

**Эта книга посвящается моей  
замечательной жене Джесс.  
Именно ее любовь к математике  
и ее невероятная поддержка  
вдохновили меня на этот проект**

# Содержание

От издательства .....	9
Об авторе.....	10
Благодарности.....	11
Введение.....	12

## ГЛАВА 1

<b>ОСНОВЫ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ .....</b>	<b>16</b>
Проект 1.1. Выполнение вращательного движения.....	29
Проект 1.2. Схема активного управления .....	37
Проект 1.3. Схема подключения потенциометра .....	44

## ГЛАВА 2

<b>ДВЕ СТЕПЕНИ СВОБОДЫ .....</b>	<b>48</b>
Проект 2.1. Конструируем двухзвенный манипулятор с двумя степенями свободы .....	50
Проект 2.2. Управление углами поворота сервоприводов.....	56
Проект 2.3. Как насчет потенциометров?.....	60

## ГЛАВА 3

<b>ОБРАТНАЯ КИНЕМАТИКА ДЛЯ 2D-ПЕРЕМЕЩЕНИЯ .....</b>	<b>64</b>
Проект 3.1. Вывод уравнений обратной кинематики двухзвенного 2D-манипулятора с двумя степенями свободы .....	71
Проект 3.2. Программирование обратной кинематики двухзвенной механической руки.....	77

## ГЛАВА 4

<b>БОЛЬШЕ ЗВЕНЬЕВ И ТОЧНЕЕ .....</b>	<b>84</b>
Проект 4.1. Сборка четырехзвенной механической руки .....	87
Проект 4.2. Знакомимся с циклом for .....	92

Проект 4.3. Управление четырехзвенным манипулятором с помощью цикла for .....	95
Проект 4.4. Одновременное управление двумя приводами механической руки.....	98
<b>ГЛАВА 5</b>	
<b>ИГРЫ С ДЖОЙСТИКОМ .....</b>	<b>102</b>
Проект 5.1. Базовая схема управления джойстиком.....	106
Проект 5.2. Управление положением приводов.....	111
<b>ГЛАВА 6</b>	
<b>ПРОМЕЖУТОЧНАЯ ОБРАТНАЯ КИНЕМАТИКА .....</b>	<b>116</b>
Проект 6.1. Вывод уравнений обратной кинематики четырёхзвенного манипулятора .....	118
Проект 6.2. Программирование обратной кинематики четырёхзвенного манипулятора .....	122
Проект 6.3. Управление джойстиком на основе обратной кинематики .....	128
Проект 6.4. Рисование базовых фигур .....	133
<b>ГЛАВА 7</b>	
<b>3D-МАНИПУЛЯТОР.....</b>	<b>144</b>
Проект 7.1. Создание трехмерной механической руки .....	146
Проект 7.2. Тестирование трехмерной механической руки.....	156
<b>ГЛАВА 8</b>	
<b>ЭНКОДЕР КАК УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ .....</b>	<b>164</b>
Проект 8.1. Простое подключение энкодера.....	166
Проект 8.2. Управление манипулятором с помощью энкодера.....	173
<b>ГЛАВА 9</b>	
<b>ОБРАТНАЯ КИНЕМАТИКА ДЛЯ 3D-ПЕРЕМЕЩЕНИЯ.....</b>	<b>180</b>
Проект 9.1. Обратная кинематика 3D-манипулятора.....	182
Проект 9.2. Программирование уравнений обратной кинематики 3D-манипулятора.....	188

Проект 9.3. Рисование 3D-фигур .....	194
Проект 9.4. Добавление энкодера в программу обратной кинематики для 3D-манипулятора.....	198

## **ГЛАВА 10**

<b>КУДА ДВИГАТЬСЯ ДАЛЬШЕ?</b> .....	202
-------------------------------------	-----

Приложение.....	224
-----------------	-----

Предметный указатель .....	226
----------------------------	-----

# ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

## ***Отзывы и пожелания***

Мы всегда рады отзывам наших читателей. Расскажите нам, что вы думаете об этой книге – что понравилось или, может быть, не понравилось. Отзывы важны для нас, чтобы выпускать книги, которые будут для вас максимально полезны.

Вы можете написать отзыв на нашем сайте [www.dmkpress.com](http://www.dmkpress.com), зайдя на страницу книги и оставив комментарий в разделе «Отзывы и рецензии». Также можно послать письмо главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com); при этом укажите название книги в теме письма.

Если вы являетесь экспертом в какой-либо области и заинтересованы в написании новой книги, заполните форму на нашем сайте по адресу [http://dmkpress.com/authors/publish\\_book/](http://dmkpress.com/authors/publish_book/) или напишите в издательство по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

## ***Список опечаток***

Хотя мы приняли все возможные меры для того, чтобы обеспечить высокое качество наших текстов, ошибки все равно случаются. Если вы найдете ошибку в одной из наших книг, мы будем очень благодарны, если вы сообщите о ней главному редактору по адресу [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com). Сделав это, вы избавите других читателей от недопонимания и поможете нам улучшить последующие издания этой книги.

## ***Нарушение авторских прав***

Пиратство в интернете по-прежнему остается насущной проблемой. Издательство «ДМК Пресс» очень серьезно относится к вопросам защиты авторских прав и лицензирования. Если вы столкнетесь в интернете с незаконной публикацией какой-либо из наших книг, пожалуйста, пришлите нам ссылку на интернет-ресурс, чтобы мы могли применить санкции.

Ссылку на подозрительные материалы можно прислать по адресу электронной почты [dmkpress@gmail.com](mailto:dmkpress@gmail.com).

Мы высоко ценим любую помощь по защите наших авторов, благодаря которой мы можем предоставлять вам качественные материалы.



## **Об авторе**

**Мэтт Итон** (Matt Eaton) – руководитель производственной лаборатории в инженерной школе Webb School of Engineering при университете High Point University в Северной Каролине. Он также является основателем благотворительной робототехнической компании Anyone Can Build Robots, производителя высококачественных и доступных по цене комплектов для робототехники. Мэтт преподавал робототехнику в старших классах, был тренером команд на соревнованиях робототехников и разработчиком школьной программы по робототехнике и информатике. Он живет в Гринсборо, Северная Каролина.

# Благодарности

Огромное спасибо людям, которые помогли сделать эту книгу возможной:

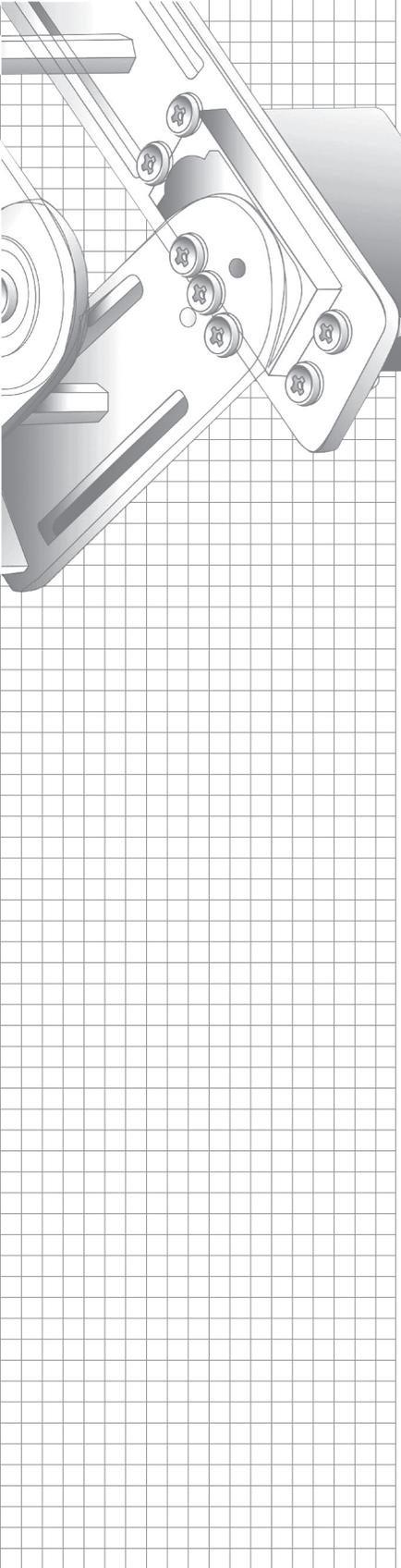
**Дэйву Перкинсу** (Dave Perkins) – за рецензию на книгу и ценные технические замечания;

**Эрику Йорку** (Eric York) – за роль студенческого консультанта и ценную обратную связь с точки зрения студента;

**Еве Клопф** (Eve Klopff) – за то, что вдохновила меня на выход за рамки традиционного учебного процесса с превращением этих уроков в книгу;

**Джесс Итон** (Jess Eaton) – за бесчисленные часы на связи со мной, новаторский взгляд на математическое образование и невероятную поддержку на протяжении всего проекта!





# ВВЕДЕНИЕ

## СОЗДАВАТЬ РОБОТОВ МОЖЕТ КАЖДЫЙ!

Спроектировать робота в определенном смысле невозможно. Это не значит, что объединение нескольких проводов, винтовых соединений, двигателей и добавление продуманного кода не может привести к созданию робота – это именно то, что создаст робота. Однако создание робота – это не просто соединение деталей по инструкции. Это процесс непрерывной перестройки, редизайна, доработки и нахождения новых решений. Иногда это процесс, состоящий из десяти шагов вперед и девяти назад. Мои студенты часто слышат, как я говорю: «Если вы собираетесь создавать роботов, вы будете их ломать». Но поверьте, что именно это доставит вам массу удовольствия – процесс совершенствования конструкций, изучения новых технологий и роста как создателя и инженера!

Сколько бы вы не учились, сколько бы вы не разрабатывали дизайн и сколько бы вы не совершенствовались, всегда будет следующий большой проект. Как только вы начнете, остановиться будет невозможно – по крайней мере так было со мной. Меня зовут Мэтт, и я уже много лет помогаю своим студентам создавать собственных роботов. Я начал свою карьеру преподавателем робототехники в Сан-Диего, и мне нравилась каждая минута этого процесса – от проведения занятий и подготовки команд робототехников до помощи студентам в разработке проектов их мечты.

В настоящее время я имею удовольствие работать менеджером по оборудованию рабочих мест в инженерной школе Webb School of Engineering при университете High Point University, расположенном в Хай-Пойнте, Северная Каролина. Оборудование рабочих мест – это центр инноваций, а эта книга стала результатом серии семинаров по робототехнике «Сделай сам», которые я провожу в университете. Если вы впервые приступаете к этой области, для меня большая честь приветствовать вас в увлекательном мире создания и конструирования роботов своими руками. Эта книга предназначена для того, чтобы стать

пошаговым руководством, которое поможет любому начать создавать свои собственные забавные и полезные конструкции механических рук.

В детстве у меня было ощущение, что мое будущее – инженерное дело: мне нравилось разбирать вещи на части, узнавать, как они работают, и (иногда) иметь возможность собрать их обратно. Это такое чувство восторга и выполненного долга, которое возникает, когда ты работаешь своими руками и создаешь что-то новое с нуля, будь то арт-проект, постройка домика на дереве, переделка двигателя для картинга или даже разработка собственного робота. Я не сомневался, что стану инженером.

К сожалению, у меня была проблема: я был ужасен в математике – или по крайней мере я был убежден, что это так. Все данные, которыми я располагал, свидетельствовали о том, что у меня не было возможности стать инженером, и ко времени начала обучения в колледже я был убежден, что недостаточно умен для этого. Если бы я тогда сказал себе, что напишу книгу по робототехнике, в которой присутствует математика, я бы сам себе не поверил! И теперь, став взрослым, получив высшее образование в области робототехники и работая менеджером в инженерной школе, я хотел бы, чтобы тогда кто-нибудь сказал мне, что у меня получится!

Именно об этом я рассказываю вам прямо сейчас. Если вы похожи на меня и в начале своего творческого пути боитесь математики, но хотите узнать больше о робототехнике и роботах-манипуляторах, я призываю вас не позволять математике встать у вас на пути!

Я всегда был твердо убежден в том, что создавать роботов может каждый. Возможно, вы берете в руки эту книгу, чтобы впервые создать механическую руку, или, может быть, у вас за плечами есть несколько проектов, и вам интересно внедрить в свои творения более продвинутые технологии, такие как обратная кинематика<sup>1</sup>. Независимо от того, впер-

---

<sup>1</sup> Прямая задача кинематики – вычисление положения конечного устройства манипулятора по его кинематической схеме и заданной ориентации звеньев. Обратная задача кинематики (или, коротко, обратная кинематика) – вычисление углов поворота звеньев заданной кинематической схемы манипулятора по заданному положению конечного устройства. – *Здесь и далее прим. перев.*

вы ли вы создаете роботов или являетесь опытным профессионалом, я надеюсь, что эта книга доставит вам удовольствие. Она предназначена не только для инженеров, но и для производителей, преподавателей, учащихся и всех, кто хочет узнать больше о создании роботов-манипуляторов.

Вместе мы шаг за шагом создадим три конструкции роботов-манипуляторов. Опыт работы не требуется. Мы поговорим об основах приведения механических рук в движение, а затем о том, что нужно для того, чтобы научить их делать всевозможные удивительные вещи. К концу этой книги вы не только создадите три замечательных робота-манипулятора, но и овладеете основами теории, опытом работы с аппаратным обеспечением и знаниями кода, необходимыми для создания собственных проектов в области робототехники.

Прежде чем начать, следует рассказать о нескольких важных моментах, связанных с работой над проектами, описанными в этой книге.

## КАК ЧИТАТЬ ЭТУ КНИГУ

Я рекомендую прочитать ее от начала до конца, как вы бы прочитали любую другую книгу. Если вы впервые создаете манипулятор, лучше всего осваивать проекты последовательно по ходу изложения, поскольку сведения, представленные в начале книги, будут расширены и использованы в последующих проектах. К каждому проекту в книге прилагается подробное пошаговое руководство, включающее весь код, схемы и порядок сборки, необходимые для завершения проекта.

Нужно ли заказывать сопутствующий набор для чтения этой книги?

Вовсе нет! Хотя приобретение набора (см. приложение) поможет убедиться, что у вас есть все необходимое, нужные компоненты можно приобрести самостоятельно. Кроме того, все чертежи структурных компонентов для проектов имеют свободную лицензию и доступны для скачивания в репозитории книги на GitHub (см. ссылку далее). Это означает, что все файлы с компонентами механических рук можно загружать и изготавливать их самостоятельно! Эти файлы можно использо-

вать для самостоятельного изготовления или отправить в онлайн-сервис, предоставляющий услуги по лазерной резке различных материалов. В сопутствующем наборе для этой книги детали механической руки изготовлены из акрила толщиной 3 мм, но более дешевый материал, такой как фанера или древесноволокнистая плита (МДФ), может стать отличной альтернативой. Свободная загрузка файлов означает, что вы не только можете создавать детали самостоятельно, но также использовать эти заготовки для своих собственных проектов.

## О ПРОГРАММНОМ КОДЕ

Как чертежи деталей механической руки, так и все коды программ для проектов, которые мы рассматриваем в книге, доступны для скачивания в репозитории книги на GitHub. Конечно, самостоятельное написание кода, даже если вы копируете его непосредственно из книги, может стать отличной практикой, однако вы можете их просто загрузить и использовать в своем проекте.

Как файлы с чертежами компонентов, так и файлы с кодом можно найти по следующей ссылке<sup>1</sup>:

[https://github.com/ACBRrobotics/Make\\_Robotic\\_Arms](https://github.com/ACBRrobotics/Make_Robotic_Arms). См. также дополнительные подробности в приложении в конце книги.

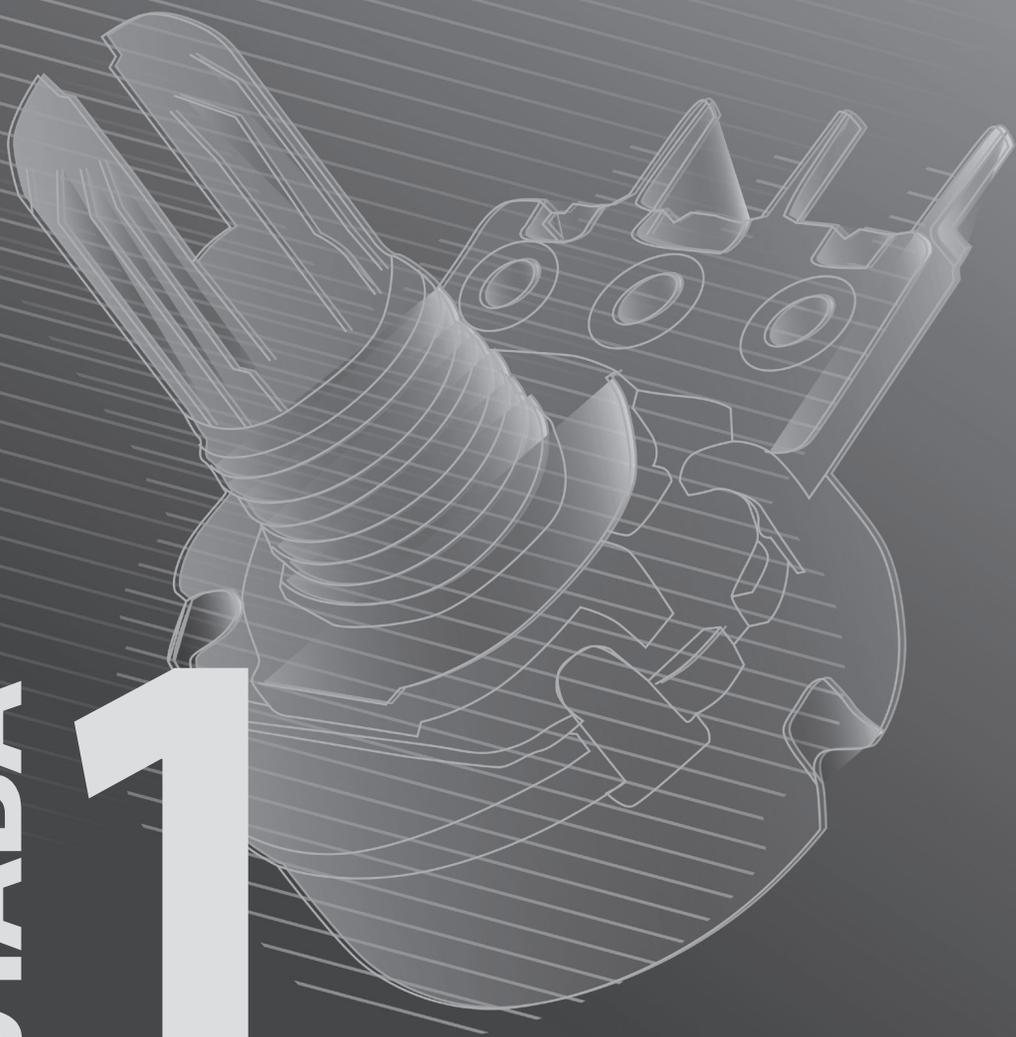
---

<sup>1</sup> В депозитории по указанному адресу чертежи механических компонентов представлены в папке *Structural Design Files* в популярном CAD-формате *.dxf* (Drawing Exchange Format). Для их просмотра можно воспользоваться отдельными просмотрщиками (как автономными программами, например Free DWG Viewer, так и онлайн-сервисами, например ShareCAD), а также векторными графическими редакторами (Inkscape) или CAD-системами (AutoCAD). Управляющие программы представлены в формате Arduino (обычные файлы скетчей с расширением *.ino*). Электрические схемы в депозитории отсутствуют; следует ориентироваться на иллюстрации в тексте глав.

ГЛАВА

1

ОСНОВЫ  
РОБОТОВ-  
МАНИПУЛЯТОРОВ



Прежде чем начать создавать роботов с механическими руками, необходимо поближе познакомиться с конструкционными блоками, из которых состоят проекты в области робототехники. Этот этап процесса обучения всегда доставляет массу удовольствия. Когда я начинаю помогать студентам с их первыми проектами по робототехнике, всегда интересно наблюдать за реакцией, когда их схемы начинают двигаться и оживать! В проектах по робототехнике, описанных в этой книге, мы будем использовать один из моих любимых типов электродвигателей – сервопривод. В этой главе первым шагом будет заставить эти маленькие устройства двигаться, а затем мы рассмотрим несколько полезных способов управления ими.

Первым делом рассмотрим способы подключения и приведения сервоприводов в действие с помощью кода. Затем разберем некоторые основные методы передачи данных для управления двигателями. Это создаст основу для производства первого манипулятора. Но прежде чем приступить к этим темам, давайте немного разберемся с терминологией.

Роботы-манипуляторы бывают самых разных форм и размеров. Когда большинство людей думают о механических руках, на ум часто приходят несколько вещей: в первую очередь это, как правило, большие промышленные манипуляторы – огромные машины, которые помогают компаниям собирать автомобили и другую крупногабаритную технику. Некоторые могут подумать об антропоморфных роботах-гуманоидах, у которых такие же руки и ноги, как у нас. Однако хотя эти разновидности роботов очень интересны, в данной книге мы сосредоточимся на механических руках меньшего размера, предназначенных для подключения к настольному компьютеру.

В наши дни вы можете делать множество вещей с помощью настольного робота-манипулятора, и научиться проектировать и создавать их – это отличный способ начать свой путь в робототехнике. Даже для настольных манипуля-

## Проекты

### Проект 1.1

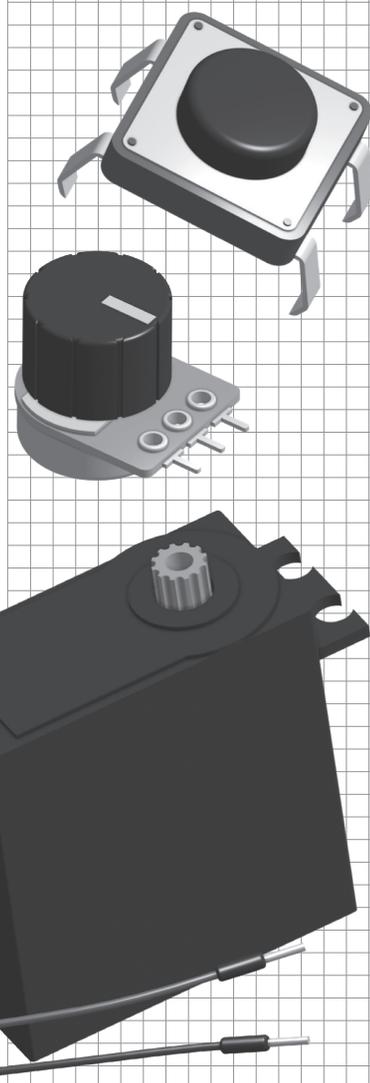
Выполнение вращательного движения

### Проект 1.2

Схема активного управления

### Проект 1.3

Схема подключения потенциометра



## Электроприводы

Электродвигатели обычно размещаются в суставах робота-манипулятора, что дает механической руке возможность управлять своим положением, скоростью или усилием.

торов существует множество стилей, каждый из которых имеет свои плюсы и минусы.

По своей сути манипуляторы состоят из двух ключевых компонентов: приводов и звеньев. Приводы, которые заставляют робота двигаться, обычно выполняются на основе электродвигателей. Существует несколько разных вариантов электродвигателей для робототехнических проектов. Здесь мы начнем с сервопривода. В последней главе мы обсудим другие варианты, которые вы, возможно, захотите рассмотреть при создании более совершенных роботов.

Звенья манипулятора – это детали, объединяющие приводы и образующие каркас механической руки. Такие звенья могут быть изготовлены из дерева, пластика, акрила, алюминия или чего угодно еще. В простейшем варианте мы можем создать простую механическую руку, используя всего два привода и два звена.

Конфигурация с двумя приводами и двумя звеньями – это тот тип манипулятора, который мы создадим в первую очередь. Хотя это первое устройство, возможно, и не самая совершенная механическая рука из существующих, оно является первым шагом в создании всевозможных робототехнических проектов, таких как роботы-собаки, двуногие или шагающие роботы, роботы-рисовальщики и многое другое! На изображениях (рис. 1.1) мы видим один и тот же манипулятор в разных положениях, служащий разным целям.

Один из самых интересных моментов в изучении электроприводов – это осознание широкого спектра применений, в которых они могут быть использованы (рис. 1.1). Вы можете написать код управления приводом, предназначенный для руки-манипулятора, с таким же успехом этот код можно использовать для открытия дверей в «умном доме», рисования картин или помощи собаке-роботу в проведении поисково-спасательной операции.

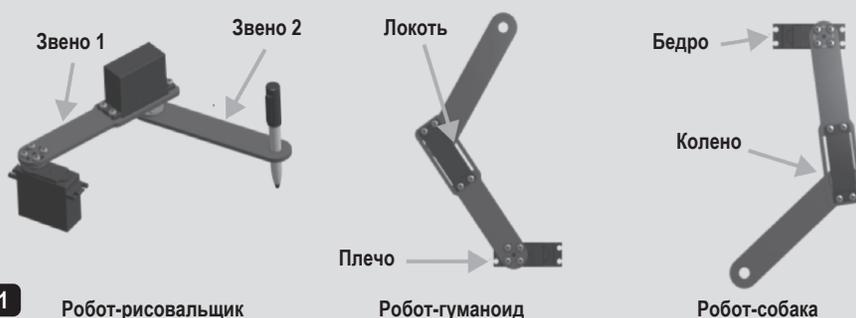


Рис. 1.1

Робот-рисовальщик

Робот-гуманоид

Робот-собака

## БОЛЕЕ ПРИСТАЛЬНЫЙ ВЗГЛЯД НА СЕРВОПРИВОД

Хотя для создания манипуляторов применяются очень разные приводы, для небольших настольных конструкций наиболее распространенным является то, что называется сервоприводом. Эти небольшие электродвигатели идеально подходят для создания настольных манипуляторов. Когда дело доходит до создания больших настоящих роботов, безусловно, существуют более мощные и точные разновидности приводов, но сервоприводы благодаря своей низкой стоимости, высокой прочности и простоте использования – отличный способ начать работу. В отличие от большинства электродвигателей, которые, вообще говоря, предназначены для вращения, сервопривод перемещается в заданное положение и удерживает его, что делает его удобным для настольных проектов робототехники. Хотя существуют серводвигатели и непрерывного вращения, большинство имеет заданный угловой диапазон перемещения, чаще всего в пределах от 0 до 180°.

### СЕРВОПРИВОДЫ

Одним из преимуществ сервоприводов является то, что они бывают самых разных форм и размеров (рис. 1.2). Базовый сервопривод состоит из нескольких ключевых деталей. Он приводится в действие небольшим двигателем постоянного тока, расположенным внутри пластикового корпуса. Двигатели постоянного тока – это самые простые из электродвигателей: чем выше напряжение, подаваемое на два электрических контакта двигателя, тем быстрее они вращаются. Ключом к пониманию того, как вращаются большинство электродвигателей, является концепция, известная как сила Лоренца. Суть заключается в том, что всякий раз, когда по проводнику протекает электрический ток, вокруг проводника создается магнитное поле.

Если обмотать проволоку, по которой течет электрический ток, вокруг железного стержня, магнитное поле усилится. В двигателе постоянного тока мы используем эту концепцию, чтобы заставить двигатель вращаться. Если мы подаем напряжение на положительную и отрицательную клеммы двигателя, то это напряжение передается через щетки двигателя на обмотки (витки провода), включая и выключая магнитное поле обмоток. Когда

### Звенья

Звено – это то, что объединяет приводы и образует каркас манипулятора. Звено может быть изготовлено из дерева, пластика, акрила, алюминия – практически из чего угодно.

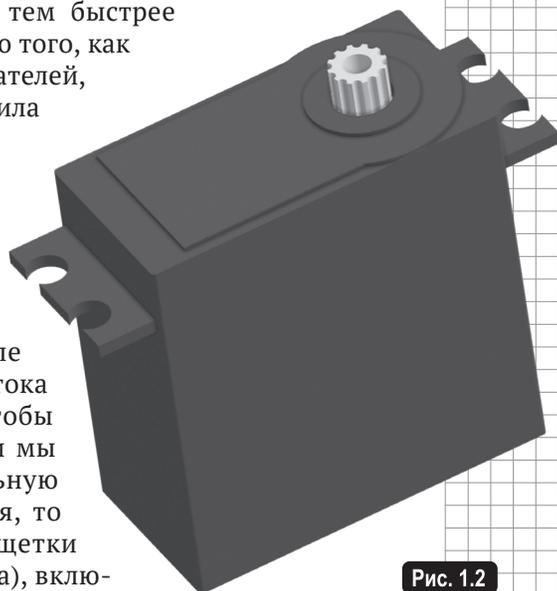
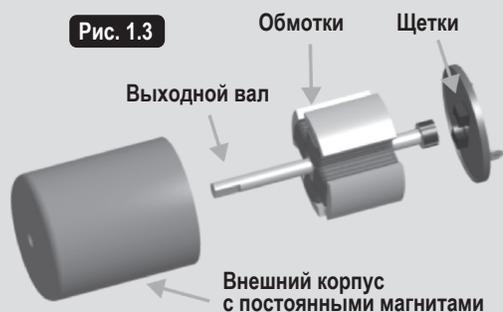


Рис. 1.2

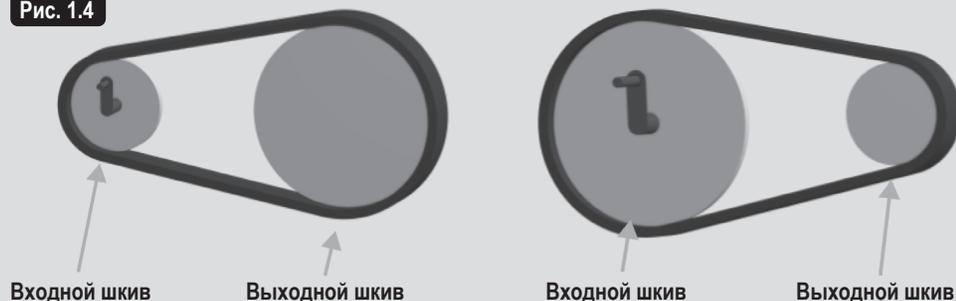
**Рис. 1.3**

по обмотке течет ток и, следовательно, имеется магнитное поле, она притягивается к одному из постоянных магнитов, расположенных по наружному периметру корпуса двигателя (рис. 1.3). По мере того как обмотки намагничиваются по очереди, двигатель поворачивается на некоторый угол дальше и дальше.

К сожалению, двигатели постоянного тока сами по себе недостаточно точные. Нам нужна гораздо большая

точность для управления манипулятором. Для этой цели и служит стандартный сервопривод, представляющий собой нечто большее, чем просто двигатель постоянного тока. Встроенный в сервопривод двигатель постоянного тока для начала подключается к набору выходных шестерен – редуктору. Вообще говоря, редукторы предназначены для выполнения одной из двух задач – увеличения или уменьшения частоты вращения двигателя постоянного тока, которая обычно измеряется в оборотах в минуту (RPM), или мощности двигателя, которая измеряется величиной крутящего момента. Редуктор в сервоприводе всегда предназначен для увеличения крутящего момента на выходном валу сервопривода (и, соответственно, уменьшения частоты вращения).

Редуктор здесь играет ключевую роль. В любом случае, когда имеется вращающаяся деталь от такой большой, как ось колеса автомобиля, до маленького устройства, вроде электродрели, редуктор является ключом к увеличению мощности или скорости вращающейся системы. На рис. 1.4 вверху показана ручка, соединенная с маленьким шкивом<sup>1</sup>. Этот маленький шкив соединен со шкивом вдвое большего размера. Когда вы вращаете ручку, соединенную с меньшим шкивом, больший будет вращаться вдвое медленнее, но с удвоенной силой. Это означает, что если бы вы использовали подобную передачу

**Рис. 1.4**

<sup>1</sup> В реальности в сервоприводах установлены шестеренчатые редукторы (см. рис. 1.5), но на рисунке автор для простоты изобразил ременную передачу со шкивами вместо шестеренок.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)