer of 8 bits	$[0, 2^8]$
int16	Signed integer of 16 bits	$\pm 2^{15} - 1$
uint16	Unsigned integer of 16 bits	$[0, 2^{16}]$
int32	Signed integer of 32 bits	$\pm 2^{31} - 1$
uint32	Unsigned integer of 32 bits	$[0, 2^{32}]$
int64	Signed integer of 64 bits	$\pm 2^{63} - 1$
uint64	Unsigned integer of 64 bits	$[0, 2^{64}]$

Поведение целых чисел при выходе за границы допустимого диапазона заслуживает особого внимания, поскольку часто различается в пакетах математических вычислений. В Scilab значения целых чисел изменяются циклически, поэтому при увеличении на 1 за максимальным будет следовать минимальное значение диапазона.

Для хранения чисел за пределами диапазона разрешенного определенной точностью, вы должны использовать типы данных с более высокой точностью (более числом бит, используемым для хранения цифр).

```

1 --> 2^8
2 ans =
3 256.
4 --> int8(2^8)
5 ans =
6 0
7 --> uint8(2^8)
8 ans =
9 0
10 --> uint8(2^8-1)
11 ans =
12 255
13 --> int8(2^8-1)
14 ans =
15 -1
16 --> uint8(2^8+1)
17 ans =
18 1
19 --> int8(2^8+1)
20 ans =
21 1

```

Строковые выражения

Переменной в Scilab можно присвоить строковое значение, заключив его в двойные кавычки " ". Конкатенация (слияние) строк осуществляется с помощью оператора "+". В следующем примере мы объявляем две строки и склеиваем их при помощи оператора "+":

```
--> x = " foo "  
x =  
foo  
--> y = " bar "  
y =  
bar  
--> x + y  
ans =  
foobar
```

Тип переменной в Scilab может динамически меняться в зависимости от присвоенного ей значения. Таким образом, возможно, к примеру, создать переменную, содержащую вещественное число, а затем присвоить этой переменной строковое значение:

```
--> x = 1  
x =  
1.  
--> x + 1  
ans =  
2.  
--> x = " foo "  
x =  
foo  
--> x + " bar "  
ans = foobar
```

Числа с плавающей точкой

Точность
представления
чисел:

одинарной точности:

4 байта = 32 бита

двойной точности:

8 байт = 64 бита

расширенная

двойная точность:

80 бит

четверная точность:

16 байт = 128 бит

Если при создании переменной ей присваивается целое значение, переменная будет иметь тип с плавающей точкой. Целые числа, хранимые таким образом, получили название "flint" (сокращение от "floating point integer"). На практике целые значения в диапазоне $[-2^{52}, 2^{52}]$ можно без особых опасений хранить в вещественных переменных, так как Scilab в этом случае гарантирует точность выполнения операций.

```
--> a = 2 ^ 40 - 12
```

```
a  
= 1099511627764.
```

```
--> b = 2 ^ 45 + 3
```

```
b  
= 35184372088835.
```

```
--> c = a + b
```

```
c  
= 36283883716599
```

Массивы, векторы, матрицы

Базовой структурой данных в Scilab является матрица. Элементами матрицы могут являться вещественные, комплексные или целые числа, логические значения, строки или полиномы. Собственно скалярные величины в Scilab отсутствуют - скалярное значение представляется матрицей 1×1 .

Определение вещественной матрицы в Scilab выглядит следующим образом:

$A = [a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}; \dots; a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nn}]$.

где:

квадратные скобки "[" и "]" обозначают начало и конец перечисления элементов матрицы,
запятой "," отделяются элементы матрицы, находящиеся в одной строке,
точка с запятой ";" разделяет строки матрицы.

eye	единичная матрица
linspace	вектор равноотстоящих значений
ones	матрица, все элементы которой равны 1
zeros	нулевая матрица
testmatrix	специальные типы матриц (Гильберта, Франка и пр.)
rand	генератор случайных чисел
grand	генератор случайных чисел с возможностью выбора
	распределения
Функции для создания матриц.	

Ускоренный
ввод

```
--> a=[1 2 3  
> 4 5 6]  
a =
```

```
1. 2. 3.  
4. 5. 6.
```


Работа с элементами матрицы

Scilab предоставляет несколько способов доступа к элементам матрицы A:

- используя имя матрицы A, можно оперировать матрицей как целым,
- для поэлементных манипуляций применяется запись $A(i,j)$,
- для доступа к группе элементов, индексы которых лежат в некотором диапазоне, служит оператор ":".

```
-->a = [1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]
```

```
a =
```

```
1. 2. 3.
```

```
4. 5. 6.
```

```
7. 8. 9.
```

```
-->b = a
```

```
b =
```

```
1. 2. 3.
```

```
4. 5. 6.
```

```
7. 8. 9.
```

```
--> a./b
```

```
ans =
```

```
1. 1. 1.
```

```
1. 1. 1.
```

```
1. 1. 1.
```

```
--> a.^b
```

```
ans =
```

```
1. 4. 27.
```

```
256. 3125. 46656.
```

```
823543. 16777216. 3.874D+08
```

Элементарные матричные операции и их поэлементные варианты

+	сложение			+.+	поэлементное сложение
-	вычитание			.-	поэлементное вычитание
*	умножение			.*	поэлементное умножение
/	деление справа			./	поэлементное деление справа
\	деление слева			.\	поэлементное деление слева
^ или **	возведение в степень			.^	поэлементное возведение в
					степень
'	эрмитово	сопряжение (ком-		.'	транспонирование без сопря-
	плексное	сопряжение	и		жения
	транспонирование)				

Использование функций

<p>Единичная матрица</p> <p>--> <code>A = ones (2 , 3)</code></p> <p><code>A =</code></p> <pre> 1. 1. 1. 1. 1. 1. </pre>	<p>Пустая матрица</p> <p>--> <code>A = []</code></p> <p><code>A =</code></p> <pre> [] </pre>	<p>Размер матрицы</p> <p>--> <code>[nr , nc] = size (A)</code></p> <p><code>nc =</code></p> <pre> 3. nr = 2. </pre>
---	---	--

Функция `size` также имеет альтернативный синтаксис:

`nr = size (A , sel)` ·

при `sel=1` или `sel="r"` возвращается число строк,

при `sel=2` или `sel="c"` возвращается число столбцов,

при `sel="*"` возвращается общее число элементов в матрице, равное числу строк, умноженному на число столбцов.

--> `size (A , "*")`

`ans =`

6.

```

-->a = [1, 2; 3, 4; 5, 6] // Defining a 3 X 3 matrix
a =
1. 2.
3. 4.
5. 6.
-->size(a) // size is found to be 3 X 2
ans =
3. 2.
-->a_t = a' // defining transpose
a_t =
1. 3. 5.
2. 4. 6.
-->size(a_t) // size of transpose is 2 X 3
ans =
2. 3.
-->mul=a*a_t // multiplying two matrices
ans =
5. 11. 17.
11. 25. 39.
17. 39. 61.
-->size(mul) // size of multiplication matrix is 3
X 3
ans =
3. 3.

```

Умножение матриц

Матрица размером $a \times b$ может быть умножена на матрицу только $b \times c$, результат представляет собой матрицу $a \times c$. Новый элемент представляет собой произведение соответствующих элементов строки и столбца.

Обратные матрицы

Обратная матрица такова, что ее умножение на исходную матрицу дает единичную матрицу (матрицу с определителем, равным 1), то есть матрицу с 1 на ее диагональных элементах и 0 в противном случае:

```
-->a = [2 5 4;-4 6 -3;4 7 -1] // Defining a 3 X 3
matrix
a =
2. 5. 4.
-4. 6. -3.
4. 7. -1.
-->inverse = inv(a) // calculating inverse of matrix a
inverse =
-0.06 -0.13 0.15
0.06 0.07 0.04
0.2 -0.02 -0.12
-->a*inverse // matrix multiplied by inverse is
identity
matrix
ans =
1. 0. 0.
0. 1. 0.
0. 0. 1.
```

Определитель

```
-->a = [1 2 3;4 5 6;7 8 9]
```

```
a =
```

```
1. 2. 3.
```

```
4. 5. 6.
```

```
7. 8. 9.
```

```
-->det(a)
```

```
ans =
```

```
-9.0 D-16
```

Ранг матрицы (количество линейно- независимых строк или колонок)

```
-->a = eye(3,3)
```

```
a =
```

```
1. 0. 0.
```

```
0. 1. 0.
```

```
0. 0. 1.
```

```
-->rank(a) // all rows are  
linearly independent
```

```
ans =
```

```
3.
```

```
-->a = [1, 2, 3;2, 4, 6;4, 6, 3] //  
second row is just  
first row multiplied by 2
```

```
a =
```

```
1. 2. 3.
```

```
2. 4. 6.
```

```
4. 6. 3.
```

```
-->rank(a)
```

```
ans =
```

```
2.
```

```
-->a = [1, 2, 3;2, 4, 6;3, 6, 9]  
// second and third row  
are merely first row  
multiplied by 2 and 3 res  
pectively
```

```
a =
```

```
1. 2. 3.
```

```
2. 4. 6.
```

```
3. 6. 9.
```

```
-->rank(a)
```

```
ans =
```

```
1.
```

Трасса (сумма диагональных элементов)

```
-->a = [1, 2, 3;2, 4, 6;3, 6, 9]
```

```
a =
```

```
1. 2. 3.
```

```
2. 4. 6.
```

```
3. 6. 9.
```

```
-->trace(a)
```

```
ans =
```

```
14.
```

Величина вектора

Вектор может быть определен как массив 1 × 3. Встроенная функция `norm()` дает величину вектора. Это евклидово расстояние от начала координат до вектора.

$$\vec{a} = A\vec{x} + B\vec{y} + C\vec{z}$$

$$N = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$$

```
-->a = [1 2 3]
```

```
a =
```

```
1. 2. 3.
```

```
-->norm(a)
```

```
ans =
```

```
3.74166
```

```
-->a = [1 2 3]/norm(a)
```

```
a =
```

```
9 0.26726 0.53452 0.80178
```

Случайные матрицы

«Нормальные» (normal) и «равномерные» (uniform) функции обеспечивают нормальное и равномерное распределение случайных чисел. Нормальное распределение имеет среднее значение 0 и дисперсию 1. Все случайные числа соответствуют гауссову распределению со средним значением 0 и распределены между -1 и 1. С другой стороны, распределение случайных чисел по умолчанию является «равномерным», и эти числа генерируются между 0 и 1.

Более усовершенствованная встроенная функция с именем `rand()` предоставляет множество опций для выбора распределений и установки ограничений для набора чисел.

```
--> rand(3,4)
```

```
ans =
```

```
0.2113249 0.3303271 0.8497452 0.068374
0.7560439 0.6653811 0.685731 0.5608486
0.0002211 0.6283918 0.8782165 0.6623569
```

```
--> rand(3,4)
```

```
ans =
```

```
0.7263507 0.2320748 0.8833888 0.9329616
0.1985144 0.2312237 0.6525135 0.2146008
0.5442573 0.2164633 0.3076091 0.312642
```

```
--> rand(1,1)
```

```
ans =
```

```
0.3616361
```

```
--> rand(1,1)
```

```
ans =
```

```
0.2922267
```

```
--> rand(2,3, 'uniform')
```

```
ans =
```

```
0.5664249 0.3321719 0.5015342
0.4826472 0.5935095 0.4368588
```

```
--> rand(2,3, 'normal')
```

```
ans =
```

```
-1.3772844 -0.1728369 -0.6019868
0.7915156 0.7629083 -0.0239455
```


Работа с элементами матриц

Каждый элемент матрицы характеризуется двумя числами: номером строки и номером столбца. Эти числа используются, чтобы точно определить элемент и оперировать этим. Они называются индексом элементов. Оператор присваивания может использоваться для установки значения по определенному индексу, чтобы создать новую матрицу с обновленными значениями. Следующий пример иллюстрирует эти понятия:

```
-->a = rand(3,4)
a =
0.38850 0.04070 0.44219 0.01109
0.67899 0.64673 0.48739 0.84484
0.37286 0.81418 0.76592 0.89999
-->a(2,1) // element at row 2 and column 1
ans =
0.67899
-->a(4,2) // element at row 4 and column 2
does not exist
Invalid index.
-->a(2,2)=0 // setting element at row 2
column 2 to 0
```

```
a =
0.38850 0.04070 0.44219 0.01109
0.67899 0. 0.48739 0.84484
0.37286 0.81418 0.76592 0.89999
```

Использование индексов для создания НОВЫХ векторов

```
f =  
  0.61618  0.38019  0.76251  0.40089  
  0.63517  0.3526   0.7284   0.55388  
  0.15988  0.91202  0.27883  0.27174  
--> f([1,2],[2,3])  
ans =  
  0.38019  0.76251  
  0.3526   0.7284
```

```
--> a = [1 4 1 3 1 4 1 4 2 4 5]  
a =  
  1.  4.  1.  3.  1.  4.  1.  4.  2.  4.  5.  
  
--> b = a([2 4 2 4])  
b =  
  4.  3.  4.  3.
```

Нарезка матриц

Матрицы можно разрезать на нужные части, используя индексы и оператор двоеточия. Если для нарезки предусмотрено $n:m$, создается новая матрица, в которой размещаются элементы с индексом от n до индекса m . Также Оператор «;» определяет новый столбец во время нарезки.

```
-->a = [1,2,3;4,5,6]
```

a =

1. 2. 3.

4. 5. 6.

```
-->B = [(1:3);(4:6);(7:9)]
```

B =

1. 2. 3.

4. 5. 6.

7. 8. 9.

```
-->c = [a;B]
```

c =

1. 2. 3.

4. 5. 6.

1. 2. 3.

4. 5. 6.

7. 8. 9.

```
-->a = 1:3 // array whose element start from 1 and  
ends at 3
```

a =

1. 2. 3.

```
-->A = [a,a] // New array with old array as its two  
element in a row
```

A =

1. 2. 3. 1. 2. 3.

```
-->A = [a;a] // New array with old array as its two  
elements in a column
```

A =

1. 2. 3.

1. 2. 3.

Стоит отметить, что оператор запятой (,) разделяет элементы строки, в то время как столбцы разделены точкой с запятой (;).

Добавление строк и колонок

Когда необходимо добавить всю строку или столбец матрицы, необходимо учитывать, что размер новой матрицы, которая используется для этой цели, должен соответствовать требованию строки и столбца.

В качестве примера, давайте определим массив A, B, D с размерами 2×2 , 1×2 и 2×1 соответственно. Матрица строк B может быть

вставлена как строка в A, а матрица столбцов D может быть вставлена как строка в A:

```
-->A = [4 -3; 5 -5]
A =
4. -3.
5. -5.
-->B = [-9,1]
B =
-9. 1.
-->size(A)
ans =
2. 2.
-->size(B)
ans =
1. 2.
-->C = [A;B]
C =
4. -3.
5. -5.
```

```
-->size(C)
ans =
3. 2.
-->D = [5;6]
D =
5.
6.
-->size(D)
ans =
2. 1.
-->E = [A,D]
E =
4. -3. 5.
5. -5. 6.
-->size(E)
ans =
2. 3.
```

Удаление строки и/или колонки матрицы

Строки и столбцы можно удалить, назначив им нулевые матрицы [].

Например, `() 1,:) = []` удаляет первую строку, а `() :, 1)` удаляет первый столбец матрицы:

```
-->A = rand(3,3)
```

```
A =
```

```
0.88 0.93 0.36
```

```
0.65 0.21 0.29
```

```
0.31 0.31 0.57
```

```
-->A (1,:)=[]
```

```
A =
```

```
0.65 0.21 0.29
```

```
0.31 0.31 0.57
```

```
-->A(:,1)=[]
```

```
A =
```

```
0.21 0.29
```

```
0.31 0.57
```

Конкатенация (соединение) по измерению

Конкатенация двух матриц вдоль измерения может быть получена с помощью `cat(dim, A, B, ...)`, где `dim` представляет размерность, а `A` и `B` -

входные матрицы.

```
-->A = rand(2,2) // 2x2 matrix is defined
A =
0.48 0.59
0.33 0.5
-->B = rand(2,2)
B =
0.44 0.63
0.27 0.41
-->cat(1,A,B) // A and B are concatenated along strings
(dimension=1)
ans =
0.48 0.59
0.33 0.5
0.44 0.63
0.27 0.41
-->cat(2,A,B) // A and B are concatenated along
columns
(dimension=2)
```

```
ans =
0.48 0.59 0.44 0.63
0.33 0.5 0.27 0.41
-->C = cat(3,A,B) // A and B are concatenated a long third
dimension where first element is A and second is B
C =
(:,:,1)
0.48 0.59
25 0.33 0.5
(:,:,2)
28 0.44 0.63
29 0.27 0.41
-->size(C) // new matrix has 3 dimensions i.e its size is
2X2X2
ans =
2. 2. 2.
```

Когда `cat(1, A, B)` записывается в командную строку, `A` и `B` объединяются по строкам, а `cat(2, A, B)` - объединяется по столбцам. В случае `cat(3, A, B)` создается новая матрица, первым элементом третьего измерения которой является матрица `A`, а вторым элементом является матрица `B`.

Верхняя и нижняя
треугольные матрицы

```
-->a = rand(3,3)
```

a =

```
0.40409 0.31513 0.02929
```

```
0.41941 0.78735 0.18410
```

```
0.24369 0.63817 0.26223
```

```
-->tril(a)
```

ans =

```
0.40409 0. 0.
```

```
0.41941 0.78735 0.
```

```
0.24369 0.63817 0.26223
```

```
-->triu(a)
```

ans =

```
0.40409 0.31513 0.02929
```

```
0. 0.78735 0.18410
```

```
0. 0. 0.26223
```

Единичная и нулевая
матрицы

```
-->ones(3,3)
```

ans =

```
1. 1. 1.
```

```
1. 1. 1.
```

```
1. 1. 1.
```

```
-->zeros(3,3)
```

ans =

```
0. 0. 0.
```

```
0. 0. 0.
```

```
0. 0. 0.
```

Диагональная матрица

```
-->diag([1 3])
```

ans =

```
1. 0.
```

```
0. 3.
```

```
-->diag([1 3 4 6 7])
```

ans =

```
1. 0. 0. 0. 0.
```

```
0. 3. 0. 0. 0.
```

```
0. 0. 4. 0. 0.
```

```
0. 0. 0. 6. 0.
```

```
0. 0. 0. 0. 7.
```

Скалярное произведение векторов

$$\vec{A}_1 = x_1 \vec{i} + y_1 \vec{j} + z_1 \vec{k}$$

-->a1=[1 2 3];

$$\vec{A}_2 = x_2 \vec{i} + y_2 \vec{j} + z_2 \vec{k}$$

-->a2=[2 3 4];

-->a1*a2'

ans =

$$\vec{A}_1 \cdot \vec{A}_2 = x_1 \times x_2 + y_1 \times y_2 + z_1 \times z_2$$

20.

Дискретная математика

Простые числа

-->x = 30;

-->y = primes(x)

y =

2. 3. 5. 7. 11. 13. 17. 19. 23. 29.

factor выводит множители заданного

числа - если n - заданное число, то factor

создает массив простых чисел a, b, c ... z,

такой что

-->x=3*10e4;

-->x=9999;

-->y=factor(x)

y =

13 3. 3. 11. 101.

-->y=factor(x)

y =

2. 2. 2. 2. 2. 3. 5. 5. 5. 5. 5.

$$n = \prod(a, b, c \dots z)$$

Программирование

Циклы на основе If и select

Оператор if позволяет выполнить некоторый блок инструкций в случае истинности заданного условия. В качестве условия может выступать переменная логического типа или любое выражение, результатом вычисления которого является логическое значение. Блок выполняемых инструкций завершается ключевым словом end.

```
if ( %t ) then  
disp ( "Привет! " )  
end
```

в консоль будет
выведено
Привет!

```
i = 2  
if ( i == 2 ) then  
disp ( "Привет! " )  
else  
disp ( "До встречи! " )  
end
```

```
if ( %f ) then  
disp ( "Привет! " )  
else  
disp ( "До встречи! " )  
End
```

Довстречи !

```
i = 2  
if ( i == 1 ) then  
disp ( "Привет! " )  
elseif ( i == 2 ) then  
disp ( "До встречи! " )  
elseif ( i == 3 ) then  
disp ( "Чао! " )  
else  
disp ( "Оревуар! " )  
end
```

```
i = 2  
select i  
case 1  
disp ( "Один" )  
case 2  
disp ( "Два" )  
case 3  
disp ( "Три" )  
else  
disp ( "Иное значение" )  
end
```

while

Цикл while определяет логическое условие и, пока он не будет выполнен, он выполняет блок кода. Синтаксис цикла while следующий:

1 while condition

2 BODY

3 endwhile

Некоторые циклы могут выполняться бесконечно, поэтому их называют бесконечными циклами. Попробуйте код while.sce, инициализируя $i = 0$ вместо $i = 1$. В этом случае значение i всегда будет 0 внутри цикла, а условие $i < 20$ всегда будет истинным.

Следовательно, код будет работать вечно, если его не прерывать. Бесконечные циклы могут быть прерваны комбинацией клавиш Ctrl + C на клавиатуре ASCII.

```
i = 1
```

```
while i<20
```

```
disp(i);
```

```
i = i*2;
```

```
end
```

```
-->exec('.....while.sce', -1)
```

```
1.
```

```
2.
```

```
4.
```

```
8.
```

```
16
```

for

Цикл for используется для выполнения вычислений в списке известных значений. Синтаксис цикла for следующий:

```
1 for variable = vector  
2 BODY  
3 end
```

```
for i = 1:10  
square_root = sqrt(i);  
disp(square_root)  
end
```

```
disp("Program finished")
```

Executing for1.m yields:

```
--->exec('.....for.sce', -1)
```

```
1.  
1.4142136  
1.7320508  
2.
```

Функции

Функция - это набор кодов, которые могут быть вызваны при необходимости. В результате он может быть определен отдельно либо в своем собственном файле, либо в теле программы.

Файл сценария похож по своей природе. Файл сценария хранит последовательность команд, которые должны быть выполнены. Кажется, что функция и скрипт имеют схожую природу, но, в отличие от MATLAB и Octave, Scilab предоставляет отдельные виды файлов для каждого из них. Это основано на характере их поведения в основной программе Scilab.

В то время как файл сценария (с расширением .sce) является исполняемым файлом, файл функции (с расширением .sci) хранит набор инструкций. Функциональный файл ведет себя как черный ящик, в который подается ввод, а на выходе - результат. С другой стороны, файл сценария меняет свое поведение в соответствии с входными значениями. Любые входные данные, к которым обращается файл скрипта, берутся из рабочей области Scilab. Выходные данные из файла сценария помещаются в рабочую область Scilab. Семантика входных данных, локальных переменных, видна только внутри функции.

Определение функции следует этому синтаксису:

```
1 function [o1,o2,...] = function_name (i1,i2,...)
2 statement_1
3 statement_2
4 ...
5 statement_n
6 endfunction
```

Здесь ключевое слово function определяет типы объектов как функции. Затем определяется набор переменных, которые эта функция должна возвращать (o1, o2, ..., означающие output1, output2, ...). Далее следует оператор =, а затем имя функции. Функция принимает входные данные (i1, i2, ..., обозначающие input1, input2, ...) для создания выходных данных в соответствии с вычислениями, определенными в ее теле. Затем идет основная часть функции, в которой следуют команды для выполнения назначения функции. Последняя команда, endfunction, означает конец функции.

Примеры

```
function y = fn1(a,b)
y = a^2-b^2;
Endfunction
```

Обратите внимание, что расширение этого кода - .sci. Этот файл должен сначала быть загружен в рабочую область Scilab. Нам нужно сначала указать полный путь файла к встроенной функции `exec()`, а затем использовать функцию, указав ее имя с входными аргументами:

```
--->exec('.....fn1.sci', -1)
--->fn1(2,3)
ans =
-5.
```

Рекомендуется определять программу как группу файлов функций и вызывать их в главной программе, хранящейся в виде файла сценария. Этот модульный подход облегчает отладку и тестирование кода. Функция также может возвращать более двух значений

fn2.sci

```
function[y1,y2,y3] = fn2(x,y)
```

```
y1 = x - y;
```

```
y2 = x + y;
```

```
y3 = y - x;
```

```
endfunction
```

```
---->exec('.../fn2.sci', -1)
```

```
---->[a,b,c] = fn2(2,3)
```

```
c =
```

```
1.
```

```
b =
```

```
5.
```

```
a =
```

```
-1.
```

Встроенная функция - это короткая функция, которая может быть определена без использования скелета функции

```
---->deff('[x] = mult(y,z)', 'x=y*z')
```

```
---->mult(2,3)
```

```
ans =
```

```
6
```

Графики

Без визуализации численные вычисления трудно понять и в конечном итоге анализировать. Создание высококачественных сложных графиков, дающих содержательный анализ числовых результатов, было проблемой для ученых всего мира. Многие коммерческие программы удовлетворяют эту потребность.

Scilab также предоставляет это средство довольно эффективно. Его особенности построения графиков включают выбор из различных типов графиков в 2D и 3D режимах; выводить дополнительную информацию, такую как заголовки, помеченные оси, сетки и метки данных; и написание уравнений и другой важной информации о данных.

Функции linspace и meshgrid

Встроенные функции linspace и logspace используются для графического получения точек на отрезке.

```
1 --> a = linspace(1,2,5)
```

```
2 a =
```

```
3 1. 1.25 1.5 1.75 2.
```

```
4 --> a = linspace(1,10,10)
```

```
5 a =
```

```
6 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10.
```

Если мы хотим получить поверхность в виде точек сетки с равным интервалом, мы используем встроенную функцию meshgrid следующим образом:

```
1 -> a = 1: 0,1: 100;
```

```
2 -> b = 1: 0,1: 100;
```

```
3 -> [X, Y] = сетка (a, б);
```

Здесь [X, Y] - двумерный массив, содержащий два числа для каждого элемента. Один из элементов берется из массива a, а другой элемент - из массива b.

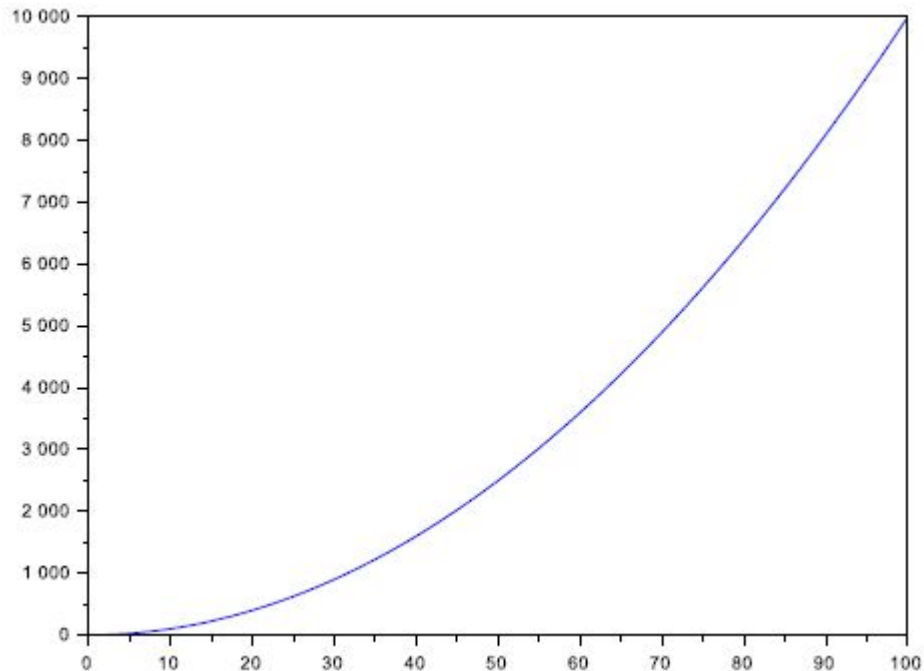
Простейшие графики

```
1 >> x = linspace(0,100,100);
```

```
2 >> y = x.^2
```

```
3 >> plot(x,y)
```

Сначала мы определяем переменную x и размещаем 100 точек данных с равным интервалом от 0 до 100. Это составляет матрицу 1×100 . Используя скалярную операцию возведения в степень, мы определяем переменную y как x^2 . Важно отметить, что эта операция определяется с помощью поэлементного оператора, так что каждый элемент матрицы x управляется оператором. Без этого подхода массив пришлось бы возвести в квадрат, то есть умножить на себя. Это приведет к ошибке, поскольку матрица $n \times m$ может быть умножена только на матрицу $m \times n$. Наконец, можно использовать функцию `plot()`, которая принимает два аргумента в качестве точек данных по осям x и y .



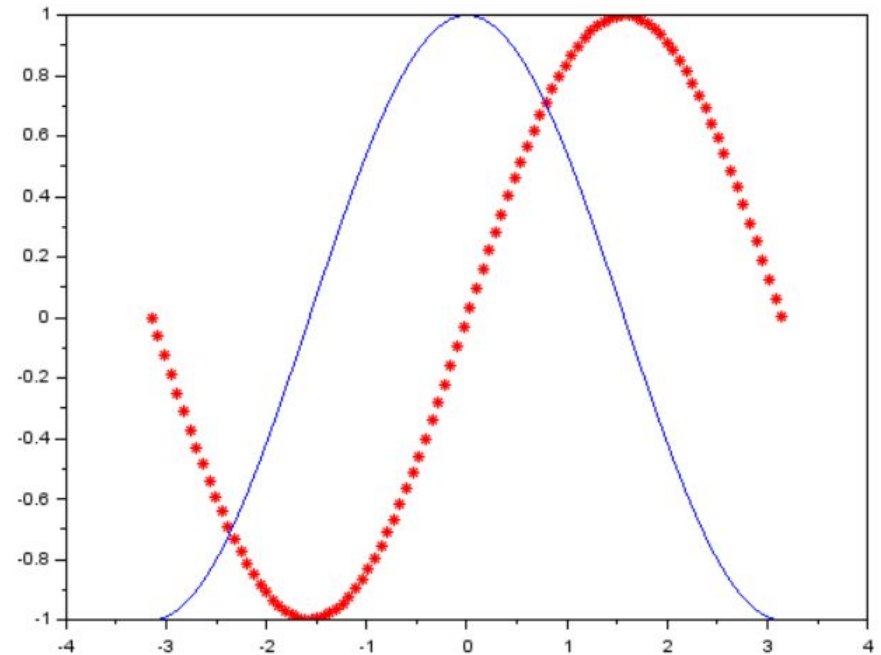
Ввод команды `help plot` или `help 'plot'` в командной строке дает полезную информацию об этой замечательной функции, написанной для построения двумерных данных.

По умолчанию последовательные графики накладываются. Чтобы очистить предыдущий сюжет, используйте `clf()`.

Несколько графиков на одном поле

```
--> x = linspace(-%pi,%pi,100);  
plot(x,sin(x),'r*')  
plot (x,cos(x),'b-')
```

r* маркер * красный
b-маркер - голубой



Функции `plot2d()`, `plot2d2()`, `plot2d3()`, and `plot2d4()`

Команда `plot2d` работает аналогично команде `plot`. Кроме того, существуют некоторые другие варианты этих функций относительно специализированного способа построения графиков:

1. `plot2d2` такой же, как `plot2d`, но предполагается, что кривая быть кусочно-постоянным
2. `plot2d3` такой же, как `plot2d`, но кривая построена с вертикальными полосами
3. `plot2d4` такой же, как `plot2d`, но кривая построена со стрелками

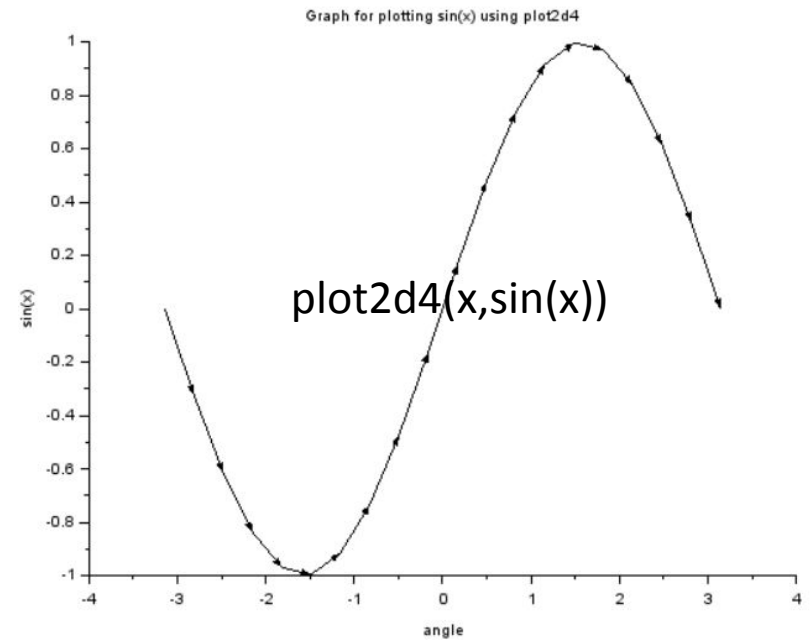
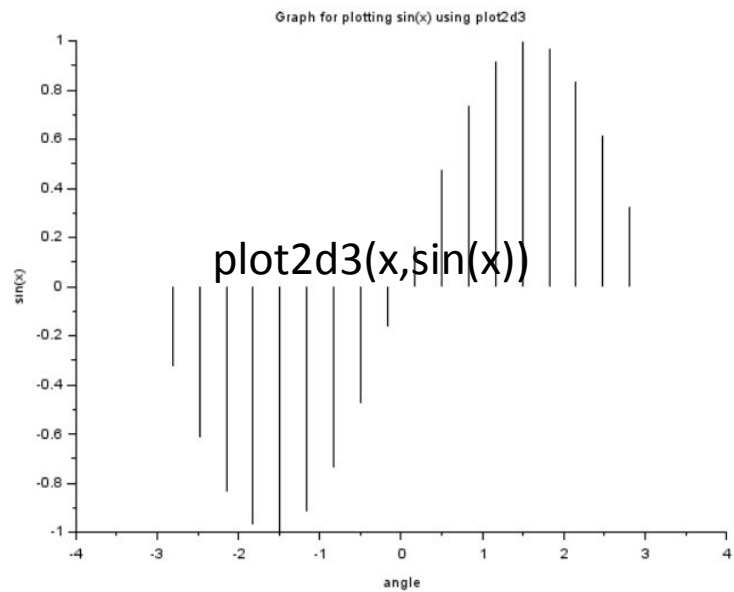
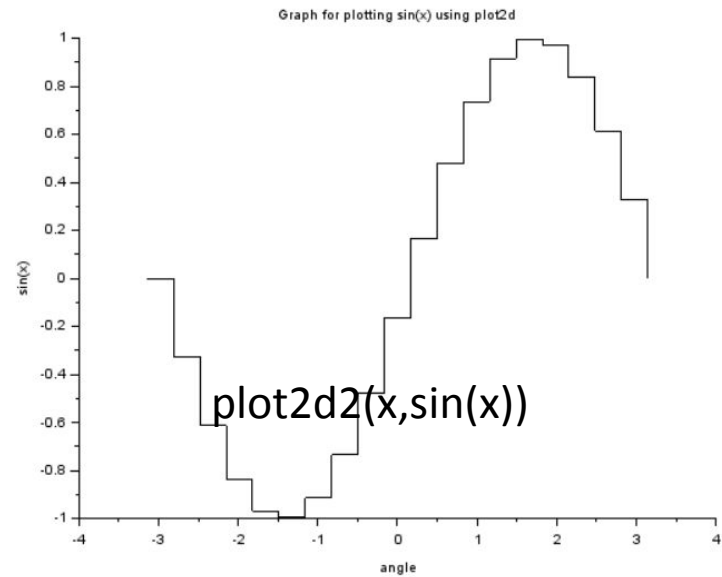
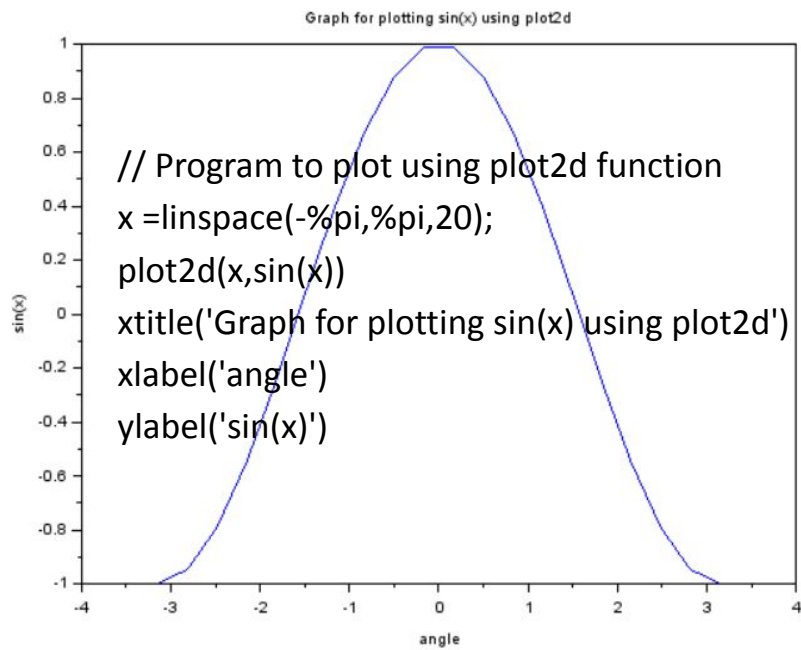
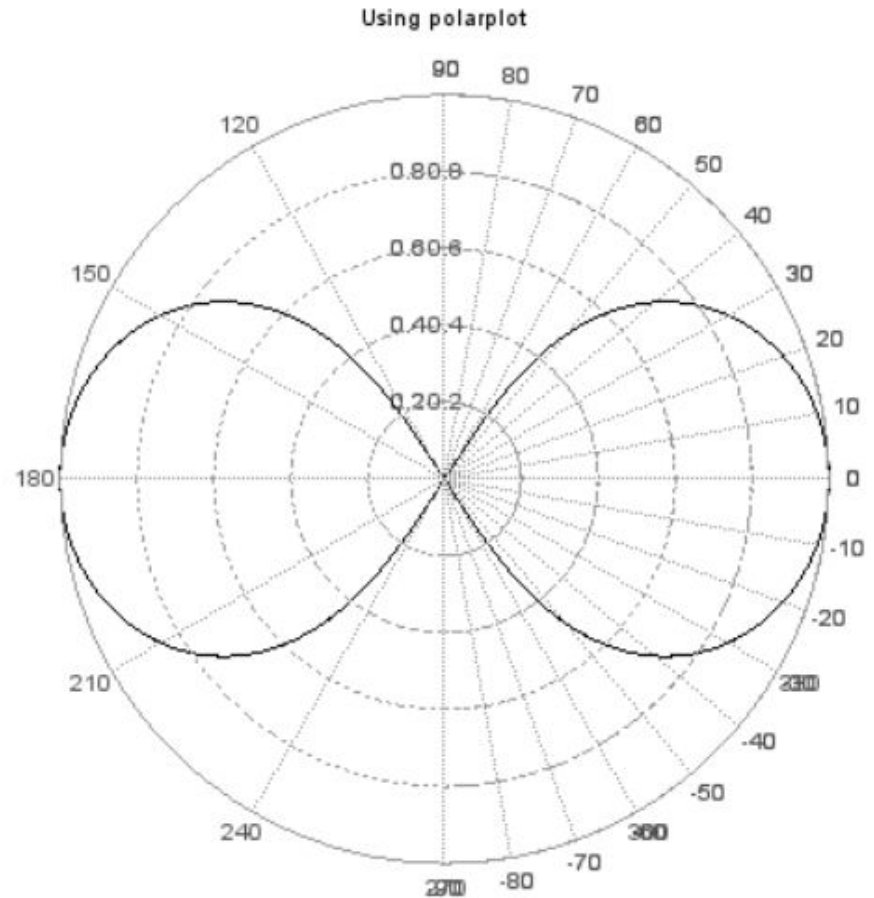


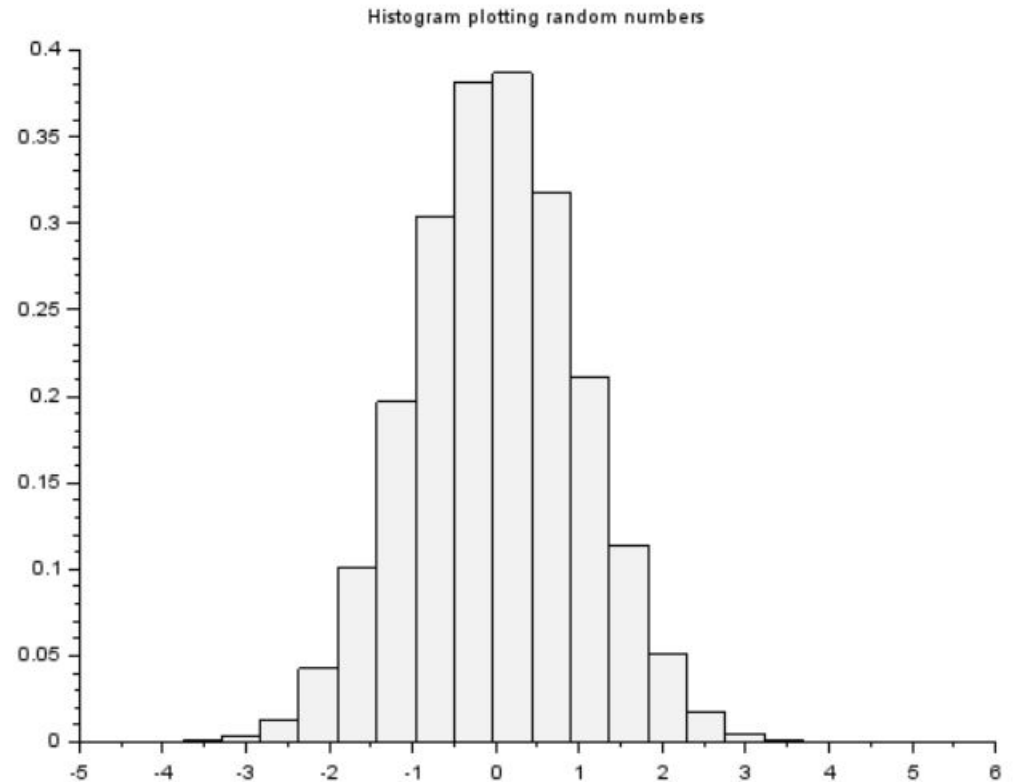
График в полярной системе координат

```
// Program to plot using  
polarplot function  
theta=0:0.01:3*%pi;  
polarplot(sin(2*theta),cos((2*th  
eta)))  
xtitle('Using polarplot')
```



Гистограмма

```
// Program to plot histogram  
n = rand(1,10e4,'normal'); //  
normalized gaussian random sample  
bins=20  
histplot(bins,n)  
title('Histogram plotting random  
numbers')  
xlabel('x')  
ylabel('y')
```



Функция GRAYPLOT

Иногда нам нужно увидеть значение двумерной функции на двухмерном графике. Это делается путем визуализации компонентов функционального значения z по координатам x и y . Grayplot строит графическое окно для 2D-графика поверхности, заданной z на сетке, определяемой x и y . Каждый прямоугольник на сетке заполнен серым или цветным уровнем в зависимости от среднего значения z по углам прямоугольника. На рисунках показано значение цвета в соответствии со значением z (которое в данном случае задается случайным числом).

```
// Program to plot using grayplot function
```

```
x = -10:10;
```

```
y = -10:10;
```

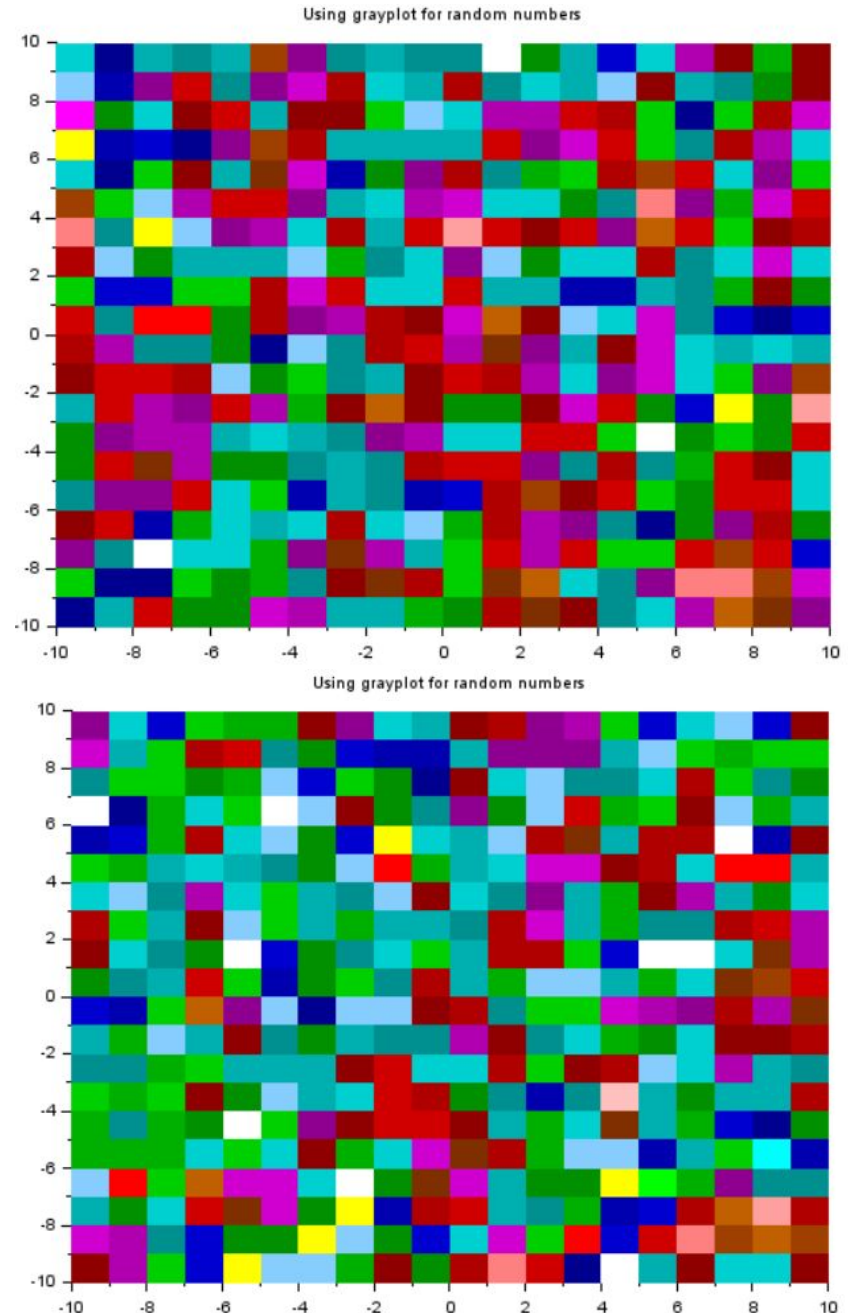
```
m = rand(21,21);
```

```
grayplot(x,y,m)
```

```
xtitle('Using grayplot for random numbers')
```

```
xlabel('x')
```

```
ylabel('y')
```



Функция CHAMP

В научных и инженерных исследованиях строятся векторные поля. Как в теоретических, так и в практических исследованиях иногда важно построить векторные поля в соответствии с заданным уравнением. Векторы лучше всего описываются стрелками. Чтобы обеспечить это средство, `champ()` рисует двухмерное векторное поле. Длина стрелок пропорциональна напряженности поля. Добавление цвета (указывающего интенсивность поля) к стрелкам обеспечивает лучшее визуальное представление.

```
// Program to plot using champ function for plotting
```

```
a vector field
```

```
x = linspace(-1,1,20);
```

```
y = linspace(-1,1,20);
```

```
[X,Y] = meshgrid(x,y);
```

```
fy = 3.*Y;
```

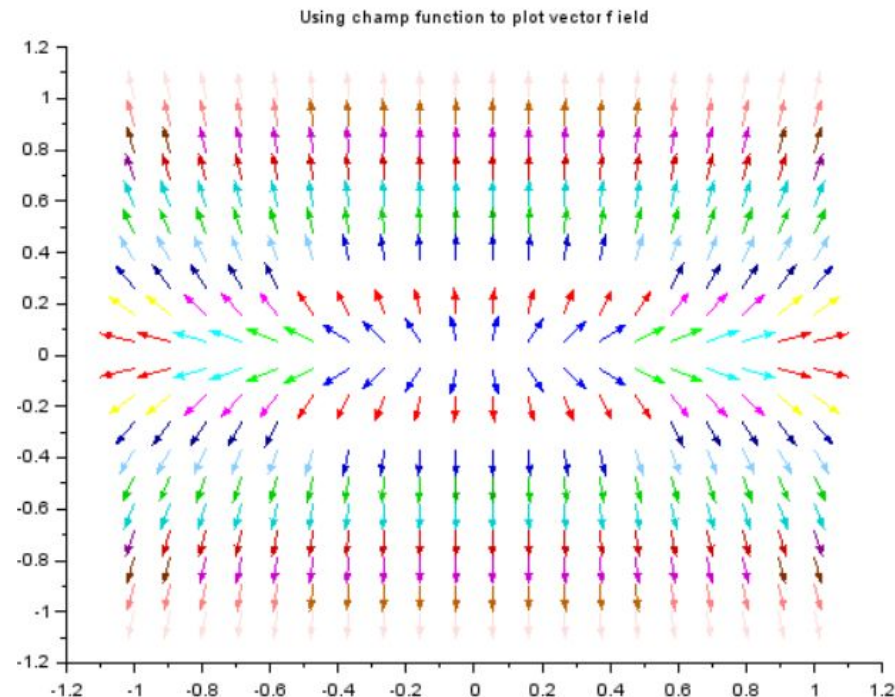
```
fx = 0.5.*X;
```

```
champ1(x,y,fx',fy')
```

```
xtitle('Using champ function to plot vector field')
```

```
xlabel('x')
```

```
ylabel('y')
```

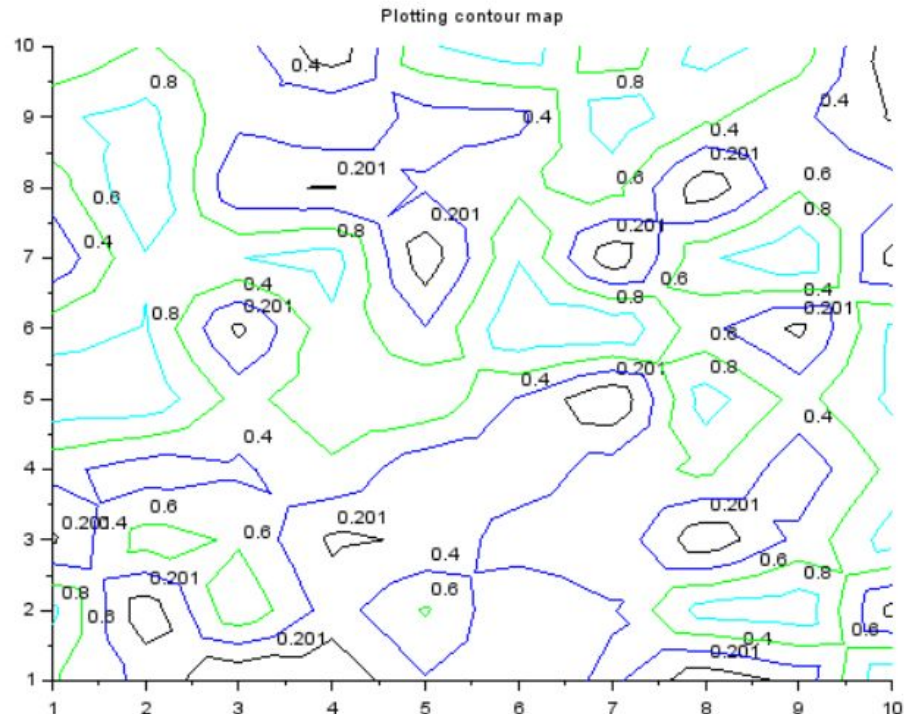


Контурные графики

Контурные карты часто используются для визуализации проекции функции на двумерную поверхность. Они используются в различных областях науки и техники, особенно в геофизике, где информация о параметрах измерения, таких как температура, давление и влажность, проецируется на карту. Кроме того, контурные карты также используются для визуализации 2D математической проекции на плоскость. Для этой цели Scilab предоставляет встроенную функцию `contour2d()`.

По сути, функция принимает значения x , y и z и значение для количества уровней. Код генерирует случайные числа и наносит их на график согласно их значению на двумерной матрице.

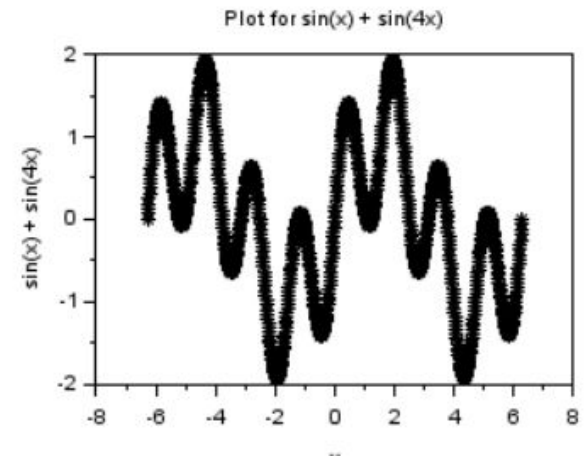
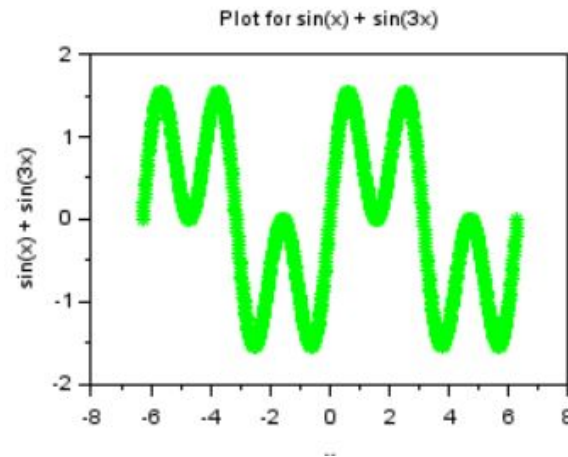
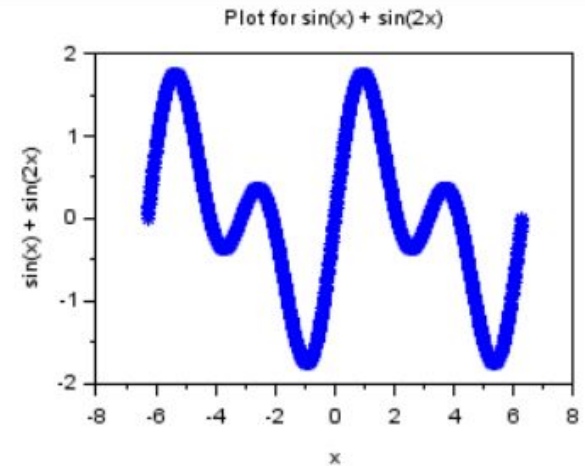
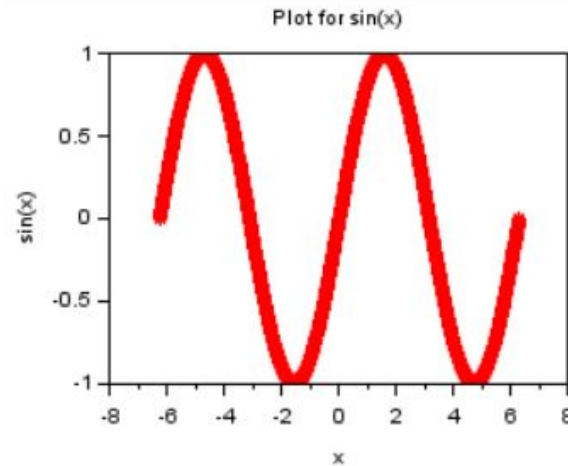
```
// Program to plot 2D contours
x = 1:10;
y = 1:10;
z = rand(10,10);
level_number = 4;
contour2d(x,y,z, level_number)
title('Plotting contour map')
xlabel('x')
ylabel('y')
```



Несколько графиков на 1 рисунке

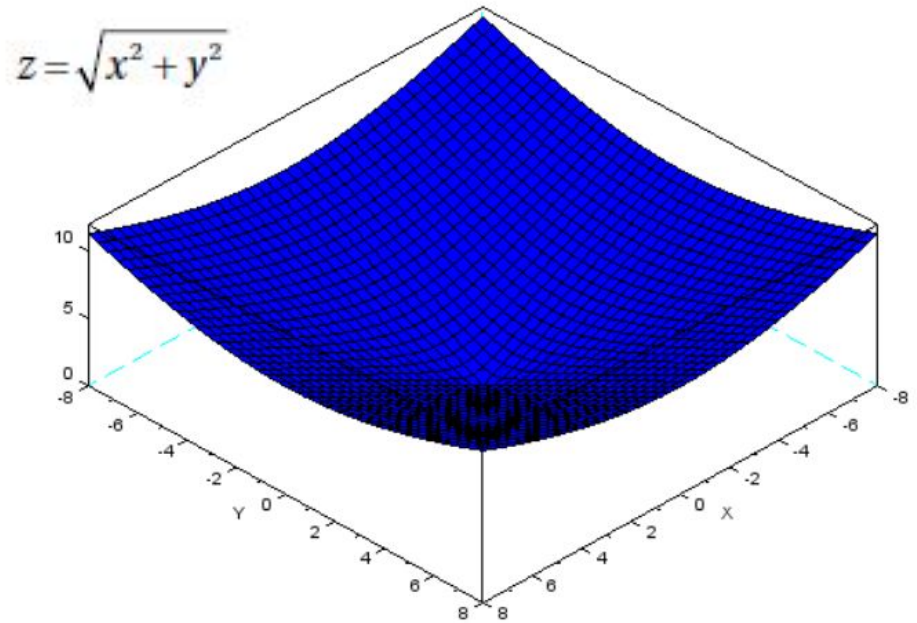
Команда `subplot (row, column, index)` используется для отдельного построения нескольких графиков на одном и том же рисунке. `Subplot (2,2,4)` означает, что график будет находиться во втором ряду, втором столбце и четвертом индексе.

```
// Program to show usage of subplot function
// subplot function produces a figure as a matrix
x = linspace(-2*pi,2*pi,1000);
//1st figure of a 2X2 figure matrix
subplot(221)
plot(x,sin(x),'r*')
title('Plot for sin(x)')
xlabel('x')
ylabel('sin(x)')
//2nd figure of a 2X2 figure matrix
subplot(222)
plot(x,sin(x)+sin(2.*x),'b*')
title('Plot for sin(x) + sin(2x)')
xlabel('x')
ylabel('sin(x) + sin(2x)')
//3rd figure of a 2X2 figure matrix
subplot(2,2,3)
plot(x,sin(x) + sin(3.* x),'g*')
title('Plot for sin(x) + sin(3x)')
xlabel('x')
ylabel('sin(x) + sin(3x)')
//4th figure of a 2X2 figure matrix
subplot(2,2,4)
plot(x,sin(x) + sin(4.*x),'k*')
title('Plot for sin(x) + sin(4x)')
xlabel('x')
ylabel('sin(x) + sin(4x)')
```



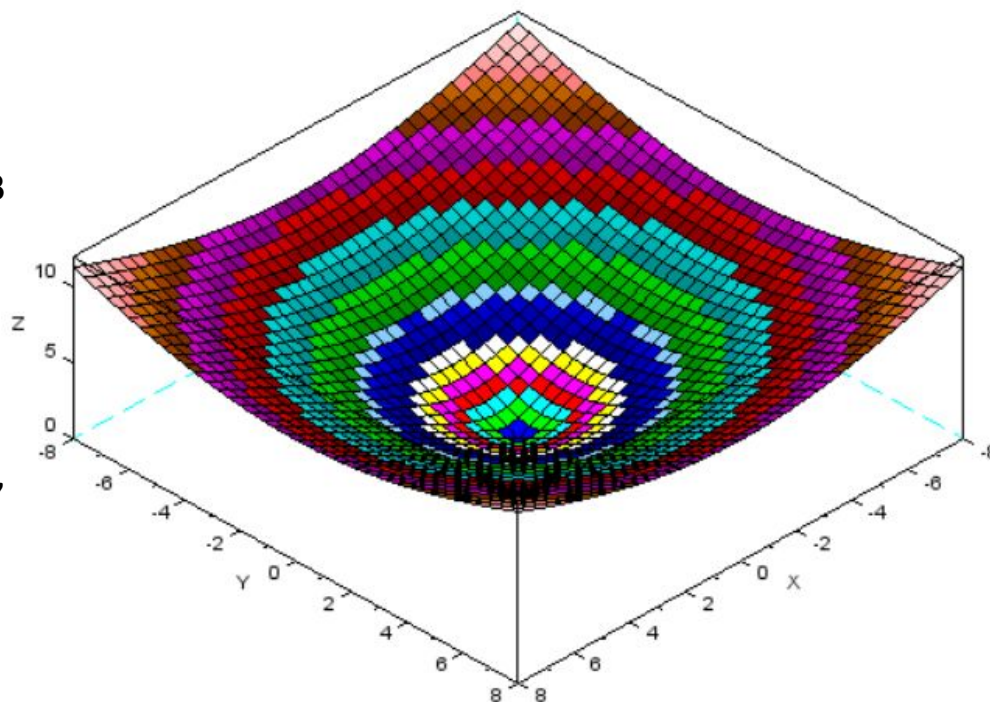
Трёхмерные графики

```
// Program to plot 3D graph using  
plot3d  
a = linspace(-8,8,41)';  
b = linspace(-8,8,41)'  
[xx, yy] = meshgrid(a,b);  
c = sqrt(xx.^2 + yy.^2)+%eps;  
plot3d(a,b,c)
```



Трехмерные графики цветные plot3d1()

Цветовое кодирование, предоставляемое plot3d1 (), становится дополнительной функцией в некоторых случаях. Контуры на трехмерном графике дают форму областей проекции, в которых значение измеряемой системы одинаково. Например, предположим, что на рис. представлено электрическое поле вблизи заряженной частицы, расположенной в ее центре. Цвет представляет зону в 3D, где сила на этой заряженной частице будет в определенном диапазоне.



plot3d(a,b,c)

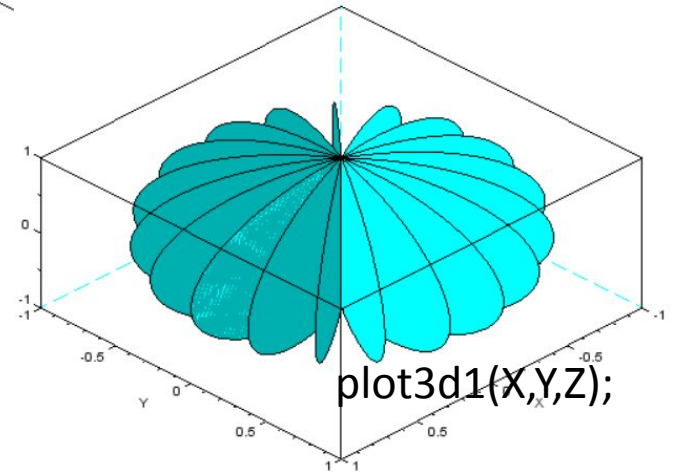
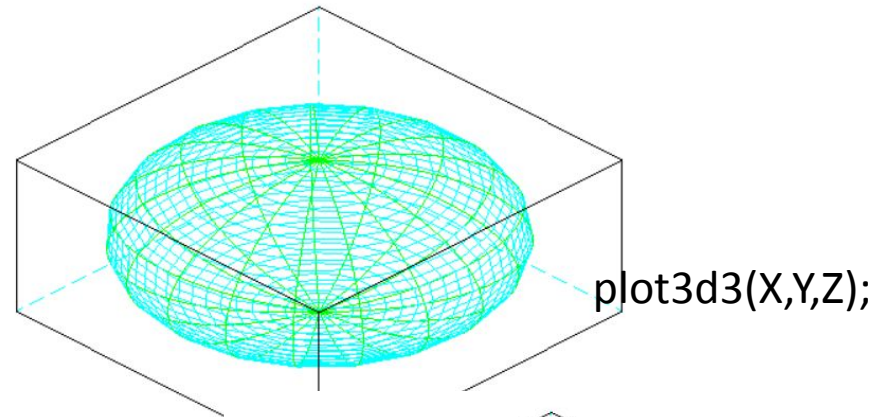
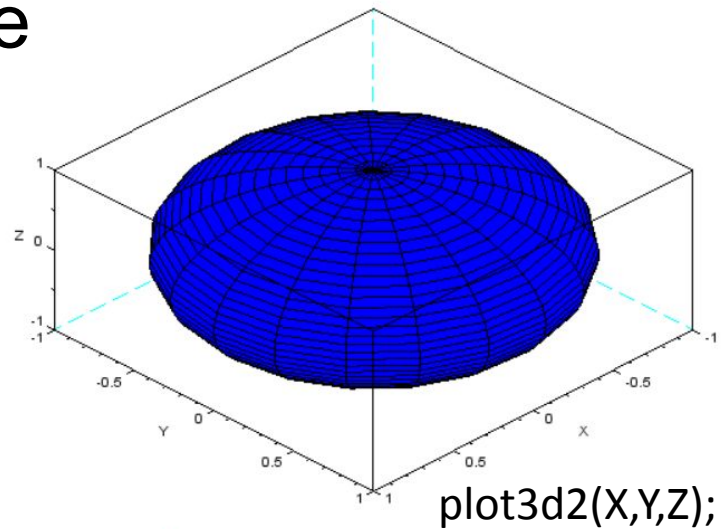
Трёхмерные графики цветные

plot3d2(), plot3d3()

Создает трехмерный график с использованием прямоугольных граней. Важно отметить, что более мелкая сетка сделает фигуру с лучшим разрешением ее 3D-функции. Для более тонкой сетки аргументы `linspace()` должны быть определены с меньшим размером шага. Однако в то же время наличие более мелкой сетки увеличивает время вычислений. Таким образом, 3D-рендеринг является сложной вычислительной задачей, но иногда это желательно. Выбор параметров зависит от требований анализа данных. Когда требуется более точное разрешение трехмерных элементов поверхности, пользователи должны стремиться к более высокой мощности рендеринга (что напрямую приводит к высоким требованиям к вычислительной мощности).

```
// Program to plot 3D graph using  
plot3d2
```

```
u = linspace(-%pi/2,%pi/2,40);  
v = linspace(0,2*%pi,20);  
X = cos(u)*cos(v);  
Y = cos(u)*sin(v);  
Z = sin(u)*ones(v);  
plot3d2(X,Y,Z);
```



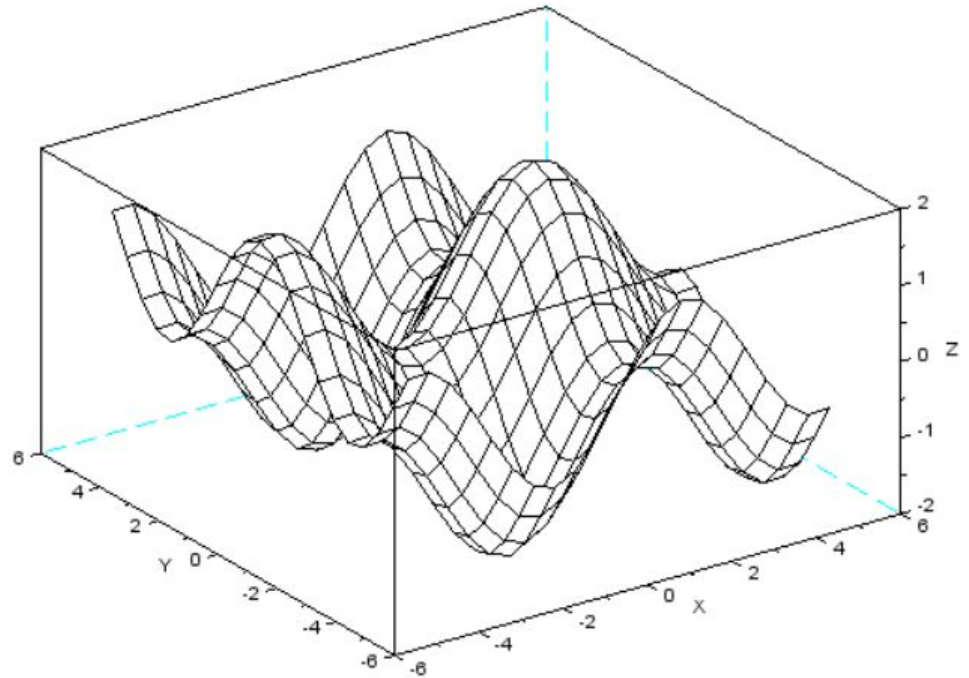
Сетчатые (mesh) графики

Сетчатые графики создаются путем соединения точек сетки, определяемых координатами. Здесь двумерная система координат генерируется и сохраняется в двух массивах с именами X и Y. Для этих точек, определяющих x и y, уравнение поверхности записывается:

$$Z = \sin(x) + \cos(y)$$

// Program to explain the usage of mesh function

```
[X,Y] = meshgrid(-5:0.5:5, -5:0.5:5);  
Z = sin(X)+cos(Y);  
mesh(X,Y,Z);
```



Визуальное моделирование в Scilab: Xcos

(краткое руководство для начала
работы)

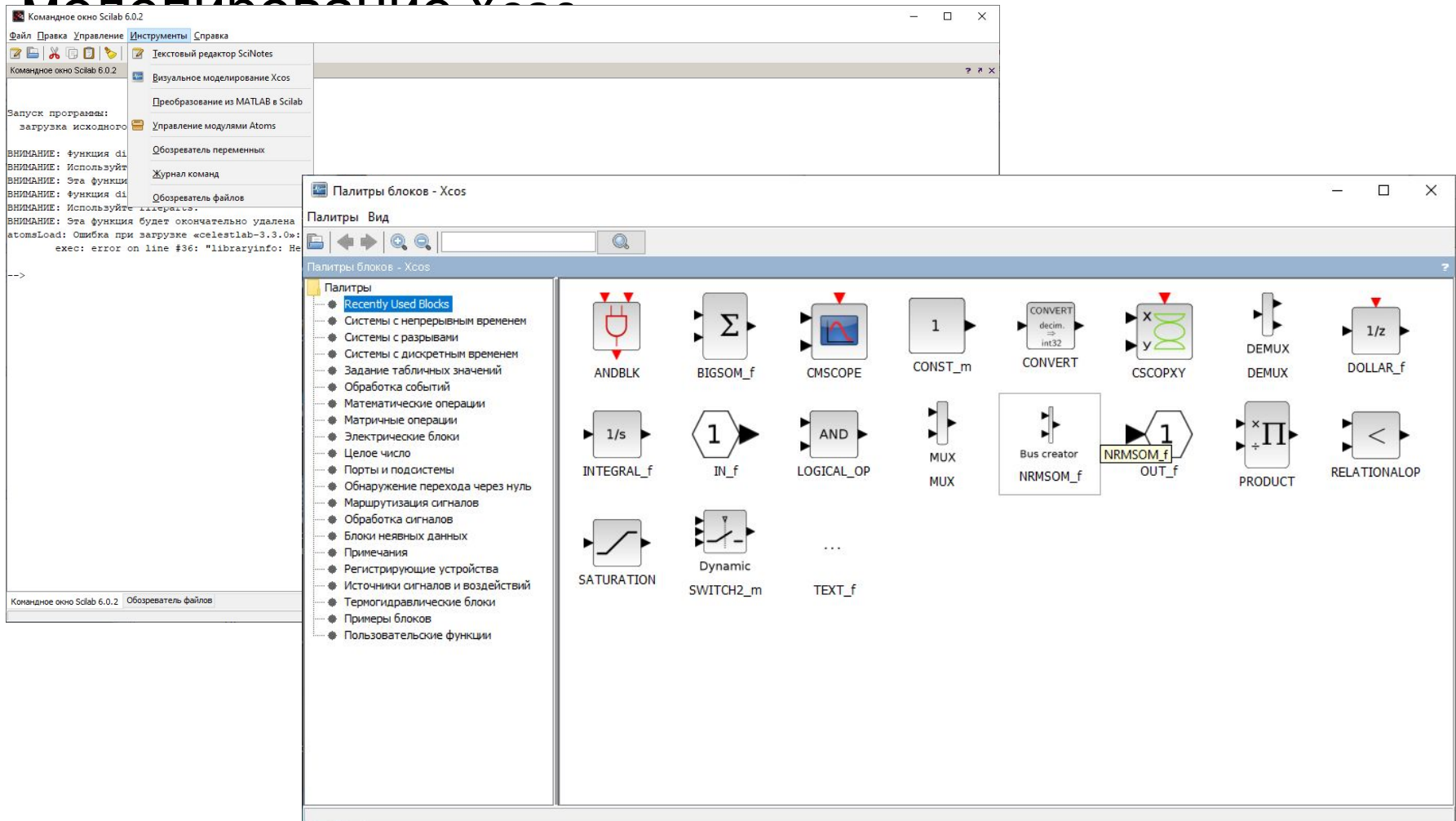
По материалам Основы теории систем
связи с подвижными объектами.
ПГУТИ. Чингаева А. М.

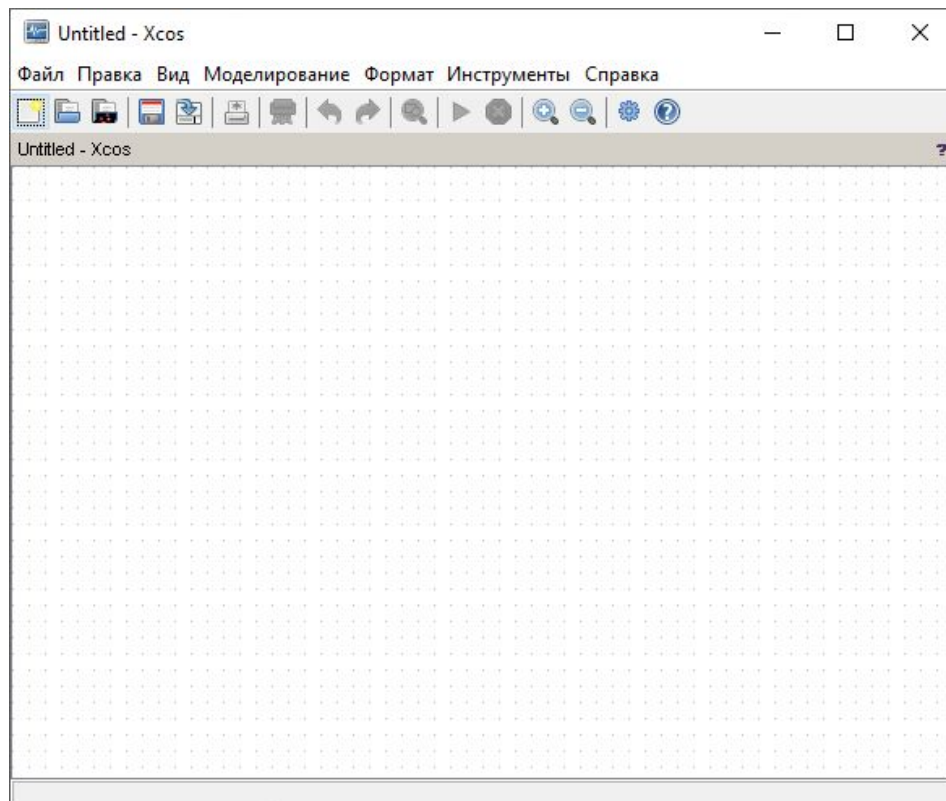
XCOS

- XCOS является форком (ответвлением) Scicos (Scilab Connected Objects Simulator)
- Исторически сложилось, что у MATLAB была одна особенность, которая выделяет его среди других, когда речь заходит об удобстве обучения информатике - Simulink. Simulink не является частью базовой MATLAB, поэтому его необходимо приобретать отдельно. С Simulink вы можете составить программу, визуально подключив блок кодов.
- Scilab предоставляет эквивалент Simulink XCOS. XCOS - это набор инструментов для моделирования и симуляции динамических (непрерывных и дискретных) систем. Хотя его основная цель состоит в моделировании динамических систем, XCOS также может использоваться для генерации сигналов, визуализации данных и простых алгебраических операций.
- При моделировании систем, работающих с взаимосвязанными компонентами с непрерывным и дискретным временем, XCOS идеально подходит для моделирования и симуляции. XCOS является одним из самых мощных инструментов Scilab для новых пользователей.
- Поскольку это среда программирования на основе графического интерфейса, Scilab просто требует, чтобы пользователи соединяли блоки для написания кода. Эти блоки кода можно перетаскивать и подключать по желанию пользователя. Поток информации в коде определяется направлениями и использованием соединителей между блоком кода. Блоки фактически являются визуальным представлением обобщенного кода, чьи входы и выходы могут быть изменены в соответствии с использованием.
- XCOS обеспечивает модульный подход для моделирования сложных систем, используя визуальный редактор блок-схем. Модульный подход делает процесс разработки симуляции довольно простым, поскольку пользователи могут просто заменить один модуль другим, чтобы протестировать систему в различных сценариях. Модели XCOS компилируются и моделируются за один прогон. Полученные математические уравнения объединяются числовым решателем с настраиваемыми параметрами.

Начало работы

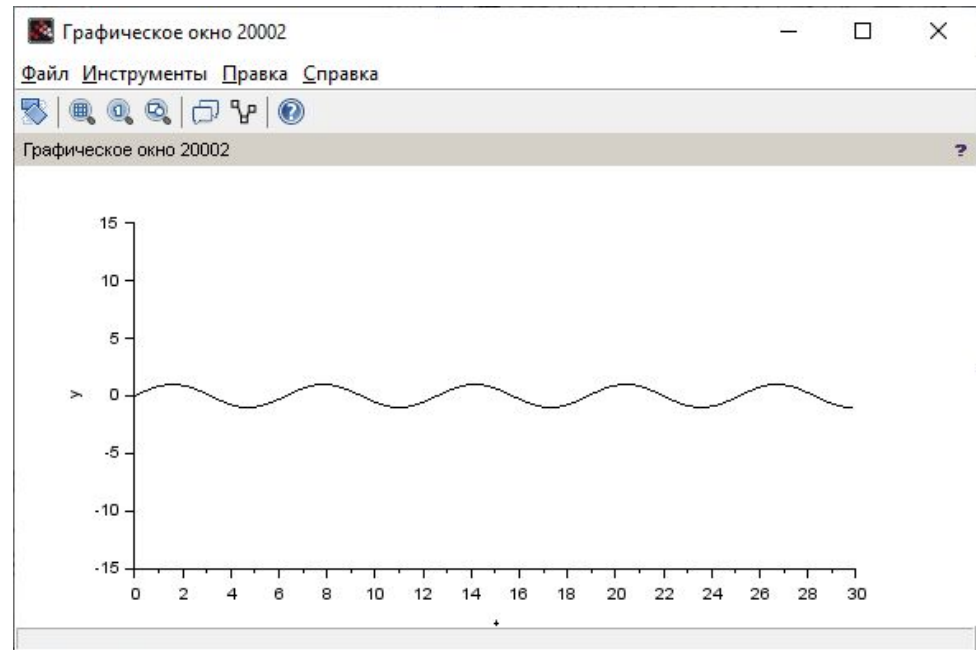
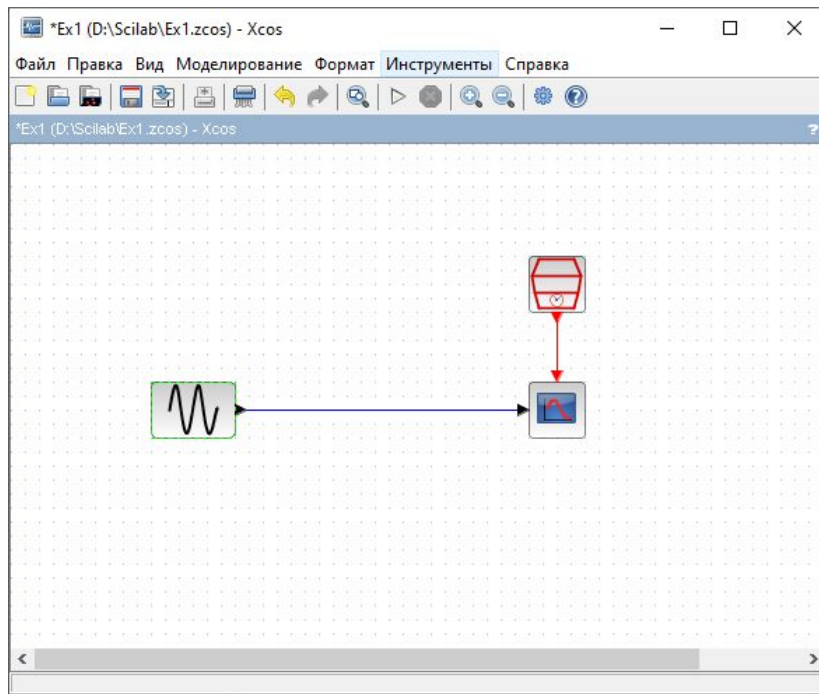
Для построения блочной диаграммы используется графический редактор Xcos: Главное меню → Инструменты → Визуальное





После запуска Xcos обычно отображаются два окна: окно Палитры блоков и окно графического редактора. Если окно Палитры блоков отсутствует, его необходимо отобразить, выбрав Вид → Палитры блоков в главном меню окна графического редактора Xcos.

В окне Палитры блоков представлены группы блоков, из которых строится диаграмма Xcos. Выделив нужную группу левым кликом мыши (ЛКМ), вы увидите графические изображения входящих в неё блоков. Правый клик мыши (ПКМ) на изображении блока вызывает контекстное меню, через которое можно добавить выбранный блок к диаграмме или вызвать справку по данному блоку. Добавить выбранный блок к диаграмме можно также просто перетаскив его мышью.



Выберите палитру Источники сигналов и воздействий и перетащите в окно диаграммы блоки GENSIN_f (генератор синусоиды) и SampleCLK (счётчик времени). Затем перейдите к палитре Регистрирующие устройства и добавьте к диаграмме блок CSCOPE (осциллограф). Соедините выход генератора с чёрным входом осциллографа, а выход счётчика с красным входом осциллографа. Счётчик используется для периодической активации осциллографа с заданным временным интервалом.

Соединительные линии проводятся от выхода к входу (или наоборот) при зажатой ЛКМ. Разрешённые соединения подсвечиваются зелёным. Для удаления соединительной линии выделите её и нажмите Delete.

Для запуска моделирования выберите Моделирование → Выполнить в главном меню редактора или просто нажмите на соответствующую кнопку в панели инструментов. Для остановки моделирования выберите Моделирование → Завершить или же воспользуйтесь соответствующей кнопкой в панели инструментов.

Сохранение и загрузка. Сохраните текущую диаграмму, выбрав Файл → Сохранить в главном меню окна графического редактора. Сохраняйтесь чаще!

Основные понятия

Любая диаграмма Xcos содержит два типа соединений: регулярные (чёрные) и управляющие (красные). По регулярным соединениям передаются сигналы данных, а по управляющим сигналы активации. Блоки также могут иметь регулярные и управляющие входы и выходы. Как правило регулярные входы и выходы блоков располагаются слева и справа от изображения блока, а управляющие сверху и снизу.

В качестве основного источника сигналов активации мы будем использовать счётчик времени SampleCLK. Его особенность заключается в том, что все такие счётчики внутри одной диаграммы синхронизированы.

Если блок имеет управляющий вход, то он срабатывает каждый раз, когда на него поступает сигнал активации. Поведение блока, не имеющего управляющего входа, определяется его внутренними параметрами.

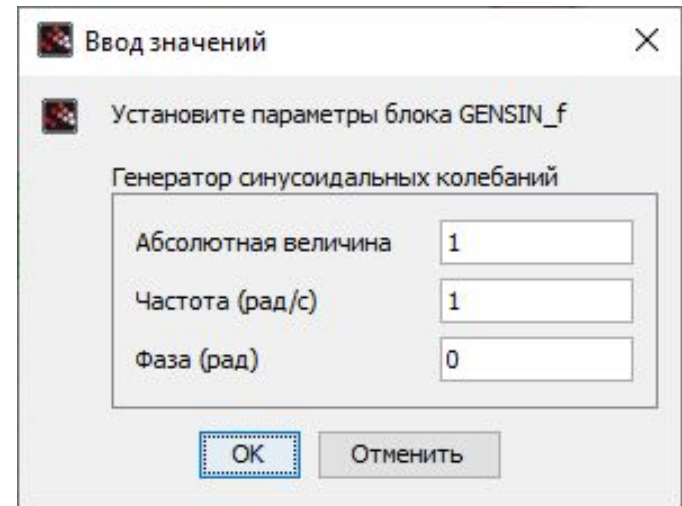
Блок может наследовать сигнал активации от предыдущего блока, т.е. срабатывать при поступлении на его регулярный вход сигнала данных. Также, блок может быть активным всегда (например, генератор гармонического сигнала).

Блок без входов, не получающий сигналов активации и не объявленный активным всегда, является константным блоком. Выход такого блока не зависит от времени, а сам блок срабатывает лишь единожды, на этапе инициализации. После срабатывания блока значения на его выходе остаются неизменными до следующего момента активации.

Таким образом, выходные значения константных блоков не изменяются никогда, как бы часто вы к ним ни обращались. Выходные значения блоков, активных всегда, будут меняться так часто, как часто вы будете их запрашивать. В остальных случаях выходные значения будут меняться так часто, как часто блок будет получать сигнал активации: от входа активации или наследовать от предыдущего блока.

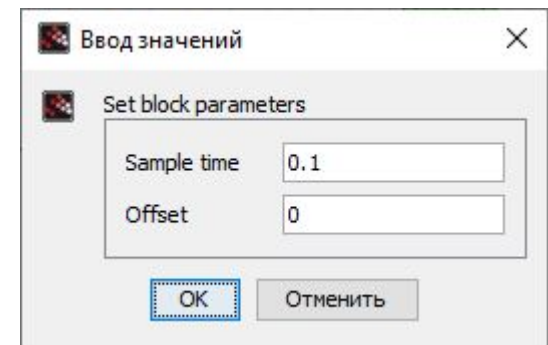
Изменение параметров блока

Двойной ЛКМ (или ПКМ и выбор в контекстном меню пункта Параметры блока) на блоке в окне графического редактора вызывает окно Ввод значений. Это окно позволяет менять параметры блока (если блок допускает изменение параметров).

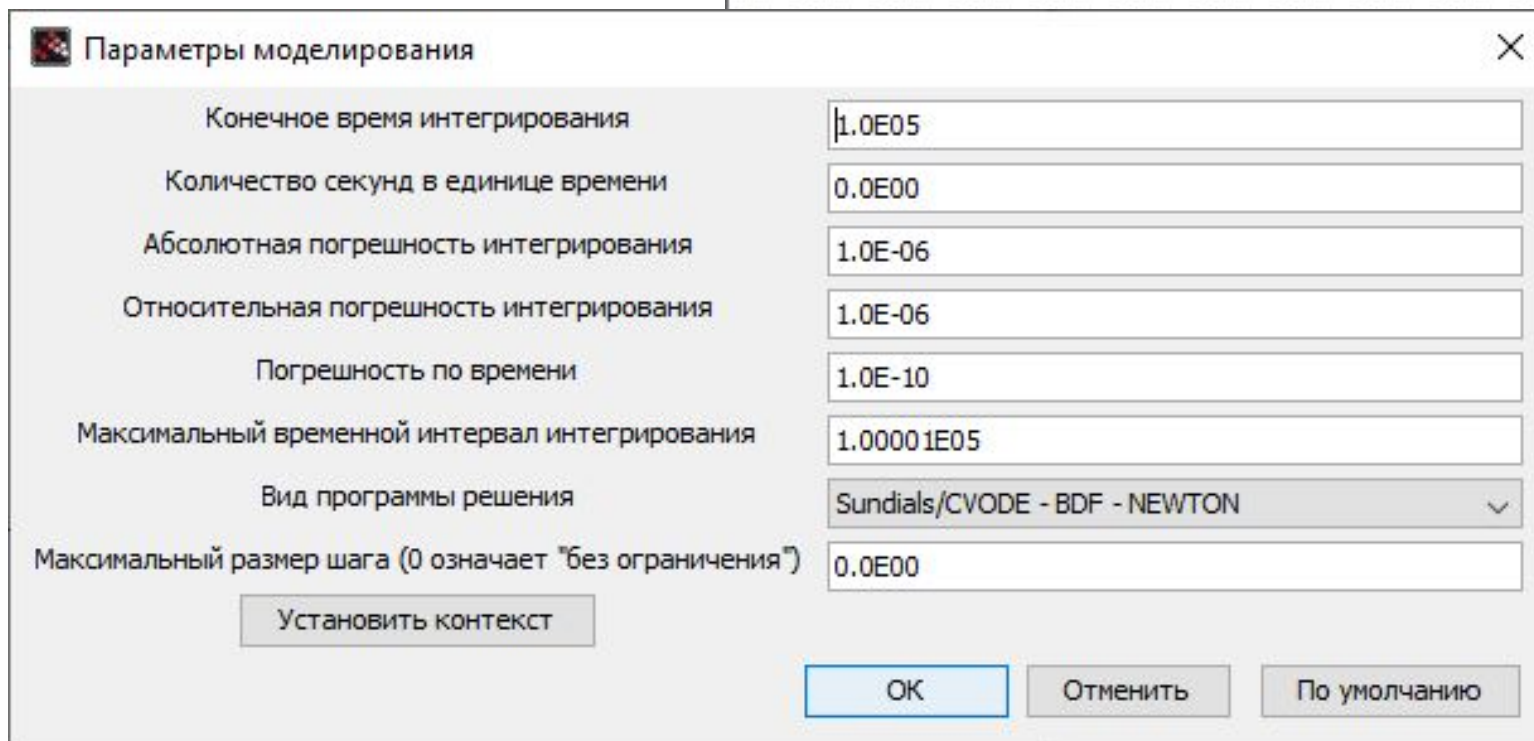
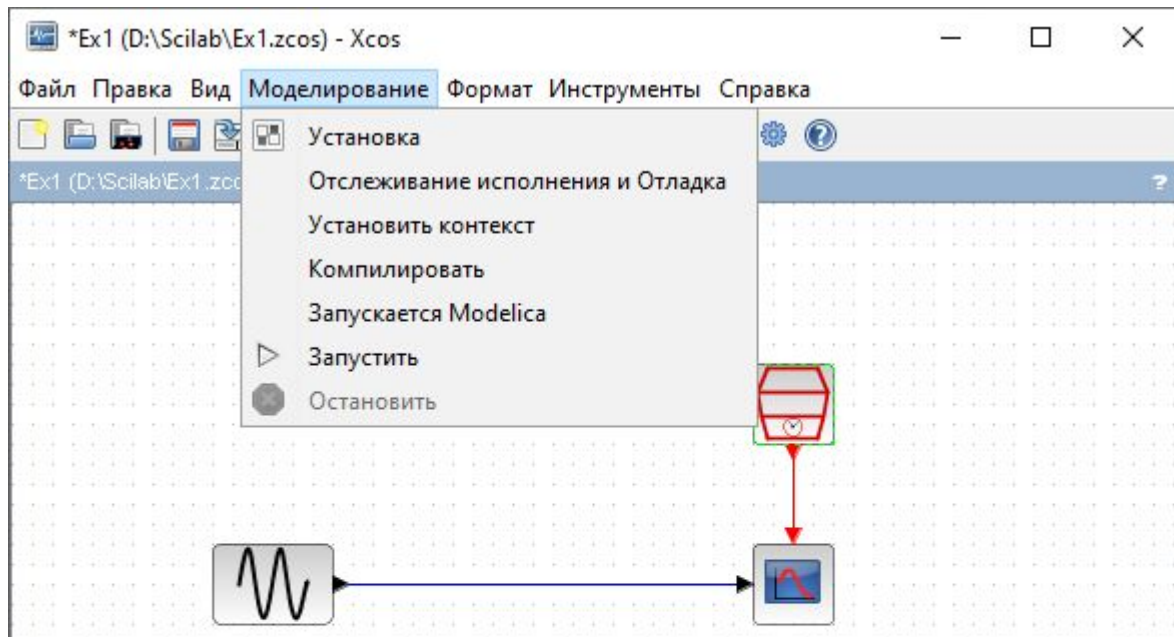


Остановите моделирование и обратите внимание на график сигнала. Синусоида на нём выглядит рваной. Чтобы сделать её более гладкой, надо уменьшить интервал взятия отсчётов. Для этого обратитесь к счётчику времени и измените параметр Sample time (интервал дискретизации), сделав его равным 0.1. Запустите моделирование.

Значение параметра может быть любой инструкцией, понятной Scilab. Вызовите окно изменения параметров генератора синусоиды и установите значение параметра Frequency (rad/s) (частота, рад/с) равным $2 \cdot \pi / 5$.



Для задания конечного времени моделирования выбрать пункт Моделирование → Установка в главном меню графического редактора и установить параметр Конечное время интегрирования равным нужному значению.



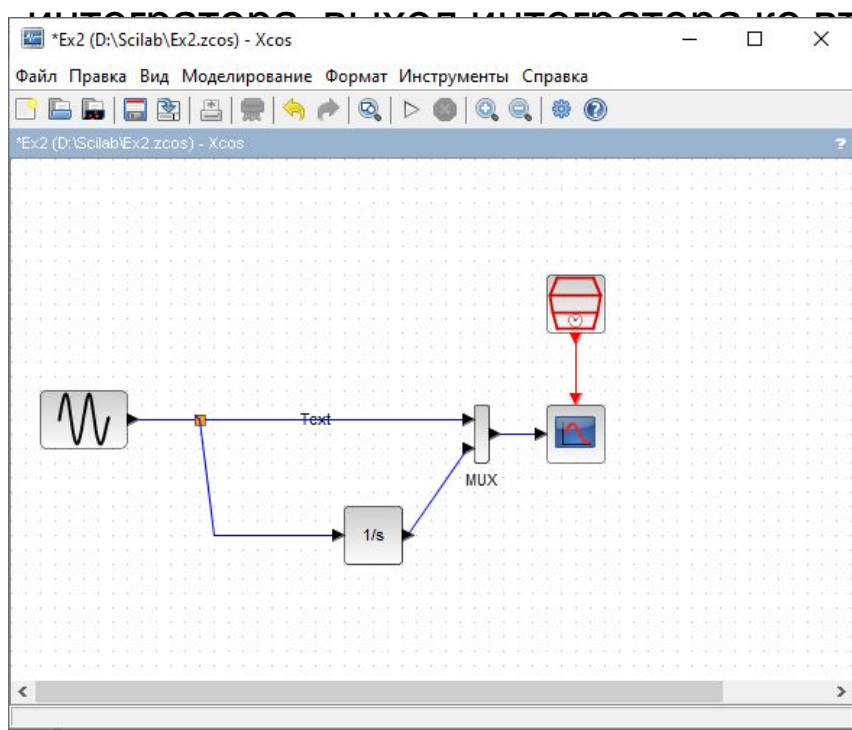
Осциллографы

Для графического отображения сигнала как функции времени в Xcos используются блоки CSCOPE и CMSCOPE из палитры Регистрирующие устройства.

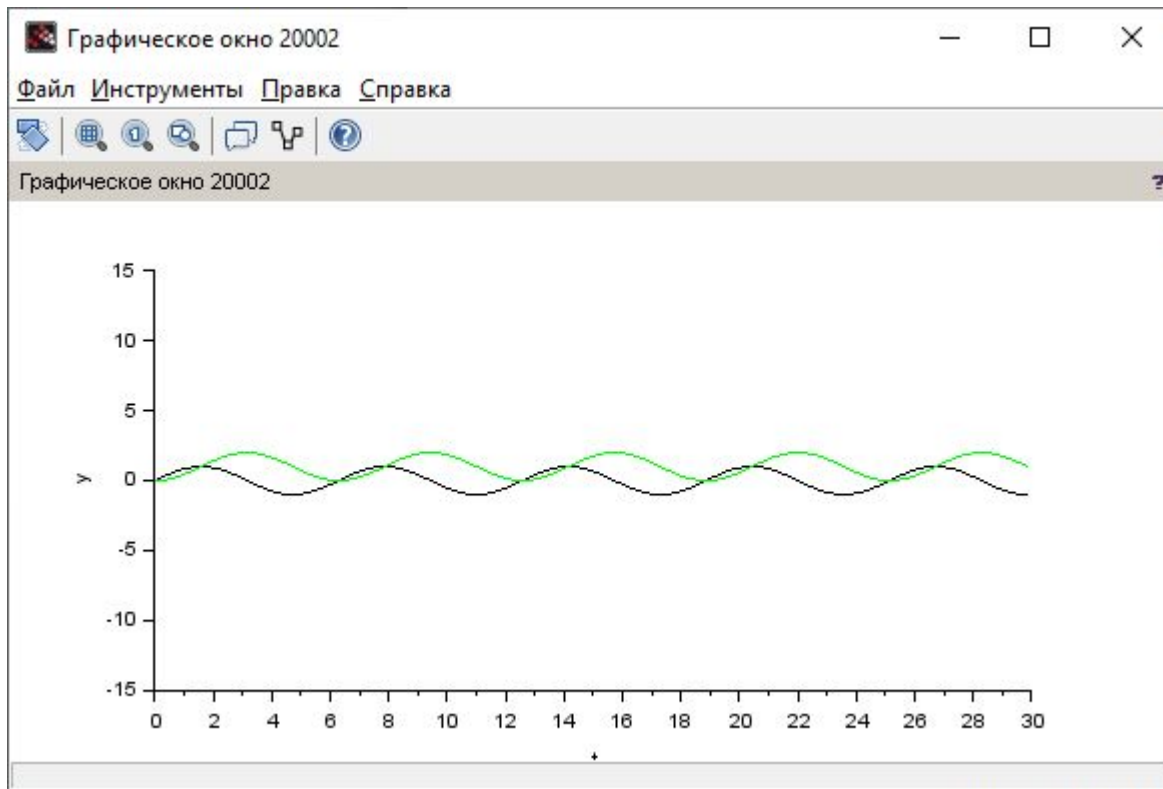
Сохраните вашу диаграмму под другим именем: Файл → Сохранить как. Добавьте к диаграмме, состоящей из генератора, осциллографа и счётчика времени,

блок INTEGRAL_f (интегратор) из палитры Системы с непрерывным временем и блок MUX (мультиплексор) из палитры Маршрутизация сигналов.

Подключите выход генератора к первому входу мультиплексора и ко входу

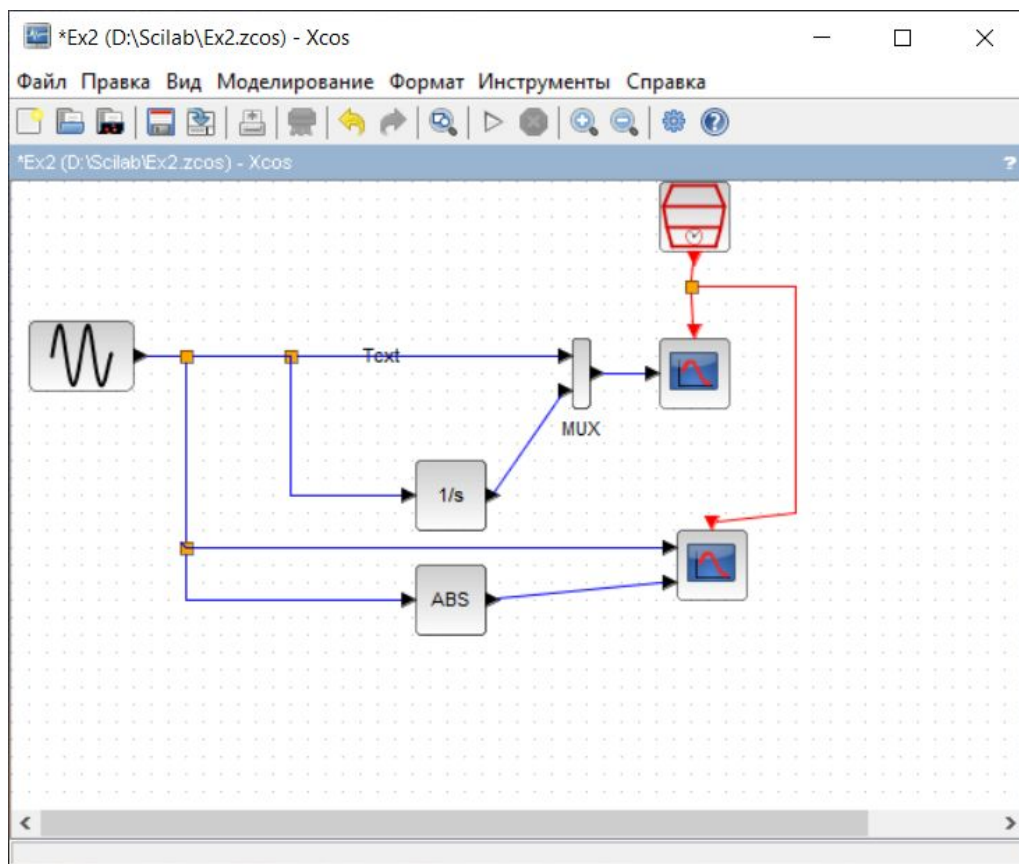


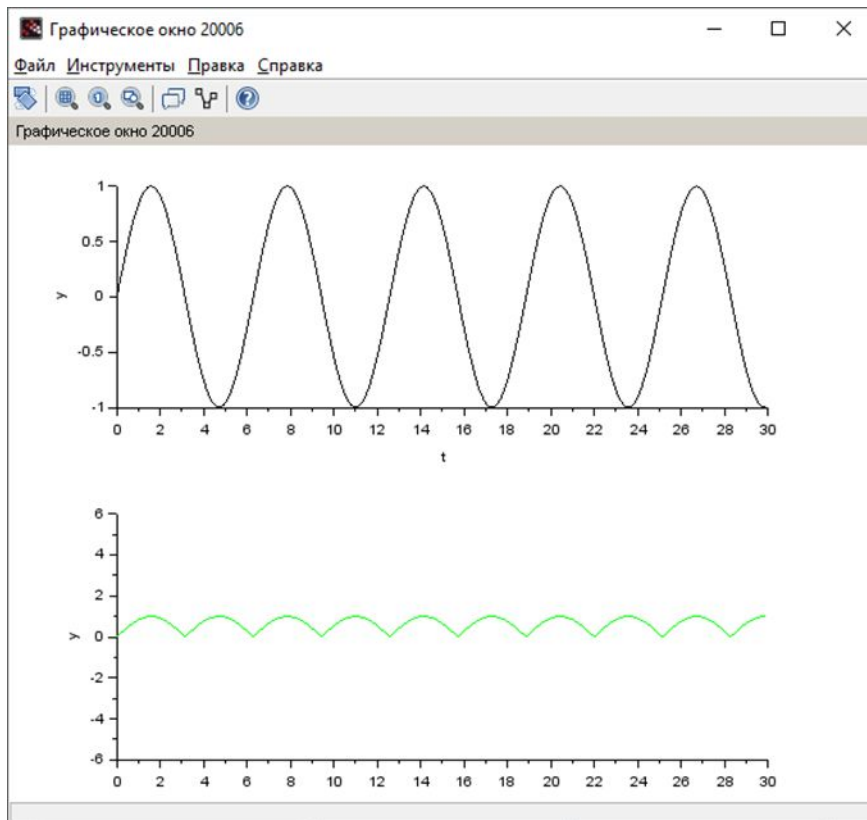
Первому входу мультиплексора и, наконец, входы блоков можно подключать к уже существующим соединительным линиям. Разрешённые соединения подсвечиваются зелёным. Соединительные линии могут иметь любую конфигурацию. В процессе создания соединения нажатие ЛКМ добавляет новый узел. Создать новый узел для изменения вида уже существующего соединения можно двойным ЛКМ по соединительной линии.



Мультиплексор в данном примере объединяет два скаляра на своих входах в один вектор из двух элементов. Осциллограф рассматривает элементы вектора как точки отдельных сигналов и изображает их соответственно.

Добавьте к диаграмме блок CMSCOPE и блок ABS_VALUE (модуль) из палитры Математические операции. Подключите к первому входу осциллографа выход генератора, а ко второму выход блока ABS_VALUE. На вход блока ABS_VALUE подайте сигнал с генератора. Управляющий вход осциллографа соедините с выходом счётчика времени.



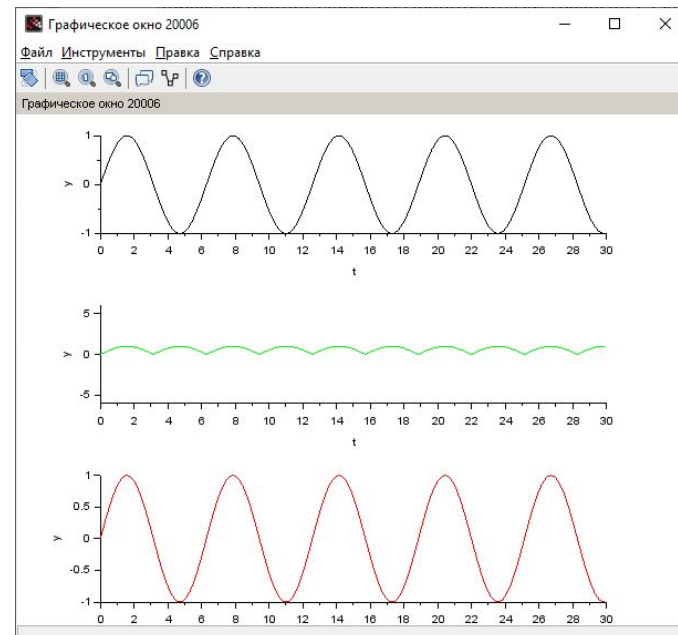
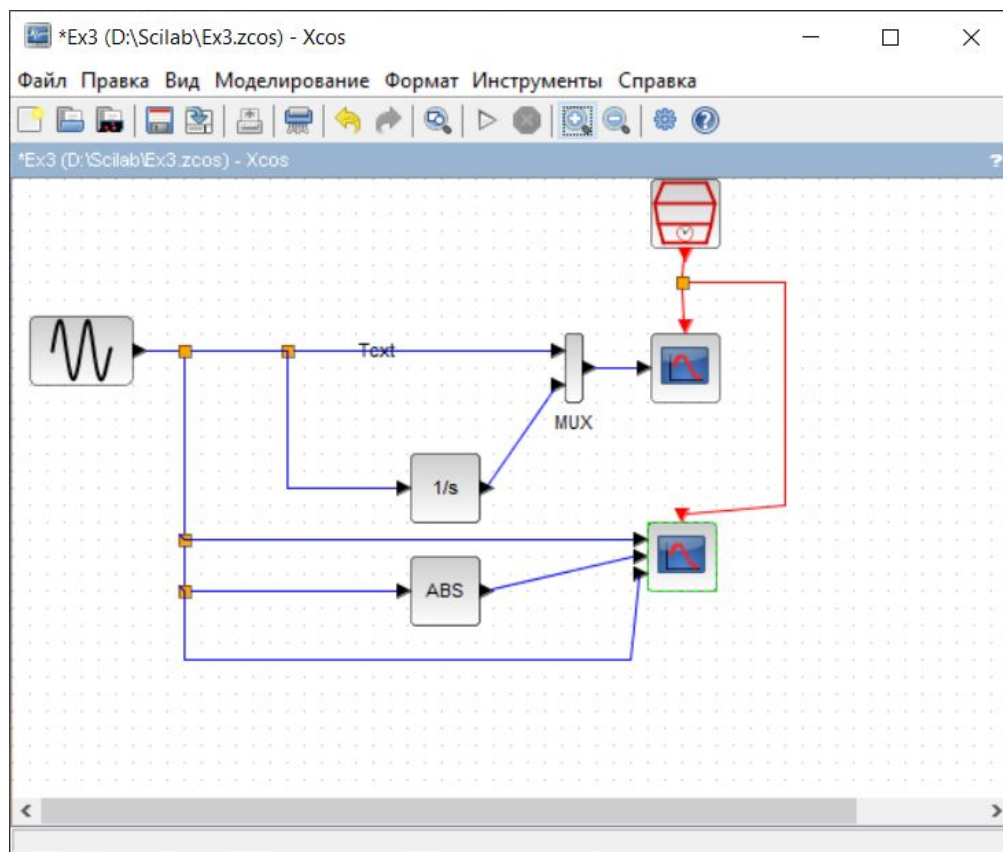


Пределы по оси y задаются в параметрах блока переменными Y_{min} vector и Y_{max} vector. Первый элемент вектора относится к первому графику, второй ко второму. Задайте пределы (2; 2) для первого графика и (0; 2) для второго.

Блок CMSCOPE, аналогично CSCOPE, отображает векторный вход в виде множества сигналов в одной системе координат. Однако, в отличие от CSCOPE, для него требуется явно указать размерности каждого из входов. Размерности входов задаются в параметрах блока переменной Input port sizes (размерности входных портов) вектор, первый элемент которого относится к первому графику, второй - ко второму.

The screenshot shows a dialog box titled 'Set Scope parameters'. It contains several input fields for configuring the scope. The 'Input ports sizes' field is set to '1 1'. The 'Drawing colors (>0) or mark (<0)' field is set to '1 3 5 7 9 11 13 15'. The 'Output window number (-1 for automatic)' field is set to '-1'. The 'Output window position' and 'Output window sizes' fields are empty. The 'Ymin vector' field is set to '-1 -5'. The 'Ymax vector' field is set to '1 5'. The 'Refresh period' field is set to '30 30'. The 'Buffer size' field is set to '20'. The 'Accept herited events 0/1' field is set to '0'. The 'Name of Scope (label&Id)' field is empty. At the bottom, there are 'OK' and 'Отменить' (Cancel) buttons.

Добавьте третий элемент к Input port sizes, равный 1. Установите для нового графика пределы по оси y и интервал обновления. Подключите к третьему входу осциллографа сигнал с выхода генератора.

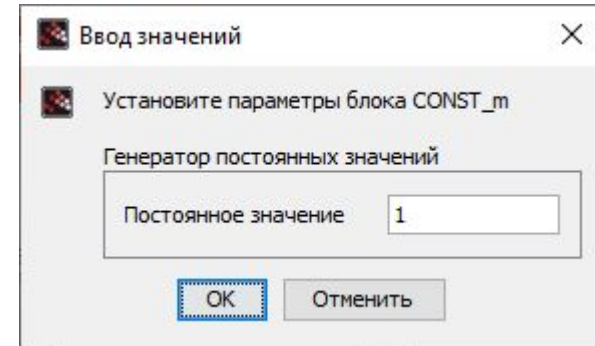


Цвет графиков функций задаётся в параметрах блока переменной Drawing colors вектор, элементы которого соответствуют номеру цвета в стандартной палитре. Первый элемент определяет цвет первой кривой, второй цвет второй кривой и т.д. Если указать значение цвета со знаком минус, то вместо кривых на графике будут отображаться метки.

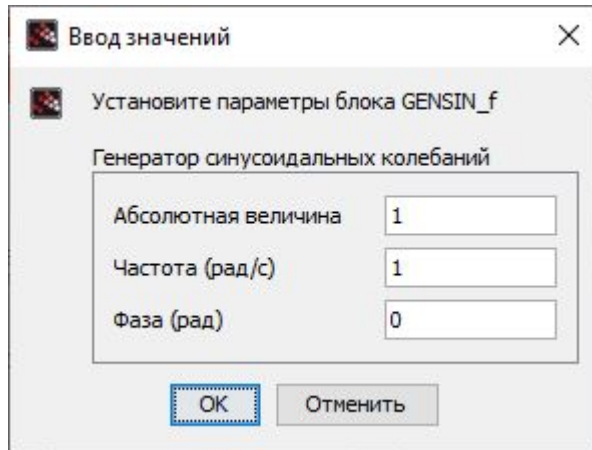
Источники сигналов

- CONST_m константа;
- GENSIN_f генератор синусоиды;
- GENSQR_f генератор прямоугольных импульсов;
- RAND_m генератор случайных чисел;
- STEP_FUNCTION функция включения.

Блок CONST_m используется для формирования постоянной величины. Он имеет один параметр: Constant Value значение константы. Блок является констатным блоком

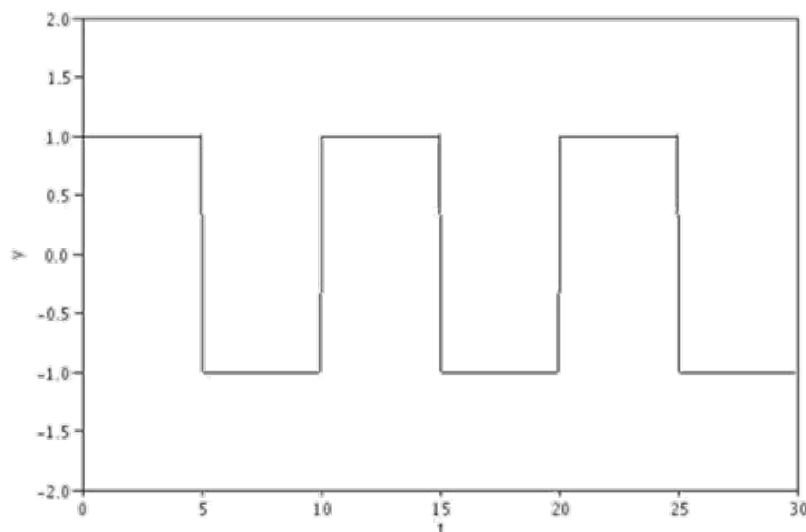
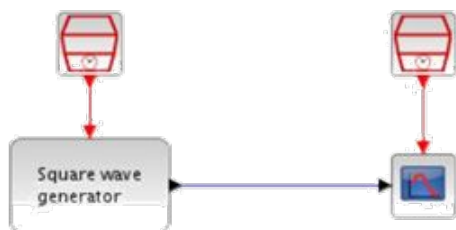
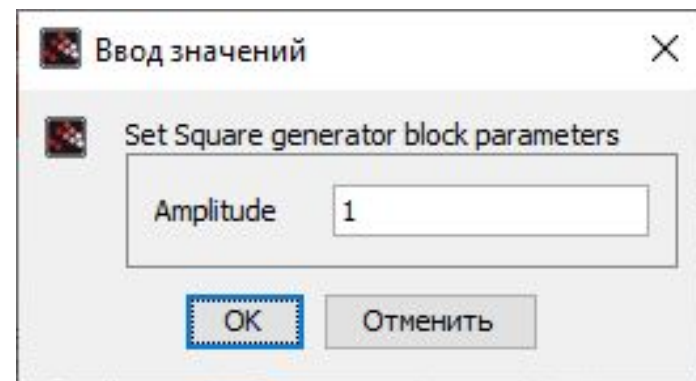


Блок GENSIN_f используется для получения сигналов синусоидальной формы.



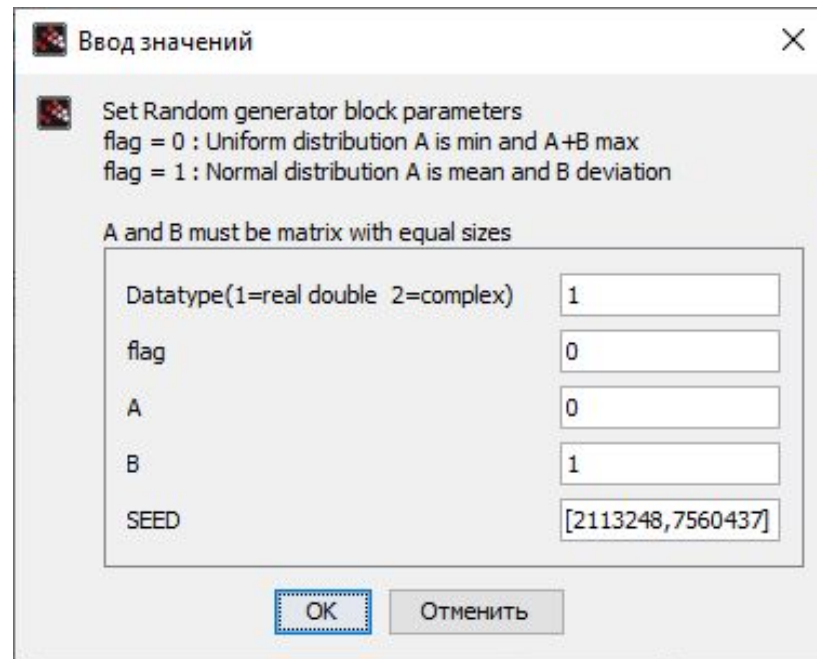
Создайте новую диаграмму (Файл → Новая диаграмма). Добавьте к ней два генератора синусоиды. Установите фазу первого генератора равной $\pi/2$ (коси-нус), а второго оставьте равной нулю (синус). Отобразите сигналы с обоих генераторов в одном окне осциллографа.

Блок GENSQR_f используется для получения последовательности прямоугольных импульсов (видеоимпульсов) со скважностью 2 т.е. для формирования меандра. Блок имеет один управляющий вход и один регулярный выход. Параметр Amplitude задаёт амплитуду импульсов. Длительность импульсов определяется интервалом поступления на управляющий вход сигналов активации.



Создайте новую диаграмму. Добавьте к диаграмме генератор прямоугольных импульсов и счётчик времени. Установите интервал дискретизации равным 5. Со-едините управляющий выход счётчика с управляющим входом генератора. Отобразите сигнал генератора на экране осциллографа.

Генератор случайных чисел



Ввод значений

Set Random generator block parameters
flag = 0 : Uniform distribution A is min and A+B max
flag = 1 : Normal distribution A is mean and B deviation

A and B must be matrix with equal sizes

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| Datatype(1=real double 2=complex) | 1 |
| flag | 0 |
| A | 0 |
| B | 1 |
| SEED | [2113248,7560437] |

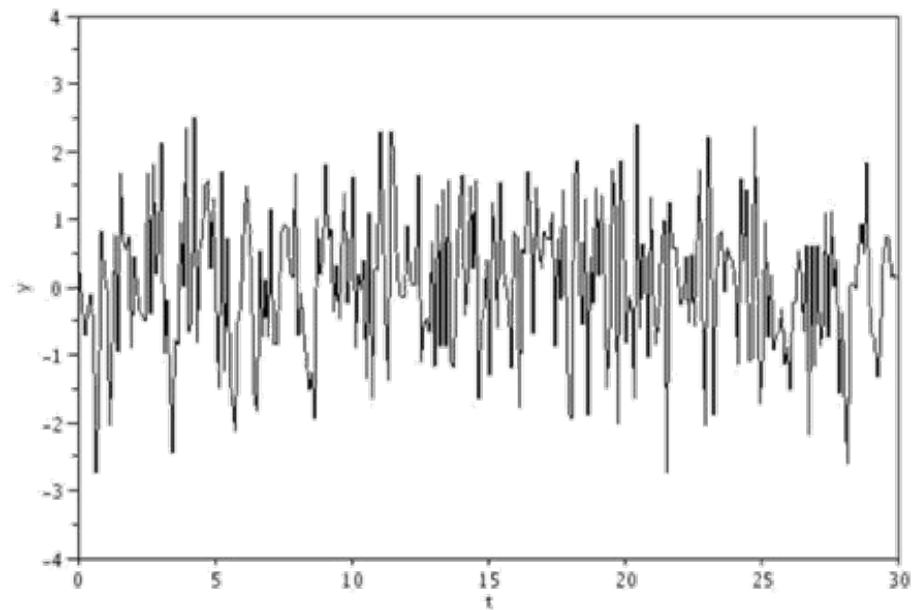
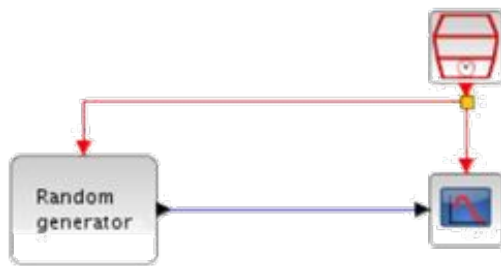
OK Отменить

Блок RAND_m используется для получения случайных чисел, распределённых по нормальному или равномерному закону. Блок имеет один управляющий вход и один регулярный выход. Параметры блока:

- Data type (тип выходных данных): 1 действительные числа, 2 комплексные;
- flag флаг, определяющий вид закона распределения: 0 равномерное, 1 нормальное (гауссовское);
- A и B для равномерного распределения величина A определяет минимальное значение, а величина A + B максимальное. Для нормального распределения A определяет матожидание, а B среднеквадратическое отклонение (СКО).
- SEED числа, используемые для инициализации машинного генератора псевдослучайных чисел. Первое значение относится к действительной, а второе к мнимой части выходного сигнала. Два генератора с одинаковым параметром SEED будут выдавать два идентичных псевдослучайных сигнала.

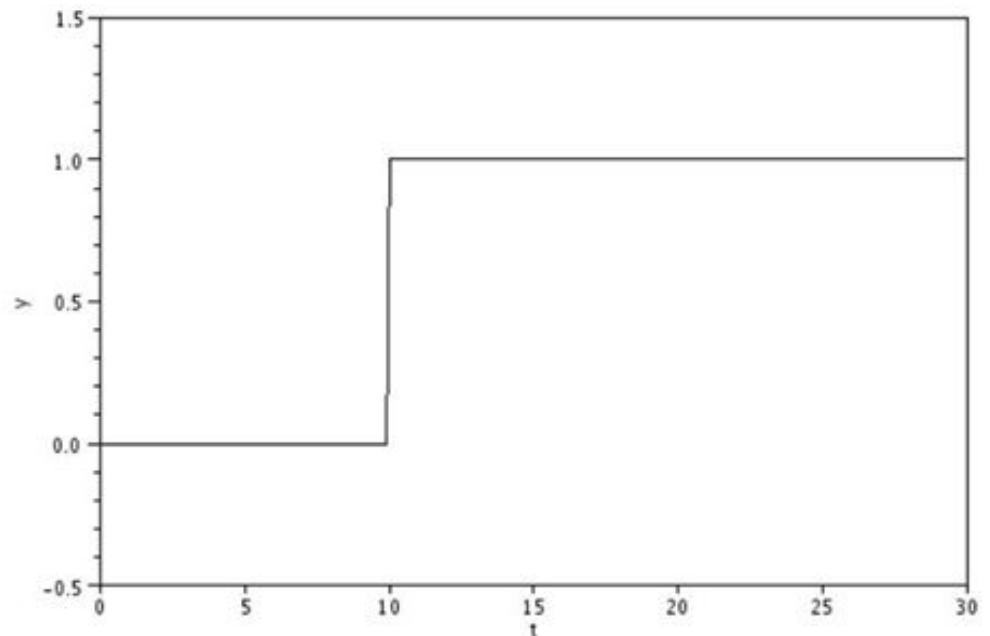
Создайте диаграмму и добавьте к ней генератор случайных чисел. Установите параметры генератора таким образом, чтобы получить на выходе случайные числа, распределённые по нормальному закону с мат. ожиданием равным 0 и СКО равным 1. Выведите сигнал генератора в окно осциллографа с интервалом дискретизации 0:1.

Случайный процесс на выходе генератора представляет собой белый гауссовский шум (его отсчёты некоррелированы).



Функция включения

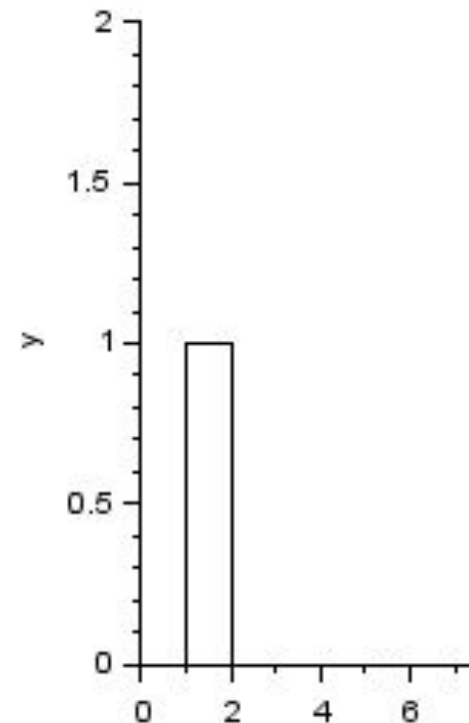
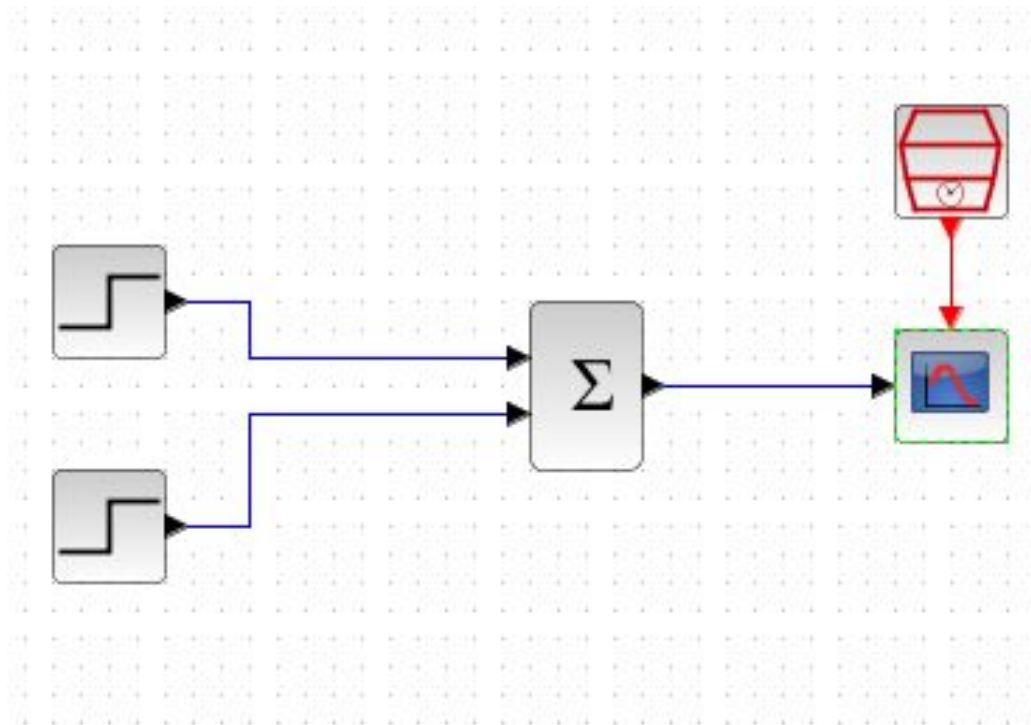
Создайте диаграмму, содержащую генератор функции включения с параметрами: время включения 10, начальное значение 0, конечное значение 1. Отобразите сигнал с выхода генератора в окне осциллографа.



Добавьте к диаграмме ещё один блок STEP_FUNCTION и блок BIGSOM_f. Установите время включения второго генератора равным 1.5 и конечное значение равным -1. Соедините выходы генераторов со входами сумматора, а выход сумматора со входом осциллографа.

Блок BIGSOM_f (сумматор) имеет один параметр: Input ports signs/gain вектор весовых коэффициентов входных портов. Размерность этого вектора определяет число портов. Выходной сигнал сумматора равен взвешенной сумме входных сигналов. По умолчанию блок имеет два входа с весами 1, т.е. просто суммирует входные сигналы.

Длительность полученного импульса определяется разностью времени включения генераторов. Уменьшая эту разность до сколь угодно малого значения, будем получать сигнал, приближающийся к дельта-функции. Практически минимальная разность определяется наименьшим временем дискретизации из всех счётчиков на диаграмме.

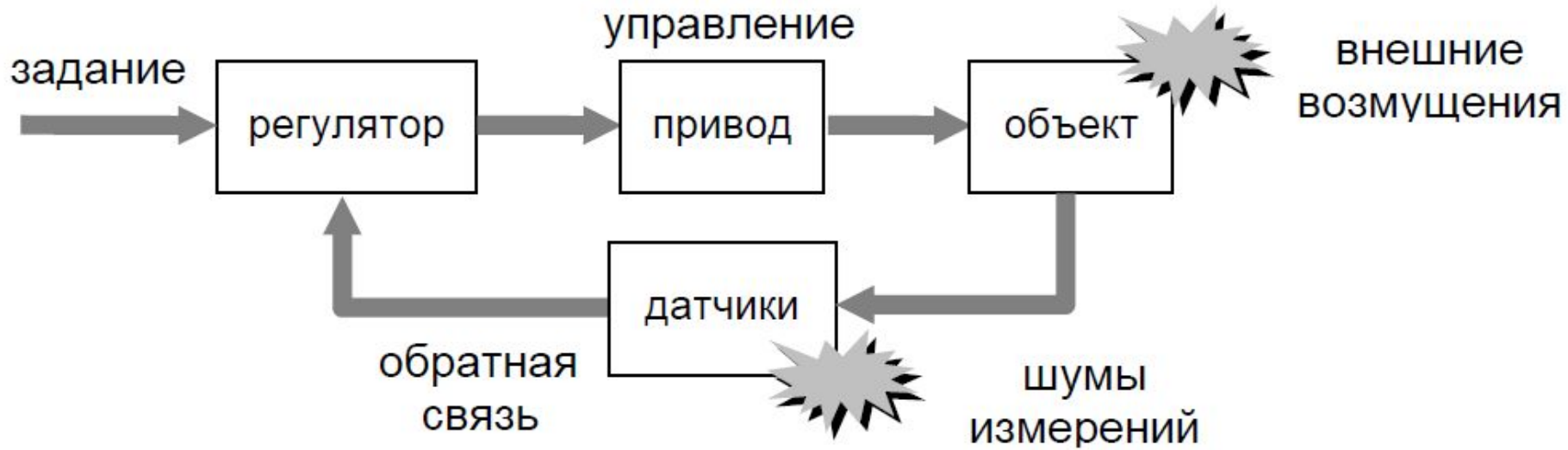


ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ «ЧАЙНИКОВ» (К.Ю. Поляков)

Теория управления пытается ответить на вопрос «как нужно управлять?». До XIX века науки об управлении не существовало, хотя первые системы автоматического управления уже были (например, ветряные мельницы «научили» разворачиваться навстречу ветру). Развитие теории управления началось в период промышленной революции. Сначала это направление в науке разрабатывалось механиками для решения задач регулирования, то есть поддержания заданного значения частоты вращения, температуры, давления в технических устройствах (например, в паровых машинах). Отсюда происходит название «теория автоматического регулирования».

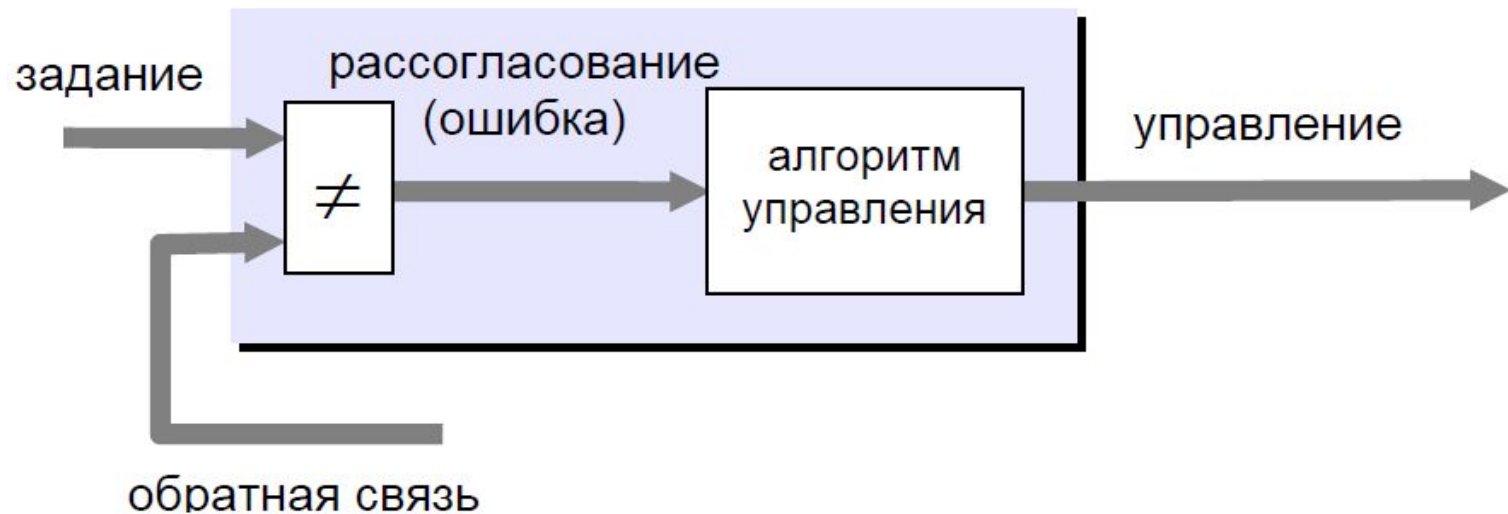
Позднее выяснилось, что принципы управления можно успешно применять не только в технике, но и в биологии, экономике, общественных науках. Процессы управления и обработки информации в системах любой природы изучает наука кибернетика. Один из ее разделов, связанный главным образом с техническими системами, называется теорией автоматического управления.

Структурная схема системы управления



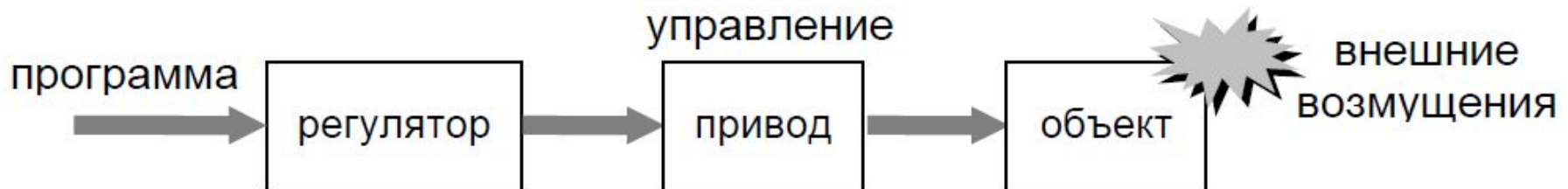
- Функции блоков
- Внешние возмущения
- Шумы
- Замкнутые системы (с ОС)

Работа регулятора



Управление по ошибке (или по отклонению)
Источники ошибок (возмущения, инерционность)
Положительная ОС

Разомкнутые СУ



Задачи систем управления

- стабилизация, то есть поддержание заданного режима работы, который не меняется длительное время (задающий сигнал – постоянная, часто нуль);
- программное управление – управление по заранее известной программе (задающий сигнал меняется, но заранее известен);
- слежение за неизвестным задающим сигналом.

По количеству входов и выходов

- одномерные системы, у которых один вход и один выход (они рассматриваются в так называемой классической теории управления);
- многомерные системы, имеющие несколько входов и./или выходов (главный предмет изучения современной теории управления).

По характеру сигналов

- непрерывные, в которых все сигналы – функции непрерывного времени, определенные на некотором интервале;
- дискретные, в которых используются дискретные сигналы (последовательности чисел), определенные только в отдельные моменты времени;
- непрерывно-дискретные, в которых есть как непрерывные, так и дискретные сигналы.

Классификации систем

Системы, в которых все параметры остаются постоянными, называются стационарными, что значит «не изменяющиеся во времени»

Детерминированные системы - все параметры объекта определены (заданы) точно, так же, как и внешние воздействия.

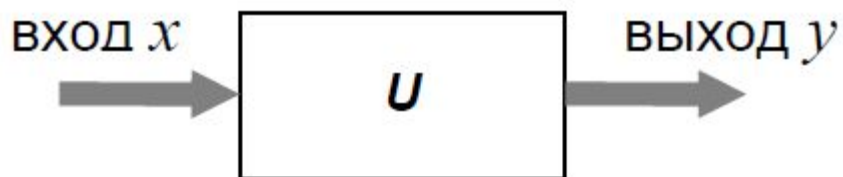
Системы, в которых действуют случайные возмущения или параметры объекта могут изменяться случайным образом, называются стохастическими (вероятностными).

В оптимальных системах регулятор строится так, чтобы обеспечить минимум или максимум какого-то критерия качества.

Адаптивные или самонастраивающиеся регуляторы - закон управления меняется при изменении условий (экстремальные, нечеткие регуляторы, ИИ)

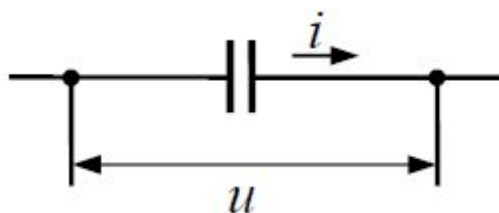
Математические модели. Связь входа с ВЫХОДОМ.

Построить модель – это значит найти оператор, связывающий входы и выходы. С его помощью можно предсказать реакцию объекта на любой входной сигнал.



$y = U[x]$ означает, что выход y получен в результате применения оператора U ко входу x .

$$p \, x(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad \begin{array}{l} \text{оператор} \\ \text{дифференцирования} \end{array}$$



$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} = C \, p \, u(t)$$

$$U[x] = \int_0^t x(t) dt \quad y(t) = \frac{x(t)}{p}$$

Если сечение бака S (в м²) постоянно по всей его высоте, то уровень воды h определяется как интеграл от потока воды q (в м³/с), деленный на S :

$$h(t) = \frac{1}{S} \int_0^t q(t) dt .$$

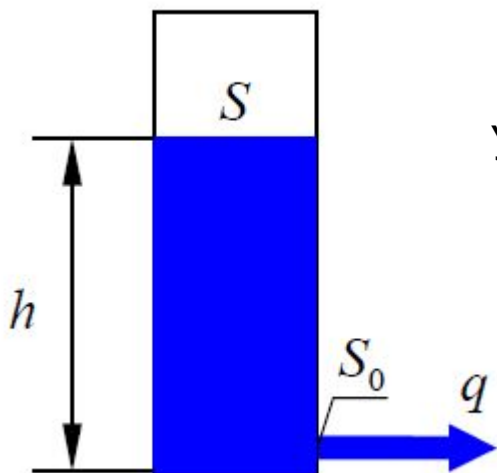
Построение моделей

1. Математические модели могут быть получены теоретически из законов физики (законы сохранения массы, энергии, импульса). Эти модели описывают внутренние связи в объекте и, как правило, наиболее точны.
2. Построение модели в результате наблюдения за объектом при различных входных сигналах (этим занимается теория идентификации). Объект рассматривается как «черный ящик», то есть, его внутреннее устройство неизвестно. Мы смотрим, как он реагирует на входные сигналы, и стараемся подстроить модель так, чтобы выходы модели и объекта совпадали как можно точнее при разнообразных входах.
3. Комбинация 1 и 2

Дифференциальные уравнения

Связь уровня и расхода воды

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{S} [Q(t) - q(t)]$$



Уравнение Бернулли

$$\rho g h = \frac{\rho v^2}{2}$$

$$q = S_0 \cdot v$$

$$q = \alpha \sqrt{h}$$

$$\alpha = S_0 \sqrt{2g}$$

Нелинейное дифференциальное уравнение для уровня воды в баке при наличии поступления воды и расхода воды, зависящего от уровня.

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{1}{S} Q(t) - \frac{\alpha}{S} \sqrt{h(t)}$$

$Q(t)$ – поступление воды

$q(t)$ – расход воды

$h(t)$ – уровень воды

S – сечение бака

S_0 – сечение выпускной трубы

v – скорость потока на выпуске

ρ – плотность воды

Линеаризованное ДУ

В установившемся (статическом) режиме $\frac{dh(t)}{dt} = 0$

$$Q = Q_0 + \Delta Q \quad \text{и} \quad h = h_0 + \Delta h$$

$$f(x, y) \approx f(x_0, y_0) + \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial f(x_0, y_0)}{\partial y} \cdot \Delta y.$$

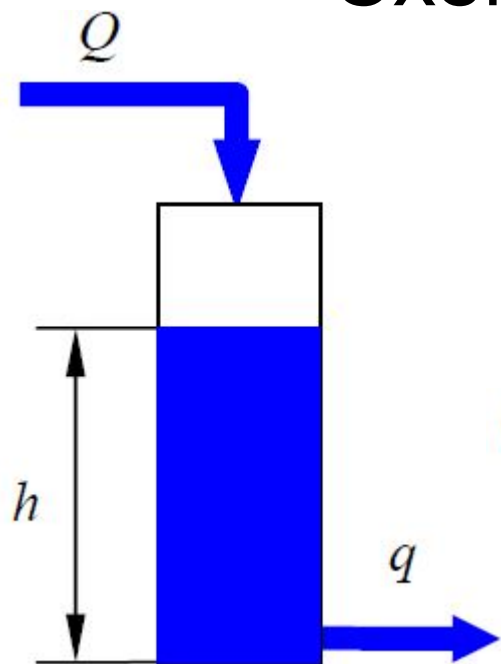
$$\frac{d\Delta h}{dt} \approx \frac{1}{S} Q_0 - \frac{\alpha}{S} \sqrt{h_0} + \frac{1}{S} \cdot \Delta Q - \frac{\alpha}{2S\sqrt{h_0}} \cdot \Delta h$$

Линеаризованная модель для уровня воды в баке при постоянном расходе и поступлении как функции времени

$$\frac{d\Delta h}{dt} + k_h \cdot \Delta h \approx k_Q \cdot \Delta Q \quad \text{где} \quad k_h = \frac{\alpha}{2S\sqrt{h_0}} \quad \text{и} \quad k_Q = \frac{1}{S}$$

$$\frac{dh(t)}{dt} + k_h \cdot h(t) = k_Q \cdot Q(t).$$

Схема автоматического управления уровнем воды



$$\Delta h(t) = \frac{1}{S} \int_0^t (Q(t) - q(t)) dt$$

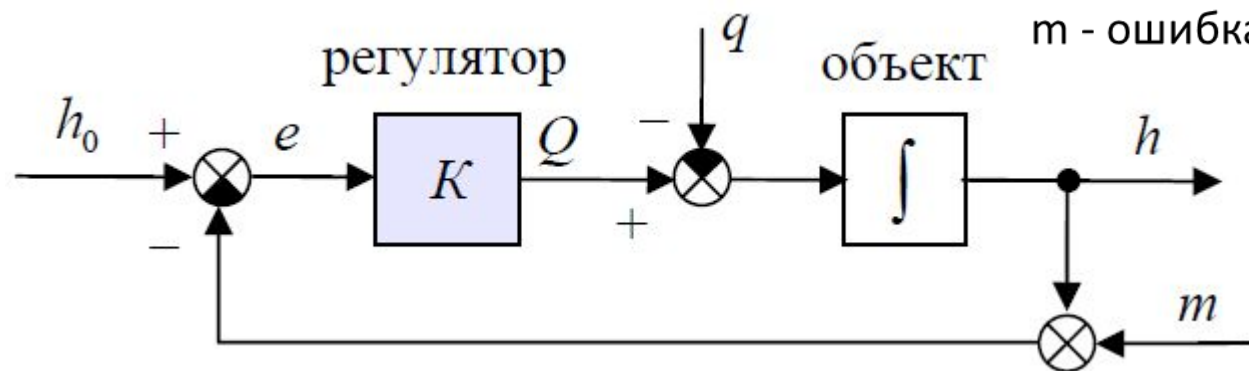
$$Q(t) = q_0 + \Delta Q(t), \quad q(t) = q_0 + \Delta q(t)$$

$$e(t) = h_0(t) - h(t)$$

Отклонение текущего уровня h
от заданного h_0

q – текущий расход воды

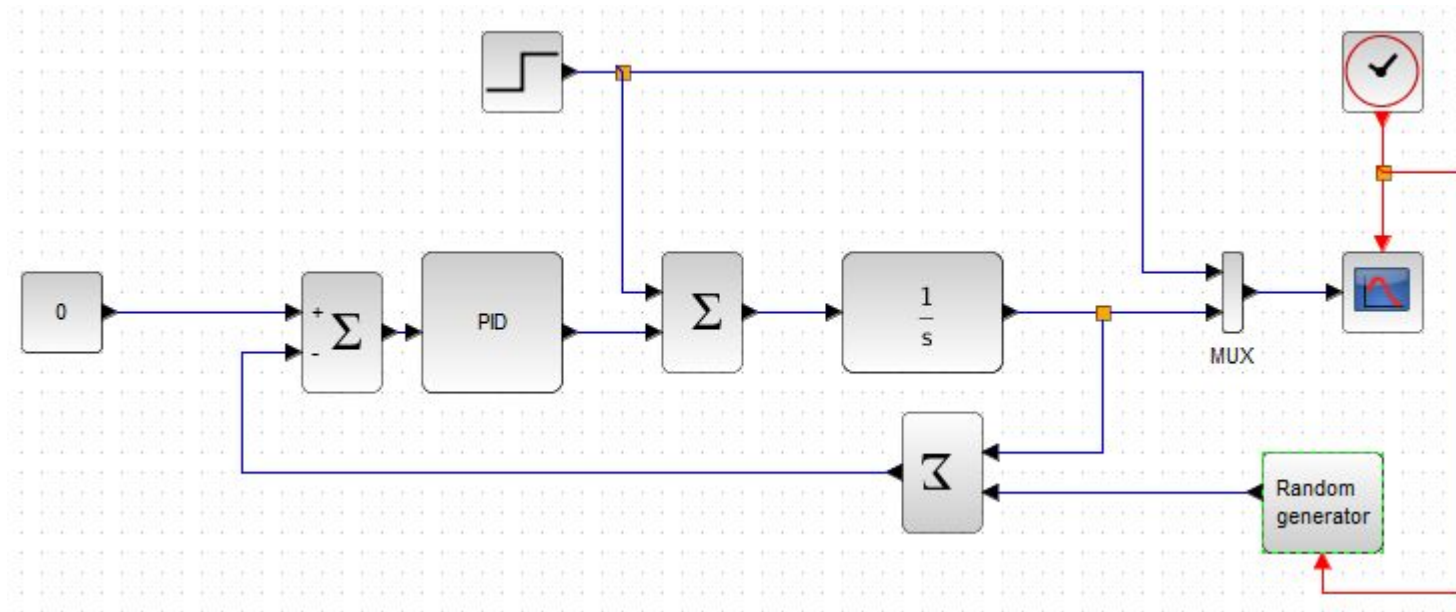
m – ошибка измерения



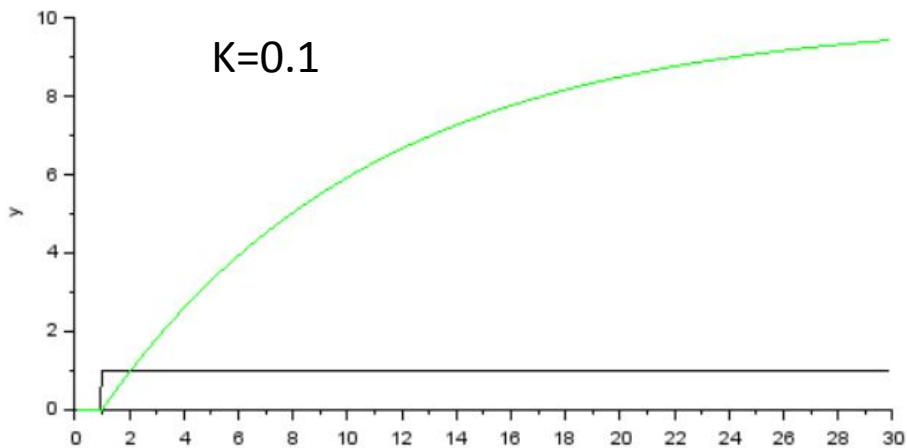
$$Q = K * e$$

регулятор – усилитель с коэффициентом K (или пропорциональный регулятор, П-регулятор)

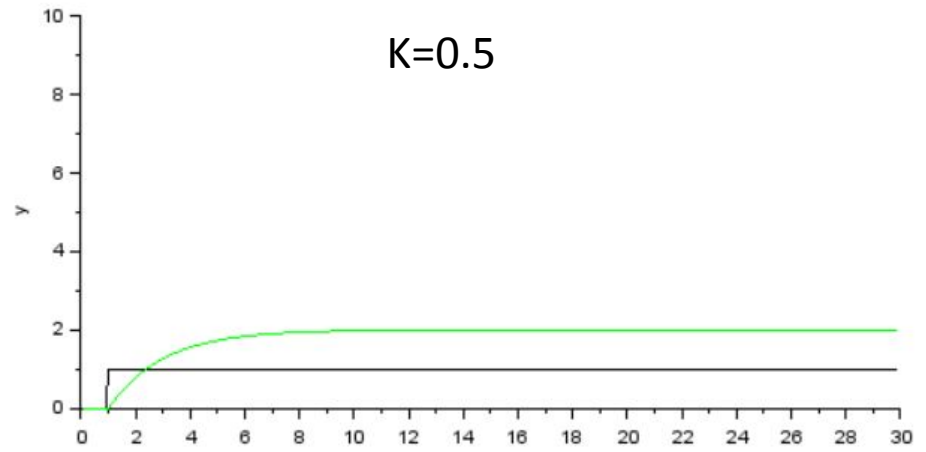
Модель в RCOS



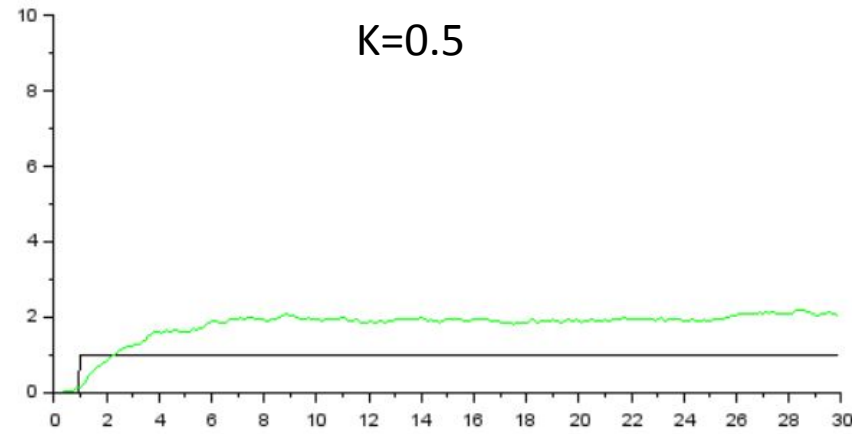
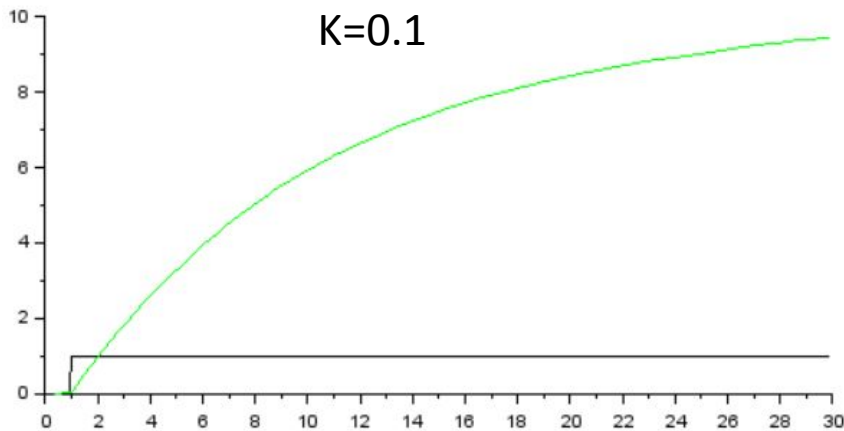
K=0.1



K=0.5



Работа регулятора



- при изменении нагрузки (потребления воды, потока q) регулятор-усилитель не может поддерживать заданный уровень (графики не приходят к значению $\Delta h = 0$);
- чем больше K , тем меньше ошибка регулирования Δh в установившемся режиме; можно ожидать, что при $K \rightarrow \infty$ ошибка должна уменьшиться до нуля;
- чем больше K , тем быстрее заканчивается переход на новый режим
- нужно увеличивать K , чтобы повысить точность, а с другой – нужно уменьшать K , чтобы уменьшить влияние шума измерения

Передаточная функция

Пусть модель объекта задана линейным дифференциальным уравнением второго порядка, связывающим вход $x(t)$ и выход $y(t)$:

$$b_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + b_1 \frac{dy(t)}{dt} + b_0 y(t) = a_1 \frac{dx(t)}{dt} + a_0 x(t)$$

где a ($i = 0,1$) и b ($i = 0,1,2$) – постоянные.

Используя оператор дифференцирования, получим

$$(b_2 p^2 + b_1 p + b_0) y(t) = (a_1 p + a_0) x(t)$$

$$y(t) = \frac{a_1 p + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0} x(t) = W(p) x(t)$$

Функция $W(p)$ называется передаточной функцией объекта

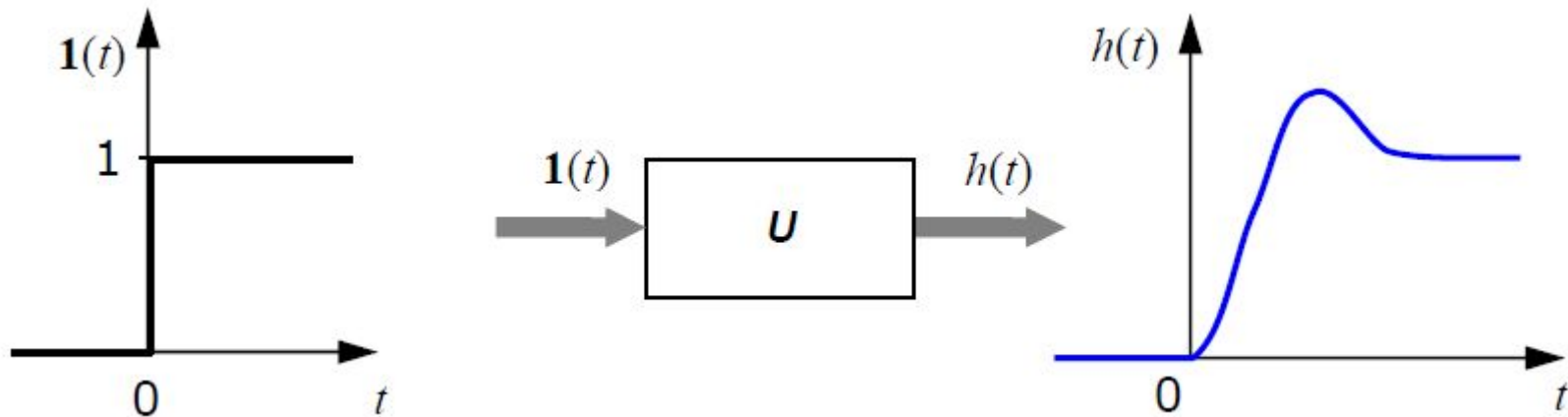
$$W(p) = \frac{a_1 p + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}$$

Переходная функция

«Единичный скачок» («единичный ступенчатый сигнал»)

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$$

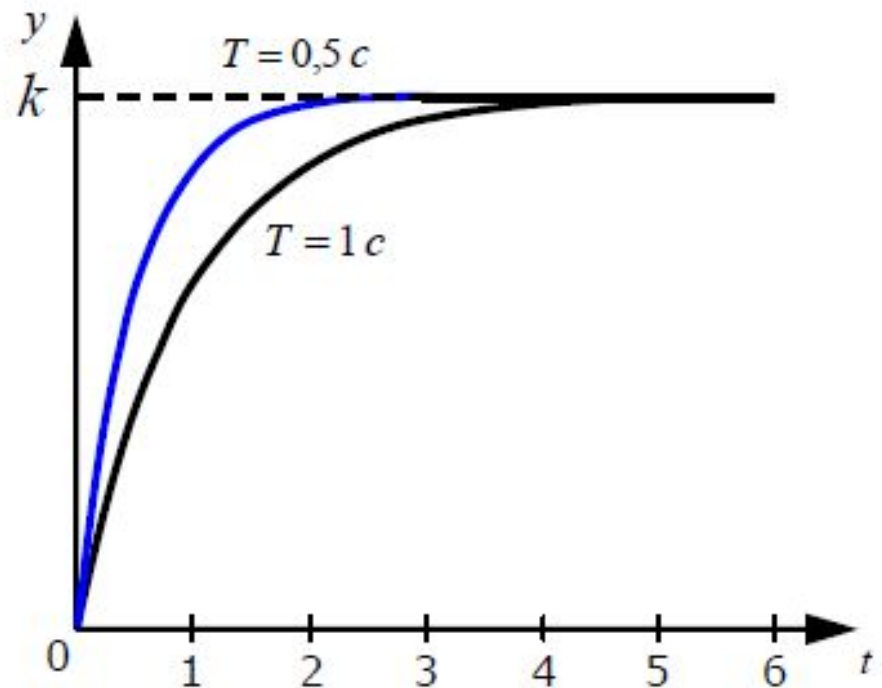
Реакция объекта на единичный скачок называется переходной функцией и обозначается $h(t)$. Объект в начальный момент находится в состоянии покоя, то есть, имеет нулевые начальные условия



Переходная функция для: $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot x(t)$

$$y(t) = k + C_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{T}\right), \quad y(0) = 0, \text{ что дает } C_1 = -k$$

$$h(t) = y(t) = k \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right]$$



Типовые динамические звенья

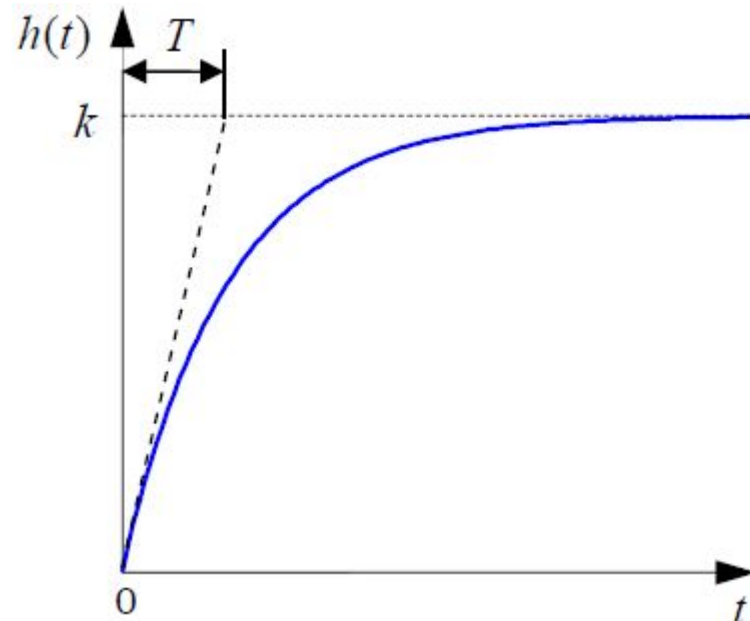
$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s) \dots \cdot W_N(s)$$

1. Простейшее позиционное звено – идеальный (безынерционный) **усилитель**. Его передаточная функция $W(s) = k$.

2. **Апериодическое звено**. Обратите внимание, что предельное значение переходной характеристики равно k , а касательная к ней в точке $t = 0$ пересекается с линией установившегося значения при $t = T$. Переходная характеристика выходит на установившееся значение (с ошибкой не более 5%) примерно за время $3T$.

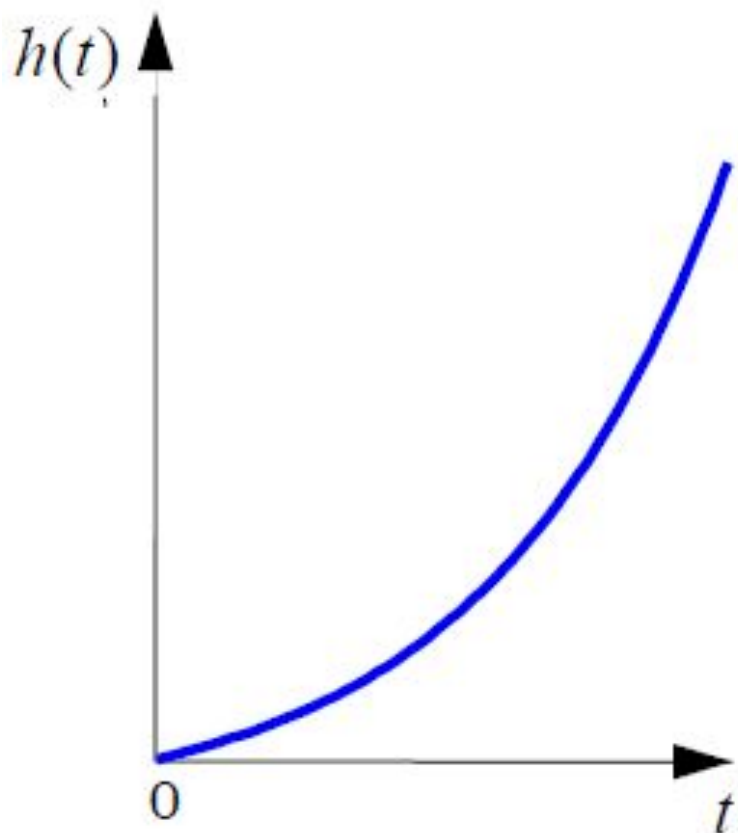
$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot x(t)$$

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1}$$



Неустойчивое апериодическое звено

$$T \frac{dy(t)}{dt} - y(t) = k \cdot x(t)$$

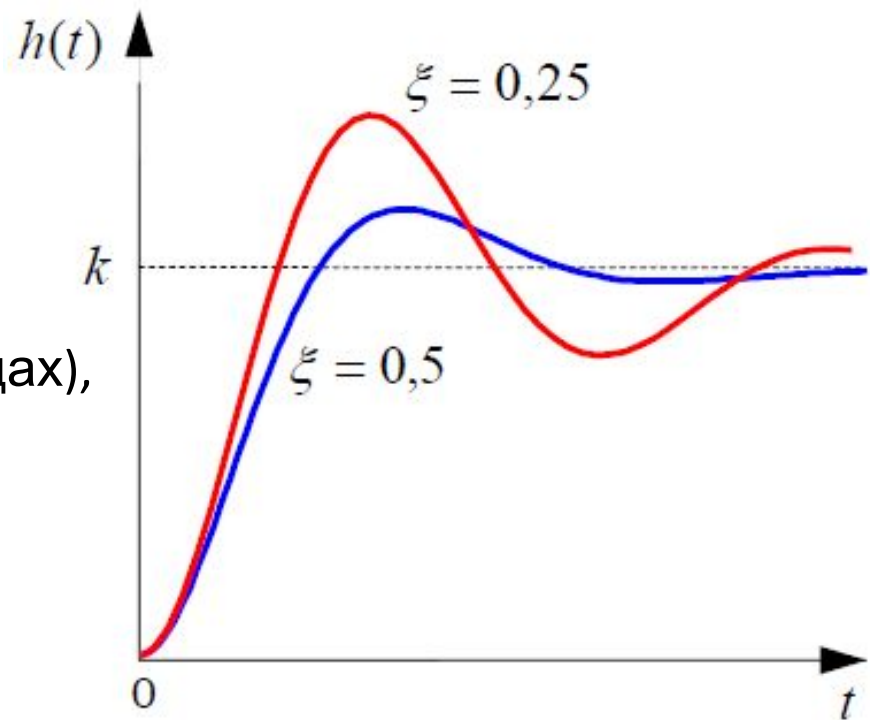


Колебательное звено

$$W(s) = \frac{k}{b_2 s^2 + b_1 s + 1}, \quad b_1^2 - 4b_2 < 0$$

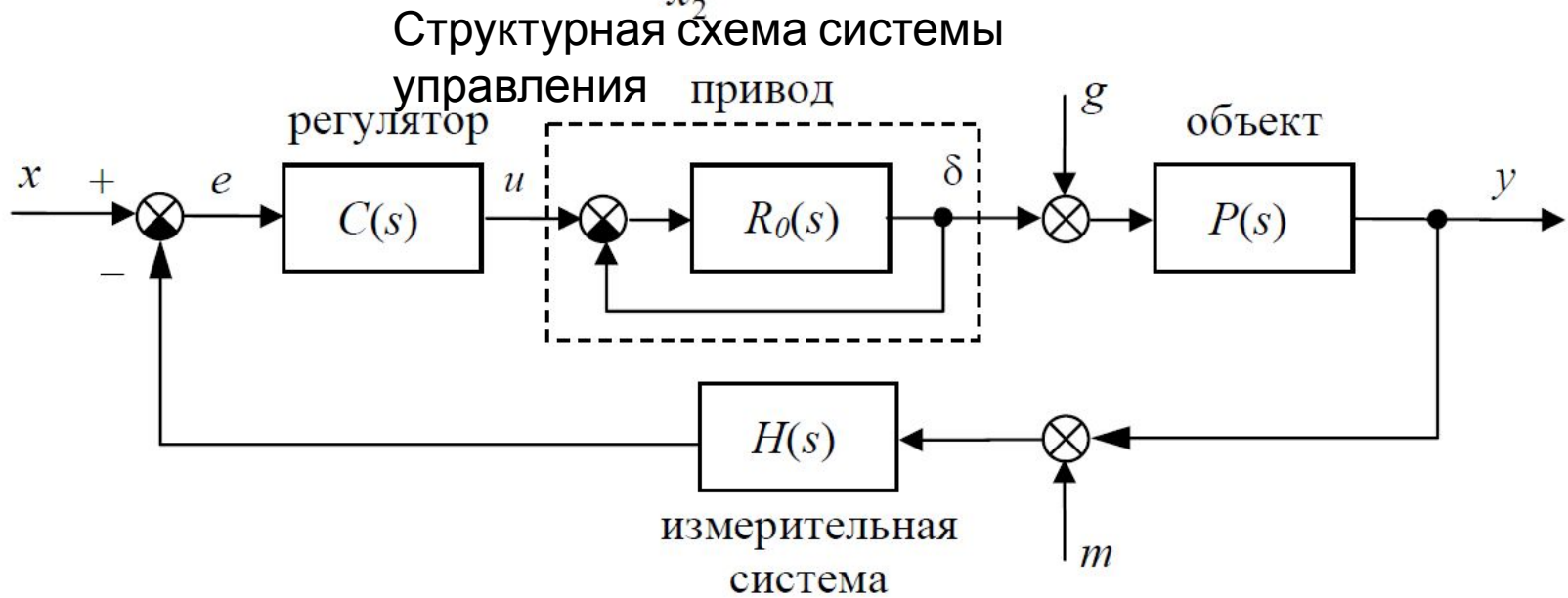
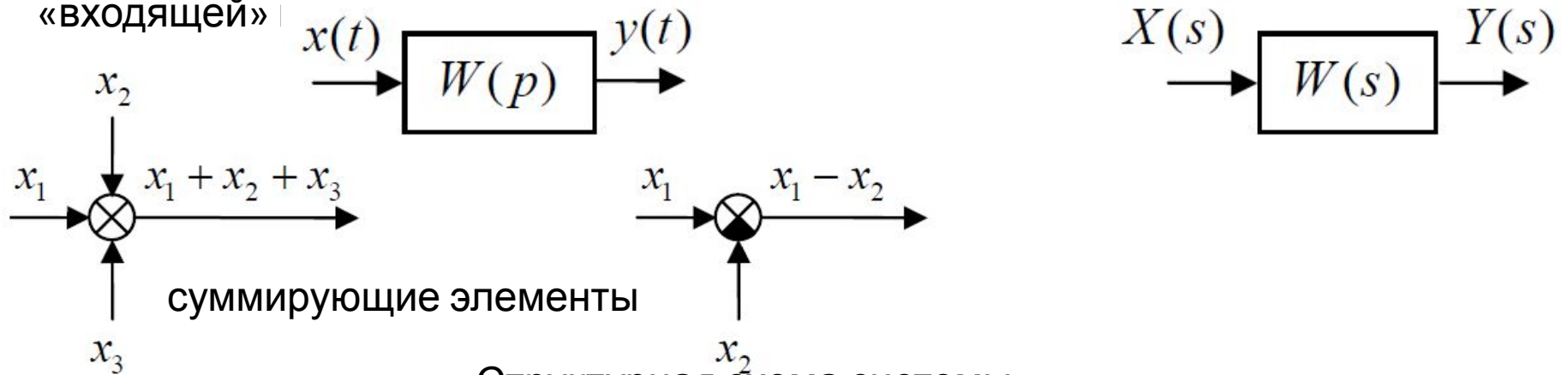
$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2T\xi s + 1}$$

где k – коэффициент,
 T – постоянная времени (в секундах),
 ξ – параметр затухания
($0 < \xi < 1$).

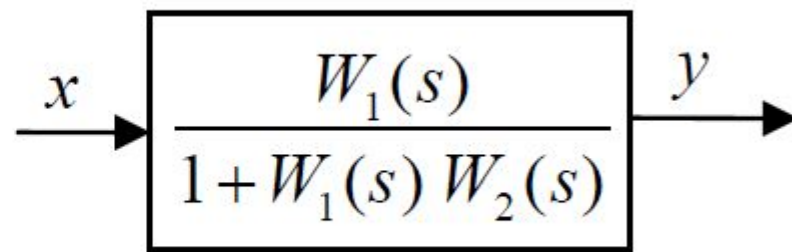
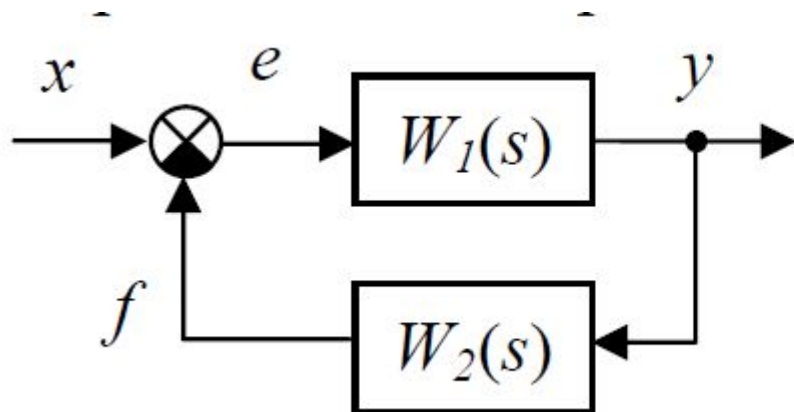
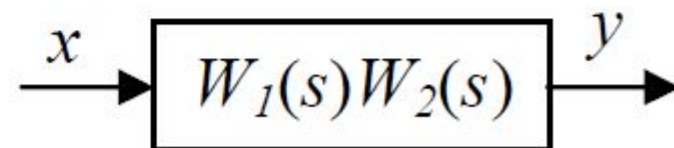
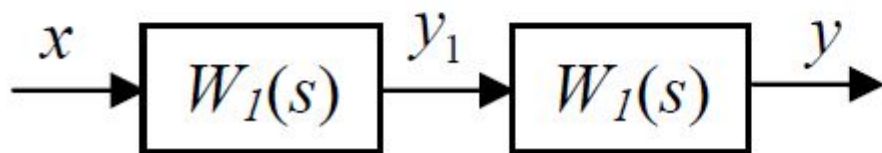
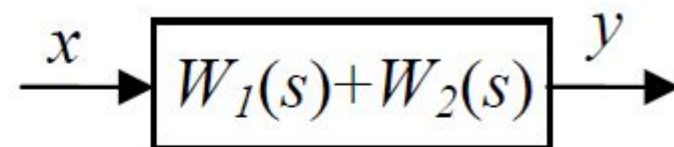
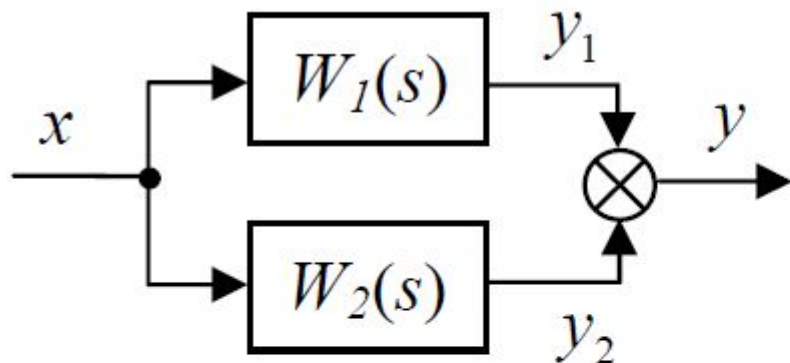


Структурные схемы

Систему управления можно разбить на блоки, имеющие вход и выход (объект, регулятор, привод, измерительная система). Для того, чтобы показать взаимосвязи этих блоков, используют структурные схемы. На них каждый элемент изображается в виде прямоугольника, внутри которого записывается его передаточная функция. Вход и выход блока показывают соответственно «входящей»



Структурные преобразования передаточных функций.



Моделирование систем управления в пакете XCOS

Пакет XCOS предназначен для моделирования систем. Вся модель строится из блоков, имеющих входы и выходы. Существует библиотека стандартных блоков, кроме того, можно создавать свои собственные блоки любой сложности.

Блоки соединяются линиями связи, по которым распространяются сигналы. Для того, чтобы соединить блоки, надо «вытащить» линию из выходного порта и протащить её к входу другого элемента. Для того, чтобы провести ломаную линию, нужно

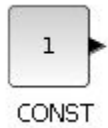
- 1) «вытащить» линию из выходного порта блока и отпустить левую клавишу мыши (ЛКМ) в первой точке излома
- 2) щелчками ЛКМ поставить остальные узлы
- 3) щелкнуть ЛКМ на входном порту другого блока

Чтобы подать один сигнал на два блока (сделать «развилку»), надо сначала создать одну линию обычным способом. Чтобы провести вторую линию, следует нажать левую или правую кнопку мыши на линии в точке развилки и протащить линию ко второму блоку.

Для того, чтобы запустить моделирование, надо щелкнуть ЛКМ по кнопке на панели инструментов. Параметры моделирования (метод интегрирования, обработка ошибок) устанавливаются с помощью окна Моделирование – Установка. Самый важный параметр – это время моделирования (Конечное время интегрирования).

Источники сигналов и

воздействий



CONST – сигнал постоянной величины.



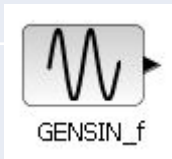
STEP_FUNCTION – ступенчатый сигнал, меняется время скачка (Step Time), начальное (Initial Value) и конечное значение (Final Value).



RAMP – линейно возрастающий сигнал с заданным наклоном (Slope). Можно задать также время начала изменения сигнала (Start Time) и начальное значение (Initial Value).



Генератор прямоугольных импульсов, задается амплитуда M (Amplitude). Выход генератора изменяется с M на $-M$, когда на красный вход поступает сигнал (например, от часов).



Синусоидальный сигнал, задается амплитуда (Amplitude), частота (Frequency), фаза (Phase).



Random generator – случайные числа с равномерным или нормальным (гауссовым) распределением. Можно задать тип распределения (параметр flag: 0 – равномерное, 1 – нормальное). Для равномерного распределения параметр A – минимальное значение, параметр B – ширина диапазона; для нормального – параметр A – среднее значение (Mean Value), параметр B – среднеквадратическое отклонение.

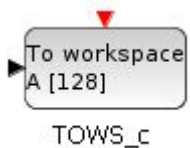


Часы (Источник событий) – задаётся период повторяемости событий и время первого события.

Регистрирующие устройства



Осциллограф – фиксирует значение, когда на синхронизирующий (красный) вход приходит сигнал (от часов). График выводит в графическое окно.

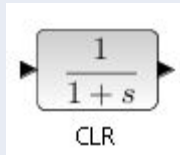


To workspace – передаёт информацию в рабочую область Scilab в виде массива с двумя полями:

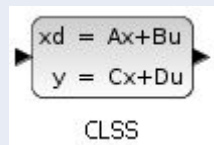
- time – набор временных отсчётов (когда приходил сигнал с часов);
- values – массив соответствующих значений измеряемого сигнала.

В параметрах задаются период обновления Refresh period (ширина диапазона по оси абсцисс), пределы по оси ординат Ymin и Ymax.

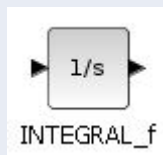
Системы с непрерывным временем



Передаточная функция, в параметрах задаются числитель (Numerator) и знаменатель (Denominator) в виде полиномов.

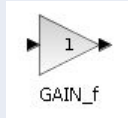


Модель в пространстве состояний, в параметрах задается четверка матриц, определяющих модель, и начальные условия для вектора состояния (Initial conditions).



Интегратор с возможностью установки начальных условий (Initial state).

Другие часто используемые блоки

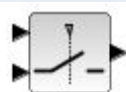


Gain – усилитель, задается коэффициент усиления (Gain).



Sum – сумматор, используется для сложения и вычитания входов. Параметр Number of input or sign vector задает количество входов и их знаки («+1» для сложения и «-1» для вычитания). Например, [1;-1].

Маршрутизация сигналов



Static: 1

Manual Switch – ручной переключатель, позволяет переключать выход на один из двух входных сигналов.



MUX

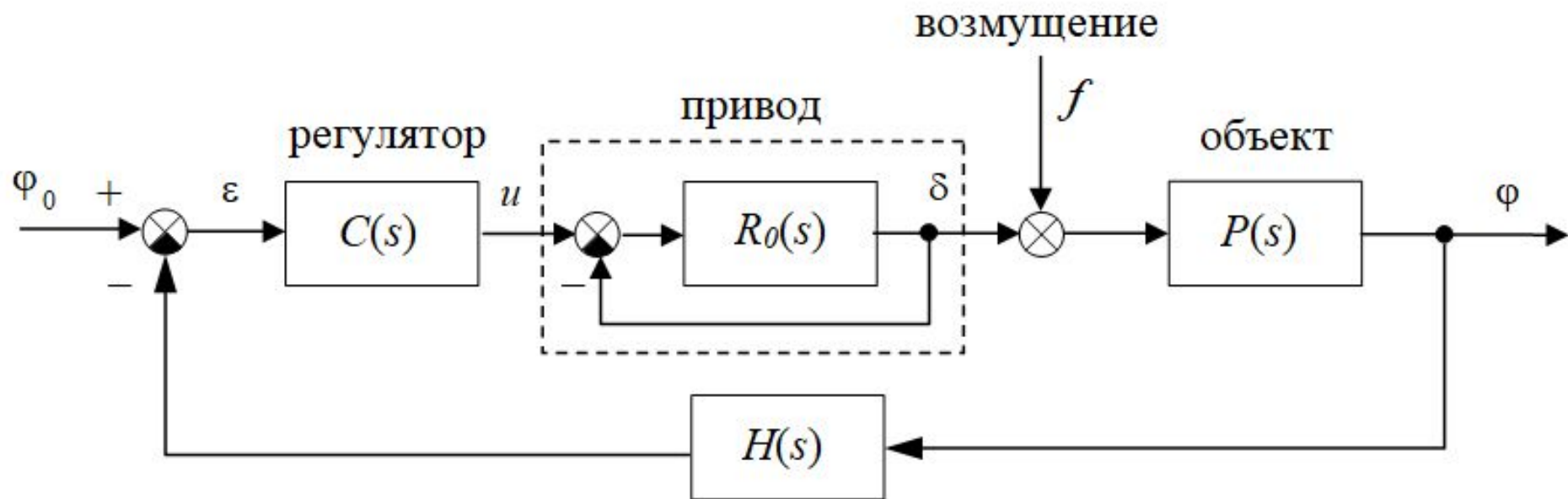
Mux – мультиплексор, объединяет несколько сигналов в один «жгут» (векторный сигнал), в параметрах задается число входов (Number of Inputs).



DEMUX

Demux – демультиплексор, позволяет «разбить» векторный сигнал на несколько скалярных, в параметрах задается число выходов (Number of Outputs).

САУ судна по курсу



Линейная математическая модель, описывающая рыскание судна, имеет вид

$$\dot{\phi} = \omega_y$$

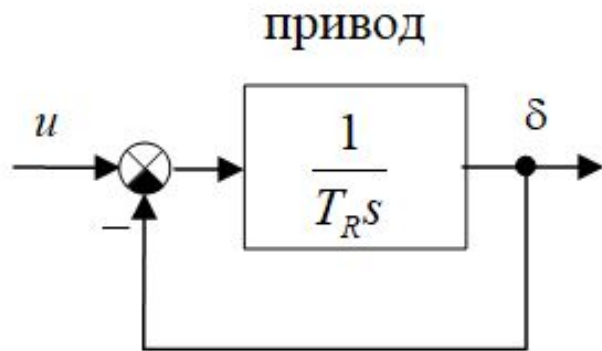
$$\dot{\omega}_y = -\frac{1}{T_s} \omega_y + \frac{K}{T_s} \delta$$

где ϕ – угол рыскания (угол отклонения от заданного курса), ω_y – угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси, δ – угол поворота вертикального руля относительно нейтрального положения, T_s – постоянная времени, K – постоянный коэффициент, имеющий размерность *рад/сек*.

Передаточная функция от угла поворота руля к углу рыскания запишется в виде

$$P(s) = \frac{K}{s(T_s s + 1)}$$

Привод (рулевая машина) приближенно моделируется как интегрирующее звено с постоянной времени T_R , охваченное единичной отрицательной обратной связью



$$R(s) = \frac{1}{T_R s + 1}$$

для измерения угла рыскания используется гироскоп

$$H(s) = \frac{1}{T_{oc} s + 1}$$

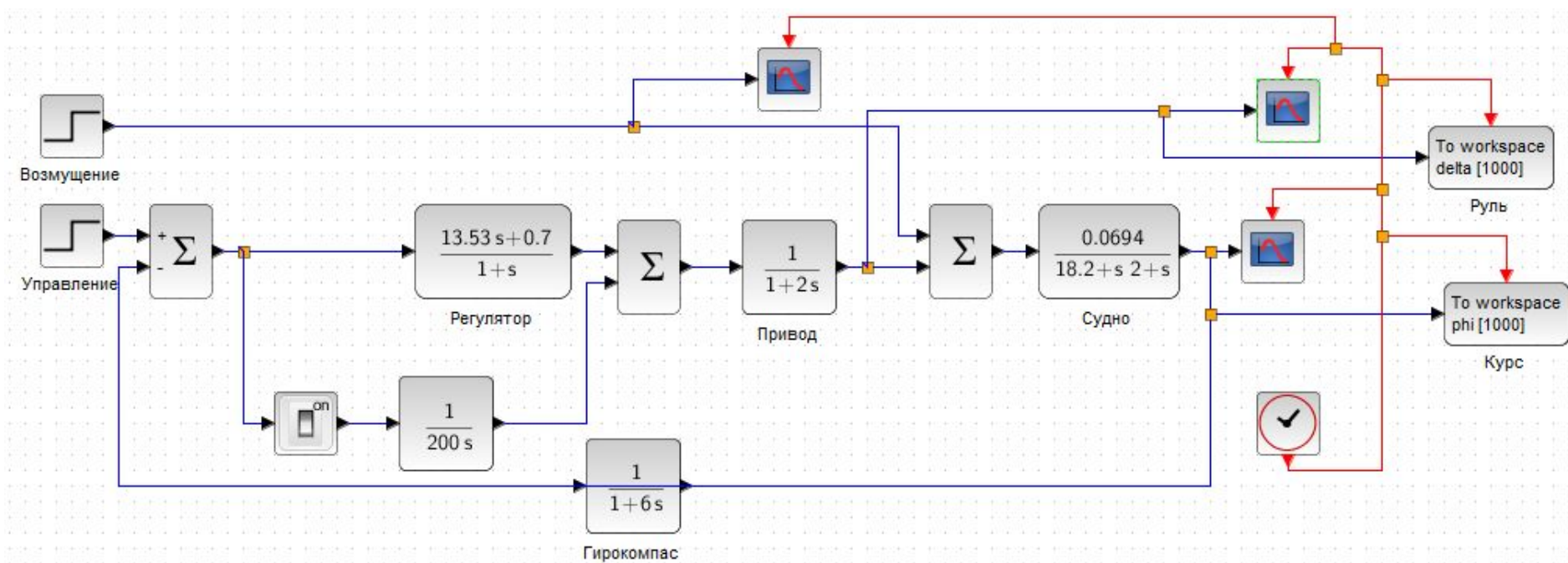
Исследуются переходные процессы в системе при использовании ПД-регулятора

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1} \right)$$

и ПИД-регулятора

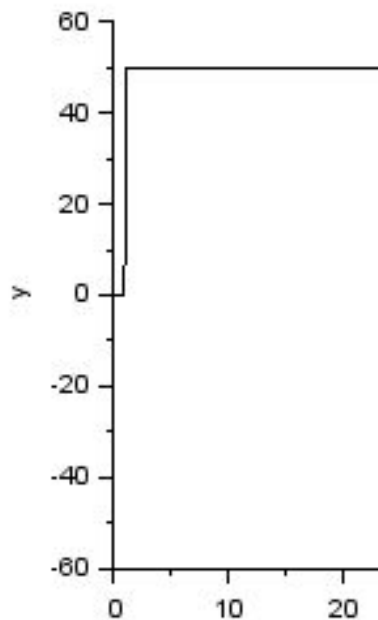
$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_s s}{T_v s + 1} \right) + \frac{1}{T_I s}.$$

Модель в XCOS

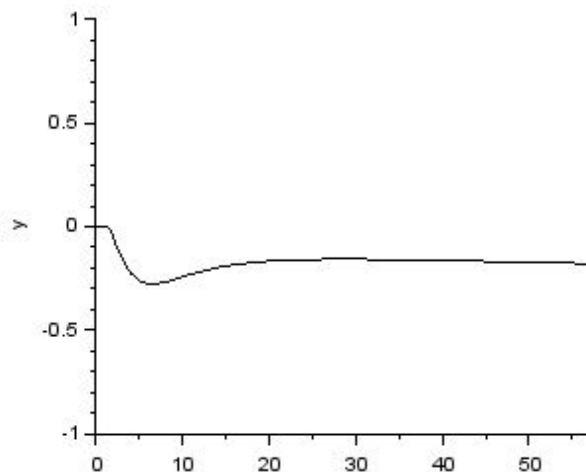


Возмущение

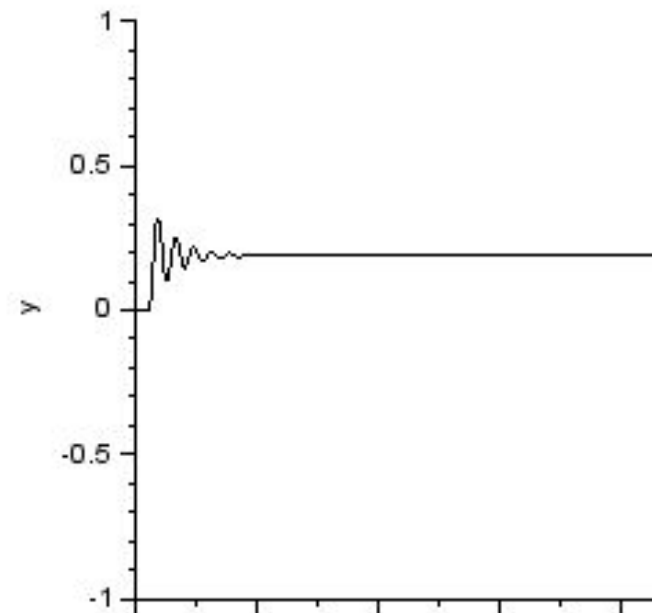
Реакция на возмущение



Руль

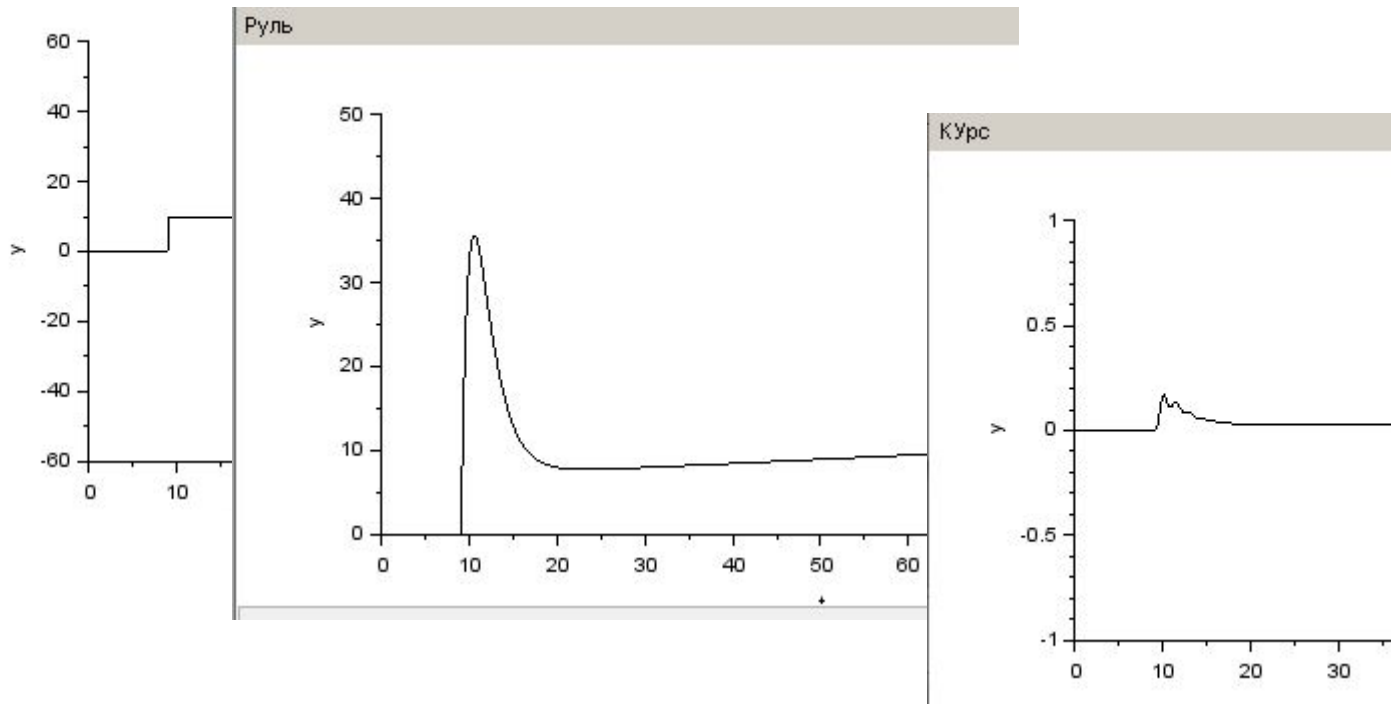


Курс



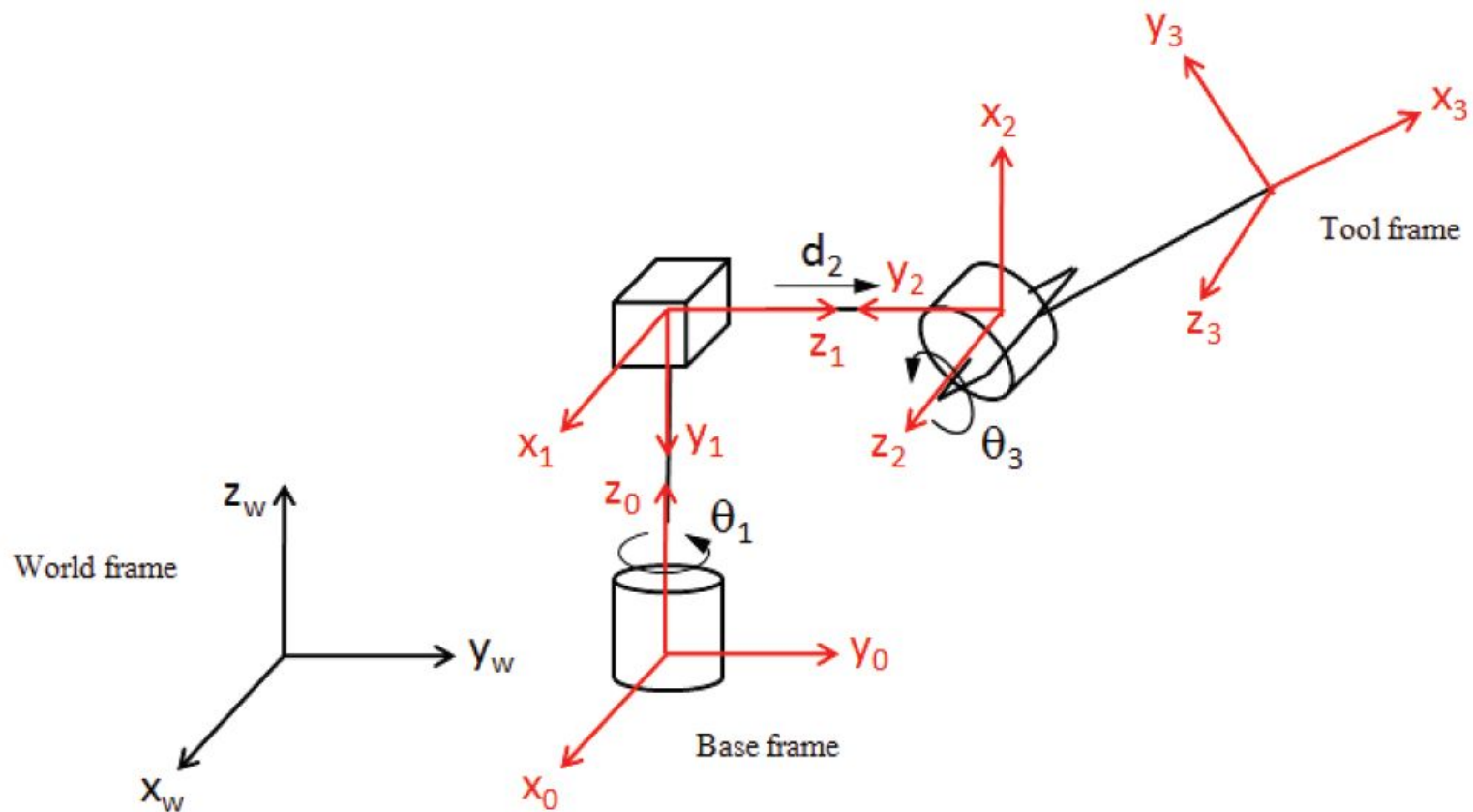
Реакция на управление

Управление



Scilab в робототехнике

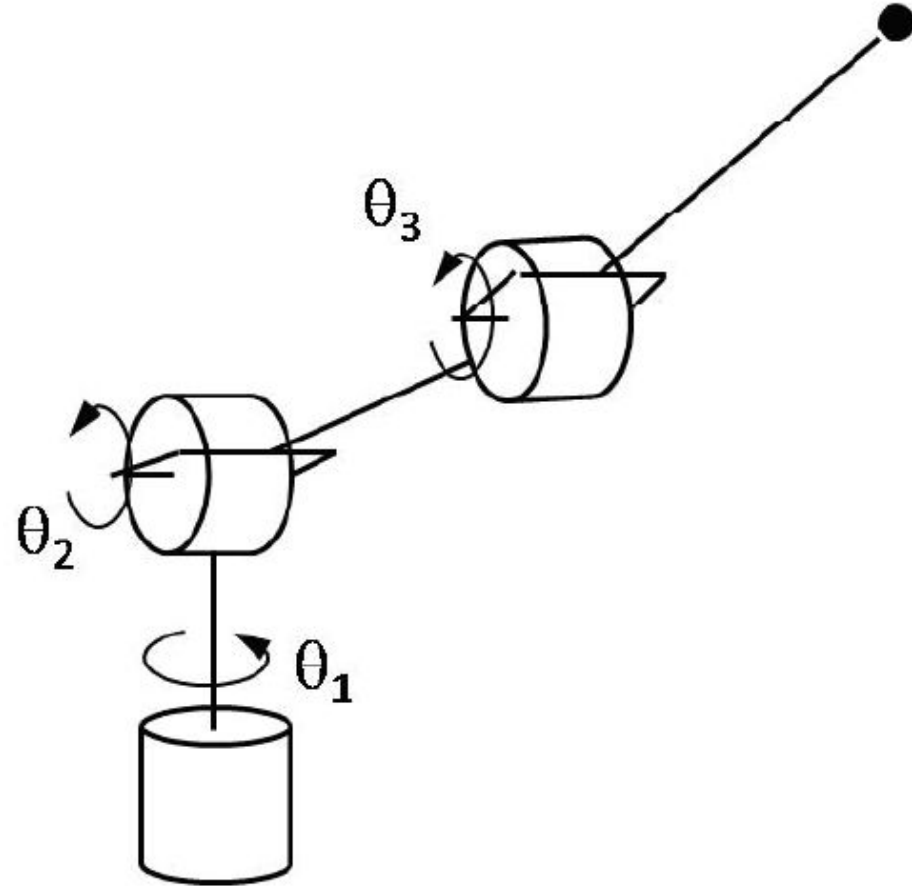
Основная задача анализа робота является представление положения и ориентации объектов в некоторой среде. Манипулятор робота - это не что иное, как набор жестких звеньев, от основания к инструменту. Движение звена может быть описано как его положение и ориентация в системе координат. Обычно используется декартова система координат



Основная процедура при изучении робототехники, заключается в прикреплении набора осей XYZ, называемых системами координат к каждому звену робота, как показано на рисунке для робота RPR (вращение, перемещение, вращение). Для решения задачи кинематики может потребоваться найти выражение положения и ориентации инструмента относительно базовой или мировой систем координат. Проблема может быть сложной, если соседние звенья прикреплены разными способами, поэтому имеются некоторые правила, такие как соглашение Денавита-Хартенберга

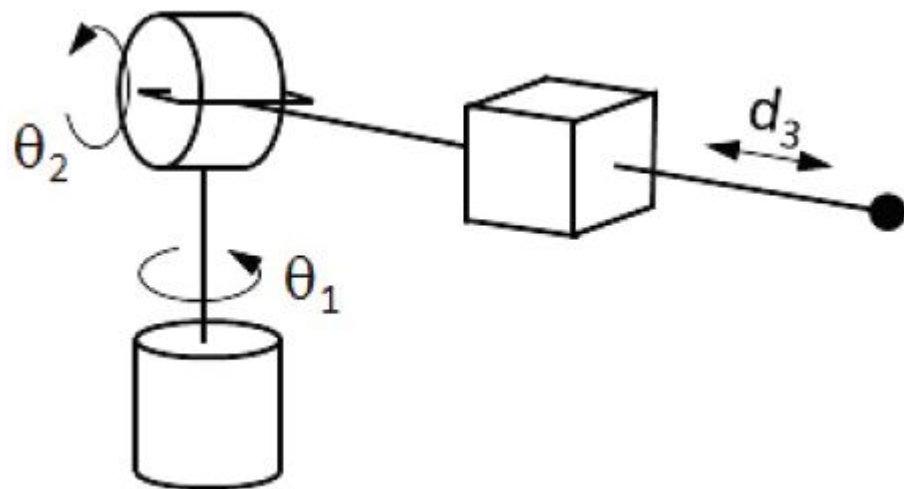
Сочлененный робот (RRR)

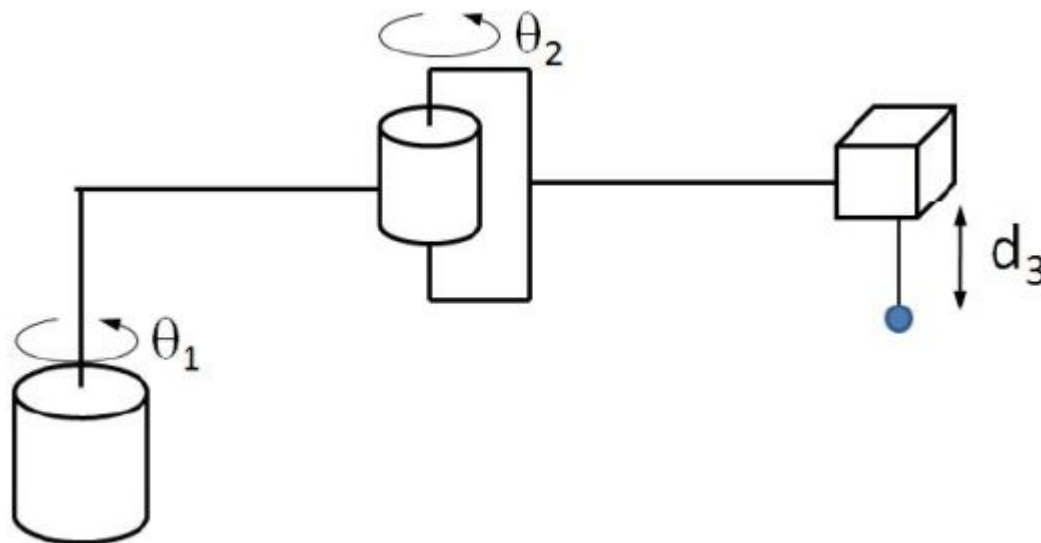
Этот робот, показанный на рисунке, также называется вращающимся, локтевым или антропоморфным. Оси сочленения от основания к инструменту обозначены как талия, плечо и локоть, а звенья - туловище, плечо и предплечье соответственно. Это один из наиболее широко используемых роботов в промышленности. Примерами являются PUMA 560 от Unimation, IRB1400 от ABB.



Сферический робот (RRP)

Довольно часто имя робота определяется по форме рабочей области, которую может охватить конечный эффектор. На рисунке показана схема сферического робота, который имеет конфигурацию соединения RRP. Хорошо известным примером сферического робота является Stanford Arm.



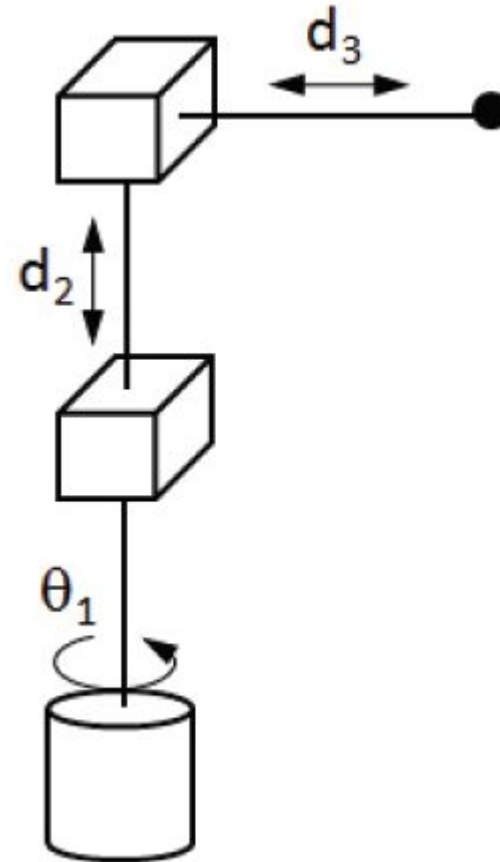


SCARA Robot (RRP)

Хотя робот SCARA (Селективный совместимый сочлененный робот для сборки) на рисунке также имеет конфигурацию RRP, его расположение отличается от сферического робота. Три оси робота SCARA взаимно параллельны. Конструкция предназначена для сборки

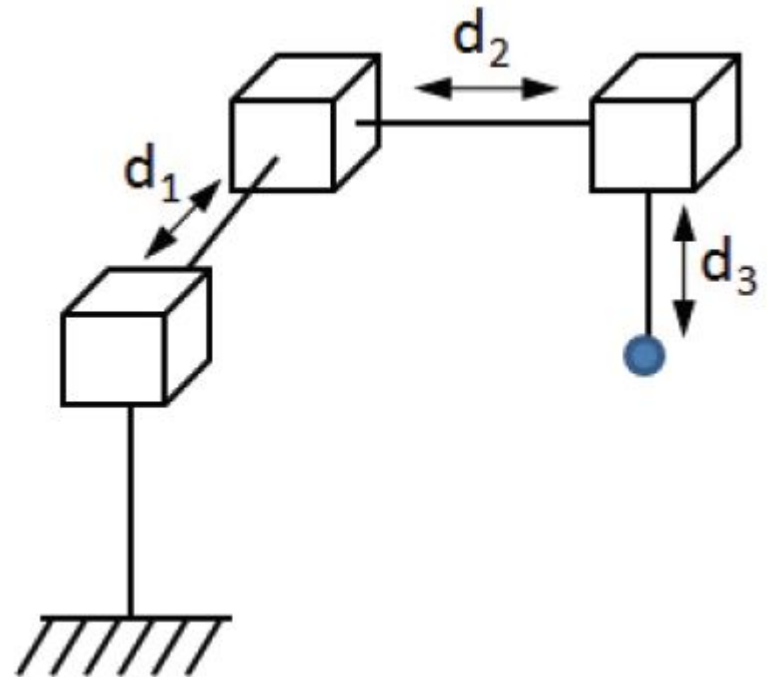
Цилиндрический робот (RPP)

На рисунке 1.7 показана символическая схема цилиндрического робота. Первый сустав вращается и производит вращение вокруг основания, в то время как второй и третий суставы призматические. Оно имеет рабочую область цилиндрической формы, отсюда и название. Цилиндрические роботы часто используются в задачах передачи объектов.



Робот с линейно перемещающимися звеньями (PPP)

У робота есть все три соединения призматического типа, как показано на рисунке. Переменными этого робота являются декартовы координаты конечного звена относительно основания. Это делает его рабочее пространство прямоугольным. Эти роботы полезны при сборке, сборке и размещении, а также при перемещении материала или груза. Конструкция позволяет увеличить структурную жесткость и, следовательно, повысить точность.



RTSX (Robotic Tools for Scilab / Xcos)

О разработчике. Д-р Вародом Тучинда, он же Дью (Роса) Тучинда, получил степень бакалавра наук в Технологическом институте им. Короля Монкута, Северный Бангкок, Таиланд, в 1987 году, степень MSEE в Университете Касетсарт, Таиланд, в 1994 году, MSEE и Ph.D. дипломы Массачусетского университета, Амхерст, США, в 1998 и 2002 годах соответственно. В настоящее время он работает в качестве исследователя / лектора в RDiPT, факультет машиностроения, Университет Kasetsart, Таиланд. Его исследовательские интересы включают разработку и внедрение систем управления для промышленного применения. Его книга представляет введение в робототехнику с множеством примеров.

Установка

RTSX - это просто набор функций и сценариев, написанных исключительно на языке Scilab вместе с некоторыми примерами модели Xcos, поэтому он не зависит от операционных систем.

Все файлы помещаются в дерево каталогов, а затем упаковываются в один zip-файл, который можно загрузить с последней версией по адресу scilab.ninja/rtsx/download.

Загрузите zip-файл и поместите его в рабочий каталог по вашему выбору. Для Например, d: \ work. Установщика нет. Просто извлеките файл вручную с помощью утилиты (Windows Explorer, 7-zip, WinRAR и т. Д.) В вашей системе. Если вы не измените имя каталога, у вас будут все файлы в d: \ work \ RTSX1.1. С этого момента мы будем называть этот каталог корневым каталогом RTSX. Если ваш отличается, просто замените путь на ваш выбор во всех последующих обсуждениях.

Запустите Scilab и используйте верхнюю часть Обзорщика файлов, чтобы изменить рабочий каталог на d: \ work \ RTSX1.1. В качестве альтернативы, в окне консоли Scilab введите -> cd d: \ work \ RTSX1.1.

Затем загрузите все функции в рабочую область Scilab, набрав -> exec ('startup_rtsx.sce', - 1); Вы должны увидеть сообщение

Robotic Tools for Scilab/Xcos (RTSX) Version 1.1

by Scilab.ninja August 2017

<http://scilab.ninja/rtsx>

Если вместо этого вы видите какое-то сообщение об ошибке, значит что-то не так.

Распространенной ошибкой является попытка запустить стартовый файл из любого каталога, кроме корня RTSX, введя полный путь к команде exec , например exec ('d: \ work \ RTSX1.1 \ startup_rtsx.sce', - 1)

Это не будет работать, потому что startup_rtsx.sce содержит список команд exec для каждого из файлов *.sci, включая файлы в подкаталогах. startup_rtsx.sce не может создать правильные имена путей для всех файлов, если вы не выполняете их в корневом каталоге. Проверьте также на синтаксическую опечатку.

Другой способ:

-> rprdemo

Сообщение:

Однородные преобразования

Для решения задач кинематики робота, необходимо описать математически отношение некоторого положения и угла объекта, скажем, конечного звена руки робота, по отношению к опорной системе координат. Для сложного манипулятора эти отношения обычно трудно найти за один шаг. Вместо этого промежуточные координатные оси должным образом размещаются между соседними соединениями. Затем общая кинематика вычисляется как произведение матриц, представляющих отношения между системами координат, от основания вверх.

Гомогенное преобразование относится к математике, используемой для формирования матрицы, которая описывает расположение и ориентацию систем координат относительно другой системы отсчета.

В общем, шесть степеней свободы необходимы для описания отношения между

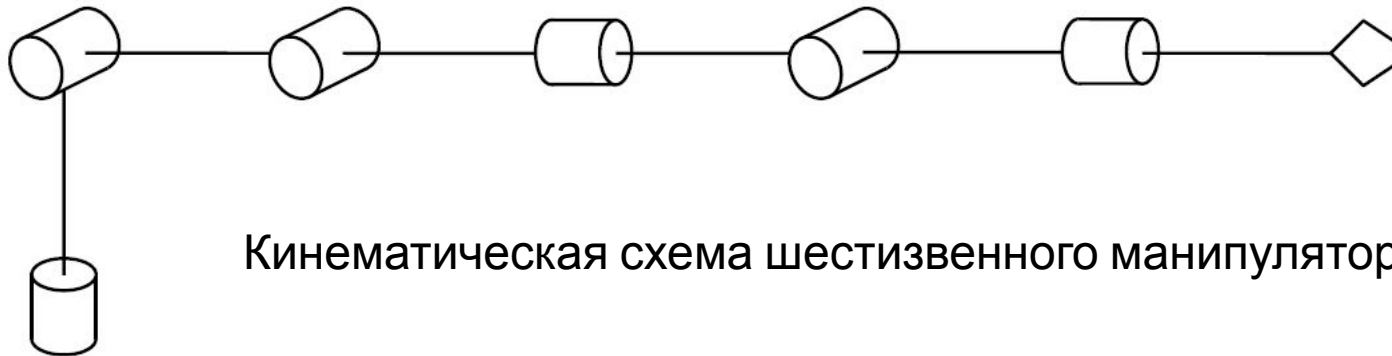
двумя с.к. в трехмерном пространстве: 3 для ориентации и 3 для местоположения.

Моделирование кинематики робота.

Известно, что положение и ориентация твердого тела (или системы координат, связанной с этим телом) в пространстве однозначно определяется шестью координатами: тремя линейными (декартовыми) и тремя угловыми (например, углами Эйлера). Использование метода, предложенного в 1955 г. учеными Жаком Денавитом и Ричардом Хартенбергом, позволяет сократить это число до четырех параметров, называемыми параметрами Денавита-Хартенберга.

Метод Денавита-Хартенберга

- Шаг 1. Привязка систем координат к звеньям.
- Шаг 2. Определение параметров Денавита-Хартенберга.
- Шаг 3. Построение матриц однородного преобразования.
- Шаг 4. Расчет углов Эйлера по итоговой матрице вращения.

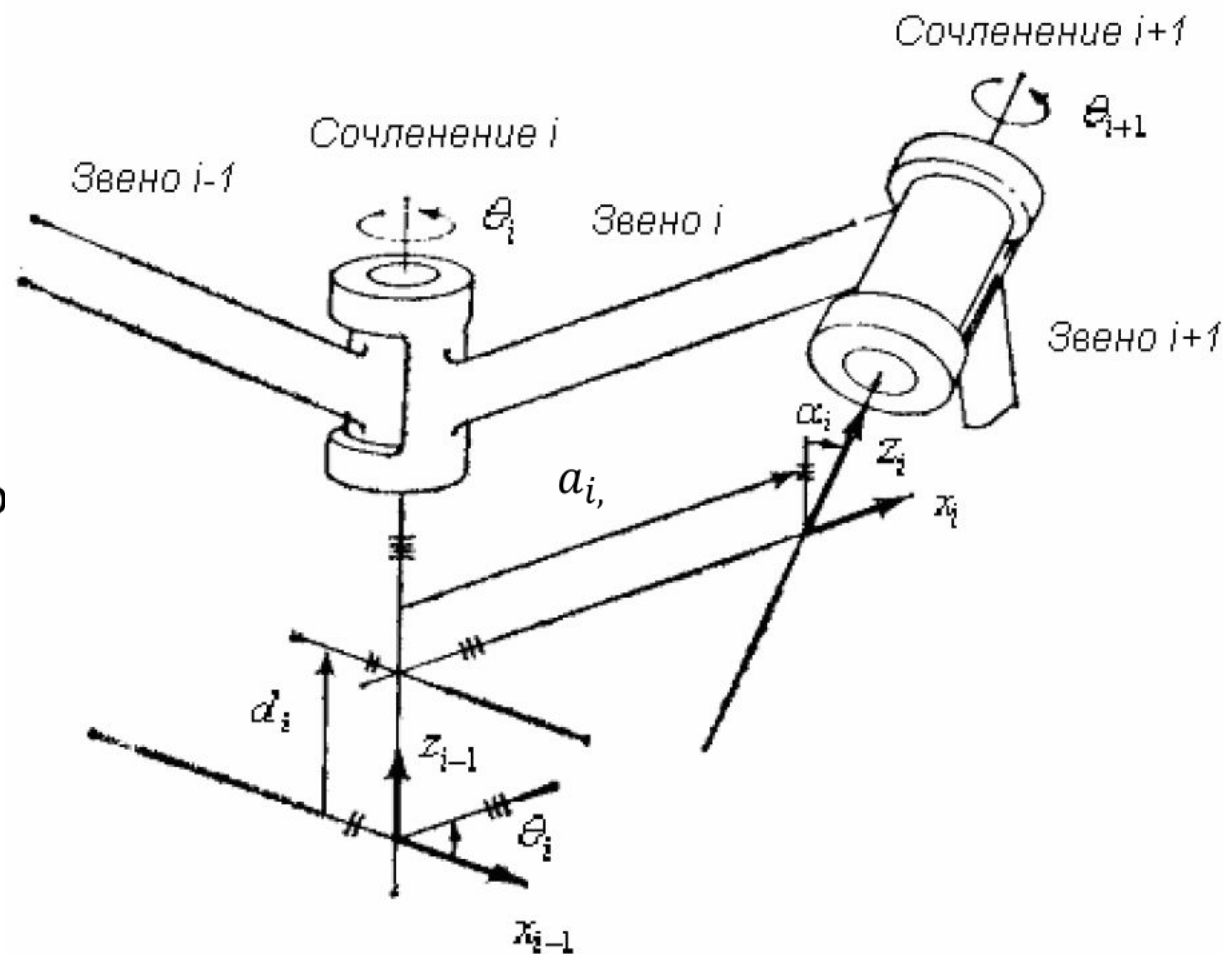


Кинематическая схема шестизвенного манипулятора

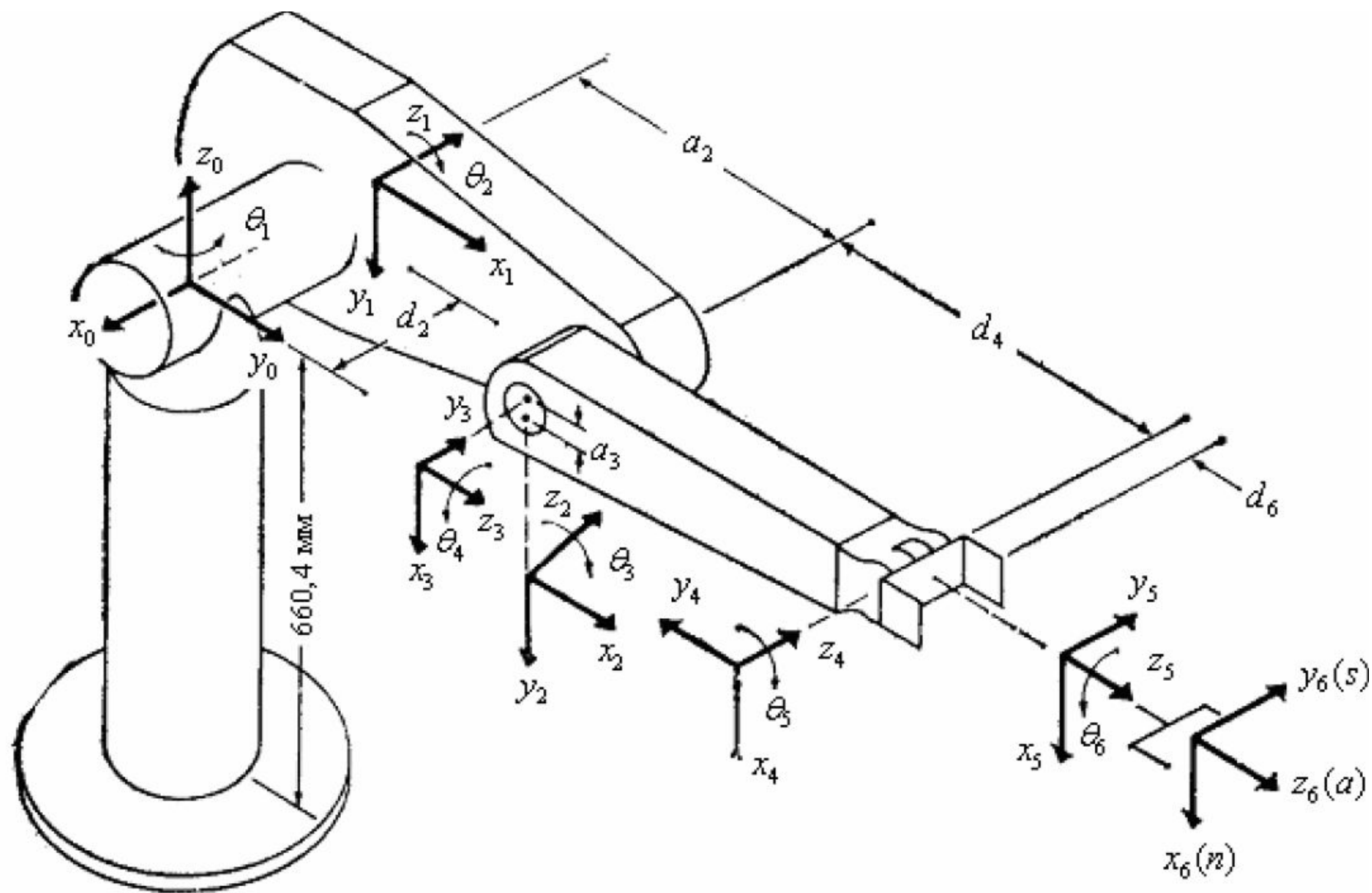
Очевидно, что каждое i -ое сочленение манипулятора соединяет два звена $i - 1$ и i . Таким образом, манипулятор с шестью степенями свободы имеет семь звеньев, пронумерованных от нуля до шести, где нулевое звено соответствует «земле». Поскольку последнее не относится напрямую к конструкции самого робота, несмотря на формальное наличие семи звеньев, таких роботов в русскоязычной литературе называют шестизвенными.

Для понимания логики работы с системами координат, привязанным к звеньям робота, подчеркнем, что i -ая система координат жестко связывается с i -ым звеном. Когда i -ое звено приводится в движение за счет i -го сочленения, система координат i меняет свое положение относительно предыдущей системы $i - 1$.

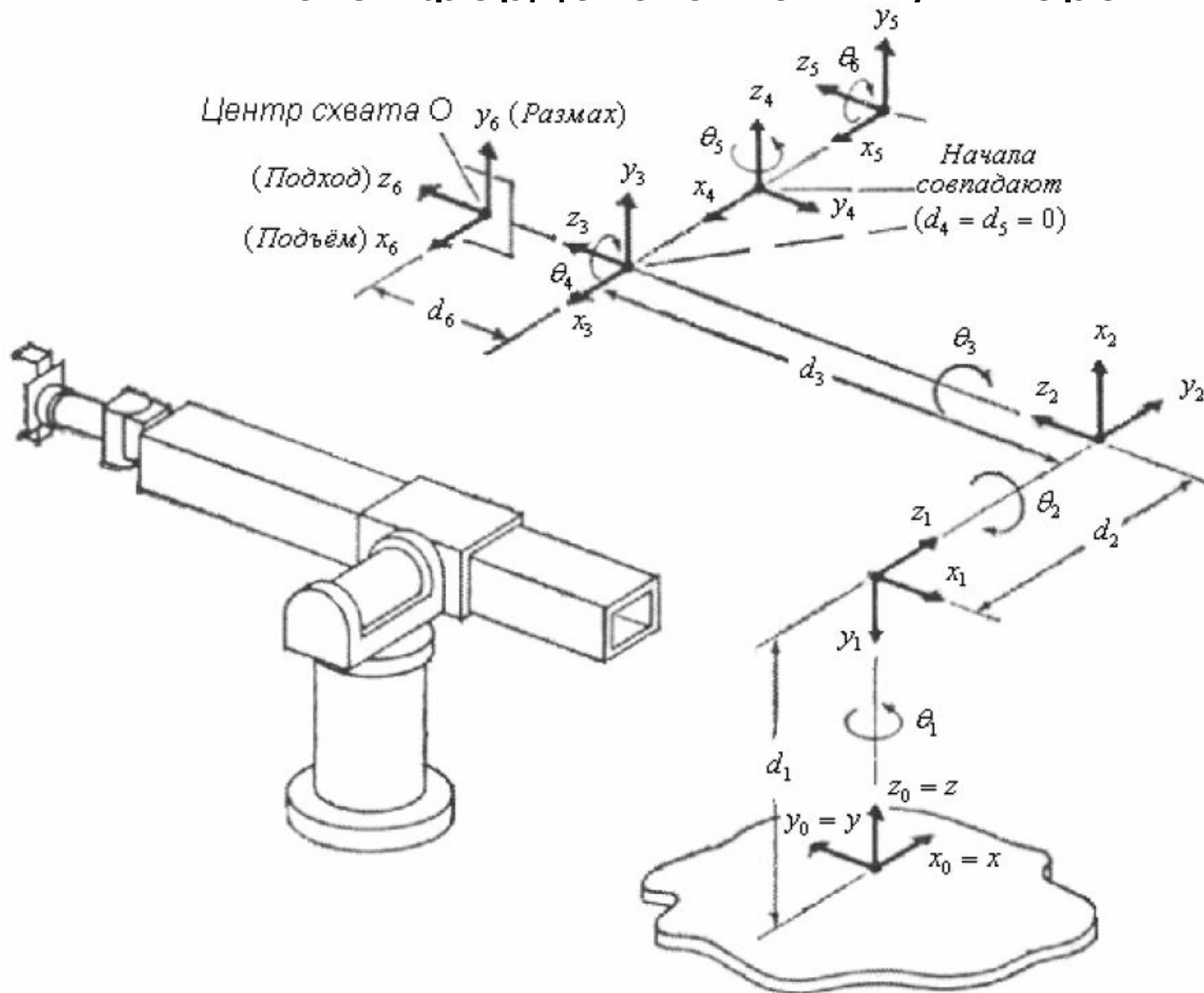
Итак, с каждым звеном манипулятора связаны четыре параметра: $\alpha_i, a_i, d_i, \theta_i$. Если для этих параметров установить правило выбора знаков, то они составят набор, достаточный для описания кинематической схемы каждого звена манипулятора. Заметим, что эти параметры можно разделить на две пары: параметры звена (α_i, a_i), которые характеризуют конструкцию звена, и параметры сочленения (d_i, θ_i), характеризующие относительное положение соседних звеньев.



Формирование систем координат звеньев для манипулятора Пума



Формирование систем координат звеньев для станфордского манипулятора



Выберем ось z_i так, чтобы она совпала с осью вращения или поступательного движения последующего сочленения $i + 1$ в зависимости от его типа. Это означает, что относительное расположение смежных звеньев (систем координат) будет определяться именно переменной вокруг (или вдоль) этой оси.

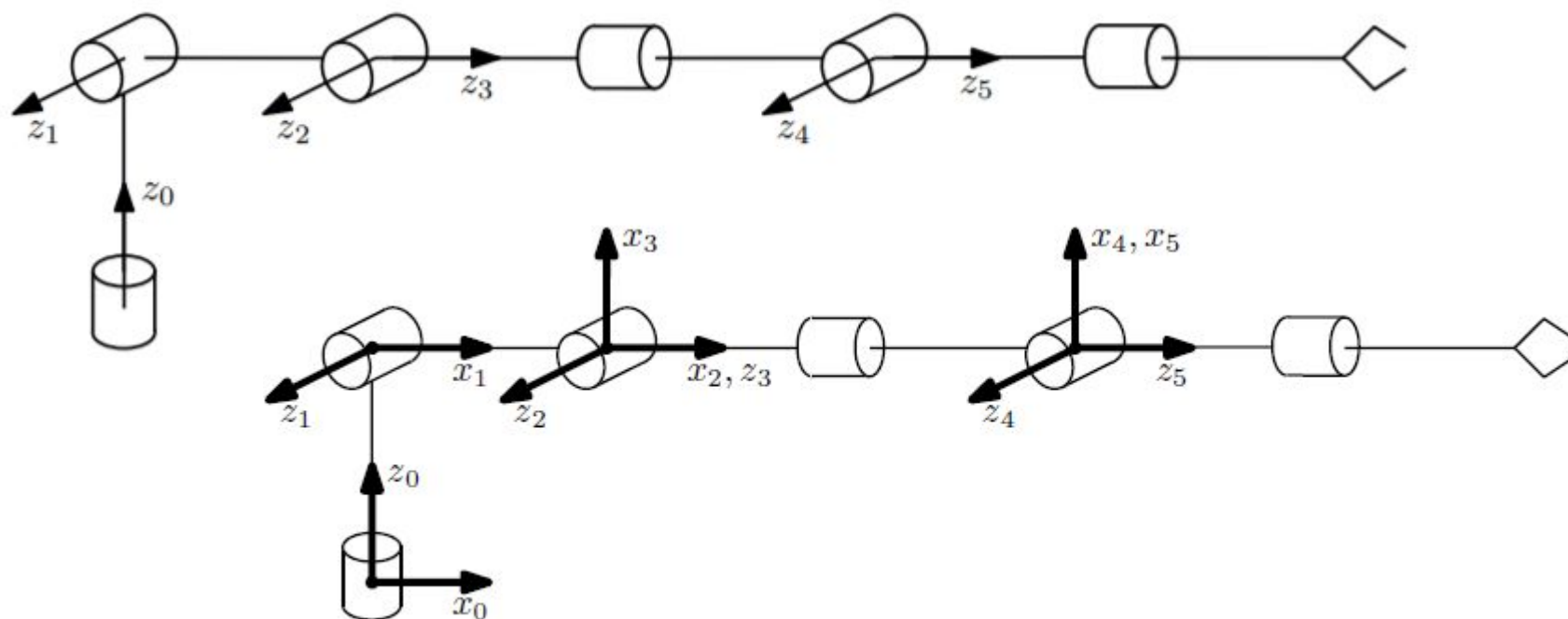
Выберем ось x_i , $i = \{1, 2 \dots, n - 1\}$ так, чтобы выполнялись два следующих условия.

У с л о в и е 1.1 Ось x_i перпендикулярна оси z_{i-1} и оси z_i

У с л о в и е 1.2 Ось x_i направлена от оси z_{i-1}

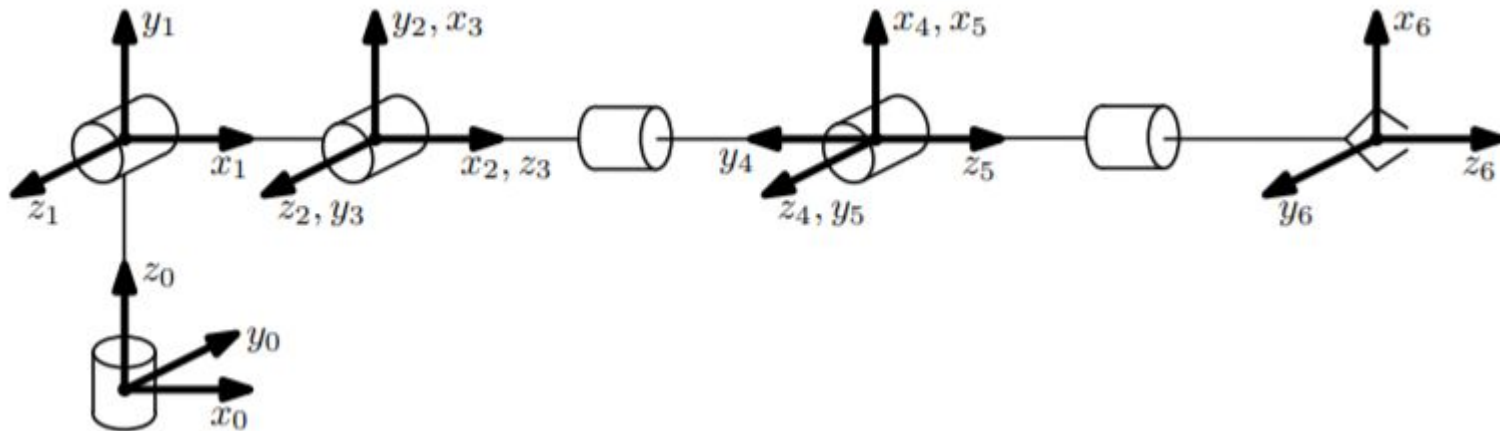
Ось x_0 можно выбрать произвольно, хотя желательно, чтобы в нулевой конфигурации смежные оси x_{i-1} и x_i были сонаправлены, поскольку именно они будут задавать значения обобщенных координат (вдоль осей z_i), которые в начальной конфигурации предполагаются нулевыми.

Обратите внимание на расположение оси x_3 и точки отсчета третьей системы координат на Рис. Такой выбор обусловлен условиями 1.1 и 1.2, согласно которым ось x_3 должна быть перпендикулярна и осям z_2 и z_3



Выберем ось y_i так, чтобы система координат, заданные единичными векторами $\vec{x}_i, \vec{y}_i, \vec{z}_i$ была правой, т.е. в направлении, заданном векторным произведением:

$$\vec{y}_i = \vec{z}_i \times \vec{x}_i.$$



Выберем систему координат n , связанную со схватом или рабочим инструментом. Для большинства современных роботов (в том числе для рассматриваемого шестизвенного манипулятора) последнее сочленение является вращательным, ввиду чего оси z_{n-1} и z_n совпадают. В этом случае искомая система получается путем смещения предшествующей системы координат на фиксированное значение d_n вдоль оси z_{n-1} и последующего поворота на переменный угол θ_n вокруг z_{n-1} или наоборот.

Параметры Денавита-Хартенберга

a_i — расстояние вдоль оси x_i от z_{i-1} до z_i ;

α_i — угол вокруг оси x_i от z_{i-1} до z_i ;

d_i — расстояние вдоль оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i ;

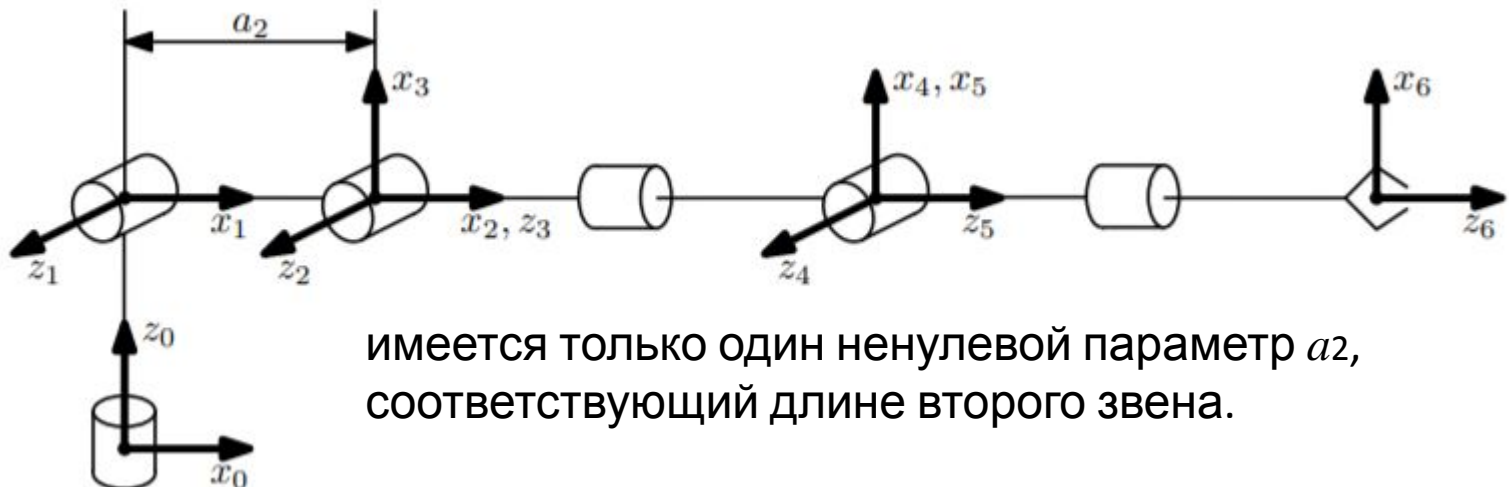
θ_i — угол вокруг оси z_{i-1} от x_{i-1} до x_i .

Параметры a_i и α_i определяются вокруг текущих осей x_i , а параметры d_i и θ_i — вокруг предыдущих осей z_{i-1} .

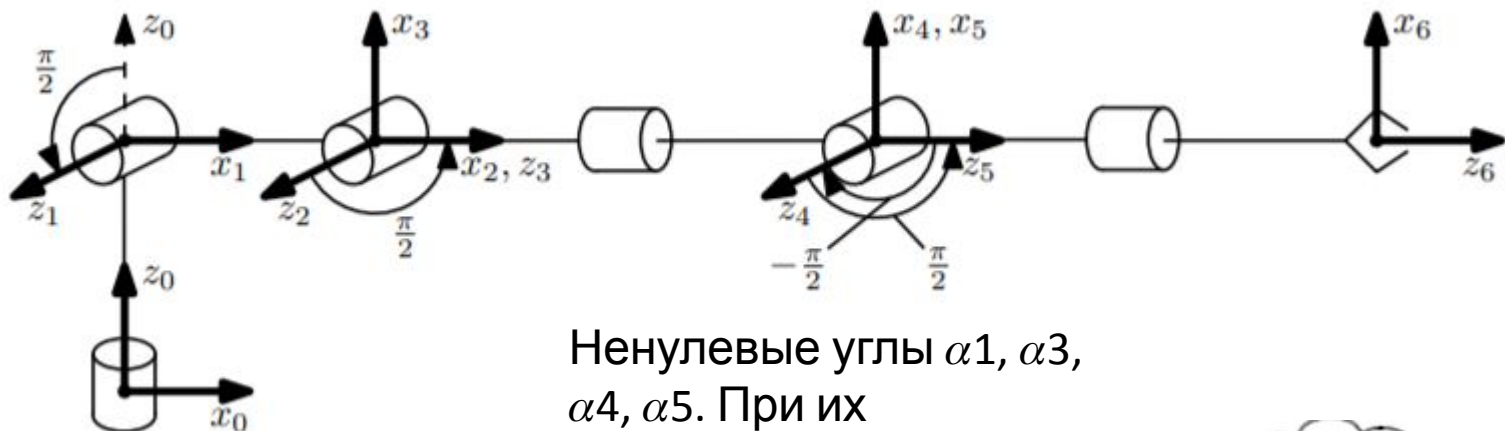
Параметры a_i и α_i всегда являются константами для всех кинематических схем и обусловлены конструкцией манипуляторов

Что касается оставшихся параметров d_i и θ_i , среди них только один параметр является постоянным, а другой — переменным в зависимости от типа сочленения: в случае вращательного — угол θ_i переменный, смещение

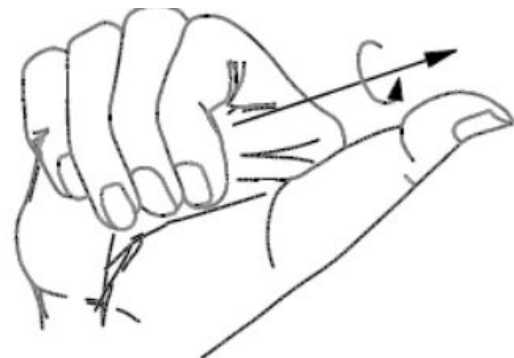
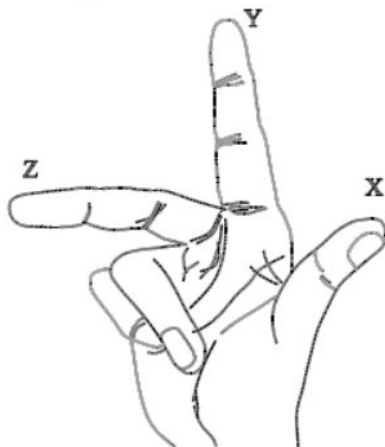
d_i постоянное, в случае поступательного — наоборот.



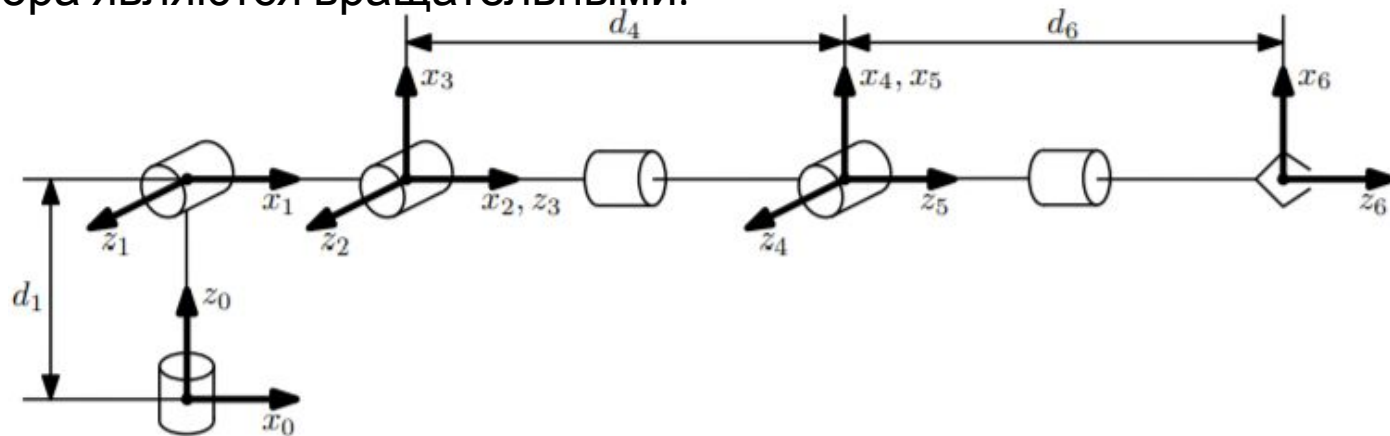
имеется только один ненулевой параметр a_2 , соответствующий длине второго звена.



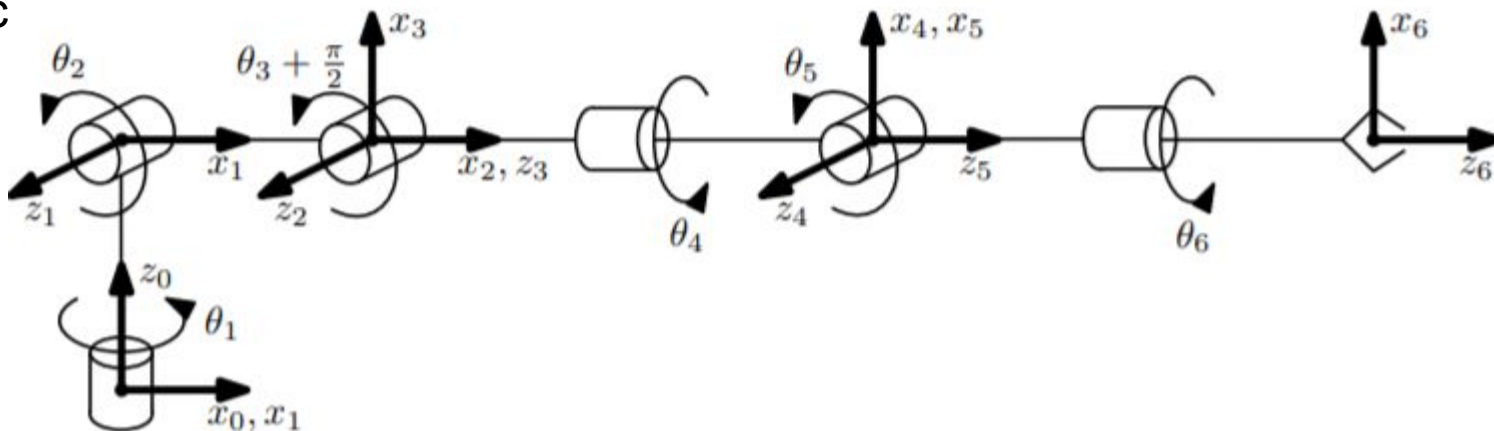
Ненулевые углы $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$. При их определении важно учитывать знаки, которые зависят от направления вращения. Положительное направление легко определяется с помощью правила



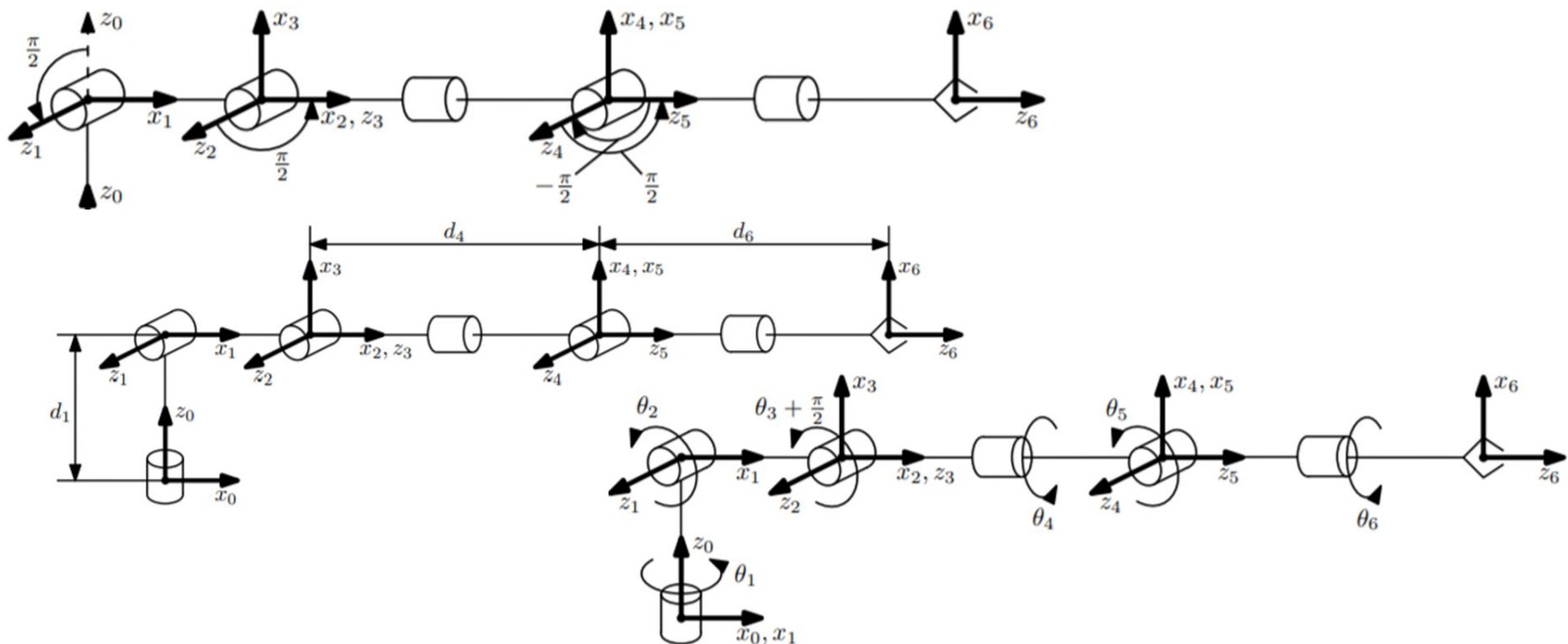
Линейные смещения d_1 , d_4 и d_6 постоянные, поскольку все сочленения манипулятора являются вращательными.



Углы θ_1 – θ_6 , являющиеся обобщенными координатами, т.е. переменными величинами. Мы приняли изображенное расположение звеньев (и связанных с ними систем координат) за нулевую конфигурацию. Это означает, что все обобщенные координаты для конкретно такого положения манипулятора являются нулевыми. Действительно, если обратить внимание на смежные оси x_i , то почти все они будут сонаправлены, кроме пары x_2 и x_3 . Между ними образуется прямой угол, который необходимо добавить к θ_3 , чтобы нивелировать это относ



Параметры Денавита-Хартенберга 6-звенного манипулятора



| Звено, i | a_i | α_i | d_i | θ_i |
|------------|-------|------------------|-------|----------------------------|
| 1 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ | d_1 | θ_1 |
| 2 | a_2 | 0 | 0 | θ_2 |
| 3 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ | 0 | $\theta_3 + \frac{\pi}{2}$ |
| 4 | 0 | $-\frac{\pi}{2}$ | d_4 | θ_4 |
| 5 | 0 | $\frac{\pi}{2}$ | 0 | θ_5 |
| 6 | 0 | 0 | d_6 | θ_6 |

Прямая задача кинематики (ПЗК)

При решении ПЗК рассматриваются две системы координат: исходная (базовая, инерциальная), связанная с «землей», $o_0x_0y_0z_0$ и итоговая, связанная со схватом или рабочим инструментом $o_nx_ny_nz_n$.

$$k^0 = T_n^0 k^n,$$

Определение: Матрица T_n^0 , определяющая связь систем координат $o_0x_0y_0z_0$ и $o_nx_ny_nz_n$, носит называется матрицей однородного преобразования и имеет вид

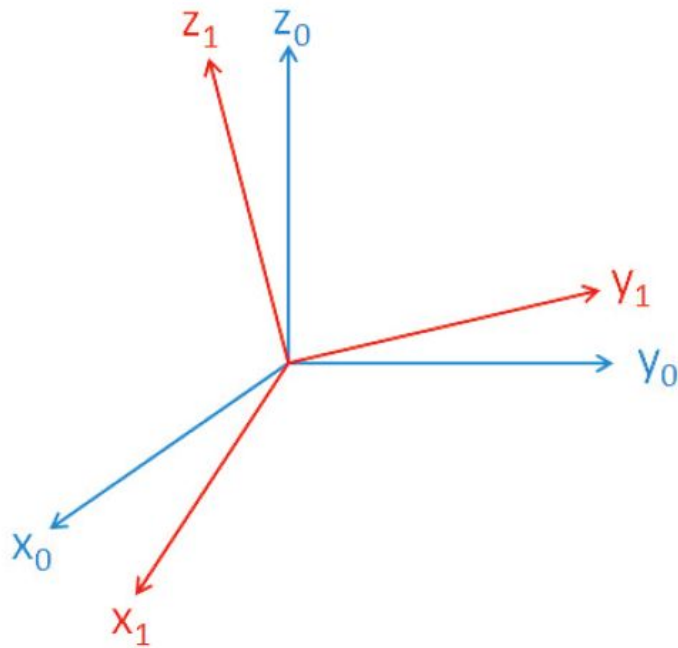
$$T_n^0 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_n^0 & s_n^0 & a_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_n^0 & p_n^0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где векторы n_n^0 , s_n^0 и a_n^0 выражают направления осей x_n , y_n и z_n , соответственно, относительно системы координат $o_0x_0y_0z_0$, $R_n^0 \in SO(3)$ — матрица вращения системы $o_nx_ny_nz_n$ относительно $o_0x_0y_0z_0$, $p_n^0 \in \mathbb{R}^3$ — вектор линейного смещения начала координат системы $o_nx_ny_nz_n$ относительно $o_0x_0y_0z_0$.

Как видно из определения, матрица T_n^0 имеет размерность (4×4) , ввиду чего возникает необходимость расширить векторы координат n единицей для соответствия размерностей в матричных уравнениях:

$$\begin{bmatrix} x^0 \\ y^0 \\ z^0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_n^0 \begin{bmatrix} x^n \\ y^n \\ z^n \\ 1 \end{bmatrix} .$$

Матрицы поворотов



$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} x_1 \cdot x_0 & y_1 \cdot x_0 & z_1 \cdot x_0 \\ x_1 \cdot y_0 & y_1 \cdot y_0 & z_1 \cdot y_0 \\ x_1 \cdot z_0 & y_1 \cdot z_0 & z_1 \cdot z_0 \end{bmatrix}$$

$${}^1R_0 = \begin{bmatrix} x_0 \cdot x_1 & y_0 \cdot x_1 & z_0 \cdot x_1 \\ x_0 \cdot y_1 & y_0 \cdot y_1 & z_0 \cdot y_1 \\ x_0 \cdot z_1 & y_0 \cdot z_1 & z_0 \cdot z_1 \end{bmatrix}$$

x_0, y_0, z_0 единичные вектора в системе $\{0\}$, x_1, y_1, z_1 единичные вектора в системе $\{1\}$

$${}^1R_0 = {}^0R_1^T$$

$${}^1R_0 = {}^0R_1^{-1}$$

поэтому

$${}^0R_1^T = {}^0R_1^{-1}$$

Матрица 0R_1 ортогональная

Матрицы поворота и функции SCILAB

$$R_{x,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad R_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Матрицы
поворота на угол
 θ относительно
осей x,y,z

-->R=rotx(pi/2)

R =

1. 0. 0.

0. 0. - 1.

0. 1. 0.

-->R=rotz(30,'deg')

R =

0.8660254 - 0.5 0.

0.5 0.8660254 0.

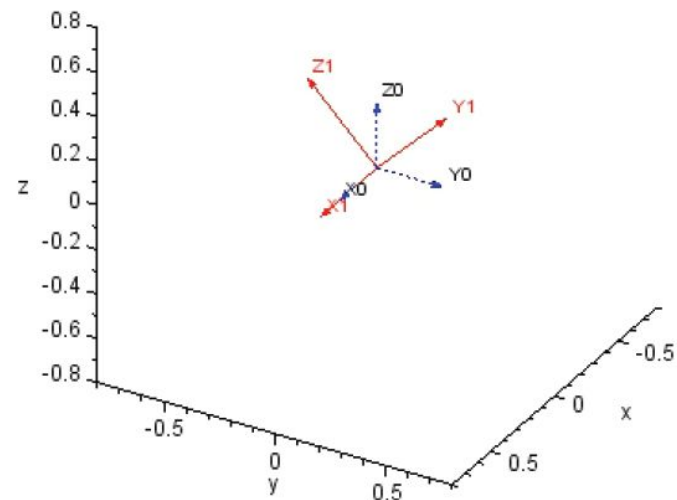
0. 0. 1.

Визуализация и анимация поворота
на 45 градусов

-->R=rotx(pi/4);

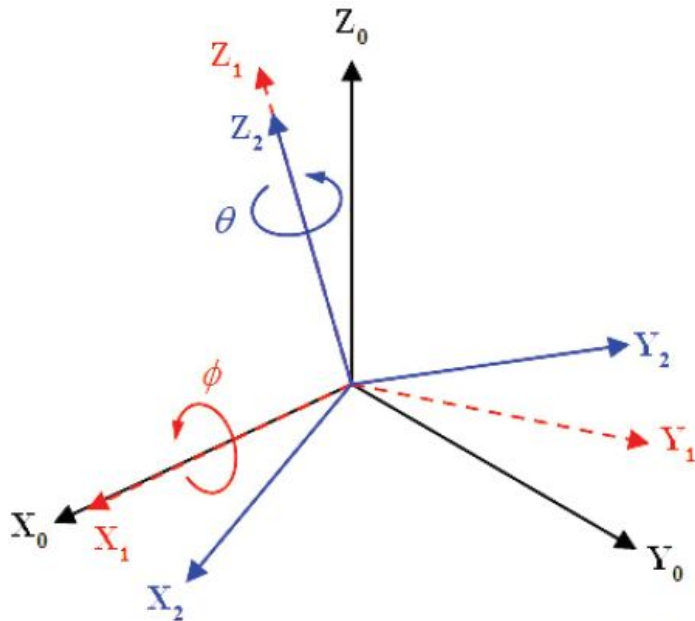
-->trplot(R,'world');

-->tranimate(R, 'world');



Повороты относительно текущей системы координат (с.к.)

Ключевое слово здесь - «текущая с.к.», поэтому мы сначала объясним, что это такое. Предположим, что требуется 3 последовательных вращения. Начиная с $\{0\}$, мировой с.к., мы вращаем его, чтобы создать $\{1\}$. В этот момент $\{1\}$ называется текущей с.к. Поэтому, если мы вращаем $\{1\}$, чтобы создать $\{2\}$, это вращение выполняется с текущей с.к. Теперь текущая с.к. меняется на $\{2\}$. Если мы поворачиваем $\{2\}$, чтобы создать $\{3\}$, это последнее вращение также относительно текущей с.к..

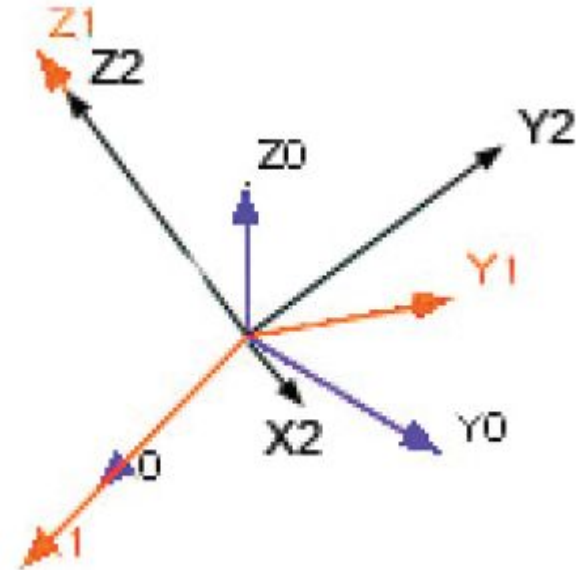


На рис. показаны 2 последовательных вращения, каждое вокруг главной оси текущей с.к. Процесс начинается с поворота ϕ вокруг X в $\{0\}$, а затем θ вращения на Z относительно Z из $\{1\}$. Полученная комбинация вращения может быть описана:

$$R = R_{x,\phi} R_{z,\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 \\ c\phi s\theta & c\phi c\theta & -s\phi \\ s\phi s\theta & s\phi c\theta & c\phi \end{bmatrix}$$

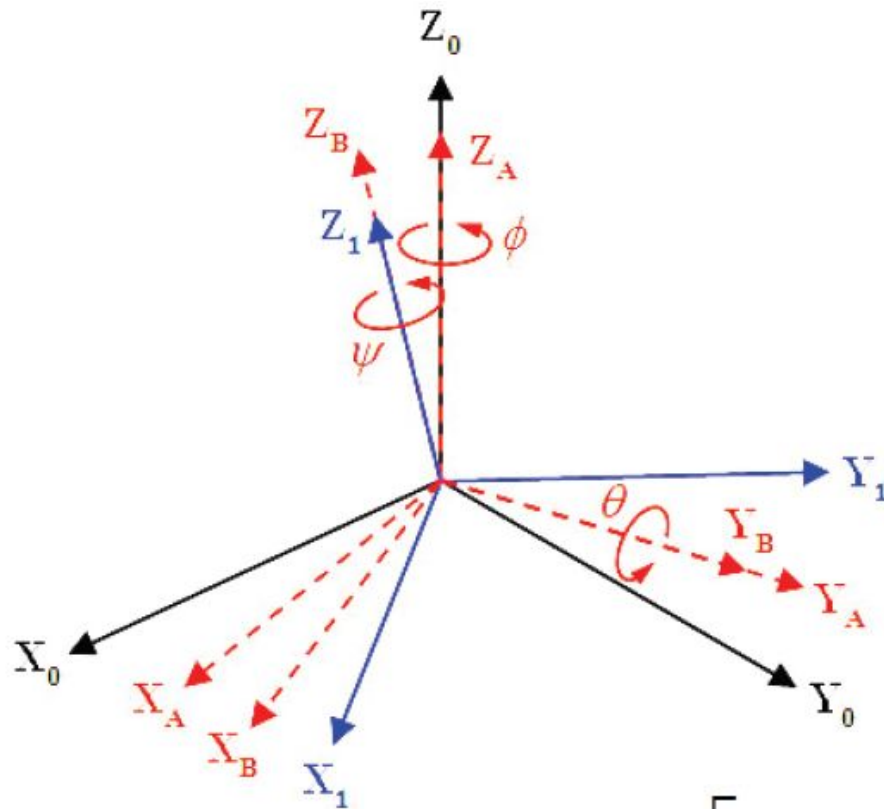
Графическое отображение и анимация

```
-->phi=pi/4; th=pi/3;  
-->R1=rotx(phi); R2=rotz(th);  
// plot {1} w.r.t {0}  
-->trplot(R1,'world','figure',1);  
// plot {2} w.r.t {1}  
-->trplot(R1*R2,'hold','frame',2,  
...  
-->'color','c');  
-->tranimate(eye(3,3),R1,'figure',2,'holdstart');  
-->tranimate(R1,R1*R2,'hold','color','b','frame',2);
```



Обратите внимание, что в последней команде мы используем опцию 'hold', чтобы заморозить текущий кадр {1} на графике, 'frame', 2, чтобы установить номер следующего кадра на 2, и 'color', 'c', чтобы установить цвет на голубой. Чтобы показать анимацию, используется команда tranimate.

Представления для общего случая вращения



Число степеней свободы вращения объекта в пространстве не более 3, поэтому требуются только три независимых параметра.

В общем случае, используются углы Эйлера, которые просто выводятся из трех последовательных базовых вращений относительно текущих осей координат в определенном порядке. Существуют варианты такого порядка (всего двенадцать на выбор). Здесь мы приведем пример последовательности ZYZ, показанной на рисунке, обычно используемой в механике и авиации.

Процесс начинается с вращения ϕ Z , чтобы получить {A}, затем на θ , чтобы получить {B}, и заканчивая ψ , чтобы получить {1}

$$R = R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{z,\psi} = \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}$$

-->R = rotx(0.3)*roty(0.4)*rotz(0.5)

R =

0.6305253 - 0.6812010 0.3720256 или

0.6968838 0.7078908 0.1150810

- 0.3417467 0.1866971 0.9210610

-->R = eul2r([0.3, 0.4, 0.5])

R =

0.6305253 - 0.6812010 0.3720256

0.6968838 0.7078908 0.1150810

- 0.3417467 0.1866971 0.9210610

Обратное преобразование

-->E=tr2eul(R)

E =

0.3 0.4 0.5

Для отрицательного θ

-->R=eul2r([0.3, -0.4, 0.5])

R =

0.6305253 - 0.6812010 - 0.3720256

0.6968838 0.7078908 - 0.1150810

0.3417467 - 0.1866971 0.9210610

-->tr2eul(R)

ans =

- 2.8415927 0.4 - 2.6415927

-->eul2r(ans)

ans =

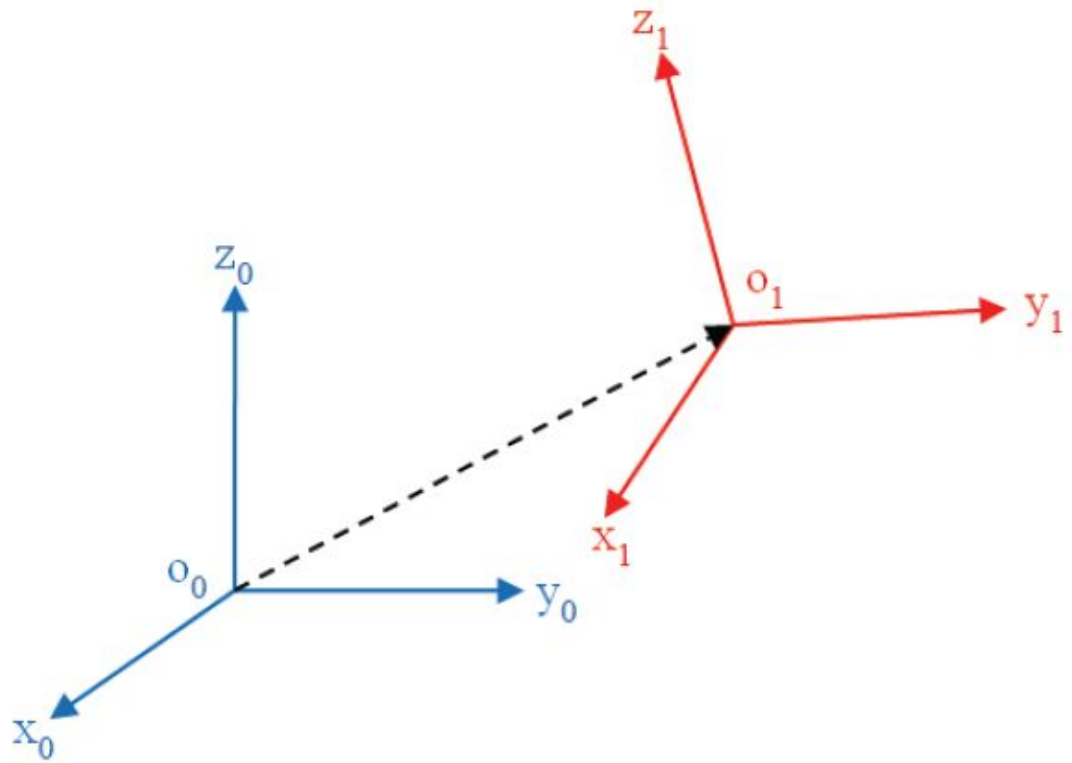
0.6305253 - 0.6812010 - 0.3720256

0.6968838 0.7078908 - 0.1150810

0.3417467 - 0.1866971 0.9210610

Однородное преобразование

До сих пор мы обсуждали только вращение между двумя системами координат (с.к.). При анализе роботов с.к. прикрепляются к каждому звену робота, поэтому их начала не совпадают. На рисунке показана общая взаимосвязь между двумя с.к., состоящая из поворота и перемещения. Для описания таких отношений будет использоваться однородное преобразование



Поворот и перемещение упакованы в матрицу 4x4, однородную между двумя с.к., имеющую следующую форму.

$$T = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где R является матрица вращения 3 x 3, и d 3 x 1 вектор, представляющий перемещение между двумя с.к. Для с.к. {0} и {1}, показанных на рисунке, например,

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} {}^0R_1 & {}^0d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Можно показать, что ее обратное значение может быть вычислено как

$${}^1T_0 = {}^0T_1^{-1} = \begin{bmatrix} {}^0R_1^T & -{}^0R_1^T {}^0d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Однородные матрицы удобны для описания цепочки преобразований, которая может быть вычислена как произведение последовательных преобразований в правильном порядке.

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \dots {}^{n-1}T_n$$

Основные однородные преобразования состоят из следующих

$$\begin{aligned}
 Transl_{x,a} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & Transl_{y,b} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & Transl_{z,c} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 Trot_{x,\theta} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_\theta & -s_\theta & 0 \\ 0 & s_\theta & c_\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & Trot_{y,\phi} &= \begin{bmatrix} c_\phi & 0 & s_\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s_\phi & 0 & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & Trot_{z,\psi} &= \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Здесь мы используем $Transl$ для представления перемещения по осям, а $Trot$ а вращение вокруг осей. Предположим, что мы хотим построить $\{1\}$, сместив начало координат $\{0\}$ в положение $[-1, 1, 0, 5]^T$, а затем повернув на 45 градусов вокруг X.

$$T = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\pi/4} & -s_{\pi/4} & 0 \\ 0 & s_{\pi/4} & c_{\pi/4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0.707 & -0.707 & 1 \\ 0 & 0.707 & 0.707 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

```
-->T=transl([-1,1,0.5])*trotx(45,'deg')
```

```
T =
```

```
1. 0. 0. - 1.
```

```
0. 0.7071068 - 0.7071068 1.
```

```
0. 0.7071068 0.7071068 0.5
```

```
0. 0. 0. 1.
```

Важен порядок сомножителей

```
-->Ta = trotx(45,'deg')*transl([-1,1,0.5])
```

```
Ta =
```

```
1. 0. 0. - 1.
```

```
0. 0.7071068 - 0.7071068 0.3535534
```

```
0. 0.7071068 0.7071068 1.0606602
```

```
0. 0. 0. 1.
```

Используя trplot убедитесь, что результат разный

```
-->trplot(T,'world','figure',1)
```

```
-->trplot(Ta,'figure',1,'hold', 'frame','1a','color','m')
```

Можете анимировать результат преобразования

```
-->tranimate(T,'world')
```