

Гололобов В.Н. Ульянов В.И.

# БЕСПИЛОТНИКИ для любознательных

**ПРОСТО!**  
о СЛОЖНОМ!



**НИТ**  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Дополнительные материалы к книге  
можно скачать на сайте издательства  
[www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru)

- выбор, эксплуатация, обслуживание
- электронная начинка, бортовая система управления
- модули ARDUINO UNO в беспилотниках
- контроль полета с использованием GPS
- ведущий интерфейс I<sup>2</sup>C

БЕСПИЛОТНИКИ для ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ



Гололобов В. Н. , Ульянов В. И.

# БЕСПИЛОТНИКИ ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ



---

Наука и Техника, Санкт-Петербург

УДК 621.314:621.311.6  
ББК 39.52, 32.85

Гололобов В. Н., Ульянов В. И.

Беспилотники для любознательных. — СПб.: Наука и Техника, 2018. — 256 с., илл.

**ISBN 978-5-94387-878-7**

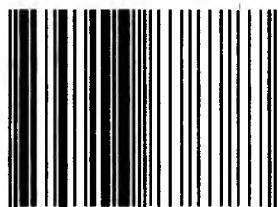
Книга поможет освоить управление беспилотными самолетами, вертолетами и мультикоптерами, ставшими особенно популярными в XXI веке. Сбылась мечта осуществлять виртуальный полет, видеть свой город сверху, снимать видео с большой высоты, наслаждаться воочию необычной панорамой, благодаря такому чудесному изобретению, как квадрокоптер.

Для освоения навыков пилотирования в начале книги в ходе диалога рассматриваются основы устройства, работы и управления настоящими летательными аппаратами, такими как самолеты и вертолеты. Понимание этих основ поможет научиться управлять беспилотниками различных типов.

Рассматриваются характеристики наиболее популярных моделей квадрокоптеров. Даются полезные советы по их безопасной эксплуатации в различных погодных условиях.

Большое внимание уделено электронной начинке квадрокоптера для тех, кого больше интересует самостоятельное изготовление, настройка и ремонт. Каждый из компонентов квадрокоптера (или беспилотника) можно исследовать и настраивать с помощью общепринятых сегодня радиолюбительских инструментов. Рассмотрен и модуль Arduino, который может стать будущим полетным контроллером.

Книга предназначена для широкого круга любознательных читателей, увлеченных авиацией, беспилотными полетами, электроникой, микроконтроллерами и техническим творчеством.



9 785943 878787

**ISBN 978-5-94387-878-7**

Автор и издательство не несут ответственности за возможный ущерб, причиненный в ходе использования материалов данной книги.

Контактный телефон издательства  
(812) 412-70-26

Официальный сайт: [www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru)

12+

© Гололобов В. Н., Ульянов В. И.  
© Наука и Техника (оригинал-макет)

ООО «Наука и Техника».

Лицензия № 000350 от 23 декабря 1999 года.

198097, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, д. 29.

Подписано в печать 7.06.2018. Формат 70×100 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем 16 п. л.

Тираж 1200 экз. Заказ № 5279.

Отпечатано с готовых файлов заказчика  
в АО «Первая Образцовая типография»  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»  
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

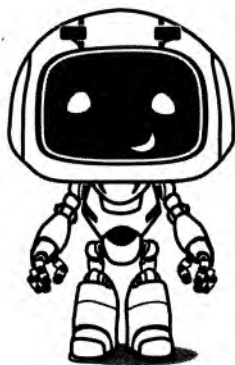
# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Это только присказка</b> .....	<b>7</b>
<b>Глава 1. Знакомьтесь: беспилотные летательные аппараты</b> .....	<b>10</b>
С чего начинать работу с мультикоптером .....	10
Бикоптеры: конструкция, достоинства, недостатки .....	11
Трикоптеры: конструкция, достоинства, недостатки .....	12
Квадрокоптеры: конструкция, достоинства, недостатки .....	14
Гексакоптеры: конструкция, достоинства, недостатки .....	15
Октокоптеры: конструкция, достоинства, недостатки .....	17
Соосные коптеры: конструкция, достоинства, недостатки .....	18
Мультикоптер: тангаж, крен, рыскание .....	19
<b>Глава 2. Почему летательные аппараты тяжелее воздуха     умеют летать?</b> .....	<b>22</b>
Союз винта и двигателя .....	22
Крыло обеспечивает полет .....	23
Как возникает подъемная сила .....	25
<b>Глава 3. Органы управления самолетом</b> .....	<b>27</b>
Внешние элементы управления .....	27
Взлетно-посадочная механизация крыла .....	29
Органы поперечного управления самолетом .....	30
Органы непосредственного управления подъемной силой .....	30
Увеличение эффективного размаха крыла .....	31
<b>Глава 4. Учимся управлять самолетом</b> .....	<b>32</b>
Как самолет управляется по крену .....	32
Как самолет управляется по высоте .....	34
Как самолет поворачивает в полете .....	36
<b>Глава 5. Воздушные винты в авиации и не только....</b> .....	<b>37</b>
Первые воздушные винты .....	37
Воздушный винт Леонардо да Винчи .....	38
Воздушный винт Михаила Ломоносова .....	39
Современный воздушный винт .....	41
Воздушный винт на экраноплане .....	42
Аэросани – почти самолет, мчащийся по снежному полю .....	43
Как работает воздушный винт .....	44
Геометрический шаг воздушного винта .....	48
О длине и количестве лопастей .....	49
Как и зачем изменяется шаг винта на основных этапах полета .....	50
Регулятор постоянства оборотов .....	53
О механизме поворота лопастей .....	53
Преимущества и недостатки воздушных винтов .....	56
Импеллеры – кто они? .....	58

<b>Глава 6. Как устроен вертолет</b> .....	<b>60</b>
Основные отличия вертолета от самолета .....	60
Фюзеляж .....	61
Взлетно-посадочные устройства .....	61
Крыло и оперение .....	62
Силовая установка и трансмиссия .....	63
Система управления вертолетом .....	64
<b>Глава 7. Особенности воздушных винтов вертолета</b> .....	<b>66</b>
Винты: несущий и рулевой .....	66
Реактивный момент и борьба с ним .....	69
<b>Глава 8. Принцип работы вертолета</b> .....	<b>75</b>
Создание подъемной силы лопастью несущего винта .....	75
Этапы взлета вертолета и горизонтальный полет .....	77
Автомат перекоса кольцевого типа .....	79
Рычаг «ШАГ-ГАЗ», ручка управления и корректор .....	82
<b>Глава 9. Учимся пилотировать вертолет</b> .....	<b>83</b>
Основные режимы полета .....	83
Взлет .....	83
Движение вперед .....	84
Режим висения .....	84
Движение вертолета назад и боком влево-вправо .....	89
Управление силой тяги рулевого винта .....	91
<b>Глава 10. Снижение вертолета при отказе двигателя</b> .....	<b>92</b>
О пользе авторотации .....	92
Автожир и рекорды Жана Буле .....	93
<b>Глава 11. Беспилотники: какие же они разные.....</b> .....	<b>94</b>
Здравствуй, эра беспилотников .....	94
Насколько большим должен быть беспилотник, чтобы его назвали малым? .....	95
Давайте разберемся в терминологии .....	96
Знакомьтесь, платформа первая: вертолетная .....	97
Мультироторная (мультивинтовая) платформа .....	98
Самолетная платформа .....	99
Летающее крыло .....	100
Беспилотник со складывающимися в полете крыльями .....	101
Беспилотник научился приземляться как птица .....	102
О степени готовности беспилотников к полету .....	103
<b>Глава 12. Выбор оптимального квадрокоптера</b> .....	<b>105</b>
Какой марки коптер вы ищите? .....	105
Фото-видеокамера .....	108
Время полета .....	109
Дальность и безопасный маршрут полета .....	112

Запасные части . . . . .	112
Квадрокоптер ценовой категории 35\$ Hubsan X4 (H107L). . . . .	113
Квадрокоптер ценовой категории 50\$ Syma X5HC. . . . .	114
Квадрокоптер ценовой категории 100\$ UDI U818A. . . . .	115
Квадрокоптер ценовой категории 105\$ Syma X8G. . . . .	116
Квадрокоптер ценовой категории 110\$ Holy Stone F181 RC. . . . .	117
Квадрокоптер ценовой категории 700\$ 3DR Solo . . . . .	118
Квадрокоптер ценовой категории 800\$ Q500 Typhoon. . . . .	119
Квадрокоптер ценовой категории 1000\$ DJI Mavic Pro. . . . .	121
Квадрокоптер ценовой категории 2000\$ DJI Phantom 4 PRO . . . . .	122
Особенности гоночных квадрокоптеров. . . . .	123
Гоночный квадрокоптер HobbyKing TBS Vendetta 240. . . . .	123
Гоночный квадрокоптер Eachine Racer 250 . . . . .	124
Гоночный квадрокоптер ARRIS X-Speed 250B RTF. . . . .	125
Гоночный квадрокоптер ImmersionRC Vortex 250 Pro . . . . .	126
Гоночный квадрокоптер Lumenier QAV210-RTF Charpu Edition. . . . .	127
<b>Глава 13. Что у квадрокоптера внутри? . . . . .</b>	<b>129</b>
Функциональная схема любительского квадрокоптера. . . . .	129
Работа пульта управления: протоколы. . . . .	130
Двигатели: легче и мощнее . . . . .	132
Аккумуляторы: питают все . . . . .	134
Гироскоп и акселерометр: укажут точное положение. . . . .	137
Полетный контроллер — всему голова. . . . .	137
Функциональная схема продвинутого беспилотника. . . . .	138
<b>Глава 14. Квадрокоптер в воздухе . . . . .</b>	<b>142</b>
Как квадрокоптер разбирается со своими винтами? . . . . .	142
Акселерометр и электронный гироскоп . . . . .	142
Интерфейс — главный посредник. . . . .	143
Какие сигналы на шине видит осциллограф . . . . .	150
<b>Глава 15. Приручаем модуль трехосевого гироскопа и акселерометра MPU-6050 . . . . .</b>	<b>154</b>
Модули гироскопа, акселерометра и барометра. . . . .	154
Принцип действия гироскопа . . . . .	156
Подключаем гироскоп. . . . .	157
Может проще создать вертолет? . . . . .	168
<b>Глава 16. Беспилотник без присмотра. . . . .</b>	<b>170</b>
Самостоятельный полет беспилотника . . . . .	170
Возможности датчиков расстояния . . . . .	171
Используем ультразвуковой датчик. . . . .	173
<b>Глава 17. Высота полета или модуль барометра . . . . .</b>	<b>178</b>
Используем модуль барометра . . . . .	178
Определение высоты в реальном самолете . . . . .	182

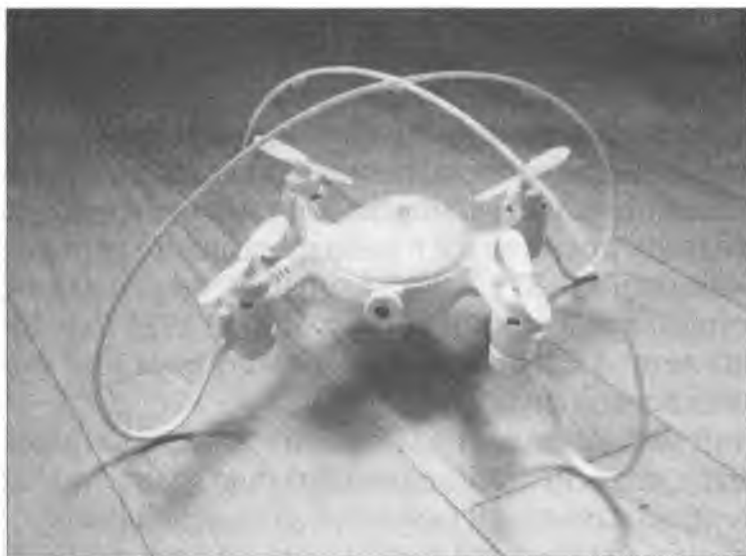
<b>Глава 18. Прокладываем и контролируем маршрут, используем GPS . . . .</b>	<b>189</b>
<b>Глава 19. Бортовой компьютер – командир квадрокоптера. . . . .</b>	<b>194</b>
<b>Глава 20. Связь «земли» с «пилотом» беспилотника . . . . .</b>	<b>212</b>
Радиосвязь в управлении беспилотником . . . . .	212
Стандарты передачи управляющего сигнала . . . . .	214
<b>Глава 21. Знакомьтесь: модули радиосвязи с частотами 2,4 ГГц и 433 МГц. . . .</b>	<b>217</b>
<b>Глава 22. Рассмотрим ближе пульт управления беспилотником . . . . .</b>	<b>227</b>
Кнопка – простейший элемент управления. . . . .	227
Сложнее – с работой джойстиков. . . . .	228
Замечание по самостоятельной разработке пульта управления. . . . .	233
<b>Глава 23. В завершении поговорим о «непонятках» . . . . .</b>	<b>235</b>
Нюансы управления с помощью PWM сигналов микроконтроллера . . . . .	235
Электронный регулятор скорости. . . . .	238
Моделирование компонентов PID-регулятора . . . . .	241
<b>Глава 24. Глава последняя: когда ж наступит лето?! . . . . .</b>	<b>247</b>
<b>Использованная литература и Интернет-ресурсы . . . . .</b>	<b>248</b>



# ЭТО ТОЛЬКО ПРИСКАЗКА

Да, эта история началась в Новый Год. Началась она с того, что сыну подарили игрушку, небольшой квадрокоптер (рис. И.1). Бабушки и дедушки обожают дарить подарки, которые так нужны внукам и внучкам. Ну, подарили и подарили. Если бы не...

Когда мы утром первого января встали, сын уже успел нанести небольшой ущерб нашему домашнему хозяйству, впрочем, и разбитую чашку он тоже успел выбросить в мусорную корзину. Пришлось объяснять, что для полетов, это не моя идея,



*Рис. И.1. Квадрокоптер-игрушка*



существуют аэродромы, а не комнаты, заставленные мебелью и прочими для летающих объектов вещами не приспособленными. Сын пообещал, что свой квадрокоптер он больше не будет запускать в квартире.

Я думаю, он сдержал бы слово, если бы дело было летом. Но и летом городские дворы не лучшим образом приспособлены для таких игр как футбол, лапта или запуска беспилотников.

На каникулах сын пропал чуть не целый день то на улице, то у приятелей. А когда каникулы закончились, когда пришло время идти в школу, сын сознался, что его новая игрушка перестала работать. Я подозреваю, что сын искренне полагал, что мне Дед Мороз на Новый Год подарил волшебную палочку. Что я сейчас взмахну палочкой, и его игрушка, которой он хотел похвастаться в школе, заработает. Пришлось объяснить, что к взрослым приходят другие деды, а не морозы.

Вечером мы с сыном попробовали запустить квадрокоптер, но тот быстро валился на бок и этим все заканчивалось.

Я немного разбираюсь в электронике, но ничего не понимаю в летающих аппаратах. Прежде, чем заниматься каким-то вопросом, я предпочитаю получить некоторое представление о предмете. А еще лучше, если достаточно хорошо его освою. Без этого разборка аппарата оставляет кучу никому не нужных деталей, которые запылившись, в конечном счете, отправляются в мусорную корзину.

У меня есть два давних знакомых, к которым я обратился за помощью. Один из них, Ульянов Вячеслав Иванович, полковник авиации в запасе, морской летчик Северного флота. В 1980-е годы он поднимался в небо на самолете вертикального взлета-посадки ЯК-38 с палубы корабля, такого как тяжелый авианесущий крейсер «Киев» (рис. И.2). В 1985 году Вячеслав Иванович летал в Средиземном море, когда крейсер выполнял там задачи боевой службы.

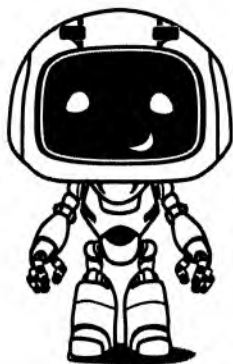
Другой мой знакомый разбирается в беспилотниках, хотя признается, что основные знания получил из книг, журналов и Интернета, но однажды и сам собирал квадрокоптер.

Общались мы с моими знакомыми по электронной почте, и я намеревался по мере получения писем, пока я вожусь



*Рис. И.2. Тяжелый авианесущий крейсер «Киев» в походе*

с чем-то, описывать и то, чем занимаюсь я, и добавлять их письма. Но через некоторое время я понял, что лучше их письма оформить в виде глав этой книги, где в роли обобщенного консультанта выступят оба моих знакомых, а в роли любознательного новичка буду и я, и временами, те, с кем приходилось общаться моим знакомым.



# ЗНАКОМЬТЕСЬ: БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

## || С чего начинать работу с мультикоптером

Жаль, что люди не летают как птицы. Виртуально это теперь уже возможно. Сбылась мечта увидеть свой город сверху, снять видео с большой высоты, насладиться необычной панорамой. И эта мечта, благодаря такому чудесному изобретению, как мультикоптер, вполне становится реальностью.

Квадрокоптеры с камерой, имеющей возможность транслировать видео, создают эффект присутствия при полете (если есть специальные очки), а также одновременно записывают ролики. Данное устройство может проникнуть практически в любые, даже самые труднодоступные места.

**Новичок:** *У меня есть желание управлять квадрокоптером, с чего мне начать?*

Начинать следует с освоения общих вопросов. Беспилотные летательные аппараты — это квадрокоптеры, вертолеты, самолеты. А есть и беспилотные модели кораблей, катеров, подводных лодок; есть беспилотные модели автомобилей.

У беспилотника самолетного типа один винт, расположенный в носовой части или 1-2 — на крыльях. У беспилотника вертолетного типа — один (несущий) на крыше и еще один (рулевой) на хвосте, или два несущих винта соосно на крыше.



## ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*Под **мультикоптером** понимаем аппарат с более чем одним несущим винтом, которые расположены в одной (горизонтальной) плоскости.*

Приставка перед словом **коптер** свидетельствует о количестве двигателей. У самого распространенного **квадрокоптера** — четыре винта. Хотя коптеры могут иметь и два винта (**бикоптеры**), и три винта (**трикоптер**), и шесть (**гексакоптер**), и восемь (**октокоптер**) и так далее. Есть еще и так называемые — соосные коптеры, имеющие на каждом луче по 2 мотора.



## ПРИМЕЧАНИЕ.

*Много споров на тему, как правильно назвать аппарат с 8-мью моторами, но 4-мя лучами: **соосный квадрокоптер** или **октокоптер**. Моторы располагаются на одной оси один над другим. У такого расположения есть одно преимущество — размеры. Но на практике те же 8 моторов на октокоптере будут давать более высокий КПД, чем установка на одной оси парных двигателей.*

Следует отметить, что коптеры (особенно квадрокоптеры) управляются легче, чем любые другие летающие модели: самолеты, вертолеты, планеры и т. д. Познакомимся с различными мультикоптерами подробнее.

## **Бикоптеры: || конструкция, достоинства, недостатки ||**

**Бикоптеры** (рис. 1.1) — это беспилотники с двумя двигателями, вращающимися в разных направлениях, которые могут



*Рис. 1.1. Так выглядит бикоптер UH-144 серии Halo (построен Феликсом Мисюцким)*

поворачиваться серво машинками. Это самая сложная платформа в плане стабилизации полета.

**Достоинства:** малы в габаритах, мало потребляют электроэнергию, имеют низкую цену.

**Недостатки:** почти нулевая грузоподъемность, стабильность полета низкая, слабая живучесть (если один из двигателей откажет в полете, то бикоптер упадет).

## || Трикоптеры: конструкция, достоинства, недостатки

**Трикоптеры (рис. 1.2)** — это беспилотники с тремя моторами. Это достаточно редкая разновидность мультикоптеров. Ведь имея всего три пропеллера, невозможно компенсировать крутящий момент с помощью пар, вращающихся в противоположном направлении, как это делается на квадро-, гекса-, окто- и других коптерах, рассмотренных ниже.



**Рис. 1.2.** Так выглядят трикоптеры:  
*а* – гоночный трикоптер RCEXplorer, разработанный компанией MiniTricopter  
*б* – трикоптер Yi Erida, разработанный компанией Yi Technology. Легкий и прочный карбоновый корпус, скорость до 120 км/час и до 40 минут полета от одного заряда аккумулятора

В трикоптерах вместо этого используется **механизм наклона заднего ротора**, позволяющий отклонять его вектор тяги от вертикали и таким образом управлять рысканьем.

**Достоинства:**

- ♦ повышенная маневренность по оси рысканья, которая у остальных коптеров является самой медленной и неточной;
- ♦ понижение веса за счет использования всего трех моторов;
- ♦ большое расстояние между передними роторами позволяет поместить камеру так, что пропеллеры не будут попадать в поле зрения, не вынося ее далеко от центра коптера;
- ♦ легки и компактны.

**Недостатки:**

- ♦ сложная конструкция;
- ♦ повышенная механическая сложность, необходим шарнир для крепления заднего мотора и сервопривод для управления им малая грузоподъемность;
- ♦ слабая живучесть (если один из ведущих двигателей откажет в полете, то трикоптер упадет).

**Квадрокоптеры:  
конструкция, достоинства, недостатки**

**Квадрокоптеры (рис. 1.3)** — это беспилотники с четырьмя моторами. Как правило, на них устанавливают мини-камеру, позволяющую вести в полете фото- и видеосъемку. Это самый популярный вид мультикоптера!



*Рис. 1.3. Квадрокоптер Turphoon Q500, обеспечивающий зрелищную 3D съемку в скоростном полете*

У квадрокоптеров 4 двигателя, которые вращаются попарно в противоположных направлениях, чтобы аппарат в полете не крутился.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*В отличие от бикоптеров и трикоптеров, у квадрокоптера отсутствуют поворотные механизмы, что делает конструкцию простой.*

Квадрокоптеры более надежны, но в случае отказа мотора летят на землю, но не быстро: оставляют шанс спасти аппарат.

## Гексакоптеры: конструкция, достоинства, || недостатки ||

**Гексакоптеры (рис. 1.4)** — это беспилотники с шестью моторами (рамы создаются чаще в форме букв Ж или Н). К ним применимы все положительные черты квадрокоптеров, а также добавляется большой вес полезной нагрузки и живучесть при поломке одного мотора.

Профессионалам рекомендуется остановить свой выбор на именно гексакоптере, то есть купить более совершенную модель.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Обращаю внимание, что гексакоптер немного сложнее в пользовании, в отличие коптера с четырьмя моторами. Поэтому он представляет собой не лучший вариант для пилотов-любителей.*

В среднем гексакоптер весит чуть более 2 кг, развивает скорость до 60 км/ч.





*Рис. 1.4. Гексакоптер YUNEEC H520, полноценная высокопроизводительная модульная платформа для профессиональной аэросъемки*

#### **Достоинства:**

- ♦ не боятся порывов ветра;
- ♦ способны поднимать большие грузы;
- ♦ более надежны, поэтому заставляют меньше волноваться за повреждение съемочной аппаратуры.

#### **Недостатки:**

- ♦ высокая стоимость — рамы стоят дороже, большее количество двигателей, регуляторов оборотов (ESC) и винтов;
- ♦ энергозатратны — чтобы обеспечить сопоставимое время полета требуется батареи большей емкости или две батареи.

## Октокоптеры: || конструкция, достоинства, недостатки ||

**Октокоптеры (рис. 1.5)** — это беспилотники с восьмью моторами. На такие машины не страшно ставить дорогую камеру. Только этим аппаратам можно доверить подъем в воздух профессиональных, тяжелых и дорогих фото-видео камер.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Кроме того, октокоптер может быть использован для картографирования местности, осуществления разведывательных миссий и научных исследований, а также для осмотра инженерных конструкций.*



**Рис. 1.5.** Профессиональный октокоптер DJI Spreading Wings S1000+

**Достоинства:**

- ♦ стабилен в полете и не чувствителен к ветру;
- ♦ при отказе одного и даже двух моторов – аппарат не падает;
- ♦ большая продолжительность полета;
- ♦ очень большая грузоподъемность (до 16–17 кг).

**Недостатки:**

- ♦ высокая цена;
- ♦ огромное энергопотребление.

**Соосные коптеры:****конструкция, достоинства, недостатки**

Схемы мультикоптеров могут предполагать варианты **соосного расположения двигателей на луче**, но они используются редко. Например, если на раму трикоптера поставить соосно по два двигателя с пропеллерами на каждый луч, то это уже гексакоптер по схеме «Y» или «Y6» (или «соосный трикоптер», как будет угодно). То же касается квадрокоптера и октокоптера по схеме «X4» или «X8».



*Рис. 1.6. Соосный квадрокоптер CZ Quadro-condor, созданный по схеме «X8»*

**Достоинства:**

- ♦ при наличии более 5 моторов появляется избыточность, т. е. если один мотор откажет, то летательный аппарат все еще будет стабилен и сможет безопасно приземлиться;
- ♦ меньшие габариты;
- ♦ для большего удобства при перевозке можно сделать складную раму.

**Недостатки:**

- ♦ потеря до 20% эффективности, ведь нижний мотор тянет уже разогнанный воздух, от этого теряется его эффективность;
- ♦ винты легче цепляют препятствия;
- ♦ сложно убрать винты из кадра, т. к. моторы расположены и над, и под лучами;
- ♦ сложно подобрать подходящие шасси.

**Новичок:** *А я слышал, как-то описывают положение беспилотника в полете?*

## Мультикоптер: || тангаж, крен, рыскание ||

В теории полета мультикоптера, как и большого летательного аппарата, принято выделять три угла, они же оси вращения, которые определяют ориентацию и направление движения летательного аппарата. Иными словами, летательный аппарат куда-то «смотрит» и куда-то движется. И эти два действия могут не совпадать — он смотрит в одну сторону, а летит в другую.

**ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Авиалайнеры в полете, настоящие самолеты, могут подвергаться сносу, отклоняющему их от курса. Вертолетам и квадрокоптерам же иногда удобнее летать боком.*

Три угла, о который я сказал выше, называют **креном**, **тангажем**, **рысканием**. Рассмотрим их.



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

**Креном** называют поворот аппарата вокруг его продольной оси от рубки пилотов до хвоста у самолета.

**Тангажем** называют поворот вокруг поперечной оси, например, нос вниз, хвост вверх.

**Рысканием** называют поворот вокруг вертикальной оси: так легко может крутиться вертолет.

У вертолета несущий винт может управлять креном и тангажем за счет **перекоса лопастей** (см. главу 8).

Ориентацию квадрокоптера в воздухе определяют те же углы: тангаж (**pitch**), крен (**roll**), рыскание (**yaw**). Меняя углы, мы заставим квадрокоптер лететь в нужном направлении. Так для полета вперед квадрокоптер должен наклониться (поклониться направлению движения!), что достигается замедлением вращения передних винтов или ускорением вращения задних винтов.

**Новичок:** *А взлетать? Я думал, все винты крутятся, квадрокоптер поднимается. Перестали крутиться, он сел.*

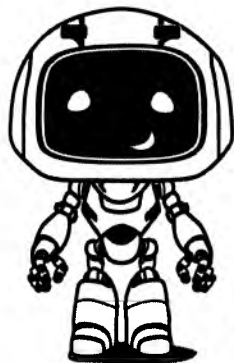
Нет, подъем квадрокоптера определяется средним арифметическим между скоростями вращения всех моторов. Чем больше эта величина, ее называют **throttle** (общий газ), тем больше суммарная тяга. Обычно величина измеряется в процентах:

- ♦ 0% — винты не вращаются;
- ♦ 100% — винты вращаются с максимальной скоростью.

Когда квадрокоптер зависает в воздухе, скорость вращения винтов должна быть такой, чтобы квадрокоптер не терял высоту.

**Новичок:** *Я пока не все понял. И я раньше не задумывался – они, ведь, все тяжелые. А как они вообще летают?*

Это, скорее, не ко мне вопрос, а к авиатору, летчику. Но поговорить есть о чем. Вот что он рассказал.



# ПОЧЕМУ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ ТЯЖЕЛЕЕ ВОЗДУХА УМЕЮТ ЛЕТАТЬ?

## || Союз винта и двигателя

Самолеты, вертолеты, беспилотники относятся к летательным аппаратам тяжелее воздуха. Мы знаем, что разгоняют самолет и поддерживают скорость в полете двигатели. Реактивные двигатели толкают самолет вперед за счет сгорания керосина и потока газов, вырывающихся из сопла с большой силой. Винтовые двигатели «тянут» самолет за собой или толкают его, если винт сзади.

Воздушный винт имеет еще одно название — пропеллер. Это устаревшее название, которое происходит от латинского *propellere* (гнать, толкать вперед).



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Замечу, кстати, что винты бывают не только тянущими, но и толкающими. Толкающие винты стояли даже на первом самолете братьев Райт.*

Но двигатель — это еще не все, что обеспечивает полет самолета. Для полета нужна подъемная сила, которая возникает при движении потоков воздуха навстречу крылу.

## Крыло обеспечивает полет

**Крыло** — это основная часть самолета, планера и летающей модели. От размеров и формы крыла в плане и в поперечном сечении зависят летные качества этих летательных аппаратов.

Крыло повернуто под точно рассчитанным углом (рис. 2.1). Этот наклон крыла к воздушному потоку принято называть **углом атаки**. Обычно его значение не превышает  $3...5^\circ$ , чего достаточно для взлета большинства моделей самолетов.

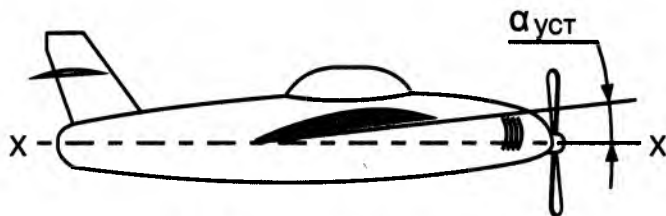


Рис. 2.1. Угол атаки крыла



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Следует помнить, что значение угла атаки не должно превышать критической отметки, иначе подъемная сила упадет.*

Кроме того, крыло имеет специальный **аэродинамический профиль** (рис. 2.2).

На рис. 2.2 вы видите такие элементы [11]. **Профиль** — контур, позволяющий получить подъемную силу с относительно высокой эффективностью. **Линия хорды** — прямая линия, сое-



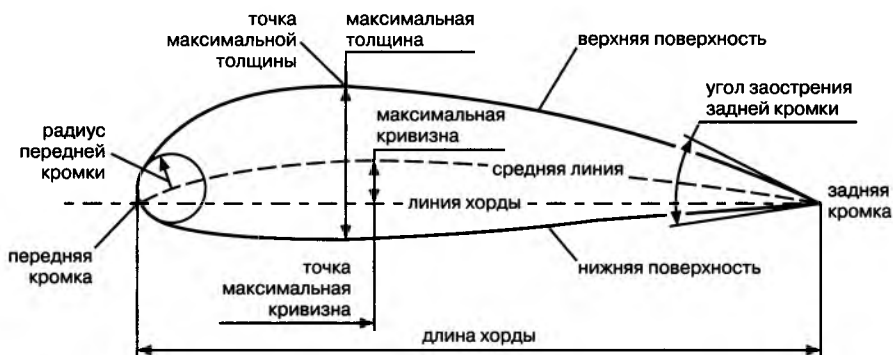


Рис. 2.2. Профиль крыла самолета

диняющая наиболее удаленные точки передней и задней кромок профиля. **Хорда** — длина линии хорды.



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

**Угол установки крыла** — это угол между хордой крыла и горизонтальной осью самолета. Этот угол фиксирован для крыла, но может быть переменным для стабилизатора.

**Средняя линия** — линия, соединяющая переднюю и заднюю кромки и равноудаленная от верхней и нижней границы профиля.

**Максимальная кривизна профиля** — максимальное расстояние между средней линией и линией хорды, которое выражается в процентах от длины хорды.

На рис. 2.2 указывается координата точки максимальной кривизны от передней кромки, тоже выраженная в процентах от хорды.

**ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Если средняя линия выше линии хорды – кривизна считается положительной, и наоборот. У симметричных профилей кривизна равна нулю.*

**Толщина и координата точки максимальной толщины** профиля выражаются в процентах от длины хорды. Эти величины имеют очень большое влияние на характеристики воздушного потока. А **радиус закругления передней кромки** оказывает существенное влияние на первоначальное обтекание профиля.

**ПРИМЕЧАНИЕ.**

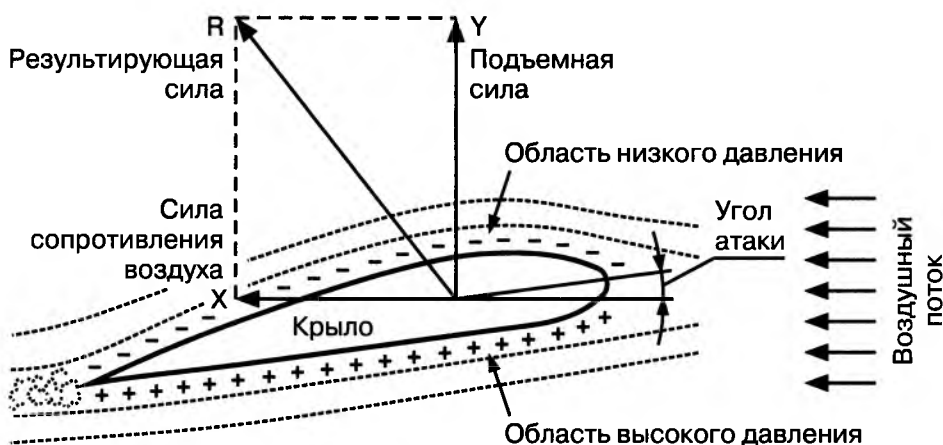
*Специальный аэродинамический профиль крыла в большинстве случаев выпуклый сверху и почти ровный снизу!*

## Как возникает подъемная сила

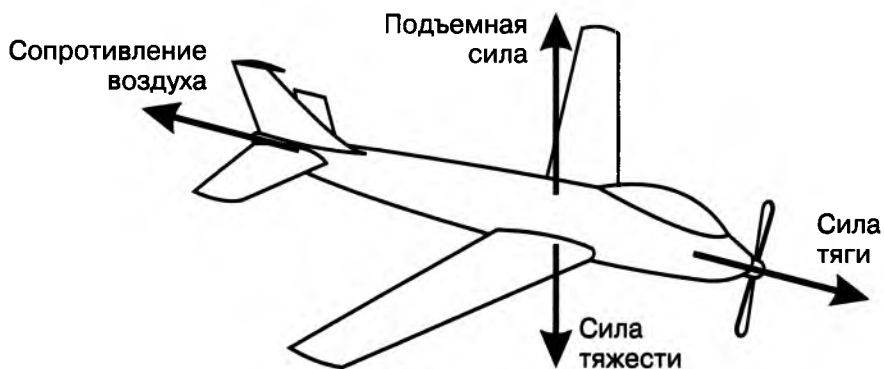
Воздух, обтекая крыло самолета, разделяется на два потока, бегущие с разными скоростями: над крылом и под ним. Нижний поток протекает свободно, а верхний сужается и течет быстрее. А чем выше скорость потока, тем давление в нем ниже и, соответственно, наоборот.

**Новичок:** *Получается, что при движении в воздушном потоке над крылом давление меньше, чем под ним?*

Да! Из-за этой разницы и возникает подъемная сила (рис. 2.3). Она выталкивает крыло самолета и, соответственно,



**Рис. 2.3.** Как возникает подъемная сила

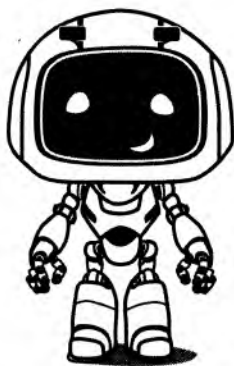


**Рис. 2.4.** Силы, действующие на самолет в полете

сам самолет вверх. Чем скорость выше, тем подъемная сила больше. А если она равна весу, то самолет летит горизонтально. Ну, а скорость зависит от работы двигателя самолета.

При движении на самолет действуют (**рис. 2.4**):

- ◆ сила тяги;
- ◆ подъемная сила;
- ◆ сила тяжести;
- ◆ сила сопротивления воздуха.



# ОРГАНЫ УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТОМ

## Внешние элементы управления

**Новичок:** *А как называют то, что управляет самолетом?  
Что дает взлет, полет, посадку?*

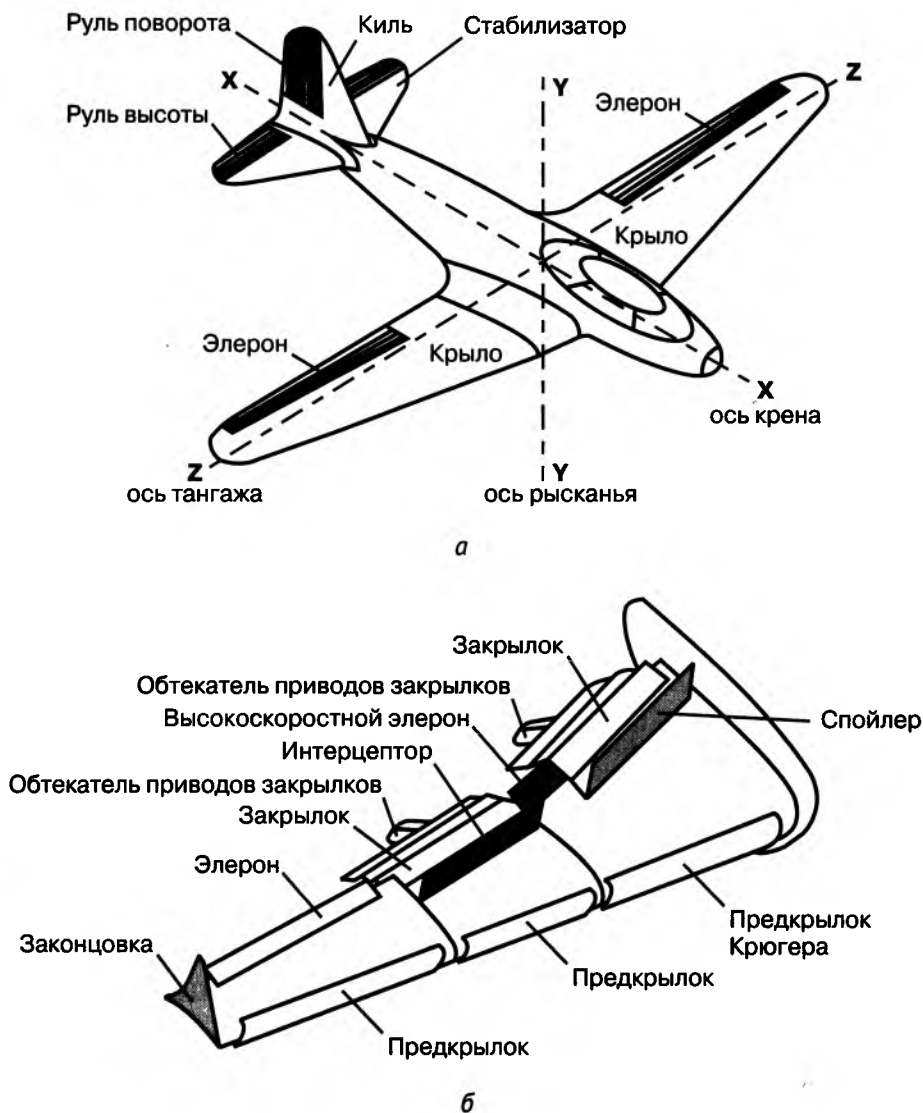
У современных **беспилотников самолетного типа**, да и у больших самолетов, крылья и хвостовое оперение состоят из нескольких элементов (**рис. 3.1, а**). Основная часть крыльев и вертикального оперения неподвижны относительно фюзеляжа, а на их задней кромке устанавливают **рулевые поверхности**. Это как бы подвижные части, «вырезанные» из целого крыла, стабилизатора или киля.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*В полете они продолжают профиль крыла, а на взлете, посадке или маневрах в воздухе могут отклоняться от своего центрального положения.*

На пассажирских лайнерах перед взлетом (или посадкой) крыло как бы «расправляется». Из его задней кромки «выпол-



**Рис. 3.1.** Внешние элементы управления:  
*а* – упрощенная схема;

*б* – элементы взлетно-посадочной механизации крыла и управления пассажирского самолета

зают» новые плоскости, слегка загибаясь вниз. А при пробеге после посадки на верхней поверхности крыла поднимается что-то похожее на почти вертикальные щитки. Это и есть элементы механизации крыла [25].

Элементы взлетно-посадочной механизации крыла и управления пассажирского самолета представлены на рис. 3.1, б.

## Взлетно-посадочная механизация крыла

К понятию взлетно-посадочная механизация крыла принято относить два элемента: **закрылки** и **предкрылки**. Они обычно работают в комплексе.

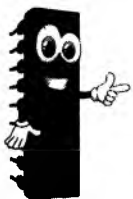


### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Однако для разных типов самолетов возможны специфичные режимы их отдельной работы.*

**Закрылки** находятся только на задней кромке крыла и всегда опускаются вниз, но могут выдвигаться и назад. Они призваны улучшить несущую способность крыла самолета при взлете, посадке, наборе высоты и маневрировании при полете. Главное, они облегчают разгон при взлете и торможение при посадке. Это первая из придуманных разновидностей механизации крыла.

**Предкрылки** придуманы, чтобы обеспечить возможность самолета летать на больших углах атаки (а, значит, и с меньшей скоростью). Благодаря им, самолеты после отрыва от полосы не плавно поднимаются вверх, а делают это интенсивно, довольно резко задрвав нос.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*По конструкции и принципу действия предкрылки похожи на щелевые закрылки, только устанавливаются, естественно, на передней кромке крыла.*

## || Органы поперечного управления самолетом

Теперь об органах **поперечного управления** самолетом, т. е. управления по каналу крена. Это **элероны**. Работают они дифференциально (на одном крыле поднимаются, на втором — опускаются).

Еще существуют **флапероны** (так называемые «зависающие элероны»), которые могут отклоняться не только в противоположные стороны, выполняя функцию закрылков.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Применяются флапероны не часто, в основном на легких самолетах.*

## || Органы непосредственного управления подъемной силой

Рассмотрим теперь органы непосредственного управления подъемной силой.



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*Интерцепторы — это плоские элементы на верхней поверхности крыла, которые поднимаются (отклоняются) в поток. При этом происходит торможение воздушного потока, уменьшение подъемной силы крыла.*

Интерцепторы в зависимости от предназначения, площади поверхности консоли и расположения на крыле делят на две разновидности:

- ♦ **элерон-интерцепторы** (работают в процессе пилотирования вместе с элеронами, которые отклоняются вверх);

- ♦ **спойлеры** (синхронно выпускаются и работают как воздушные тормоза, позволяя изменить вертикальную скорость самолета без изменения угла тангажа, т. е. не опуская его нос).



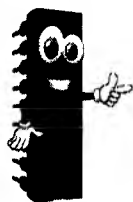
#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Спойлеры обычно применяются еще и после посадки одновременно с реверсом тяги. Главная их задача в этом случае быстро уменьшить подъемную силу крыла и тем самым прижать колеса к бетонке, чтобы эффективно заработали тормоза колес.*

## Увеличение эффективного размаха крыла

В завершении рассмотрим **законцовки крыла** — элемент, служащий для увеличения эффективного размаха крыла.

Законцовки, увеличения эффективный размах крыла, снижают лобовое сопротивление, создаваемое срывающимся с конца стреловидного крыла вихрем. И, как следствие, они увеличивают подъемную силу на конце крыла. Важно отметить, что законцовки позволяют увеличить удлинение крыла, почти не изменяя при этом его размах.

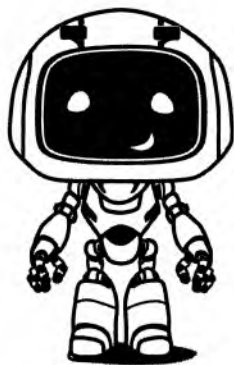


#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*В настоящее время одни и те же типы самолетов могут иметь разные варианты законцовок. Применение законцовок крыла позволяет улучшить топливную экономичность у самолетов, дальность полета у планеров.*

Рассмотрим теперь более детально, как работают эти элементы взлетно-посадочной механизации крыла и управления.





# УЧИМСЯ УПРАВЛЯТЬ САМОЛЕТОМ

## || Как самолет управляется по крену

Элероны или рули крена, рассмотренные в главе 3, предназначены для управления углом крена самолета (рис. 4.1).



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*Способность самолета поворачиваться вокруг своей продольной оси при отклонении элеронов называется **поперечной управляемостью**.*

Для совершения маневра элероны всегда отклоняются в противоположные стороны: для крена самолета вправо правый элерон поворачивается вверх, а левый — вниз; и наоборот.

**Новичок:** *Пилот управляет самолетом, используя штурвал?*

Ты правильно понимаешь. В данном случае ДА, но в других случаях, о которых поговорим ниже, еще используются педали. Помни, что штурвал пилота имеет две оси. Первая ось штурвала (рис. 4.1) обеспечивает движение влево/вправо и позволяет управлять креном самолета, поднимая и опуская элероны.

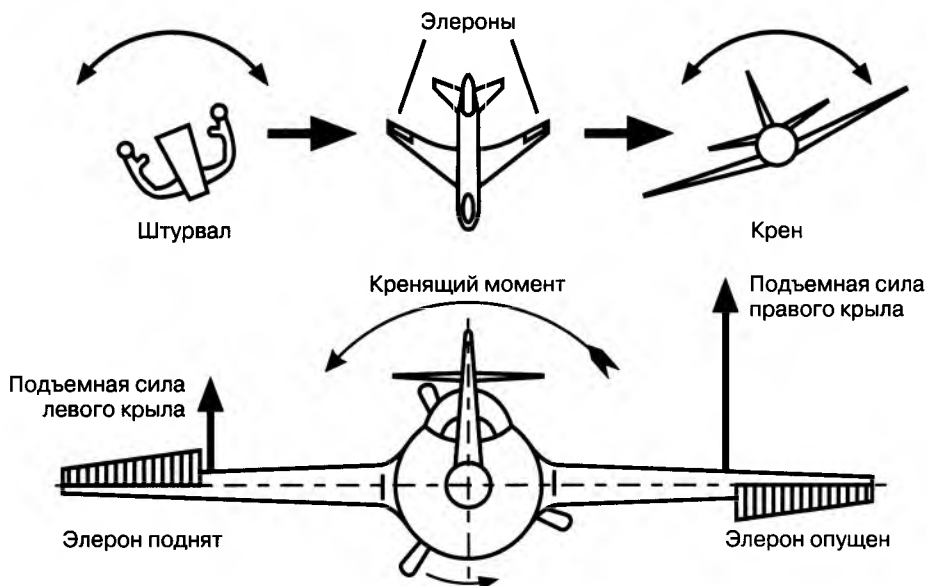


Рис. 4.1. Управление углом крена



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*В общем случае подъемная сила увеличивается в сторону, противоположную отклонению рулевой поверхности.*

Принцип действия элеронов состоит в том, что у части крыла, расположенной перед элероном, поднятым вверх, подъемная сила уменьшается, а у части крыла перед опущенным элероном — увеличивается. В итоге создается момент силы, накреняющей в нужной степени самолет.

Как только крен достигнет нужного значения, ручка управления плавно возвращается на место — к центральному положению (это называется у летчиков «зафиксировать крен»).

**Новичок:** *Да, как-то все не просто!*

Для этого летчики учатся, практикуются... Продолжим.

Дальнейшее выдерживание заданного крена в развороте нужно осуществлять небольшими движениями ручки от цен-

трального положения. Т. о. при использовании элеронов работает важное правило, называемое «возвращаться к центру».



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Особенность работы элеронов состоит в том, что при отклонении ручки управления в сторону самолет может непрерывно вращаться вокруг продольной оси. Ведь возникающий при этом демпфирующий момент не в состоянии уравновесить самолет на определенном угле крена.*

## || Как самолет управляется по высоте

Вторая ось штурвала (рис. 4.2) обеспечивает его подвижность «от себя/на себя» и управляет положением носа самолета относительно горизонта (тангажом самолета), поднимая и опуская рули высоты. Руль высоты расположен вдоль задней кромки стабилизатора. Движение рулем высоты контролируется штурвалом «на себя (набор высоты)/ от себя (снижение)».



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Следует отметить, что РУЛЬ ВЫСОТЫ – исторически сложившееся ошибочное название. Эта управляющая поверхность управляет не высотой полета, а углом тангажа, т. е. положением носа самолета относительно горизонта, что позволяет изменять высоту полета.*

Чтобы самолету подняться вверх, нужно слегка опустить хвост. Тогда возрастет угол атаки крыла, самолет начнет наби-

рать высоту (рис. 4.2). Для этого пилот должен потянуть штурвал (на ряде самолетов — ручку управления) на себя. Руль высоты на стабилизаторе отклоняется вверх, его подъемная сила уменьшается и хвост опускается. При этом угол атаки крыла увеличивается и его подъемная сила возрастает.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Стоит помнить о том, что для набора высоты нужно еще и увеличение тяги двигателя. Если набирать высоту одним только движением ручки «на себя», можно потерять скорость и даже достичь срыва с последующим сваливанием самолета.*

Чтобы спикировать, пилот наклоняет штурвал вперед. Руль высоты отклоняется вниз, самолет задирает хвост и начинает снижение.

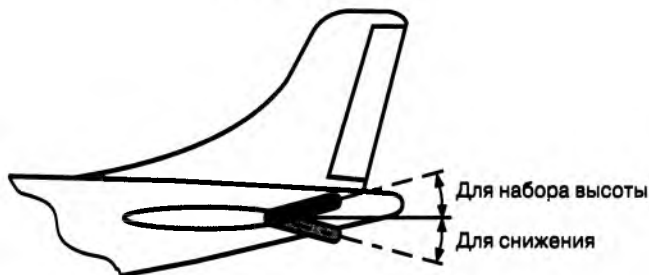


Рис. 4.2. Управление по высоте

## Как самолет поворачивает в полете

**Руль направления** (рис. 4.3) контролирует движения самолета вокруг вертикальной оси — «рыскание» влево-вправо. Пилот воздействует на педали и отклоняет подвижную часть киля (вертикальной части хвостового оперения).

Рулем направления управляют с помощью **педалей**. Толкаете вперед левую педаль — самолет поворачивает налево, толкаете правую — направо. Но делает это машина достаточно медленно.



*Рис. 4.3. Работа руля направления*

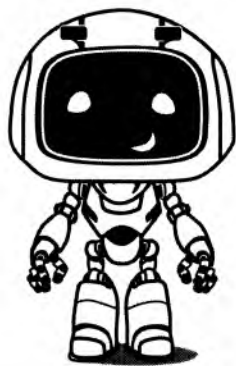
### **Новичок:** А как сделать быстро?

А вот чтобы самолет быстро развернулся, нужно действовать иначе. Для поворота, например, влево нужно наклонить машину на левый борт (повернуть штурвал или наклонить ручку управления) и одновременно нажать на левую педаль и взять штурвал на себя.



### **ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Руль направления не поворачивает самолет на новый курс, его главная задача сделать полет координированным во время разворотов.*



# ВОЗДУШНЫЕ ВИНТЫ В АВИАЦИИ И НЕ ТОЛЬКО...

## Первые воздушные винты

Человечество уже давно проявляло интерес к винту. Еще в Древнем Китае умельцы создали игрушку, которая называлась «летающая вертушка».

**Новичок:** *А я знаю, что это! У меня такая в детстве была.*

Это был стержень с винтом из птичьих перьев на конце. Его раскручивали руками (или с помощью нити, намотанной на стержень) и отпускали. Игрушка взмывала вверх. Первые теоретические свидетельства о таких винтах имеются в старинных рукописях.

В деревнях Российской империи ребята часто устанавливали на воротах двухлопастную ветрянку, которая при ветре вращалась так быстро, что лопасти сливались в сплошной круг. Ветрянку и была простейшим винтом. Если насадить ее на ось, сильно закрутить между ладо-

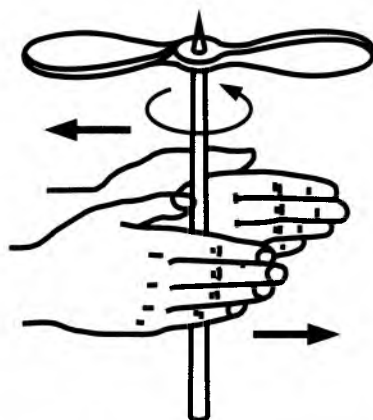


Рис. 5.1. Простейший винт – игрушка-ветрянку

нями и выпустить, то эта ветрянка, как и древнекитайская игрушка, с жужжанием полетит вверх (рис. 5.1).



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Подобная игрушка в виде детского механического вертолета продается сегодня по всему миру.*

## || Воздушный винт Леонардо да Винчи

А на эскизах Леонардо да Винчи изображается и совсем другой летательный аппарат — «воздушный винт» (рис. 5.2), способный, по мнению знаменитого ученого, подняться в воздух.

По словам Леонардо да Винчи, аппарат с таким винтом должен был летать, ввинчиваясь в воздух! Радиус винта — почти



*Рис. 5.2. Воздушный винт Леонардо да Винчи*

5 метров. Он имел металлическую окантовку и накрахмаленное полотняное покрытие. Винт должен был приводиться в движение четырьмя людьми, которые шли вокруг оси и толкали рычаги.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Существовал и еще один способ запуска винта – требовалось быстро раскрутить трос под осью.*

**Новичок:** *И взлетели?*

К сожалению, нет. Это устройство, как и многие свои творения, Леонардо не смог испытать на практике, так как мускульной силы в то время было недостаточно. Этот винт послужил прототипом для современного винта на вертолете.



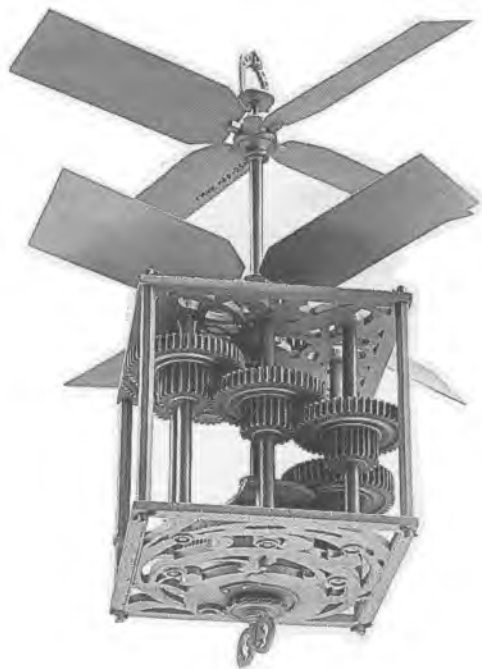
#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*В наше время экспериментаторы построили винт по чертежам и описаниям Леонардо да Винчи, но с использованием уже современных материалов. Однако мускульная сила 4 человек не позволила тяжелой конструкции подняться в небо. Не помогла, к сожалению, и замена людей электромотором. Винт так и не взлетел!*

## Воздушный винт Михаила Ломоносова

А практически винт впервые применил (для метеорологических приборов) М. В. Ломоносов. Великий русский ученый в 1754 год построил модель вертолета с пружинным заводом и практически доказал осуществимость полета такого аппарата [8].





*Рис. 5.3. Модель вертолета с пружинным заводом, созданная М. В. Ломоносовым*

Его вертолет (рис. 5.3) предназначался для непилотируемых измерений метеоусловий на разных высотах.



#### **ПРИМЕЧАНИЕ.**

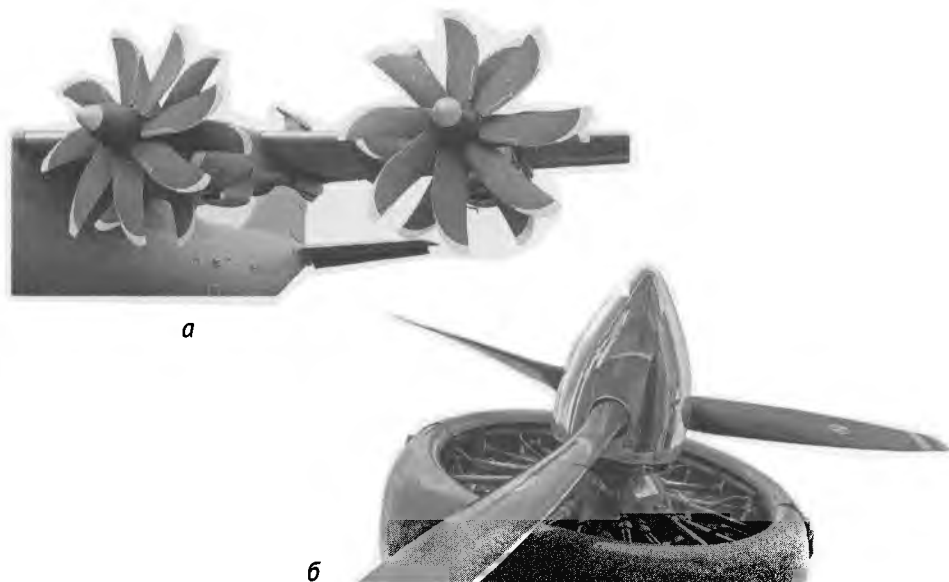
*Известно об испытаниях Михаилом Ломоносовым как минимум одного такого вертолета-беспилотника с термометром на борту.*

Воздушный винт в начале XX века устанавливался на дирижаблях, а затем на самолетах и вертолетах при использовании поршневых и турбовинтовых двигателей. Винты поднимают сегодня в небо и многочисленное семейство коптеров [9].

**Новичок:** *И как работает винт сегодня?*

## Современный воздушный винт

Современный воздушный винт (или пропеллер) приводится во вращение двигателем и преобразует крутящий момент двигателя в движущую силу поступательного движения. Воздушные винты имеют, как правило, от 2 до 8 лопастей (рис. 5.4).



**Рис. 5.4.** Винты современной авиации:  
а – турбовинтовой самолет АН-70;  
б – модернизированный винт самолета Avia BH-21

Трудно представить себе движитель более универсальный, чем воздушный винт. Он годится, чуть ли не для любого транспортного средства:

- ◆ экранолета (экраноплана, рис. 5.5);
- ◆ самолета;
- ◆ вертолета;
- ◆ мотодельтаплана;
- ◆ глиссера и даже...
- ◆ аэросаней.



*Рис. 5.5. Транспортно-десантный турбовинтовой экраноплан «Орленок»*

**Новичок:** *Я по телевизору видел, его называли... гордостью советского авиапрома, если я правильно запомнил. Расскажите, пожалуйста, о нем.*

## **Воздушный винт на экраноплане**

С удовольствием! «Орленок» — транспортно-десантный экраноплан, разработанный в конструкторском бюро Р. Е. Алексеева. Экраноплан использовал для передвижения эффект «экрана», возникающий при полетах на низких высотах от полуметра до десяти метров. В результате этого, «Орленок» мог двигаться почти с самолетными скоростями, взлетал и садился на воду, мог летать над относительно ровными участками суши.

**Новичок:** *А сколько груза он мог поднимать?*

Грузоподъемность значительная. «Орленок» мог перевозить до 20 тонн техники и живой силы (до 200 человек).

Еще отмечу, что на сверхмалых высотах обнаружение экраноплана радиолокационной техникой было затруднено, это обеспечивало «Орленку» внезапность.

Силовая установка «Орленка» состояла из главного кормового турбовинтового двигателя мощностью 15000 л. с., двух носовых (стартовых) турбовентиляторных двигателей тягой по 10,5 тонн. Экипаж состоял из 9 человек.

Всего было построено 5 экранопланов этого проекта, которые были в эксплуатации с 1992 по 2007 год [24].

## **Аэросани – почти самолет, мчащийся по снежному полю**

**Аэросани (рис. 5.6)** — это транспортное средство с полозьями для движения по снегу, которое приводится в движение с помощью авиационного воздушного винта. Вращает винт бензиновый двигатель.

### **Новичок: А сегодня как?**

И сегодня, конечно, это актуально. Особенно в нашей стране с ее бескрайними снежными просторами. Аэросани [7] позволяют перевозить людей и грузы на значительные расстояния в условиях тотальной заснеженности. По проходимости по снегу этому виду транспорта нет равных.

Если на транспортном средстве установлен двигатель средней мощности, то одного бака, емкостью в 40 литров хватает, чтобы проехать до 300 км. По обычному укатанному снегу аэросани можно разогнать до 50 км/ч, а по нетронутому, давно лежащему снегу — до 80 км/ч. Наличие твердого наста позволяет разогнать конструкцию до 110 км/ч. Но при подобной скорости появляется опасность опрокидывания, поскольку устойчивость аэросаней снижается.



*Рис. 5.6. Аэросани с бензиновым двигателем «Пермь»*

**Новичок:** *Расскажите, пожалуйста, еще, как работает воздушный винт? Я слышал, что бывают винты с изменяемым углом... А это что?*

## || Как работает || воздушный винт

Бывают и такие винты, о которых ты спрашиваешь, причем таких сегодня большинство! Но давай обо всем по порядку! При вращении винта лопасти набегают на воздух под некоторым углом (называемым углом атаки) и отбрасывают его назад. Благодаря этому винт как бы отталкивается от воздуха, стремится двигаться вперед.



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*Угол атаки воздушного винта – угол между направлением воздушного потока (противоположным направлению полета) и плоскостью вращения втулки винта.*



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*При вращении воздушный винт развивает аэродинамическую силу, направленную вдоль оси винта. Эта сила тянет самолет вперед и поэтому называется **силой тяги**.*

Профиль (сечение) лопасти винта подобен профилю крыла (рис. 5.7). Лопастей воздушного винта имеют:

- ♦ переднюю (режущую) кромку;
- ♦ заднюю кромку.

Сечение лопастей имеет профиль крыльевого типа. В профиле лопастей имеется хорда, которая имеет относительную кривизну и толщину. Для повышения прочности лопастей винта используют хорду, которая имеет утолщение к корню воздушного винта.

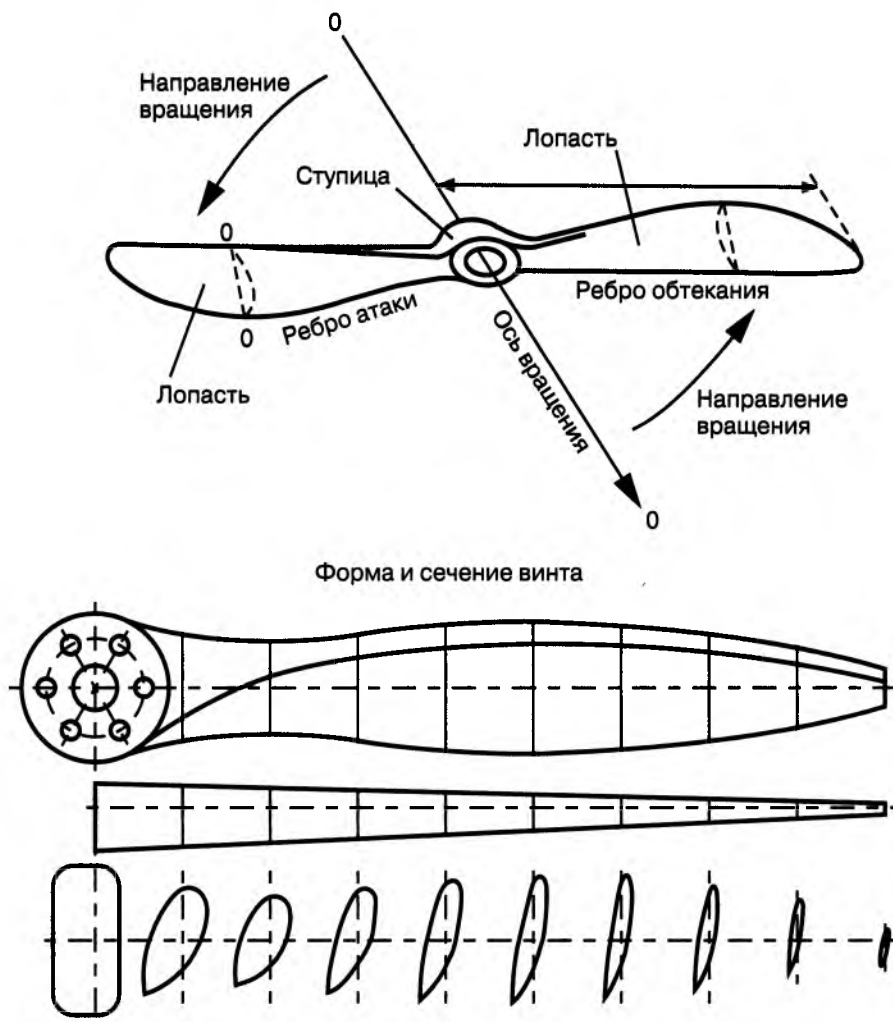


### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Хорды сечения находятся в разных плоскостях, поскольку лопасть изготовлена закрученной.*

Существует еще такое понятие, как **крутка**. То есть каждая лопасть по всей длине слегка закручена. Это делается опять же для того, чтобы при одной и той же мощности лопасть создавала наибольшую тягу.

**Новичок:** А крутка произвольная или как?



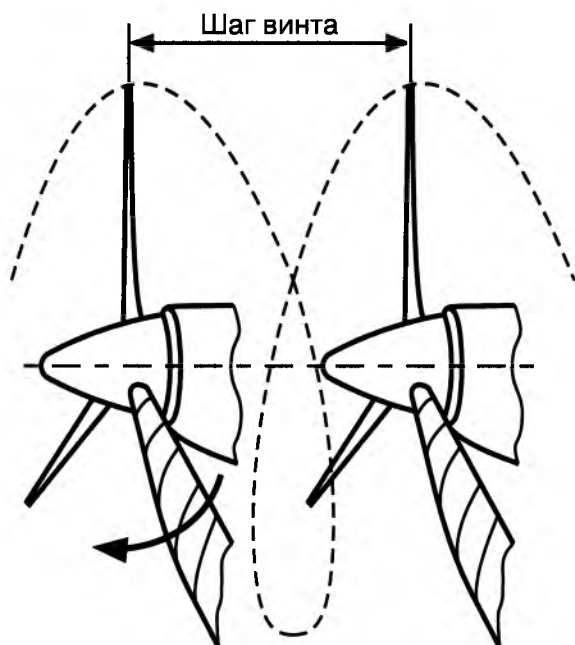
*Рис. 5.7. Профиль и сечение воздушного винта*

На рис. 5.7 видно, что за счет наличия кривки лопастей угол поворота в большинстве случаев составляет  $2/3$  всей длины лопасти.

**ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Работа лопастей воздушного винта подобна работе крыла. Но движение винта сложнее. В отличие от крыла лопасти винта в полете не только движутся вперед, но еще и вращаются при этом.*

Эти движения складываются, и поэтому лопасти винта движутся в полете по некоторой винтовой линии (рис. 5.8).



*Рис. 5.8. Движение лопастей воздушного винта в полете*

В работе по созданию силы тяги большую роль играют шаг воздушного винта и угол установки лопасти к плоскости вращения.





## ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

***Шаг воздушного винта** — это расстояние, которое винт должен был бы пройти за один свой полный оборот, если бы он ввинчивался в воздух, как болт в гайку. Шаг воздушного винта получается тем больше, чем больше угол установки лопасти к плоскости вращения.*

Диаметр винта и его шаг — это основные технические параметры воздушного винта. Шаг винта, в первую очередь, зависит от угла установки лопастей. Шаг измеряется в единицах пройденного расстояния за один оборот. Чем больший шаг делает винт за один оборот, тем больший объем отбрасывается лопастью.

## Геометрический шаг воздушного винта

В действительности же при полете самолета воздушный винт из-за малой плотности воздуха продвигается на несколько меньшее расстояние (**рис. 5.9**). **Геометрический шаг** воздушного винта (расстояние, которое мог бы пройти винт в твердой среде за один оборот) от **поступи** винта в воздухе отличается **скольжением** лопастей в воздухе.



## ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

***Поступь винта** — реальное расстояние, проходящее винтом за один оборот. Данная характеристика зависит от скорости движения и оборотов.*



## ПРИМЕЧАНИЕ.

*Винт с большим шагом нужен для большой скорости полета, а с малым шагом — для малой скорости.*

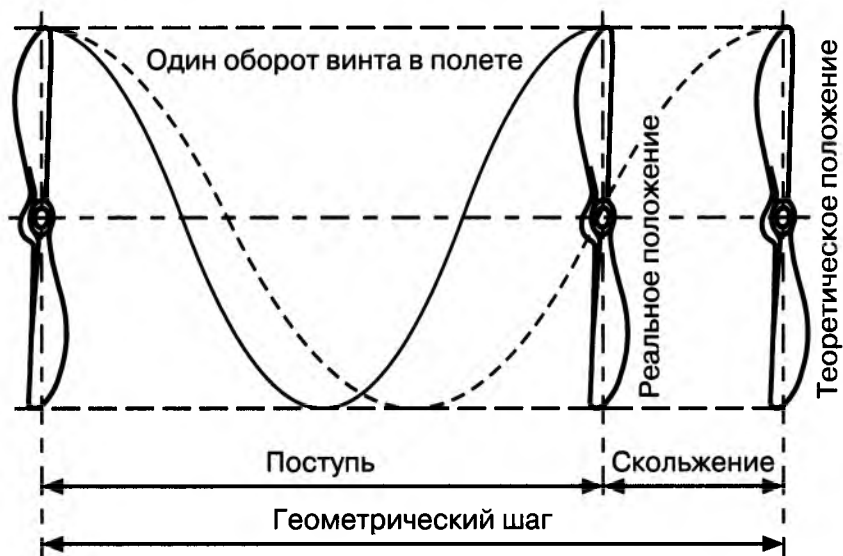


Рис. 5.9. Реальное расстояние, проходимое винтом за один оборот

**Новичок:** Интересно, а отчего зависит длина лопастей и их количество? Чем больше, тем лучше?

## О длине и количестве лопастей

Длина и количество лопастей каждого винта зависит от соотношения тяги винта, его КПД, массы, возможности возникновения срывных явлений на концах лопастей, влияния на конструкцию самолета.

Если лопастей больше и диаметр больше — больше тяга. Но при этом больше сопротивление и масса, а КПД — меньше. Повышается при этом и возможность срыва на концах. При большом диаметре винта, возможно, потребуются высокие шасси — это тоже масса.

**Новичок:** А как связан диаметр винта со скоростью самолета?

Пожалуй, правильней говорить о связи диаметра винта с его тягой. Тяга винта прямо пропорциональна четвертой степени диаметра винта. То есть больший винт ощутимо увеличивает тягу (при прочих равных условиях конечно), а, значит, и скорость. Но при этом надо, конечно учитывать рост сопротивления и скорости обтекания на концах лопастей.

**Новичок:** *Но увеличение шага еще больше нагружает силовую установку, количество оборотов снижается?*

До 30-х годов прошлого века использовались винты с постоянным шагом вращения. А уже с конца 1930-х годов практически все самолеты стали оснащаться воздушными винтами с **изменяемым шагом вращения**.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Современные самолеты имеют возможность изменять наклон лопастей без остановки двигателя.*

## || Как и зачем изменяется шаг винта на основных этапах полета

Винт фиксированного шага снимает максимальную мощность двигателя только на одном режиме полета, для которого он подобран, а на всех других режимах такой винт для двигателя становится либо «тяжелым», либо «легким».

**Новичок:** *Винты изменяемого шага, наверно, дорогие. Стоит ли игра свеч?*

Стоит! Воздушные винты изменяемого шага дают огромные дополнительные возможности. Это и уменьшение расхода

топлива при сохранении крейсерской скорости, и короткий взлет, и увеличение ресурса мотора, и увеличение скорости. Ведь для винта, да и самолета в целом, важен коэффициент полезного действия, который может меняться в зависимости от:

- ♦ изменения скорости полета;
- ♦ мощности двигателя;
- ♦ лобового сопротивления винта и др.

Чтобы сохранить КПД на достаточной высоте и была придумана система изменения шага винта, появились винты изменяемого в полете шага.

Такой винт должен:

- ♦ устанавливать на всех режимах полета оптимальные углы атаки лопастей;
- ♦ снимать с двигателя номинальную мощность на всем рабочем диапазоне скоростей и высот;
- ♦ сохранять максимальное значение коэффициента полезного действия на возможно большем диапазоне скоростей.

В зависимости от задаваемого летчиком режима полета, шаг винта меняется (рис. 5.10).

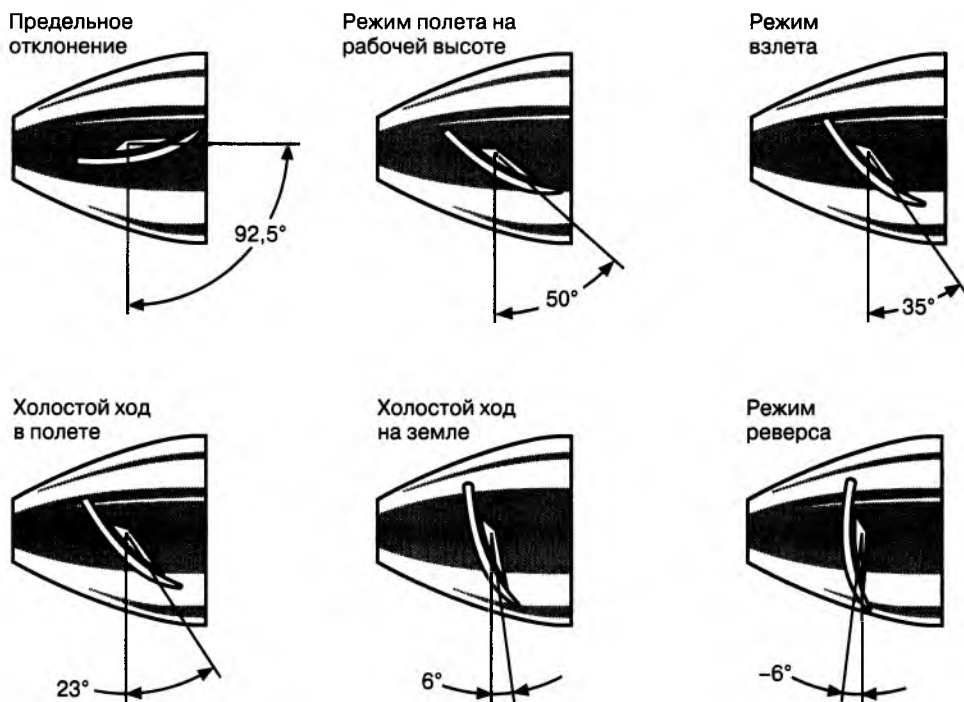
**Этап 1.** При взлете двигатель развивает максимальные обороты, а каждая часть лопасти винта развивает наибольшую тягу, имея наименьшее сопротивление вращению. Каждый элемент лопасти воздушного винта работает на углах атаки, близких к критическим. Угол атаки лопастей соответствует величине максимальной подъемной силы [10].

**Этап 2.** С увеличением скорости угол атаки лопастей воздушного винта уменьшается. Уменьшается сопротивление вращению, и воздушный винт как бы облегчается.

**Этап 3.** При выполнении полета на максимальной скорости винт также должен обеспечивать максимальное значение тяги. При полете на максимальной скорости угол наклона лопастей имеет предельное значение.

**Этап 4.** При изменении скорости полета происходит изменение угла атаки лопастей воздушного винта:

- ♦ при уменьшении скорости полета угол атаки увеличивается, чем винт как бы «утяжеляется»;



*Рис. 5.10. Ориентировочные положения лопастей винта при различных фазах полета*

- ♦ при увеличении скорости полета угол атаки уменьшается, чем винт облегчается.

**Этап 5.** При увеличении высоты полета мощность двигателя уменьшается и уменьшается угол наклона лопастей, чтобы облегчить работу двигателя. При уменьшении высоты происходит обратный процесс. Таким образом, обороты двигателя с изменением высоты полета сохраняются постоянными.

**Этап 6.** При заходе на посадку воздушный винт устанавливается на малый шаг, что соответствует оборотам взлетного режима. Это дает возможность летчику при выполнении всевозможных маневров на глиссаде посадки получить взлетную мощность двигателя при увеличении оборотов до максимальных.

**Новичок:** А как изменяется положение лопастей винта?

## Регулятор постоянства оборотов

**Регулятор постоянства оборотов** совместно с **механизмом поворота лопастей** изменяет угол наклона лопастей таким образом, чтобы обороты, заданные летчиком с помощью рычага управления даже при изменении режима полета оставались заданными и неизменными.



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

**Регулятор постоянства оборотов** – автоматическое устройство в винтах изменяемого шага, предназначенное для сохранения постоянными заданных оборотов воздушного винта (двигателя) путем синхронного изменения угла наклона лопастей при изменении режима полета (скорости, высоты).

## О механизме поворота лопастей

Лопастей воздушных винтов изменяемого шага поворачиваются в нужное положение [4]:

- ♦ либо под влиянием внешних сил, действующих на воздушный винт (аэромеханические винты);
- ♦ либо управляются специальным механизмом (гидравлические и электрические воздушные винты).



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

**Аэромеханический винт** – воздушный винт, у которого изменение угла установки лопастей производится автоматически аэродинамическими и центробежными силами.



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

**Гидравлический винт** – воздушный винт, у которого изменение угла установки лопастей производится давлением масла подаваемого в механизм, находящийся во втулке винта.

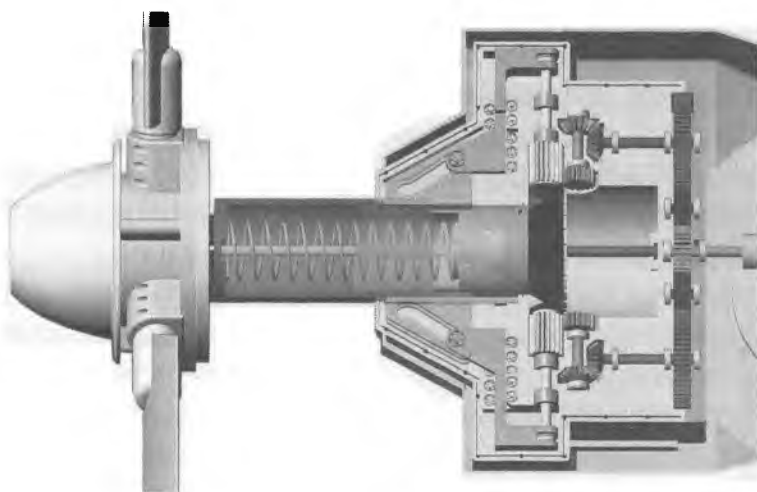
Пример внутреннего устройства управления гидравлическим винтом приведен на **рис. 5.11**. Гидравлические механизмы управления получили наибольшее распространение.



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

**Электрический винт** – воздушный винт, у которого изменение угла установки лопастей производится электродвигателем, соединенным с лопастями механической передачей.

Конструкция винтов изменяемого шага, как я сказал выше, позволяет изменять шаг винта (угол установки лопастей), пово-



**Рис. 5.11.** Пример внутреннего устройства управления гидравлическим винтом



*Рис. 5.12. Внешний вид воздушного винта изменяемого шага АВ-15-Д2*

рачивая с помощью специальных устройств или механизмов лопасть относительно продольной оси за ее корневую часть (комель лопасти), шарнирно закрепленную во втулке винта. Внешний вид воздушного винта изменяемого шага АВ-15-Д2 приведен на **рис. 5.12**.

Например, воздушный винт изменяемого шага АВ-15-Д2 [13] (разработан в ОСКБЭС МАИ совместно с СКБ МЛА, **рис. 5.12**) предназначен для создания прямой и обратной тяги. Специально разработанные лопасти позволяют реализовать величину реверсной тяги до 50% от тяги прямой.

Время полной перекладки лопастей — от 0,5 секунды. Это позволяет использовать его для управления и стабилизации в различных летательных аппаратах с несколькими силовыми установками.

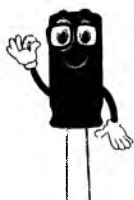




### ПРИМЕЧАНИЕ.

*В отличие от традиционных винтов, АВ-15-Д2 имеет увеличенное быстродействие системы изменения шага. Для исключения вибраций на переходных режимах и при косой обдувке, каждая лопасть установлена на шарнире с осью, перпендикулярной оси вращения винта.*

Конструкция винта АВ-15-Д2 позволяет устанавливать разные типы лопастей без разборки ступицы. Привод лопастей устанавливается вне винта, что дает возможность использовать широкую линейку приводов в зависимости от необходимых параметров управления.



### ВЫВОД.

*Таким образом, при изменении скорости полета от взлетной до максимальной в горизонтальном полете угол установки лопастей возрастает от своего минимального значения до максимального. Благодаря этому углы атаки лопасти изменяются мало и сохраняются близкими к оптимальным значениям.*

## || Преимущества и недостатки воздушных винтов

**Новичок:** *Я сейчас прочитал в Интернете: коэффициент полезного действия винтов на современных самолетах в ряде режимов полета достигает показателя в 86% [3].*

Так и есть! Это делает винты востребованными авиастроением. Также нужно отметить, что турбовинтовые аппараты в ряде случаев значительно экономнее, чем реактивные самолеты.



## ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*Коэффициент полезного действия воздушного винта – отношение полезно используемой мощности к затрачиваемой мощности двигателя.*

**Новичок:** *Наверное, есть и какие-то недостатки у воздушных винтов?*

Первым недостатком воздушного винта является «эффект запираания», который радикально снижает КПД при достижении определенной скорости полета. Этот эффект объясняется тем, что на лопастях винта возникают участки со сверхзвуковыми или околосзвуковыми потоками воздуха. Эффект проявляется в том, что при добавлении количества оборотов мощность остается на том же уровне.

Объясню, почему так происходит. Когда на кончике винта достигается околосзвуковая линейная скорость (330 м/с) и при дальнейшем увеличении скорости вращения часть винта начнет двигаться в пространстве со сверхзвуковой скоростью.



## ПРИМЕЧАНИЕ.

*Участок сверхзвуковой скорости от кончика винта в сторону оси вращения будет тем больше, чем больше скорость вращения винта.*

Часть винта, имеющая сверхзвуковую скорость (в перспективе – весь винт) не будет участвовать в создании тяги (вот он «эффект запираания»).



## ПРИМЕЧАНИЕ.

*Именно этот эффект не позволяет большинству летательных аппаратов с винтами развить скорость выше чем 700 км/час. На данный момент*

*самой быстрой машиной с винтами является отечественная модель дальнего бомбардировщика Ту-95, который может развить скорость в 920 км/час.*

Для борьбы с этим эффектом конструкторы идут по пути применения на винтах узких саблевидных лопастей, каковые имеют возможность отсрочить момент точки возникновения проблемы. Это разрешает достигнуть более высоких показателей скорости. Такой тип винтов установлен, например, на самолете типа Ан-70.

В какой-то степени миновать эффект запираания удалось конструкторам за счет применения турбовинтового двигателя типа НК-12, который передает мощность на два соосных винта. Их вращение в различные стороны разрешило миновать запираание и даже повысить тягу.

Сверхзвуковые воздушные винты (сложной формы) разрабатываются, но реальных применений нет.

**Вторым недостатком** винтов следует считать высокую шумность, которая регламентируется мировыми нормами ICAO. Шум от винтов не вписывается в эти стандарты шумности.

Новые типы воздушных винтов с саблевидными лопастями создают меньший шум, но такие лопасти очень сложны и дороги в производстве.

## || Импеллеры – кто они?

Для снижения уровня шума и концевое обтекания лопастей заключают винт в кольцо, **импеллер**. Одновременно это новшество повышает безопасность.

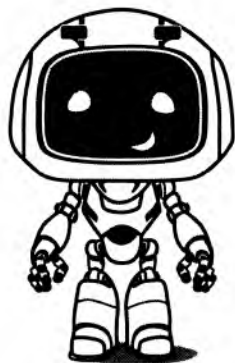


## ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*Импеллер – это лопаточная машина, работающая в специальном кожухе, в отличие от воздушного винта, который работает в открытом пространстве.*

В переводе с немецкого языка дословно звучит как «направленный, канализированный вентилятор». Внешний кожух устройства помогает эффективно направлять воздушные потоки (или рабочую среду), эффективно распределяя центробежные усилия. Это предотвращает концевые потери.

Импеллер способен обеспечивать максимальную тягу при минимальном диаметре вентилятора.



# КАК УСТРОЕН ВЕРТОЛЕТ

## || Основные отличия вертолета от самолета

Самолет поднимает и держит в воздухе крыло, а у вертолета эти функции выполняет винт большого диаметра. Его называют несущим винтом. Такой принцип полета вертолета действительно соответствует устоявшемуся выражению о вертолете — «винтокрылая машина».

Вертолет обладает рядом **преимуществ** по сравнению с самолетом. Он может взлетать и садиться на пятачке, разворачиваться на месте, лететь назад и вбок.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Некоторые современные вертолеты даже могут выполнять фигуры высшего пилотажа: «мертвую петлю» и «бочку».*

Рассмотрим, как устроен вертолет.

## Фюзеляж

Фюзеляж (рис. 6.1) является основной частью конструкции вертолета, служащей для соединения в одно целое всех его частей, а также для размещения экипажа, пассажиров, грузов, оборудования. К фюзеляжу крепятся:

- ♦ шасси;
- ♦ подредукторные рамы;
- ♦ узлы крепления двигателя;
- ♦ оперение и т. д.

Фюзеляж имеет хвостовую и концевую балки для размещения хвостового винта вне зоны вращения несущего винта, и крыла.

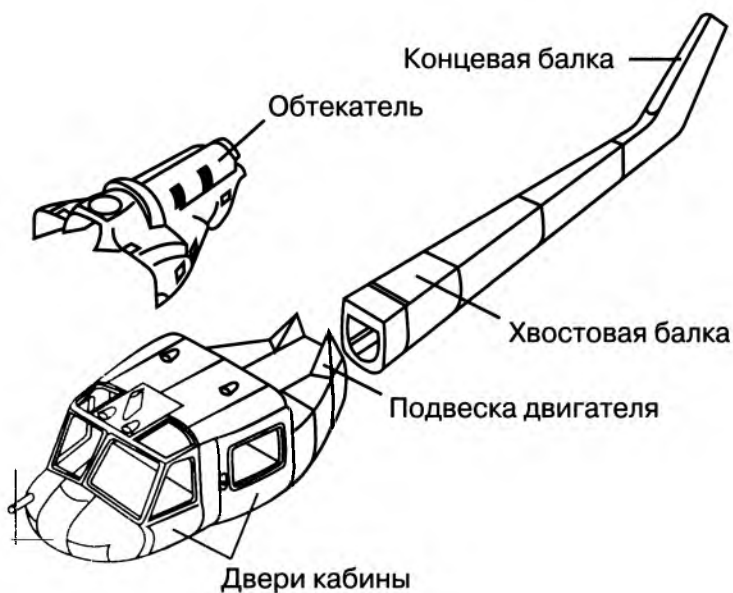


Рис. 6.1. Так выглядит фюзеляж вертолета

## Взлетно-посадочные устройства

Взлетно-посадочные устройства служат опорой вертолета при стоянке и обеспечивают перемещение вертолета по земле,

взлет и посадку. Для смягчения толчков и ударов они снабжены амортизаторами. Они могут быть выполнены в виде:

- ♦ колесного шасси;
- ♦ полозкового шасси;
- ♦ поплавков (жестких или надувных);
- ♦ лыж.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Колесное шасси может быть убираемым в полете.*

## || Крыло и оперение

**Крыло** создает дополнительную подъемную силу, разгружая несущий винт, что позволяет увеличить скорость полета. В крыле могут размещаться топливные баки, оборудование, ниши для уборки шасси.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*У вертолетов поперечной схемы на крыльях устанавливаются несущие винты. На некоторых вертолетах, например, на боевом вертолете МИ-24 (рис. 6.2) крылья устанавливаются с целью увеличения максимальной скорости полета за счет частичной разгрузки несущего винта.*

**Оперение** предназначено для обеспечения устойчивости, управляемости и балансировки вертолета. Оно разделяется на две категории:

- ♦ горизонтальное (стабилизатор);
- ♦ вертикальное (киль).



*Рис. 6.2. Внешний вид боевого вертолета Ми-24*

## Силовая установка || и трансмиссия ||

**Силовая установка** является источником механической энергии для приведения во вращение несущего и рулевого винтов. Кроме того она обеспечивает работу вспомогательных агрегатов.

Установка может включать от одного (рис. 6.3) до трех поршневых, газотурбинных или электрических двигателей с системами, обеспечивающими их нормальную устойчивую работу на всех режимах полета:

- ♦ топливную;
- ♦ масляную;
- ♦ охлаждения;
- ♦ запуска двигателей.

**Трансмиссия** (рис. 6.3) предназначена для передачи мощности от двигателей к несущему и рулевому винтам и вспомогательным агрегатам. Схема трансмиссии определяется схемой вертолета, числом и расположением двигателей. Трансмиссия состоит из главного, промежуточного и хвостового редукторов, валов и их опор, соединительных муфт, тормоза несущего винта.



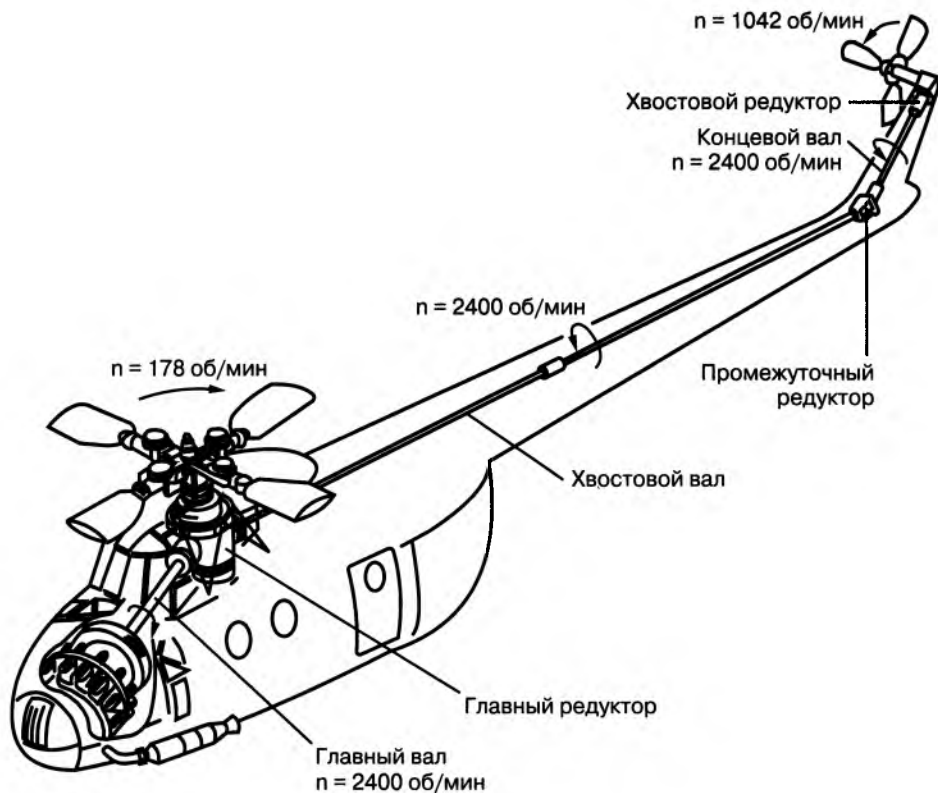


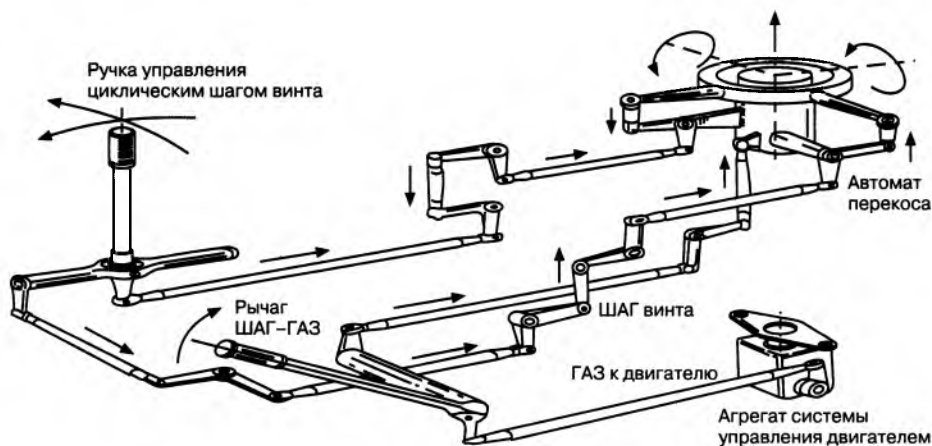
Рис. 6.3. Силовая установка и трансмиссия вертолета МИ-4

## || Система управления вертолетом

Система управления вертолетом (рис. 6.4) предназначена для создания сил и моментов, необходимых для движения вертолета по заданной траектории. Состоит из элементов ручного и ножного управления и включает:

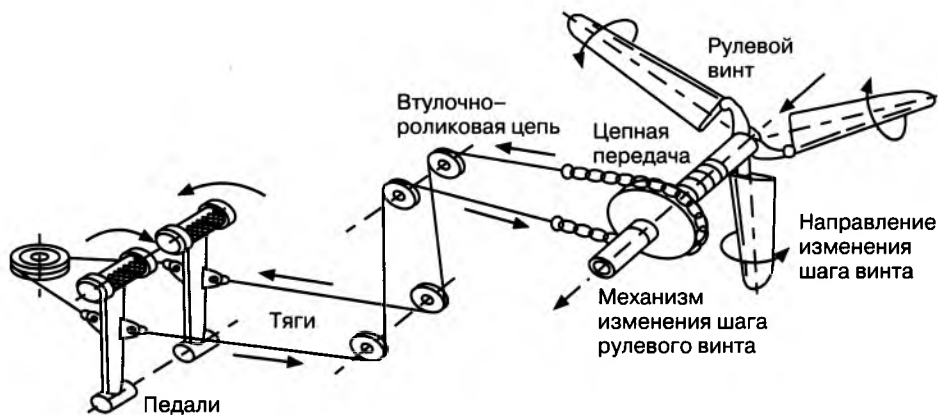
- ♦ командные рычаги (ручка управления, рычаг «ШАГ-ГАЗ» и педали);
- ♦ системы проводки к несущему и рулевому винтам.

Управление главным винтом передается на автомат перекоса, который служит для изменения угла установки лопастей несущего винта в нужное положение.

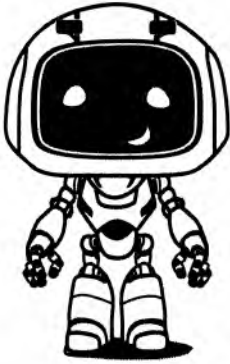


**Рис. 6.4.** Система управления вертолетом

Управление рулевым винтом (рис. 6.5) производится от педалей. Подробно вопрос управления вертолетом будет рассмотрен через несколько страниц.



**Рис. 6.5.** Система управления шагом рулевого винта.



# ОСОБЕННОСТИ ВОЗДУШНЫХ ВИНТОВ ВЕРТОЛЕТА

## Винты: несущий и рулевой

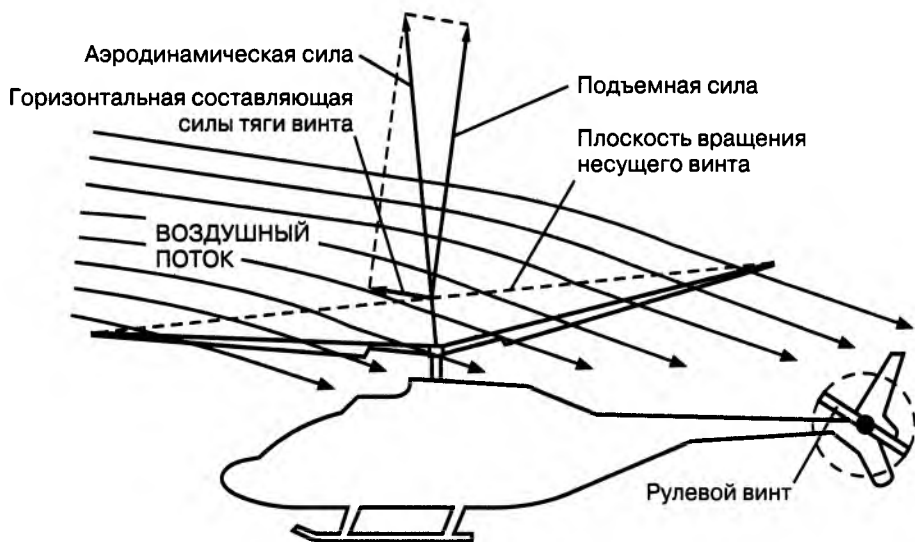
Лопасты несущего винта вертолета схожи по своему профилю с крылом самолета. Каждая лопасть такого винта представляет собой, по сути дела, крыло, имеющее аэродинамический профиль, и движущееся при вращении винта в воздушном потоке (рис. 7.1). При вращении в горизонтальной плоскости несущий винт создает тягу, направленную вверх, играет роль подъемной силы.

Возникает аэродинамическая сила, приложенная к каждой лопасти и, как их сумма, общая сила, приложенная к винту, и через него ко всему вертолету. Сила эта всегда перпендикулярна плоскости вращения винта.

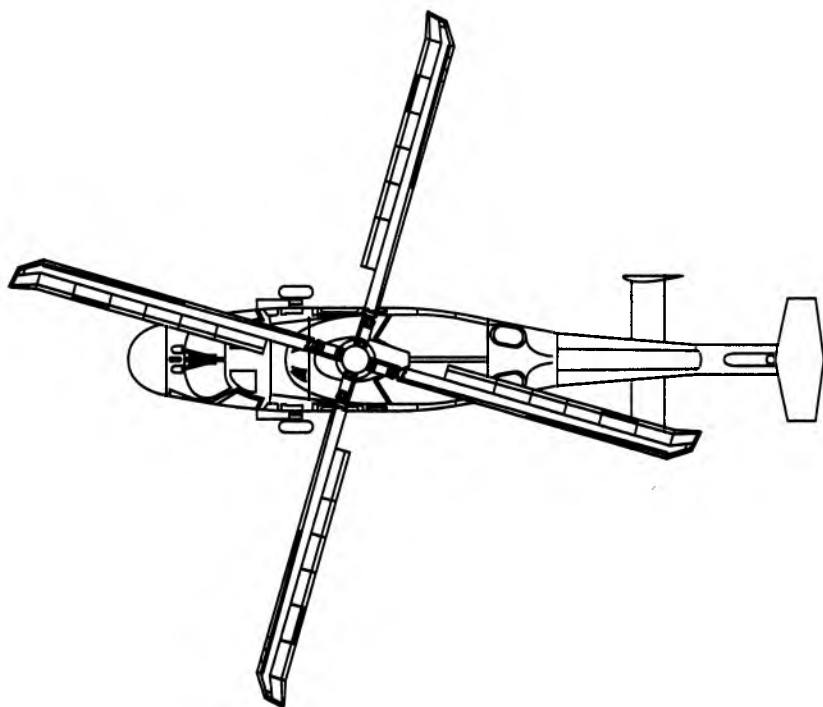
Несущий винт (рис. 7.2) состоит из нескольких лопастей (обычно от двух до восьми) и втулки, которая передает крутящий момент с вала главного редуктора к лопастям.

Широко распространенным способом является крепление лопасти несущего винта к втулке при помощи трех шарниров (рис. 7.3):

- ♦ осевого, за счет которого с помощью рычага изменения шага лопасти можно изменять угол ее установки
- ♦ вертикального;
- ♦ горизонтального.



*Рис. 7.1. Силы, действующие на вертолет в полете*



*Рис. 7.2. Внешний вид несущего винта вертолета КА-60*

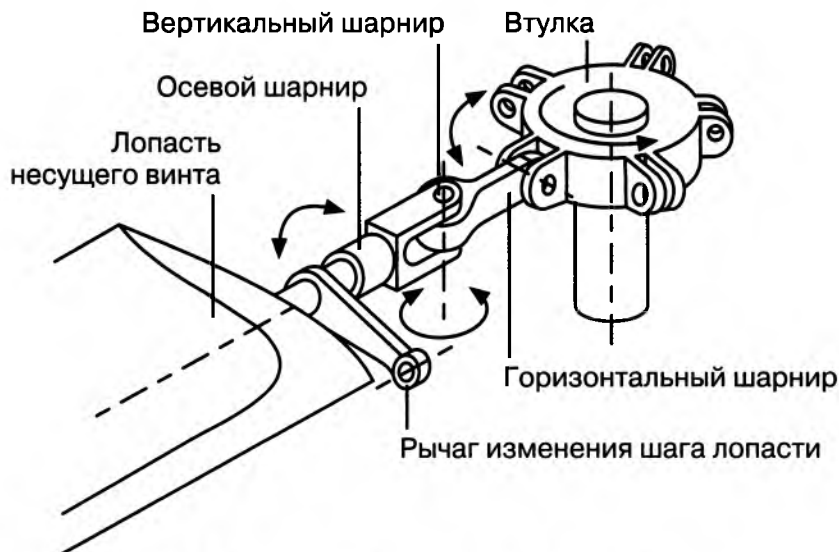


Рис. 7.3. Крепление лопасти воздушного винта



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Тяга несущего винта в значительной степени зависит от его диаметра и числа оборотов. Так, при увеличении диаметра винта вдвое тяга его увеличивается приблизительно в 16 раз; при увеличении числа оборотов вдвое – примерно в 4 раза.*

Однако целесообразность увеличения диаметра несущего винта противоречит быстрому росту его веса. Конструкторы пришли к выводу о существовании оптимального значения диаметра, выше которого выигрыш в увеличении подъемной силы теряется за счет роста веса самого винта.

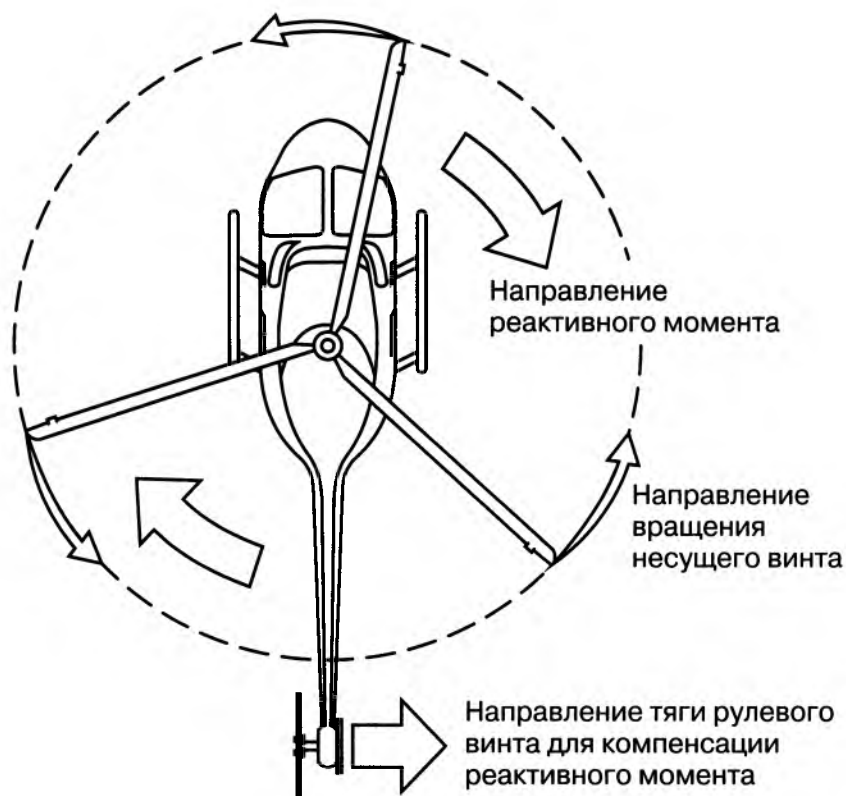
Результаты теоретических исследований, а также опыт практической постройки вертолетов позволяют утверждать, что оптимальными являются несущие винты диаметром 6–8 м.

## Реактивный момент и борьба с ним

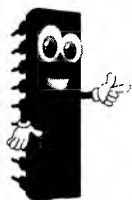
Еще Ньютон открыл закон, согласно которому:

«Силы воздействия двух тел друг на друга между собою равны и направлены в противоположные стороны. Иными словами действию всегда есть равное и противодействие».

Следовательно, если двигатель вращает воздушный винт, то и винт тоже старается вращать двигатель, установленный на вертолете, причем, в обратную сторону. Специалисты говорят об этом так: «Со стороны винта на двигатель действует реактивный момент» (рис. 7.4).



**Рис. 7.4.** Возникновение и компенсация реактивного момента



## ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

**Реактивный момент** – явление, при котором корпус проявляет тенденцию к вращению в сторону, обратную вращению несущего винта. Реактивный момент тем больше, чем больше диаметр винта и его шаг.

Для компенсации реактивного момента, т. е. исключения вращения корпуса, применяют:

- ♦ либо рулевой винт, установленный на хвосте вертолета;
- ♦ либо второй несущий винт, вращающийся в противоположную сторону относительно первого несущего винта с одинаковой скоростью. Эти винты могут быть установлены на одной оси (соосно) или разнесены, например, на специальные крылья вертолета. Об этом ниже.

**Новичок:** Во втором случае рулевой винт не нужен?

Рассмотрим несколько способов компенсации реактивного момента и, соответственно, различных схем построения вертолетов.

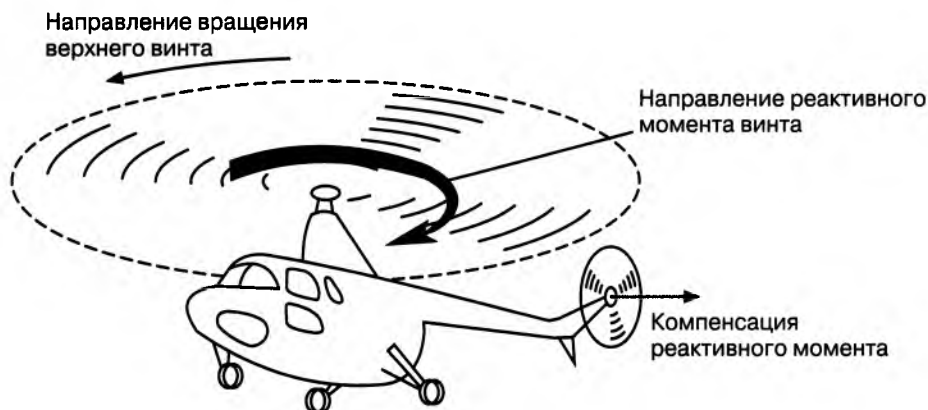
**Схема №1. Вертолет с несущим и рулевым винтами (рис. 7.5).** Это наиболее распространенная, она схема включает:

- ♦ большой несущий винт, устанавливаемый над фюзеляжем и обеспечивающий создание подъемной силы, маневрирование и горизонтальное перемещение;
- ♦ небольшой рулевой винт, который вращается в вертикальной плоскости, как винт самолета, и используется для управления.



## ПРИМЕЧАНИЕ.

Рулевой винт создает силу тяги, момент которой противоположен крутящему моменту, порождённому несущим винтом, и препятствует вращению фюзеляжа.



**Реактивный момент, действующий на фюзеляж, компенсируется тягой рулевого винта**

*Рис. 7.5. Вертолет с несущим и рулевым винтами*

**Рулевой винт** состоит из лопастей и втулки, закрепленной на валу хвостового редуктора. Рулевой винт бывает тянущий и толкающий. Служит как для уравнивания реактивного момента, возникающего при вращении несущего винта, как было указано выше, так и для управления направлением движения вертолета в полете:

- ♦ сила тяги рулевого винта создает момент относительно центра тяжести вертолета, уравнивающий реактивный момент несущего винта;
- ♦ для разворота вертолета достаточно изменить величину тяги рулевого винта.

### **Схема №2. Двухвинтовая (продольная или поперечная).**

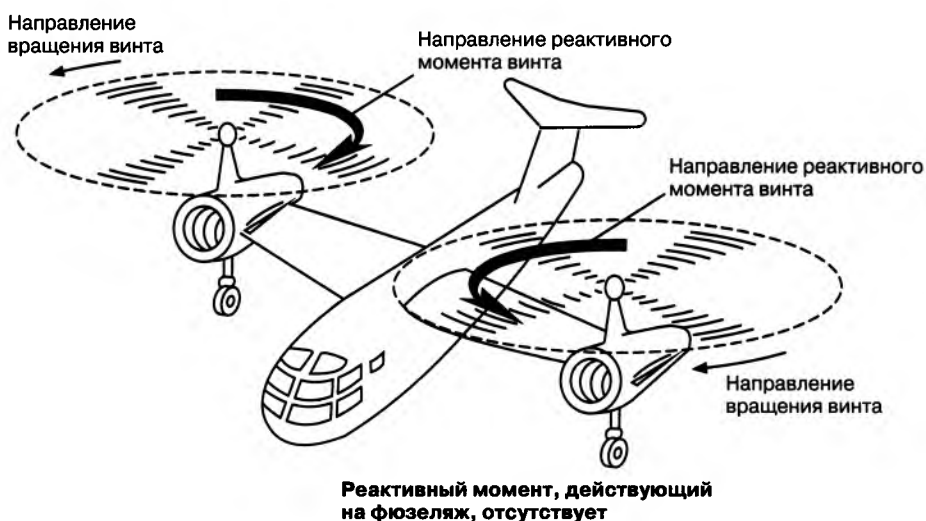
Такой вертолет имеет два отдельно стоящих несущих винта, вращающихся в горизонтальной плоскости. Винты устанавливаются на противоположных концах летательного аппарата и вращаются в противоположных направлениях, взаимно компенсируя моменты. Если один винт располагается в передней части фюзеляжа, а второй — в хвостовой; такая схема называется **продольной** (рис. 7.6).

Если винты расположены на концах поперечных выносных ферм — это **поперечная** схема (рис. 7.7).





*Рис. 7.6. Вертолет с двухвинтовой продольной схемой размещения винтов*

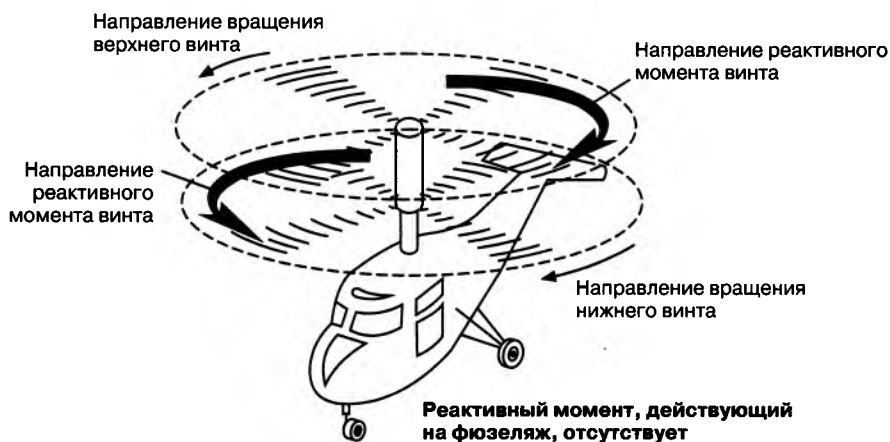


*Рис. 7.7. Вертолет с двухвинтовой поперечной схемой размещения винтов*

### ПРИМЕЧАНИЕ.

*По схеме, приведенной на рис. 7.7, выполняются летательные аппараты с поворотными воздушными винтами.*





**Рис. 7.8.** Вертолет с соосной схемой размещения винтов

**Схема №3. Соосная.** Винты устанавливаются друг над другом на одной оси и вращающимися в противоположных направлениях (рис. 7.8).

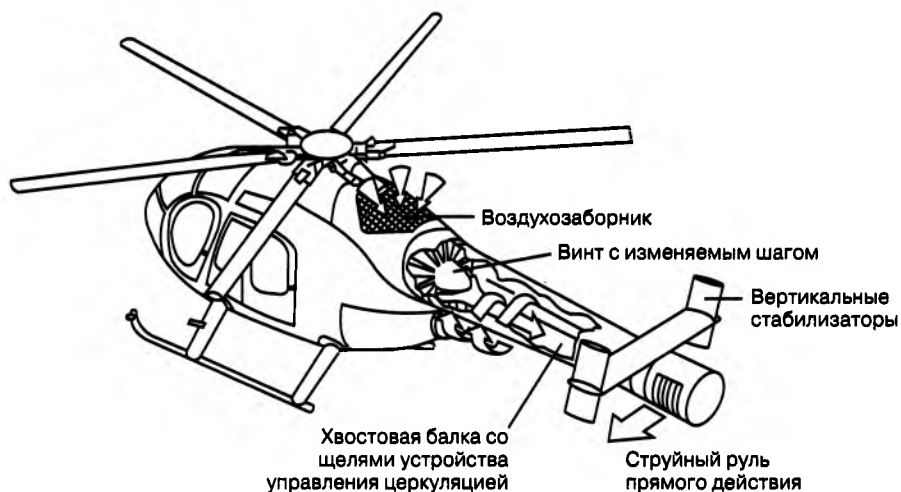
Схема с несущим и рулевым винтами (рис. 7.5) оказалась наиболее подходящей во многих отношениях. Но разработчики решили убрать хвостовой винт. Ведь на его работу расходуется часть мощности двигателя, а лопасти могут представлять опасность.

**Новичок:** Можно ли чем-то заменить рулевой винт?



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Можно заменить! Разработан вертолет, на котором крутящий момент гасится с помощью воздушной струи, выдуваемой из хвостовой части вертолета. Регулируя величину и направление реактивной силы струи, летчик создает компенсирующий реактивный момент и может поворачивать вертолет по курсу.*



**Рис. 7.9.** Принцип действия системы NOTAR

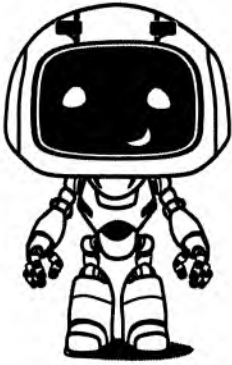
Создали, например, систему NOTAR. Идея системы NOTAR (рис. 7.9) состоит в использовании для создания боковой силы, обеспечивающей компенсацию реактивного момента несущего винта и управление курсом:

- ♦ суперциркуляции на хвостовой балке;
- ♦ тяги реактивной струи, истекающей из бокового сопла поворотного струйного руля, расположенного в конце хвостовой балки.

Для получения эффекта суперциркуляции в боковой поверхности хвостовой балки выполняется продольная щель, через которую по касательной к поверхности выдувается сжатый воздух.

Струя от несущего винта, обтекающая хвостовую балку сверху на режиме висения, в зоне действия истекающей через щель струи прижимается к поверхности хвостовой балки и обтекает эту ее сторону без срыва.

С другой стороны балки, где щели нет, обтекание происходит как обычно, т. е. со срывом. В результате возникает боковая аэродинамическая сила, компенсирующая реактивный момент от несущего винта.



# ПРИНЦИП РАБОТЫ ВЕРТОЛЕТА

## Создание подъемной силы || лопастью несущего винта ||

Полет вертолета объясняется теми же законами аэродинамики, что и полеты любых других летательных аппаратов тяжелее воздуха: обтеканием воздухом лопастей винта или крыльев, создающих подъемную силу (рис. 8.1).



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*В случае вертолета воздух обтекает лопасть винта, вращающегося над фюзеляжем. Так как подъемная сила возникает при вращении винта, сам вертолет может перемещаться туда, куда его направят. А в случае самолета воздух обтекает крыло, движущееся вперед. В этом отличие.*

Следует отметить, что при одинаковой мощности двигателя тяга несущего винта вертолета всегда больше! Ведь диаметр несущего винта вертолета во много раз больше диаметра воздушного винта самолета.



**Рис. 8.1.** Создание подъемной силы лопастью несущего винта

**Новичок:** Получается, что каждая из лопастей несущего винта, как небольшое крыло, создает подъемную силу за счет потока воздуха?

Да! При этом действующая на лопасть подъемная сила зависит от двух факторов:

- ♦ скорости движения лопасти относительно воздуха (в большинстве конструкций обороты несущего винта поддерживаются постоянными);
- ♦ установочного угла, то есть угла между хордой лопасти и плоскостью вращения винта (изменяется).

Таким образом, единственной переменной величиной, влияющий на подъемную силу винта, является установочный угол лопастей:

- ♦ при его одновременном увеличении для всех лопастей суммарно развиваемая ими подъемная сила увеличивается;
- ♦ при его одновременном уменьшении — суммарная подъемная сила, соответственно, уменьшается.



### ВЫВОД.

*Чем больше установочный угол, тем большую подъемную силу обеспечивает лопасть несущего винта. Это обеспечивает управление движением по вертикали: когда тяга несущего винта превышает действующую на вертолет силу тяжести, вертолет взлетает.*

## Этапы взлета вертолета и горизонтальный полет

Допустим, вертолет поднялся на заданную высоту и завис. Зависание происходит в случае, если сила тяги главного воздушного винта станет равной силе тяжести вертолета. Чтобы вертолет начал двигаться горизонтально, он должен наклониться в нужном направлении. Тогда баланс действующих на вертолет сил нарушается: появляется горизонтальная составляющая.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Вертикальная составляющая аэродинамической силы будет удерживать вертолет в воздухе, а горизонтальная – вызывать поступательное перемещение вертолета в соответствующем направлении.*

Но как заставить вертолет двигаться в нужном направлении? Эту задачу смогли решить уже в начале прошлого века.

Наклон вертолета вперед (назад) и вбок достигается созданием разницы подъемных сил, развиваемых лопастями несущего винта при его вращении, в зависимости от того, где находится лопасть в каждый момент времени. Угол установки лопастей синусоидально изменяться при вращении. Управляет этим стремительным процессом автомат перекоса (рис. 8.2).

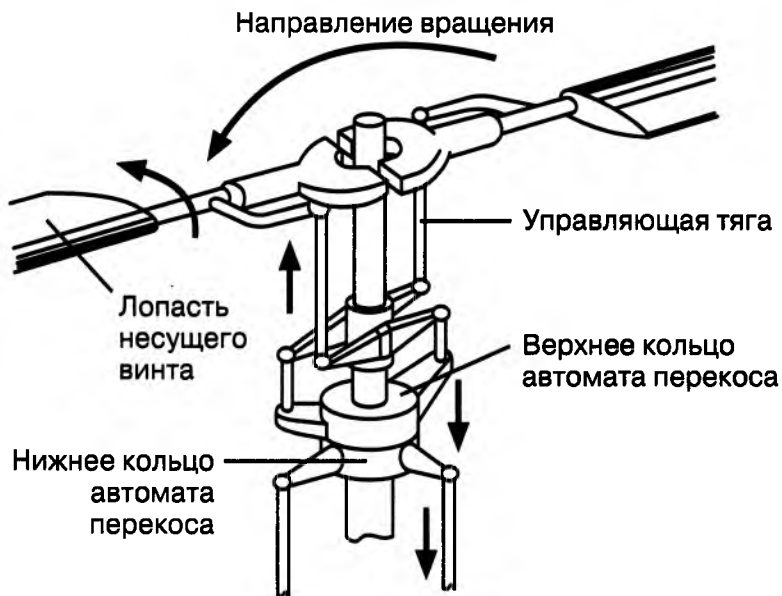
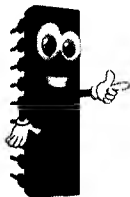


Рис. 8.2. Принцип действия автомата перекоса



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

**Автомат перекоса** – механизм в системе управления несущим винтом вертолета, позволяющий регулировать тягу (подъемную силу) винта и изменять ее направление, обеспечивая управляемость вертолета.

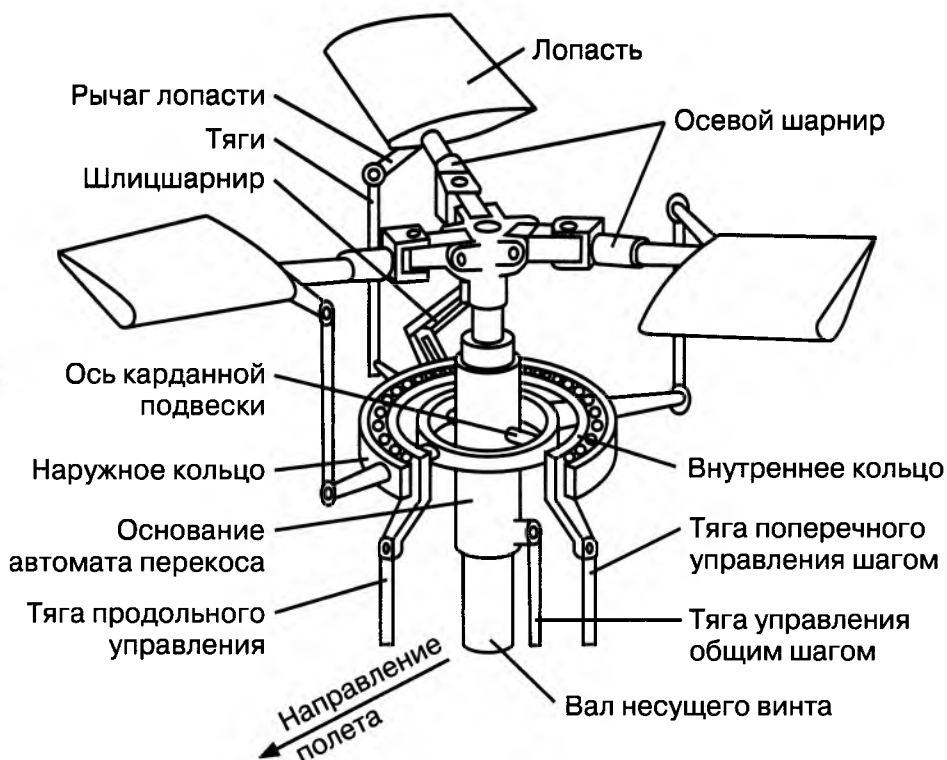
В зависимости от конструкции (при одинаковом принципе действия) различают такие автоматы перекоса:

- ♦ кольцевого типа (был создан первым и наиболее распространен сегодня);
- ♦ рычажные;
- ♦ кривошипные;
- ♦ типа «паук».

## Автомат перекоса кольцевого типа

Автомат перекоса кольцевого типа (рис. 8.3) был изобретен в 1911 году российским ученым-аэродинамиком Б. Н. Юрьевым. Подобная конструкция и по сей день остался обязательным узлом в конструкции практически любого вертолета. Рассмотрим, как работал такой «юрьевский» автомат перекоса кольцевого типа. Под втулкой несущего винта были установлены два кольца, объединенные подшипником качения в «тарелку».

Наружное (вращающееся) кольцо «тарелки» соединялось с лопастями несущего винта посредством рычагов и тяг, которые при изменении положения «тарелки» поворачивали лопасти вокруг их осей.



*Рис. 8.3. Автомат перекоса кольцевого типа, изобретенный Б. Н. Юрьевым*



Внутреннее (невращающееся) кольцо посредством кардана было закреплено на ползуне, который можно было перемещать вдоль вала несущего винта.

Таким образом, поднимая (опуская) ползун, удалось одновременно одинаково изменять углы установки всех лопастей винта, то есть регулировать подъемную силу и тягу несущего винта, обеспечивая управление вертолетом по высоте — набирать высоту, снижаться, «висеть» в воздухе.

**Новичок:** *Получается, что лопасти меняют углы установки с огромной скоростью!*

При наклоне относительно вала в ТЕЧЕНИЕ ОДНОГО ОБОРОТА винта углы установки лопастей изменялись циклически, по гармоническому закону, увеличиваясь на одной части диска вращающегося несущего винта и уменьшаясь — на противоположной. Это приводило к изменению направления вектора подъемной силы винта. Таким образом, меняя наклон «тарелки» в автомате перекоса, изобретатель добился управления движением вертолета и возможности совершать полет вперед-назад-вбок.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Справедливо будет отметить, что в вертолетостроении применяются две конструктивных схемы автомата перекоса, созданные практически одновременно Юрьевым и Сикорским. Несмотря на кажущееся отличие по внешнему виду и кинематической схеме, принцип действия обеих конструктивных схем одинаков.*

*Циклический шаг каждой лопасти зависит от наклона тарелки автомата перекоса, а общий шаг винта регулируется перемещением тарелки автомата перекоса вдоль оси вращения. Автомат перекоса Сикорского легко отличить от автомата перекоса Юрьева по внешнему виду: кон-*

*струкция Сикорского содержит небольшие дополнительные серволопасти, а у «юрьевского» автомата перекоса серволопастей нет.*

У современного вертолета автомат перекоса расположен на оси винта и состоит, в общем случае, также из двух колец, подвешенных на карданном шарнире к неподвижной опоре. Кольца соединены с тягами управления. Под действием тяг внутреннее кольцо автомата наклоняется, заставляя угол установки лопастей синусоидально изменяться при вращении.

Представим окружность, описываемую ротором, в виде сплошного диска и разделим общую подъемную силу надвое, приложив каждую к одной из половинок диска. При включенном автомате перекоса угол атаки лопастей в одной половине диска окажется больше, чем в другой, а, следовательно, там возрастет подъемная сила. Она и накренит вертолет. Теперь у несущего винта появится и горизонтальная составляющая, которая вызовет движение в нужном направлении.



### ПРИМЕР.

*Для наклона вертолета вперед лопасти несущего винта увеличивают свой установочный угол (силу тяги), проходя над задней частью вертолета, и уменьшают — над передней. Разность этих подъемных сил создает момент, заставляющий вертолет наклоняться вперед.*

Когда вертолет начинает двигаться горизонтально, подъемная сила несущего винта увеличивается за счет набегающего на лопасти потока воздуха. Поэтому, чем быстрее движется вертолет, тем лучше его летные качества, проще управление.

## || Рычаг «ШАГ-ГАЗ», ручка управления и корректор

Автомат перекоса связан с двумя командными органами, которыми пилот управляет полетом вертолета:

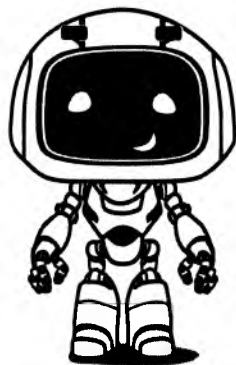
- ♦ рычагом «ШАГ-ГАЗ» (при отклонении рычага «ШАГ-ГАЗ» пилот увеличивает или уменьшает угол установки всех лопастей, и одновременно, изменяется подача топлива в двигатель («ГАЗ»);
- ♦ ручкой управления (при смещении пилотом ручки управления автомат перекоса тоже изменяет угол установки лопастей, но делает это иначе, циклически, приводя к наклону вертолета).



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Обычно обороты двигателя меняются на первой трети перемещения рычага «ШАГ-ГАЗ», далее уже меняется только общий шаг винта. Отдельно от шага винта мощность двигателя может меняться только в небольших пределах для необходимой корректировки.*

Для этого на рычаге «ШАГ-ГАЗ» существует специальный **КОРРЕКТОР** (обычно что-то типа поворотного кольца).



# УЧИМСЯ ПИЛОТИРОВАТЬ ВЕРТОЛЕТ

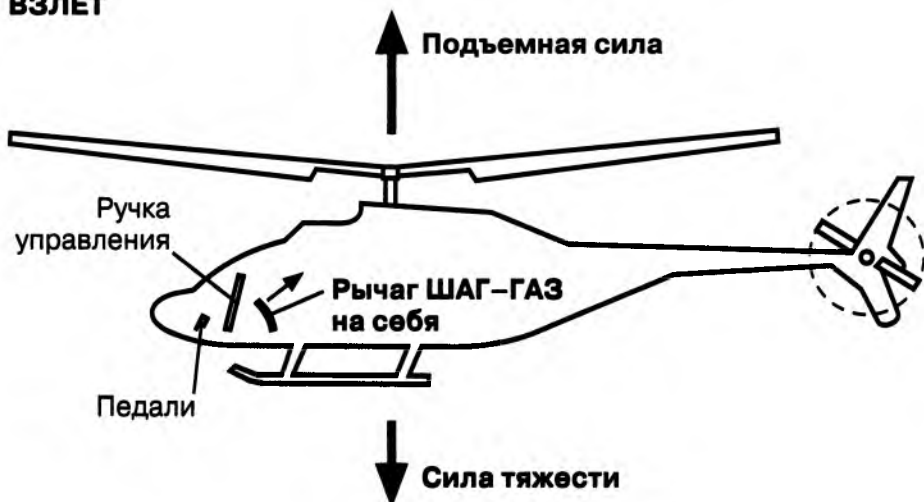
## Основные режимы полета

Основными режимами полета вертолета являются:

- ♦ взлет;
- ♦ висение;
- ♦ разгон и набор высоты;
- ♦ маневрирование;
- ♦ снижение;
- ♦ посадка.

## Взлет

Вертолет, как правило, взлетает вертикально с кратковременным зависанием на высоте 1,5—2 метров (контрольное висение). После этого производится разгон с набором высоты. Для взлета пилот тянет на себя рычаг «ШАГ-ГАЗ», и вертолет идет вертикально вверх (рис. 9.1).

**ВЗЛЕТ**

*Рис. 9.1. Для взлета пилот тянет на себя рычаг «ШАГ-ГАЗ», угол атаки всех лопастей и мощность двигателя увеличиваются, пока подъемная сила не превзойдет силу тяжести, и вертолет пойдет вертикально вверх*

## || Движение вперед

Если пилот двинет ручку управления от себя, начнет работать автомат перекаса. Лопасті несущего винта увеличат установочный угол (силу тяги), проходя над задней частью вертолета, и уменьшают — над передней. Разность этих подъемных сил создает момент, заставляющий вертолет наклоняться вперед. Появится горизонтальная составляющая тяги. Вертолет, опустив нос, полетит вперед (рис. 9.2).

## || Режим висения

Режим висения — наиболее характерный для вертолета режим полета, когда вертолет не перемещается относительно земли. Висение на больших высотах выполняется только относительно воздуха, так как пилот не может удерживать вертолет

**ДВИЖЕНИЕ ВПЕРЕД**

*Рис. 9.2. Для движения вперед пилот двигает ручку управления от себя*

относительно земли из-за большой высоты. Скорость вертолета относительно воздуха должна быть не менее той, которую может устойчиво показывать шторм-указатель скорости.

**ЧТО ЕСТЬ ЧТО.**

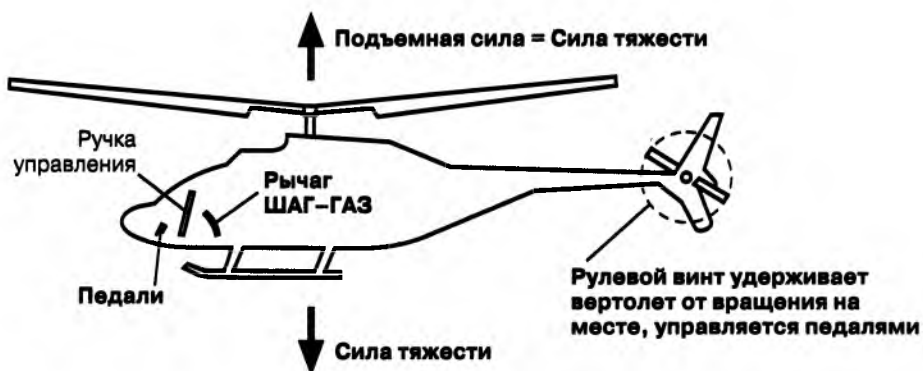
*Режим висения – это такой полет, при котором вертолет висит неподвижно над данной точкой земной поверхности.*

При этом отсутствуют какое-либо перемещение вертолета относительно воздушной среды, включая вращение вертолета. Однако этот полет может быть назван висением только при полном штиле.

При висении в штиль (рис. 9.3) на одновинтовой вертолет действует:

- ♦ сила тяжести;
- ♦ подъемная сила вертолета, компенсирующая силу тяжести вертолета;
- ♦ реактивный момент от несущего винта;
- ♦ сила тяги рулевого винта, компенсирующая реактивный момент.

## ВИСЕНИЕ В ШТИЛЬ



*Рис. 9.3. Для удержания вертолета на месте пилот удерживает такой угол наклона лопастей, чтобы подъемная сила и сила тяжести были равны*

При наличии ветра сохранение неподвижного положения вертолета относительно земли может быть выполнено только путем полета со скоростью, равной по величине, но противоположной по направлению скорости ветра.

При висении на вращение рулевого винта затрачивается в среднем 10% мощности двигателя. В полете затрата мощности сокращается до 5%, так как обдув винта в плоскости вращения приводит:

- ♦ к увеличению его тяги при затрате той же мощности;
- ♦ к уменьшению потребной мощности для создания той же самой тяги.



## ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*Статическим потолком вертолета называется некоторая предельная высота висения, выше которой, несмотря на применение полного газа и большого общего шага несущего винта, подъемная сила уже не может уравновесить веса вертолета.*

Статический потолок современных вертолетов равен 2—4 км. Но рекордом явилась высота подъема вертолета более 12 км!

Рассмотрим три случая обеспечения режима висения вертолета.

**Случай 1.** В безветренную погоду для выполнения висения необходимо по достижении заданной высоты висения плавно уменьшить общий шаг до уравнивания силы тяжести вертолета и тяги несущего винта.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Висение вертолета, как правило, выполняется против ветра.*

**Случай 2.** При ветре сзади для устранения перемещения вертолета вперед необходимо отклонять ручку управления на себя. Это вызывает увеличение угла тангажа, опускание хвостовой балки. В таком балансировочном положении возрастают продольная аэродинамическая сила, смещающая вертолет по ветру. Это, в свою очередь, требует еще большего отклонения ручки управления на себя для удержания вертолета на месте.



#### ВНИМАНИЕ.

*При скорости ветра сзади 7–10 м/с запас управления может оказаться исчерпанным. Значительное опускание хвостовой балки вызывает также опасность касания хвостом земли.*

**Случай 3.** При ветре слева необходимо уменьшить углы атаки лопастей и тягу рулевого винта. При этом возникнет поперечная аэродинамическая сила, смещающая вертолет по ветру.

Для устранения разворота влево и перемещения вертолета вправо необходимо:

- ♦ подать вперед правую педаль;
- ♦ отклонить ручку управления влево.



Это вызовет некоторое уменьшение тяги несущего винта, уравновешивающей силу тяжести вертолета, и мощности на его валу.

Для обеспечения балансировки вертолета по высоте следует отклонить вверх рычаг «ШАГ-ГАЗ». Это сопровождается увеличением реактивного момента несущего винта, что потребует еще большей подачи вперед правой педали.



### **ВНИМАНИЕ.**

*При скорости ветра слева, превышающей 10 м/с, запас путевого управления по правой педали может оказаться исчерпанным если:*

- ◆ *полетная масса увеличена;*
- ◆ *используется взлетный режим работы двигателей;*
- ◆ *понижена частота вращения несущего винта.*

Для обеспечения должных запасов управления, предотвращения самопроизвольного перемещения, снижения и вращения вертолета, отрыв его от земли, вертикальный набор высоты, висение, вертикальное снижение и приземление рекомендуется выполнять при скорости ветра:

- ◆ сзади — до 5—7 м/с;
- ◆ сбоку — до 7—10 м/с.

При висении вблизи земли под несущим винтом вертолета создается так называемая «воздушная подушка» Физическая сущность ее заключается в том, что струи воздуха, отбрасываемые несущим винтом, ударяясь о землю, резко меняют свое направление. При этом возрастает плотность воздуха под несущим винтом. В результате тяга несущего винта при прочих равных условиях увеличивается на 15—20%.



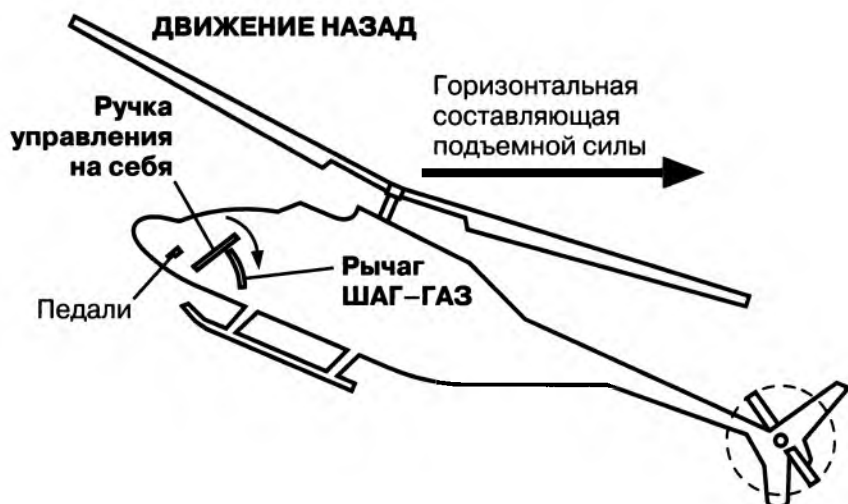
### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Влияние «воздушной подушки» распространяется до высоты, приблизительно равной полутора радиусам несущего винта, причем по мере увеличения высоты висения прирост тяги несущего винта уменьшается.*

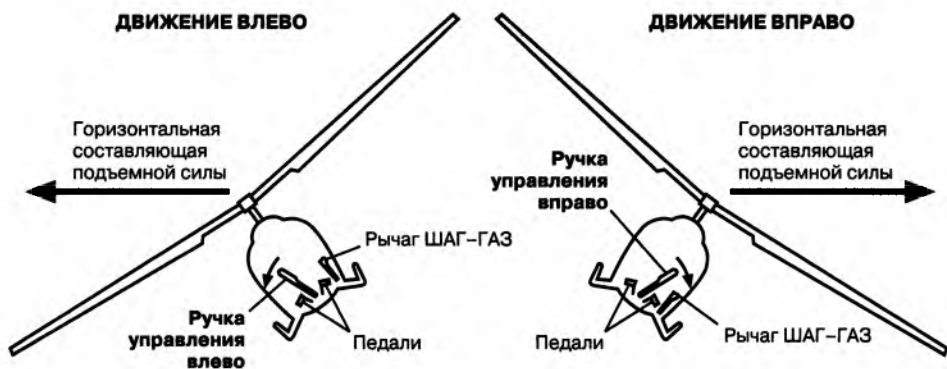
Наличие «воздушной подушки» позволяет производить висение с использованием меньшей мощности двигателя, на меньших оборотах несущего винта. Это более надежно не только как с точки зрения работы вертолета, так и более комфортно для летчика, так как уменьшаются вибрации вертолета.

## Движение вертолета назад и боком влево-вправо

А теперь рассмотрим случай, когда вертолету необходимо лететь назад (рис. 9.4).

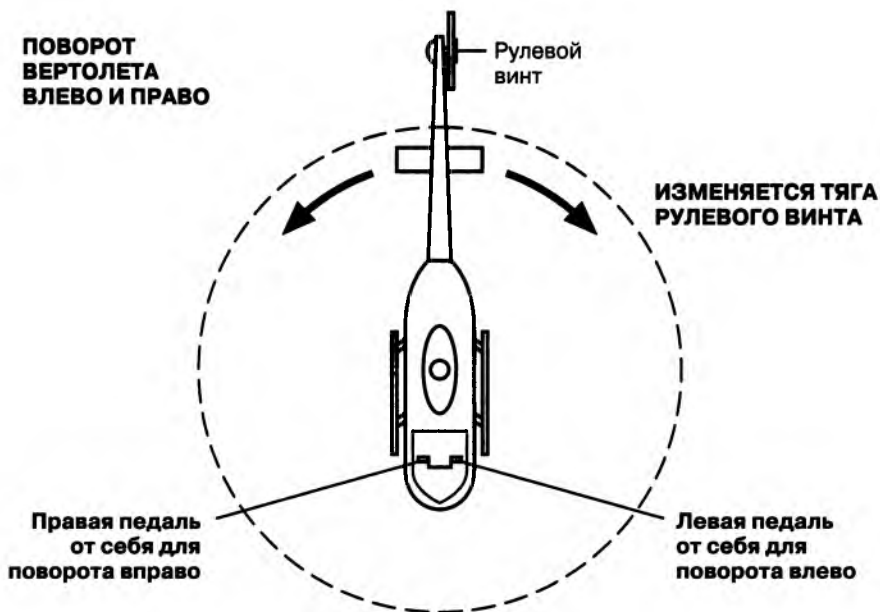


**Рис. 9.4.** Для движения назад в полете пилот тянет на себя ручку управления, вертолет задирает нос и движется назад.



*Рис. 9.5. Движение вертолета влево и вправо обеспечивается смещением ручки управления в соответствующую сторону*

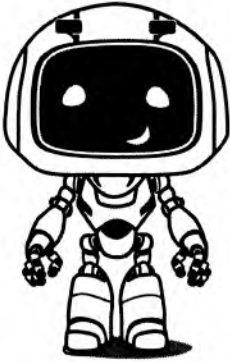
Если пилот вернет ручку управления в нейтральное положение, а затем наклонит ее влево, вертолет, накренившись, пойдет боком влево. При наклоне ручки управления вправо вертолет, накренившись, пойдет боком вправо (рис. 9.5).



*Рис. 9.6. Повороты вертолета влево и вправо осуществляются изменением тяги рулевого винта, которая управляется педалями*

## Управление силой тяги || рулевого винта ||

А углом атаки РУЛЕВОГО винта (изменением его силы тяги) пилот управляет при помощи педалей. Например, для поворота вправо пилот нажимает правую педаль (рис. 9.6). При этом изменяется угол установки лопастей рулевого винта, тяга изменяется, и вертолет поворачивает вправо. Аналогичным образом происходит поворот влево.



# СНИЖЕНИЕ ВЕРТОЛЕТА ПРИ ОТКАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ

## || О пользе авторотации

Несущий винт вертолета обладает исключительно важным свойством — способностью создавать подъемную силу в режиме самовращения (авторотации) в случае остановки двигателя.

То есть, управляемый полет вертолета возможен даже при остановке двигателя. Воздушный поток, возникающий при движении вертолета вперед или при снижении, поддерживает вращение винта. Это явление называется авторотацией.

При относительно большой высоте полета у летчика хватит времени выбрать место для аварийной посадки, подлететь к нему и произвести мягкую посадку. Использование этого явления входит в программу обучения начинающих пилотов.



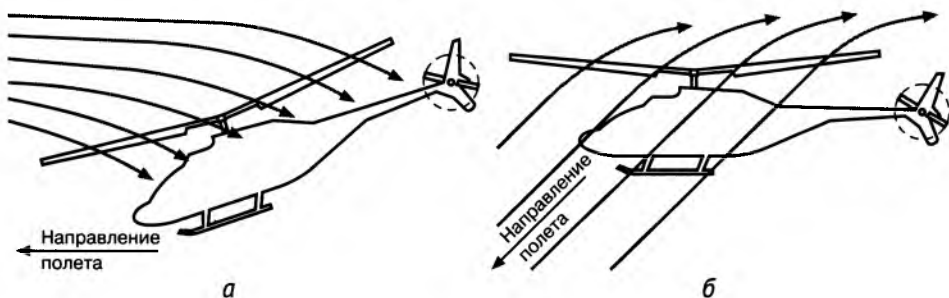
### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Авторотация позволяет вертолету совершать безопасный планирующий или парашютирующий (вертикальный) спуск и посадку.*

## Автожир и рекорды Жана Буле

При остановке мотора вертолет становится автожиром. В этом случае ротор вращается без подвода мощности в результате действия аэродинамических сил. Эти силы обеспечивают необходимую тягу несущего винта и поддерживают его вращение.

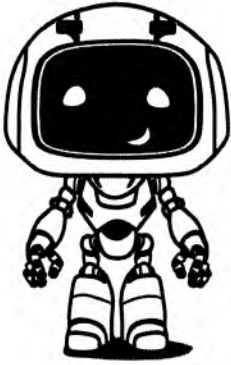
Но это превращение зависит от многих факторов. Основной из них — направление обдувки ротора воздушным потоком. При полете с работающим двигателем воздушный поток набегает на ротор вертолета сверху, в режиме авторотации — снизу. Для обеспечения авторотации необходима определенная скорость потока (прямого или косого), т. е. вертолет должен перемещаться относительно потока.



**Рис. 10.1.** Обтекание несущего винта воздушным потоком:  
а — нормальный полет с работающим двигателем; б — авторотация

Французский пилот Жан Буле в 1972 году установил за один полет сразу два рекорда, которые не побиты до настоящего времени. Летчик рассчитывал достичь рекордной высоты на своем Aérospatiale SA.315B Lama. Это ему удалось: машина поднялась на **фантастическую высоту — 12 442 метра** над уровнем моря.

А вот второй рекорд получился спонтанным. У Жана Буле не оставалось выбора, так как на огромной высоте из-за перегрузок вышел из строя двигатель. Пилот перешел в режим авторотации и посадил машину. Летчик и его машина даже не получили повреждений.



# БЕСПИЛОТНИКИ: КАКИЕ ЖЕ ОНИ РАЗНЫЕ...

## || Здравствуй, эра беспилотников

Сейчас наступила новая эра, эпоха беспилотников. Изобретатели XXI века стараются, чтобы без управления человеком ездили автомобили, летали самолеты и вертолеты, погружались и всплывали подводные лодки.

В ряде случаев это оправдано. Чтобы не рисковать жизнью пилотов, развиваются ударные беспилотники, несущие на борту грозное оружие и способные выполнять сложные задачи. Широко используются разведывательные военные беспилотники, профессиональные беспилотники для видеосъемки и многие другие.

Их используют не только в военном деле, но и в МЧС, и в геодезии, и сельском хозяйстве, и в лесничестве.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Стоит отметить, что профессиональные модели для этих отраслей и ведомств отличаются от беспилотников-игрушек тем, что они, как правило, летают на бензине.*

Однако даже такие серьезные беспилотники можно купить на сайте Алиэкспресс, прямиком из Китая. Причем весьма недорого. Здесь же можно купить и мини-версии беспилотников, и запчасти к ним: крыло, двигатель и многое другое.

## Насколько большим должен быть беспилотник, чтобы его назвали малым? ||

В этой книге о больших профессиональных беспилотниках говорить не будем. Нас, как первый шаг, интересуют так называемые «малые летающие беспилотники».

*Новичок: А насколько малым должен быть беспилотник, чтобы попасть в эту категорию?*

От 30 грамм до 30 килограммам. Не так уж и мало — 30 кг! Еще нужно отметить, что это очень «разношерстная» группа.

В России в 2017 году принят федеральный закон о малых квадрокоптерах. В Воздушном Кодексе отменена обязательная регистрация квадрокоптеров весом до 30 кг.

Малые беспилотники (квадрокоптеры, в данном случае) делятся на несколько категорий:

- ♦ **мини квадрокоптер** — помещающийся на ладони весом от 30 грамм, с маленьким радиусом действия. Рассчитан для запуска в помещении, зале, комнате;
- ♦ **маленький квадрокоптер** имеет размер рамы 250 мм. Вес 0,5—0,8 кг. Обладает высокой маневренностью. В иностранном интернете часто зовется Racing Copter (гонимый коптер). Высокие обороты и маленькие пропеллеры позволяют разгонять такой коптер свыше 120 км/ч;
- ♦ **средний квадрокоптер**, размером рамы 300—550 миллиметров, обычно рассчитывается на вес от 1 кг до 2,5 кг, сочетает маневренность и грузоподъемность;
- ♦ **тяжелый квадрокоптер** имеет вес более 2,5 кг. Как правило, делается не маневренным, т. к. она требует суще-



ственной мощности от аккумуляторной батареи. Рама от 800 миллиметров (максимальное расстояние между осями двигателей). Пропеллеры 15 дюймов и больше.

## || Давайте разберемся || в терминологии

К малым беспилотным летательным аппаратам (малым беспилотникам) или БПЛА сначала относились только беспилотные самолеты. Сегодня понятие расширилось, и к ним стали относить все, что летает без пилота:

- ♦ аппараты самолетного типа (самолетные платформы);
- ♦ летающие крылья (схемы самолета, но у которого отсутствует фюзеляж);
- ♦ радиоуправляемые вертолеты (соосная система и рулевой винт);
- ♦ мультикоптеры (платформы с несколькими винтами, расположенными в горизонтальной плоскости).

**Новичок:** *С терминологией по беспилотникам разобраться сложно. То его называют дроном, то коптером, то еще как-то...*

Действительно, часто в современной литературе и на телевидении беспилотный летательный аппарат называется ДРОНОМ, что с английского переводится как «трутень» Или благозвучно можно переводить как «шмель».

Реально, ДРОН — это модный современный медиа-термин. Он теперь относится к любым современным БПЛА, кроме радиоуправляемых авиамodelей (самолетов или вертолетов). Ведь они появились более полувека назад, когда ни ДРОНов, ни БПЛА еще не существовало и которые кардинально от них отличаются.

**ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Но сейчас ДРОН и БПЛА фактически стали синонимами в общеупотребительном смысле.*

ДРОН — это беспилотный (не обязательно летательный) аппарат любого типа. Все БПЛА — это дроны. Но ДРОНЫ, которые не летают, — это уже не БПЛА. Большинство квадрокоптеров сейчас допускается называть и БПЛА, и ДРОНОМ, и радиоуправляемой моделью, пока на них нет пилота. А вот радиоуправляемая модель — это лишь отчасти БПЛА.

Давайте выбирать платформу беспилотника, которая нам больше подойдет.

**ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Познакомимся мы со всеми беспилотниками. А выбирать нужно исходя из того, для чего вам беспилотник нужен. Но об этом позже...*

## **Знакомьтесь, платформа первая: || вертолетная ||**

**Новичок:** *Еще с детства помню пластмассовый вертолет, который устанавливался на ручное основание и запускался за счет резкого вытягивания из основания веревки. В итоге пропеллер раскручивался, и вертолет поднимался ввысь на несколько метров.*

А настоящие вертолетные (однороторные) платформы, работающие на бензине или от электродвигателя, появилась в 1970 годы. Такие вертолеты-беспилотники пролетали уже мно-

гие сотни метров и управляемые с земли по радиоканалу приземлялись в заданной точке.

И с этого времени однороторная схема активно развивалась. В итоге появились сегодня две разновидности схем радиоуправляемых вертолетов:

- ♦ классическая схема, предусматривающая несущий винт и рулевой винт;
- ♦ соосная схема, содержащая пару разнонаправленных несущих винтов на одной оси.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Соосная схема обладает гораздо большей стабильностью по сравнению с классической схемой. Это делает ее идеальной для новичков, особенно для полетов в закрытом помещении.*

Но у этой схемы есть **недостатки**:

- ♦ большинство таких моделей обладают фиксированным шагом, что значительно упрощает модель, но ухудшает управление модели по курсу;
- ♦ невозможность полетов на улице в ветреную погоду.

## || Мультироторная (мультивинтовая) платформа

Для повышения летных качеств самостабилизирующихся микровертолетов и микровертолетов с автопилотом набирает популярность многовинтовая схема (на жаргоне моделистов — «мультикоптер»). Чаще всего это квадрокоптер, т. е. схема с четырьмя винтами, расположенными на концах осесимметричной крестовины.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Помимо квадрокоптеров используются схемы с 3, 6, 8 лучами. На каждом луче может устанавливаться как один, так и два мотора с винтами.*

**Преимущества** мультироторной (мультивинтовой) платформы:

- ♦ простота в подготовке к старту;
- ♦ легкость в управлении;
- ♦ аппарат невозможно сломать неосторожным обращением;
- ♦ достаточно стабильное качество видеосигнала;
- ♦ возможность полета при ветре до 15 м/с.

**Недостатки** мультироторной платформы:

- ♦ короткое время в полете от 5 до 40 минут;
- ♦ необходимость держать аппарат в прямой видимости;
- ♦ невозможность использования при сильном ветре и дожде.

## Самолетная платформа ||

В течение 160 миллионов лет, (с тех пор, как птицы отделились от летающих ящеров) птицы совершенствовали свою технологию полета, основанную на взмахах крыльев. А у беспилотника крылья неподвижные.

**Преимущества** самолетной платформы:

- ♦ высокие летно-технические характеристики;
- ♦ покрытия больших площадей при съемке и наблюдении;
- ♦ большое время в полете (до двух-трех часов);
- ♦ возможность полета при ветре до 30 м/с.

**Недостатки** самолетной платформы:

- ♦ требует навыков от пользователя;
- ♦ неэффективна при использовании на небольших площадях обзора.

## Летающее крыло

Особенной группой можно выделить «летающее крыло». Такая схема содержит:

- ♦ стреловидное крыло переменной толщины;
- ♦ двигатель с винтом;
- ♦ вертикальное оперение.

Толщина крыла в направлении от плоскости симметрии самолета к его концам вначале увеличивается, а затем уменьшается.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Данный тип авиамодели относится к категории планеров и характеризуется большой плоскостью конструкции (на подобии треугольника), что существенно уменьшает удельный вес.*

### Преимущества:

- ♦ большая дальность и время полета;
- ♦ отсутствие фюзеляжа;
- ♦ отсутствие больших плоскостей управления.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Все это снижает удельную массу планера и дает возможность существенно увеличить массу полезной нагрузки.*

### Недостатки:

- ♦ неустойчивость в горизонтальной плоскости (по тангажу);
- ♦ малое плечо поверхностей управления в горизонтальной плоскости (по тангажу);
- ♦ невозможность применения взлетно-посадочной механизации, что удлиняет взлетно-посадочную дистанцию.

## **Беспилотник со складывающимися в полете крыльями**

Крылья обычного самолета имеют жесткую конструкцию. Они прекрасно подходят для использования на открытом пространстве, но не выдерживают столкновений с препятствиями, такими как стены или ветки деревьев. Вертолетные воздушные винты также не защищены от ударов. Вдохновившись природой, ученые создали механическое крыло с гибкостью крыла летучей мыши, стойкого к столкновениям во время полета [16, 21].

Механическое решение технической проблемы предложили ученые из Стэнфордского университета. Исследование было опубликовано в журнале *Bioinspiration and Biomimetics*.

Авторы исследования задались вопросом: как обеспечить безопасность полета беспилотника рядом с деревьями? Сенсорные системы для обхода препятствий не эффективны, когда беспилотник движется на высокой скорости. Тогда они предложили задевать препятствия, которые нельзя обойти. Для этого аппарат пришлось научить складывать свои крылья, а затем расправлять, как это делает, например, летучая мышь.

Исследователи создали миниатюрного робота с размахом крыльев около 40 сантиметров, затем сняли его полет с различной скоростью на видео. В ходе испытаний летающей машине преграждали дорогу металлическим стержнем. При столкновении крыло сгибалось, а после вытягивалось на полную длину.

Шарнирное соединение позволяет крыльям складываться при столкновении с твердым предметом. При отскоке крыло принимает свою обычную расправленную форму. В отличие от моторизированных систем эта методика обеспечивает пассивное складывание крыла и не требует использования каких-либо двигателей, батарей или контроллеров.

## || Беспилотник научился приземляться как птица

Ученые из Бристольского университета (Великобритания) совместно со специалистами компании BMT Defence Services по заказу Министерства обороны Великобритании разработали беспилотный летательный аппарат, который способен выполнять мягкую посадку по-птичьи [26].

Хотя наши небеса заполнили всевозможные мультикоптеры, у беспилотных летательных аппаратов, построенных по классической схеме с крыльями, по-прежнему есть большое преимущество в скорости и дальности полета. Именно поэтому военные беспилотники совершенно не похожи на те, которые вы можете купить в магазине электроники.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Самым большим недостатком «крылатых» летательных аппаратов является то, что они требуют взлетно-посадочной полосы.*

Пока производители беспилотников ищут лучший способ решить эту проблему, британцы вспомнили, что проблема, оказывается, уже решена миллионы лет назад. Птицы! Ведь им не нужны взлетно-посадочные полосы, не так ли?

Они могут приземляться, размахивая крыльями и расправляя перья, чтобы использовать их как воздушный тормоз. Если научить беспилотники такому способу посадки, их можно будет сажать даже на ограниченной территории вроде вертолетной площадки или палубы корабля. Для этого британцы придумали технологию изменения формы крыла.

Его разделили на несколько секций, крайние из которых расположены по краям консолей крыла. Непосредственно перед посадкой крылья способны поворачиваться под углом вверх. В результате аэродинамические плоскости встают перпендикулярно направлению движения и тормозят беспилот-

ник. Специалисты называют такой эффект срывом воздушных потоков и потерей несущей способности крыльев.

Режимом посадки аппарата управляет специальная система под контролем самообучающегося алгоритма. Во время испытаний беспилотник выполнил около пяти тысяч попыток посадки по образу и подобию птиц, причем каждый раз делал это все лучше.

Британцы сделают еще несколько прототипов «птицеподобных» беспилотников, но сроки появления технологии в серийном производстве неизвестны.

## О степени готовности беспилотников к полету

Не все приобретаемые беспилотники сразу готовы к полету. Для их обозначения закрепились сокращения на английском языке. Их всего три.

**RTF-наборы (Ready to fly или готов к полету)** предназначены для новичков, только начинающих увлекаться беспилотными летательными аппаратами.

**BNF-наборы (Bind-N-Fly или привяжи и лети)** подойдут продвинутым пользователям, уже имеющим один или несколько качественных пультов управления. Именно ими они и будут управлять беспилотником.

**ARF-наборы (Almost Ready to Fly или почти готов к полету)** созданы для пользователей, готовых самостоятельно заниматься сборкой беспилотника. На упаковке должны быть нанесены соответствующие сокращения (табл. 11.1).



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*С моделями типа BNF можно использовать передатчик по вашему выбору и связать его с получателем, который поставляется с моделью.*



## Степени готовности беспилотника к полету

Таблица 11.1

Аббре-виатура	Расши-фровка	Перевод	Комментарии
RTF	Ready to fly	готов к полету	Беспилотники категории RTF поставляются со всем необходимым, чтобы отправить их в полет в течение нескольких минут после вскрытия упаковки (если батареи заряжены)
ARF	Almost Ready to Fly	почти готов к полету	Беспилотники категории ARF поставляется не цельным, а часто требует хорошего уровня сборки для того, чтобы сделать его готовым к полету. Этот тип беспилотника подошел бы больше людям, любящим создавать и конструировать.
BNF	Bind-N-Fly	привяжи и лети	Беспилотники категории BNF идут со всем, что вам понадобится, за исключением системы управления. Такой беспилотник необходимо привязать к совместимому пульту дистанционного управления, который у Вас есть.









Некоторые квадрокоптеры нуждаются в самостоятельной установке камеры в корпус беспилотника, в то время как другие уже сразу готовы к съемке. В зависимости от производителя, есть многочисленные функциональные особенности, которые могут быть доработаны и более точно настроены:

- ♦ ISO (светочувствительность фотоматериала);
- ♦ скорость затвора;
- ♦ размер фотографии/видео и многое другое.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Квадрокоптер, оснащенный хорошей камерой, подарит вам безграничную свободу и умопомрачительные фото- и видеокadres.*

**Карданный подвес** — это устройство, которое сохраняет камеру выровненной, путем поворота вокруг него. Карданный подвес стабилизирует за счет гироскопов движение по трем осям. Это помогает поддерживать стабильные кадры на протяжении всего полета, независимо от возможного изменения направления полета и наклона беспилотника.

Вы не должны ожидать особенно высокого качества видеозаписей и других дополнительных функциональных возможностей от беспилотных летательных аппаратов стоимостью ниже 400\$...500\$. Здесь справедлива поговорка «за что платишь, то и получаешь»!

## Время полета ||

В зависимости от типа вашего беспилотника и размера его батареи, это значение может варьироваться от 5 до 30 минут. У большинства новых моделей время полета составляет при-

близительно 5...10 минут, но их батареи легко зарядить (и это намного дешевле).



### СОВЕТ.

*Если позволяют средства, можно купить 3-4 дополнительных батареи, таким образом, они просто меняют их, когда истекает заряд и продолжают полеты.*

Однако когда дело доходит до более мощных и более дорогих квадрокоптеров, их аксессуары также повышаются в цене. В зависимости от того, для каких целей приобретается квадрокоптер, покупается и дополнительная батарея (или несколько), тем самым, увеличивая время полета.



### СОВЕТ.

*Правильно заряжайте аккумуляторы. Помните, что Li-Po аккумуляторы имеют более высокую степень саморазряда именно в полностью заряженном состоянии, поэтому старайтесь заряжать их не за несколько дней до полета, не заблаговременно, а как можно ближе ко времени полета.*

Заряжайте аккумуляторы при нормальной (комнатной) температуре окружающей среды, поскольку и жара, и холод негативно сказываются на максимальной емкости.



### СОВЕТ.

*Всегда проверяйте, заряжен ли аккумулятор полностью!*

Время полета беспилотника ограничено возможностями его батареи: большинство летательных аппаратов будет сигнализировать прежде, чем батарея разрядится — удостоверьтесь, что вы отслеживаете свое время полета.



### СОВЕТ.

*Из-за ограниченного времени полета большинства беспилотных аппаратов, рекомендуется приобрести запасной аккумулятор, вместо постоянной подзарядки вашего аккумулятора.*

Минимальный уровень заряда LiPo должен составлять около 20%, и он не должен опускаться ниже. То есть если у вас есть батарея, заряженная всего на 40%, не начинайте полет с этим аккумулятором.

Аналогичным образом, когда дело идет о новых аккумуляторах, вы должны помнить, что это химия! И она иногда бывает непредсказуемой, несмотря на современные технологии. Поэтому постарайтесь предварительно испытать их в течение первых нескольких полетов, разряжая до 40% и больше, проанализировав время полета с нагрузкой и без нее.

А вот зимой используйте аккумуляторы особенно бережно. Не замораживайте аккумуляторы, так как у них есть определенный оптимальный температурный диапазон работы. Держите их в тепле (в машине, кармане) и устанавливайте на квадрокоптер в последнюю минуту.



### ВНИМАНИЕ.

*Установив холодную аккумуляторную батарею, вы потеряете до 50% полезной емкости и времени полета.*



## || Дальность и безопасный маршрут полета

**Радиус действия** индивидуальный для каждого устройства. Разумеется, он, в первую очередь, определяется эффективностью и степенью заряда аккумулятора. Не стоит забывать и о температуре окружающей среды, и о нагрузке.

Дальность полета может варьироваться от 50...100 метров для простых квадрокоптеров и до 5000 метров для более продвинутых беспилотников.



### СОВЕТ.

*Всегда следует держать квадрокоптер в поле зрения – FPV (First-Person-View). Полеты там, где не следует, очень опасны для квадрокоптера. Известно много несчастных случаев, связанных с линиями электропередач, с птицами или другими препятствиями на пути беспилотника.*

Поэтому необходимо избегать районов с высокой магнитной интерференцией: высоковольтных линий электропередач, мачт телевидения, вышек сотовой связи и радиопередатчиков.

Будет полезно проверить окружающую среду на картах Google перед полетом и, если есть возможность, использовать анализаторы спектра для контроля частот 2,4 ГГц и 5,8 ГГц.

## || Запасные части

После того, как вы выбрали свой первый беспилотник, вам надо быть уверенным, что сможете купить запасные детали для него. Иногда даже легкая авария может требовать замены воздушных винтов, двигателя, камеры или посадочного устройства (шасси).

**СОВЕТ.**

*Убедитесь перед покупкой, что вы выбираете модель, которая имеет большое количество доступных запасных частей.*

Хорошей новостью является то, что для большинства моделей беспилотников есть в наличии запасные детали, доступные в интернет-магазинах.

А в следующих разделах мы перечислим лучшие беспилотники для начинающих пользователей. Это надежные, недорогие беспилотные аппараты. Рассмотрим квадрокоптеры в порядке увеличения цены.

Для рассмотренных далее моделей можно купить достаточное количество недорогих запасных частей (например, батареи, воздушные винты и двигатели) и заменить их в случае необходимости.

## Квадрокоптер ценовой категории || 35 долларов Hubsan X4 (H107L) ||

**Назначение.** Hubsan X4 (рис. 12.1) — простой и надежный любительский беспилотник фирмы Hubsan (Китай) предназначен для развлечения и игры.

**Возможности.** Беспилотник способен находиться в полете 7..9 минут и подниматься на высоту до 100 метров. Встроенный 6-ти осевой гироскоп обеспечивает точность, стабилизацию и моментальное реагирование на команды.

**Устройство.** Прочная цельная основная рама. Обновленная версия дрона X4 (H107L) на каждом луче и корпусе имеет светодиодные индикаторы, которые ярко светятся в темное время суток.

**Управление** беспилотником осуществляется благодаря четырехканальному пульту с частотой 2,4 ГГц. Емкость литий-полимерной батареи составляет 240 мА×ч.



*Рис. 12.1. Внешний вид квадрокоптера Hubsan X4*

## || Квадрокоптер ценовой категории 50 долларов || Syma X5HC

**Назначение.** Стильный и недорогой беспилотник Syma X5HC (рис. 12.2) снабжен фото/видеокамерой. Ценовая категория — 50 \$.

**Видеокамера.** Разрешение 2 МП, съемка видео — HD 720p. Отзывы пользователей свидетельствуют, что это отличный выбор квадрокоптера с камерой.



*Рис. 12.2. Внешний вид квадрокоптера Syma X5HC*

**Возможности.** Усовершенствованный 6-осевой гироскоп для точного парения в небе и более точной стабилизации летательной системы. Квадрокоптер оснащен такими функциями: вверх/вниз, вперед/назад, поворот влево/вправо, 360-градусный 3D переворот. Яркие светодиодные индикаторы обеспечат ночной полет и ориентирование в пространстве. Пульт ДУ с основным функционалом на 2,4 ГГц.

Время полета зависит от внешних условий окружающей среды и в среднем составляет около 8 минут.

Аккумулятор Li-Po 3,7В (500 мА×ч) — при разряженной батарее начинает мигать подсветка.



### ЧТО ЕСТЬ ЧТО.

*Li-Po — это литий-полимерный аккумулятор (литий-ионный полимерный аккумулятор (lithium-ion polymer battery) представляет собой дальнейшее развитие литий-ионного аккумулятора. В качестве электролита используется полимерный материал.*

**Комплектация.** В состав набора входят: запасные 4 воздушных винта, 4 защитных блока для них, зарядное устройство, пульт управления, карта памяти на 2 Гб, кардридер, USB-кабель для подзарядки аккумулятора, отвертка и подробная инструкция.

## Квадрокоптер ценовой категории || 100 долларов UDI U818A ||

**Назначение.** Любительский радиоуправляемый беспилотный летательный аппарат UDI U818A (рис. 12.3) снабжен 2 Мп HD-камерой. Имеет стандартный дизайн. Ценовая категория — 100 \$.



*Рис. 12.3. Внешний вид квадрокоптера UDI U818A*

**Возможности.** Поддерживает автоматический режим, возврат домой и славится простотой в управлении. Это особо важно для новичков. На полном заряде батареи беспилотник может летать около 7...9 минут с радиусом действия до 30 метров.

**Комплектация.** Квадрокоптер поставляется со всеми необходимыми аксессуарами, которые нужны для запуска — Li-Po аккумулятор 500 мА×ч (2 шт.), USB-зарядное устройство к нему, SD-кардридер, SD-карта на 1 Гб, запасные воздушные винты (4 шт.), пульт ДУ четырехканальный с частотой 2,4 ГГц.

## || Квадрокоптер ценовой категории || 105 долларов *Syma X8G*

**Назначение.** Многофункциональный летательный аппарат от китайской компании *Syma Toys* (рис. 12.4). Оптимальный выбор для любого новичка, который хочет летать и снимать.

**Возможности.** Этот беспилотник имеет систему контроля ЮС — интеллектуальная система управления ориентацией.



*Рис. 12.4. Внешний вид квадрокоптера Syma X8G*

ЮС и 6-осевой гироскоп, авторежим, переворотов на 360° позволяют с легкостью управлять беспилотником во время полета. Защитный бампер вокруг лопастей предотвратит столкновение, падение и износ воздушных винтов. Аккумулятор (2000 мА×ч) гарантирует до 15 минут полета

**Комплектация.** X8G поставляется с воздушными винтами, SD-картой для камеры, шасси и набором дополнительных винтов.

Укомплектован съемной 8 Мп камерой, которая способна снимать в Full HD 720/1080p. Квадрокоптер совместим с другими камерами типа GoPro.

## **Квадрокоптер ценовой категории || 110 долларов Holy Stone F181 RC ||**

**Назначение.** Солидный квадрокоптер с встроенной камерой 2 Мп для начинающих (рис. 12.5).

**Возможности.** Имеет 4 скорости. Беспилотник оснащен функциями «Key Return & Headless Security System», удержания высоты, которые помогут новичкам предотвратить потери и повреждения.



*Рис. 12.5. Внешний вид квадрокоптера Holy Stone F181 RC*

Время зарядки батареи около 80 минут. Непрерывный полет на одном заряде до 9 минут с диапазоном действия до 100 метров.

## || Квадрокоптер ценовой категории 700 долларов 3DR Solo

**Назначение.** Беспилотник от компании 3DR Solo (рис. 12.6) типа RTF предназначен для пользователей-новичков, выполнен в черном цвете. Эта модель не имеет встроенной камеры, но совместима с камерами GoPro.

Пульт дистанционного управления от компании 3DR Solo подходит для смартфонов и планшетов, так что никаких ограничений нет. Вид из камеры передается на смарт-устройство практически без задержек. Пульт управления Solo поставляется с креплениями для мобильных гаджетов (на базе iOS и Android) и портом HDMI.



*Рис. 12.6. Внешний вид квадрокоптера 3DR Solo*

**Возможности.** Благодаря функции «возврат домой», коптер автоматически возвращается на базу. Максимальное расстояние управления 800 м. Присутствует автономный режим, режим селфи. Прибор оборудован автопилотом Pixhawk 2.

Можно задать маршрут полета, а в течение самого полета делать необходимые фотоснимки или записывать видео, совершать 3D перевороты по траектории в 360°. Аккумулятор предоставляет примерно 20 минут полета.

## Квадрокоптер ценовой категории 800 долларов Q500 Turphoon

**Назначение.** Turphoon Q500 4K (рис. 12.7) — это модульная система для видеосъемки с профессиональной камерой CGO2





*Рис. 12.7. Внешний вид квадрокоптера Q500 Turbo*

на борту: 12 Мп с 3-осевым стабилизатором и устойчивым захватом.

**Возможности камеры.** Обеспечивает возможность снимать видео в формате 4K со скоростью 30 кадров в секунду или Full HD (до 1080p) со скоростью 120 кадров в секунду с полным набором ручных настроек камеры для полного творческого контроля. Широкоугольный объектив с эффектом устранения кривизны изображения.

**Характеристики.** Дальность управления составляет 800 м. Аккумулятор Li-Po 5400 мА×ч, 11,1 В. Максимальное время полета 25 минут.

Система All-in-one 4K с встроенным сенсорным управлением Android позволяет быстрее настраивать устройство. Нет необходимости добавлять собственное мобильное устройство для съемки впечатляющих видеороликов в разрешение 4K. Handheld SteadyGrip™ можно также использовать для съемки на земле.

Управление полетом помогают осуществлять GPS, датчик высоты, акселерометр, магнитометр. Есть функции: «Визуальное слежение» и «Возврат домой (Home Mode)», прилет обратно к месту нахождения пилота, удерживающего ST10 +,

и автоматическое приземление на расстоянии от 4 до 8 м от пилота.

**Комплектация:** запасной аккумулятор, зарядное устройство (с адаптером переменного тока), подвес CGO2-GB, запасные лопасти (4 шт.), USB-адаптер, флеш-карта с программным обеспечением, Micro SD карта, переносной кейс, ручной стабилизатор CGO3.

## Квадрокоптер ценовой категории || 1000 долларов DJI Mavic Pro ||

**Назначение.** Новинка 2017 года в компании DJI модель Mavic Pro (рис. 12.8) — компактная, портативная, позволяющая положить его в рюкзак или сумку и легко носить.

**Возможности.** 12 Мп видеокамера с 3-осевой механической системой стабилизации, набор датчиков (видения, обход препятствий, жест-контроль), спортивный режим, автономный, умный режим (smart).

Большая дальность полета — до 4,3—7 км или около 27 минут со скоростью около 64 км/ч. Точное позиционирова-



*Рис. 12.8. Внешний вид квадрокоптера Mavic Pro*

ние в помещении и на открытом воздухе обеспечивает GPS и ГЛОНАСС. Профессиональное видео обеспечивается интеллектуальными функциями (ActiveTrack, TapFly).

## || Квадрокоптер ценовой категории || 2000 долларов DJI Phantom 4 PRO

**Назначение.** Беспилотник для профи-съемки — модель DJI Phantom 4 PRO (рис. 12.9). Модернизированная версия 4 PRO всемогущего Phantom является лучшим квадрокоптером по соотношению качество/цена.

**Возможности.** 3D-камера Phantom 4 Professional имеет 20 МП возможности фотосъемки, механический затвор и большой 1-дюймовый датчик. Видеовозможности также были улучшены, теперь этот беспилотник способен снимать видео 4K в 60 кадров в секунду.

Беспилотник оснащен системой для обхода препятствий (5 датчиков направлений, инфракрасные датчики). Технология Lightbridge: пульт автоматически распознает сигнал и пере-



*Рис. 12.9. Внешний вид квадрокоптера DJI Phantom 4 PRO*

ключает между диапазонами 2,4 ГГц и 5,8 ГГц передачи. Время полета увеличено до 30 минут (в зависимости от погодных условий).

## Особенности гоночных квадрокоптеров

В завершении рассмотрим гоночные квадрокоптеры — небольшие беспилотники, специально построенные для соревнований в FPV гонке («first person view» — «вид от первого лица»).

Гоночные беспилотники абсолютно другие по сравнению с квадрокоптерами с камерой и моделями для начинающих. Эти беспилотники, как правило, имеют среднее время полета, высокую скорость, просты в использовании, маневренны и максимально облегчены.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Важно отметить, что эти квадрокоптеры не предназначены для новичков.*

## Гоночный квадрокоптер HobbyKing TBS Vendetta 240

HobbyKing TBS Vendetta 240 — мощный гоночный квадрокоптер небольшого размера (240 мм). Корпус полностью выполнен из углеродного волокна (весом чуть более 400 граммов без батареи и камеры, см. рис. 12.10). Цена 499\$.

Благодаря своей модульной конструкции, при необходимости в замене деталей после аварии, он не потребует паяльника — электроника квадрокоптера совместима со спецоборудованием от разных фирм-производителей в достаточно широком ценовом диапазоне.



*Рис. 12.10. Внешний вид квадрокоптера HobbyKing TBS Vendetta 240*

Этот карманный квадрокоптер может достигнуть максимальной высоты 1300 м, пролетает от 3 до 5 минут с максимальной скоростью более 130 км/ч во время гонки.

## || Гоночный квадрокоптер Eachine Racer 250

**Eachine Racer 250** — один из самых популярных гоночных квадрокоптеров, благодаря своей сравнительно невысокой цене (359\$) и большой доступности (**рис. 12.11**). Квадрокоптер (RTF) поставляется со всем, что необходимо для полета. Сам гоночный квадрокоптер имеет 1500 мА×ч Li-Po аккумулятор, предоставляя до 12 минут полета.

Пульт дистанционного управления имеет встроенный 7-дюймовый дисплей с матовым покрытием для FPV -полетов. Имеется экранное меню, которое показывает уровень заряда



*Рис. 12.11. Внешний вид квадрокоптера Eachine Racer 250*

батареи, времени в воздухе, и каналный передатчик. Этот беспилотник имеет прочный корпус из углеродного волокна и оснащен светодиодными огнями на передней и задней части, с изменением цвета подсветки.

### Гоночный квадрокоптер ARRIS X-Speed 250B RTF

**ARRIS X-Speed 250B RTF** имеет такую же функциональность, как «большие модели», но стоит дешевле (около 310\$, **рис. 12.12**). Имеет прочный корпус из углеродного волокна. Устройство поставляется почти со всем, что нужно будет для полета, кроме батареи. Компания ARRIS рекомендует использовать Li-Po аккумуляторы: 3S (1500...2200 мА×ч) или 4S (1100...1500 мА×ч).

Самой впечатляющей частью этого беспилотника является внешний дизайн рамы, и более конкретно, FPV-крепление камеры. Камера отделена от основной рамы антивибрацион-



*Рис. 12.12. Внешний вид квадрокоптера ARRIS X-Speed 250B RTF*

ной системой, а на верхней панели находится ползунок для регулировки с FPV-угол наклона камеры — все это увеличивает срок службы электронных компонентов.

## || Гонимый квадрокоптер ImmersionRC Vortex 250 Pro

**ImmersionRC Vortex 250 Pro** — гоночный квадрокоптер премиум-класса, прочный и маневренный (рис. 12.13). Рама построена из 4 мм углеродного волокна. Li-Po 3S-4S аккумуляторы не входят в комплектацию.

Допускается установка внешней камеры типа GoPro, угол которой можно регулировать, обеспечивая отличный фронтальный вид во время скоростной гонки. Цена 489\$.



*Рис. 12.13. Внешний вид квадрокоптера ImmersionRC Vortex 250 Pro*

## Гоночный квадрокоптер Lumenier QAV210-RTF Charpu Edition

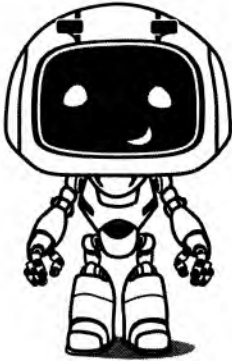
Lumenier QAV210-RTF Charpu Edition (рис. 12.14) является увеличенной версией QAV180 (наименьшего FPV-мультикоптера). Имеет 21 мм раму из углеродного волокна для дополнительной прочности и устойчивости к различным повреждениям.

Поддерживает HD-камеры, такие как Mobius или типа GoPro в дополнение к его встроенной Full HD камере (1080p). Квадрокоптер назван в честь одного из самых популярных на сегодняшний день профессиональных гонщиков — Карлоса Пуертолоса Чарпу. Цена 400\$.





**Рис. 12.14.** Внешний вид к и комплект поставки квадрокоптера QAV210-RTF Charpu Edition



# ЧТО У КВАДРОКОПТЕРА ВНУТРИ?

## Функциональная схема любительского квадрокоптера

Любой любительский квадрокоптер можно представить в таком виде (рис. 13.1).

**Новичок:** А пульт тоже внутри квадрокоптера?

Нет, но он неотъемлемая часть конструкции, не так ли?

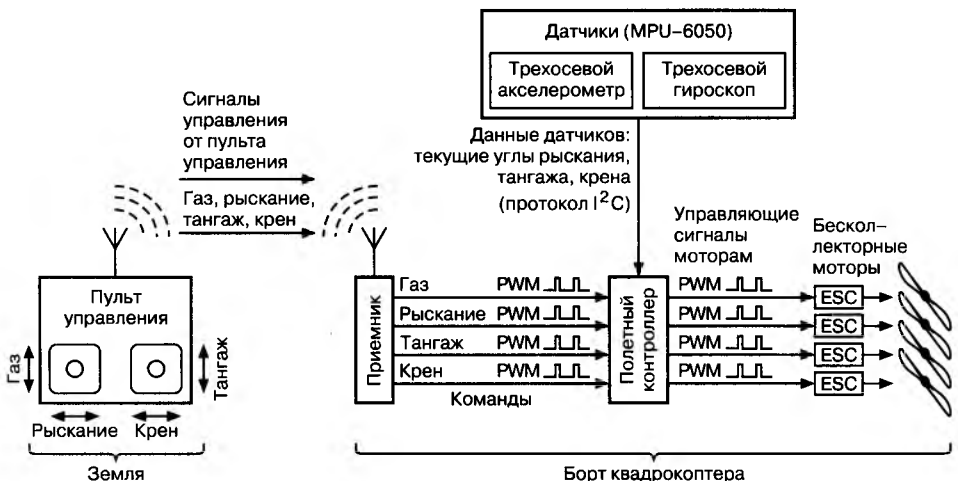


Рис. 13.1. Упрощенная функциональная схема любительского квадрокоптера

## Работа пульта управления: протоколы

С пульта и начнем. Традиционно пульты квадрокоптеров многоканальные. Дешевые пульты имеют четыре канала, более дорогие модели имеют больше каналов.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

Сегодня 4х-канальный пульт управления еще можно купить, на Алиэкспресс он пока есть по цене от 1400 руб. (рис. 13.2).



Рис. 13.2. Недорогой пульт управления квадрокоптером

Дорогие модели пультов управления не только имеют больше каналов управления, но и могут оснащаться дисплеем (рис. 13.3), на котором отображается принимаемый с видеокмеры сигнал, отображается маршрут полета и т. д.

**Новичок:** Я стал читать про радиоуправление, а там про PWM, PPM, SBUS и еще какие-то названия. Это про что?



*Рис. 13.3. Продвинутая модель пульта управления*

Это протоколы работы приемника. Протокол — соглашение о том, как устроено что-то. В нашем случае протокол описывает то, как будет использоваться радиосигнал.



### ЭТО ВАЖНО.

*Пульт управления должен работать с приемником, предназначенным именно для него.*

Самый простой протокол называется **PWM**. Он описывает выходной сигнал приемника. Подразумевается, что каждый сигнал доходит до своего бесколлекторного двигателя через преобразователь ESC, который преобразует сигнал PWM (ШИМ) в трехфазный сигнал для бесколлекторного двигателя.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Для коллекторного двигателя достаточно управляющего транзисторного ключа.*

Протокол **PPM** подразумевает, что сигнал приемника передается полетному контроллеру по одному проводу. А чем меньше проводов, тем меньше бесполезный вес! При использовании такого протокола по сигнальному кабелю передаются все сигналы последовательно, но с разной модуляцией.

Есть цифровая разновидность этого протокола **PCM**, когда сигналы передаются с помощью импульсной модуляции. Есть еще ряд последовательных протоколов, но они требуют наличие порта последовательно обмена данными у полетного контроллера.

## || Двигатели: || легче и мощнее

Чем больше мы хотим от квадрокоптера, тем больше становится его собственный вес, ограничивая вес дополнительного оборудования, например, видеокамеры. Для полета тяжелого квадрокоптера нужны мощные двигатели (с большим весом), а при электрическом обустройстве беспилотника требуется более мощный аккумулятор, мощность которого растет с его весом. Вот пример двигателей для квадрокоптера (рис. 13.4).



*Рис. 13.4. Разные двигатели для квадрокоптера*

Вес двигателя может колебаться от 20 г (возможно, и меньше) до сотен граммов.

**Новичок:** *Чем мощнее двигатель, тем мощнее должен быть аккумулятор?*

Без этого не обойтись! Если вы предполагаете использовать более надежные бесколлекторные двигатели, вам понадобятся формирователи импульсов для них, ESC (**рис. 13.5**). Хотя их вес может колебаться от 4 до 30 граммов, но их нужно для квадрокоптера четыре, а это добавит вес к общему весу беспилотника.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Дело в том, что бесколлекторные двигатели питаются трехфазными импульсами, формирует которые именно ESC (Electronic speed control, электронный регулятор скорости).*

Каждый из импульсов, формируемых ESC, поддается регулировке скважности, значение которой передается с пульта управления.



**Рис. 13.5.** ESC на разный ток потребления двигателем

## Аккумуляторы: питают все

Одной из самых важных частей любого квадрокоптера является аккумулятор (рис. 13.6). Емкость аккумулятора определит и время, которое беспилотник может провести в полете. Для радиоуправляемых моделей есть специализированные аккумуляторы, поэтому необходимо знать, как их выбирать, эксплуатировать и заряжать. Это позволит обеспечить безопасное и долгое функционирование.



Рис. 13.6. Разные аккумуляторы для беспилотников

**Батареи для квадрокоптеров** рекомендуется выбирать типа LiPo/LiPol. Данные аккумуляторы определяют три характеристики:

- ♦ емкость;
- ♦ максимальный разрядный ток;
- ♦ напряжение.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

Из наиболее распространенных типов наибольшей емкостью при наименьших габаритах обладают литий-полимерные батареи LiPol, но при этом их стоимость выше.

**Аккумулятор для квадрокоптера LiPol** обладает рядом преимуществ:

- ♦ низкий саморазряд;
- ♦ большой диапазон рабочих температур;
- ♦ отсутствие так называемого эффекта памяти;
- ♦ малый перепад напряжения при разрядке.

**Новичок:** *В Интернете рекомендуют:*

- ♦ *Turnigy 5000 mAh 3S 30C Lipo Pack*
- ♦ *Pulsar Li-pol 22.2V 12000mAh, 25C, 6s 1p, EC5.*

От себя добавлю, что одним из лучших аккумуляторов на сегодняшний день является Gens ACE Tattu 22000 мА×ч 6s 1p 22,2 В. Данный аккумулятор имеет сверхвысокую энергоемкость и при этом небольшой вес. В некоторых случаях это является определяющим фактором. Максимальные показатели достигнуты посредством технологии Otagover, обеспечивающей минимизацию нагрева корпуса батареи и пластин.

**Новичок:** *Ясно. Необходимо еще знать максимально допустимые габариты бокса под установку аккумулятора в нашем конкретном квадрокоптере! А что означают надписи на самом аккумуляторе?*

Габариты — это важно! А вот что означают надписи на самом аккумуляторе и как их стоит правильно понимать [27].

1. Самыми большими цифрами на этикетке обычно указывается номинальная емкость батареи, как правило, в миллиампер часах.

**Новичок:** *Ясно: по ней можно судить, сколько времени в часах батарея сможет питать нагрузку при токе в миллиамперах. И чем больше эта величина, тем дольше квадрокоптер сможет пробыть в полете.*



2. Немного меньшими цифрами указывается номинальное напряжение батареи.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Косвенно о напряжении можно судить и по символу, обозначающему количество банок при напряжении одной банки от 3 до 4,2 вольт: 2S для двухбаночных или 3S для трехбаночных аккумуляторов.*

Чем выше напряжение и допустимый ток разряда, тем большую мощность может развить батарея на соответствующую нагрузку.

3. Допустимый кратковременный ток разряда записывается двумя цифрами и литерой «С», а определяется произведением числового значения обозначения на номинальную емкость.



### ПРИМЕР.

*Маркировка Zippy 3S 4000 20C. Производитель «Zippy». 3 банки – напряжение 9...12 вольт. Номинальная емкость 4000 мА×ч.*

Для данного аккумулятора допустимый кратковременный ток разряда:

$$20 \times 4000 = 80000 \text{ мА или } 80 \text{ ампер.}$$



### ЭТО ВАЖНО.

*Вес аккумулятора будет колебаться от 100 г до 800 г и, наверное, больше.*

## Гироскоп и акселерометр: || укажут точное положение ||

Если посмотреть на упрощенную функциональную схему (рис. 13.1), можно увидеть еще одно необходимое для полета устройство: гироскоп и акселерометр. Даже тогда, когда у вас одинаковые двигатели, когда все ESC одинаковы и исправны, нет гарантий, что винты квадрокоптера будут создавать одинаковую тягу.

**Новичок:** *А для чего нужен гироскоп?*

Задача гироскопа сообщить полетному контроллеру положение квадрокоптера относительно горизонтальной плоскости с тем, чтобы контроллер принял меры по управлению двигателями, сохраняя горизонтальное положение квадрокоптера вне операций поворотов, смены направления движения и т. д.

**Новичок:** *А как быть, если нужно летать не только вокруг песочницы?*

В дальних перелетах применяют и другие датчики, определяющие параметры полета:

- ♦ GPS навигаторы;
- ♦ компасы;
- ♦ барометры.

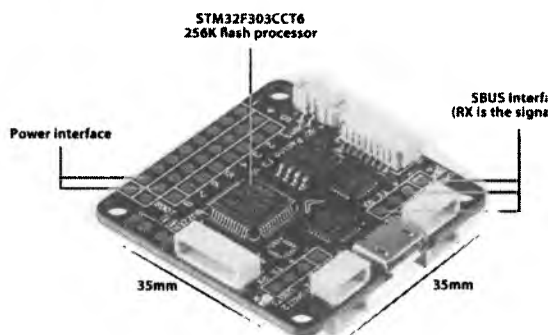
## Полетный контроллер – || всему голова ||

Все эти датчики работают с полетным контроллером. Поэтому выбор такого контроллера очень важен.



## СОВЕТ.

*Начинающим моделистам лучше приобрести готовый полетный контроллер (рис. 13.7). Хотя интереснее самому создать контроллер, например, используя Arduino или другой модуль.*



*Рис. 13.7. Так выглядят полетные контроллеры*

При самостоятельном создании полетного контроллера придется встретиться со многими сложными вопросами, но здесь выбор за вами, что вам важнее:

- ♦ получить готовое решение;
- ♦ или решить задачу самостоятельно.

Готовые полетные контроллеры часто поддерживаются готовым программным обеспечением, позволяющим легко настроить его под ваши интересы и нужды.

## || Функциональная схема продвинутого беспилотника

Выше мы рассмотрели, конечно, не полный перечень всего, что можно найти внутри беспилотника. Достаточно взглянуть на функциональную схему продвинутого беспилотника (рис. 13.8). Она даже предусматривает наличие парашюта, который автоматически приводится в рабочее состояние при выходе из строя в полете одного из двигателей.



Рис. 13.8. Функциональная схема продвинутого квадрокоптера

Еще мы, например, не касались вопросов, связанных с видеокамерой. Какие сегодня видеокамеры можно найти в магазинах [28] (рис. 13.9)?

Видеокамера MJX C4002

артикул: c4002

ВАША ЦЕНА   ДОСТАВКА   ГАРАНТИЯ   ОТЗЫВЫ 3

**760 руб.**

ДОБАВИТЬ В КОРЗИНУ → Купить этот товар сегодня, вы получите **22 руб.** на следующую покупку

в наличии - много

- ближайшая доставка: **сегодня**
- самовывоз из магазина м. Курское: **сегодня**
- самовывоз из магазина м. Крымское: **завтра**
- самовывоз из магазина Мытищи: **завтра**

ПРОСТО ВВЕДИТЕ ВАШ ТЕЛЕФОН.  
И МЫ ПЕРЕВОЗИМ ВАМ ЗА 5 МИНУТ

+7 • 896 • 233 • 24 • 00   **ОТПРАВИТЬ**

→ ✉ [отправить ссылку мне на почту](#)

Рис. 13.9. Самая дешевая камера для вертолета

## Новичок: Но мы говорили о квадрокоптерах. Так?

Вот не самая дорогая видеокамера для квадрокоптера (рис. 13.10).



Видеокамера для квадрокоптера SYMA X5

арткулус: syma-x5c-13

ВАША ЦЕНА   ДОСТАВКА   ГАРАНТИЯ   ОТЗЫВЫ 2

**1 280 руб.**

ДОБАВИТЬ В КОРЗИНУ → Купить этот товар сегодня, вы получите **38 руб.** на следующую покупку

✓ в наличии - 14 шт.

✓ ближайшая доставка: **24 Апреля**

✓ самовывоз из магазина м. Курская: **24 Апреля**

✓ самовывоз из магазина м. Крылатское: **25 Апреля**

✓ самовывоз из магазина Митищи: **25 Апреля**

ПРОСТО ВВЕДИТЕ ВАШ ТЕЛЕФОН.  
И МЫ ПЕРЕЗВОНИМ ВАМ ЗА 5 МИНУТ

+7 • [input type="text"] • [input type="text"] • [input type="text"] • [input type="text"]   **ОТПРАВИТЬ**

→ [input type="checkbox"] отправить ссылку мне на почту

**Рис. 13.10.** Видеокамера эконом класса

При этом следует подумать о следующем: если камеру жестко встроить в конструкцию беспилотника, то она будет показывать только то, что «видит» перед собой; и едва ли беспилотник будет лететь «по струнке». Видеть на дисплее прыгающее изображение – это совсем не то, что вы хотели бы, не так ли?

Чтобы этого избежать применяют [29] специальный подвес (рис. 13.11).

Двухосевые подвесы для квадрокоптеров необходимы, чтобы стабилизировать камеру, чтобы видео съемка была ровной.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Разные типы подвесов служат для разных камер, на что следует обращать внимание.*



*Рис. 13.11. Двухосевой подвес для видеокамеры*

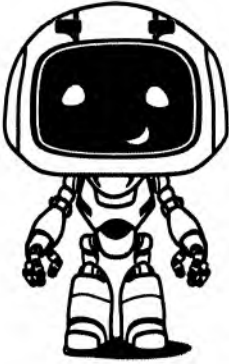
Видеокамера может работать с собственным радиоканалом Wi-Fi, но может интегрироваться и в радиоканал пульта управления. Программное обеспечение для работы с видеокамерой может включать и подпрограммы распознавания.



#### **ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Все зависит как от качества камеры, так и от качества программы и, конечно, от стоимости всего этого.*

И мы рассмотрели основное, но далеко не все, что можно обнаружить внутри квадрокоптера.



# КВАДРОКОПТЕР В ВОЗДУХЕ

## || Как квадрокоптер разбирается со своими винтами?

Теперь вам, наверное, понятно, почему я электронные письма превратил в главы книги. Из них я узнал много нового для себя, надеюсь, что и вы нашли что-то новое для себя.

Но, прочитав предыдущие главы, я сильно призадумался, не стоит ли все начинать сначала? Но с моей простой задачей... и вопросы у меня простые.

Впрочем, вот, что об этом мог спросить новичок.

**Новичок:** *И как квадрокоптер разбирается со своими винтами?*

Я бы сформулировал вопрос так: получается, что от скорости вращения винтов зависит положение беспилотника в воздухе? Когда пилот в кабине, он видит, что происходит с аппаратом, а когда пилота нет?

## || Акселерометр и электронный гироскоп

Если не довелось побывать в кабине самолета, не отчаивайтесь. В кино кабину самолета видели все. И обратили вни-

мание, как много приборов перед глазами пилотов. Среди них нет ненужных — зачем самолету лишний вес? И он не нужен беспилотнику.

Для ориентации беспилотника в воздухе, его положения по отношению к горизонту, используют **электронный гироскоп**. Это трехосевой гироскоп в сочетании с трехосевым акселерометром. Они измеряют ускорение и угловую скорость аппарата. Бортовой компьютер по этим приборам отслеживает текущие параметры тангажа, крена и рыскания.



### СОВЕТ.

*Есть разные модели датчиков, но наиболее удачная модель — это MPU-6050. Используйте при возможности ее.*

Модуль самостоятельно прodelывает все необходимые вычисления и передает бортовому компьютеру по протоколу I<sup>2</sup>C почти готовые углы для управления моторами винтов. Бортовому компьютеру остается связать их с остальными данными и изменить задание винтам, если это необходимо.

Я вспомнил, что у меня есть похожий датчик. Не сложно было найти справочные данные к нему. Читая описание датчика, я решил разобраться с некоторыми деталями его работы. И вот, что из этого получилось.

## Интерфейс — главный посредник

Интерфейс — это посредник между чем-то и чем-то или между кем-то и чем-то. Когда-то у компьютера был интерфейс RS232 для связи с модемом. Позже его упростили, он стал называться **COM-порт**.





### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Понятие интерфейса описывало все, начиная от разъема, который применялся и расписания сигналов на его выводах, до напряжений в линиях и программного обеспечения для работы с этим интерфейсом.*

Сегодня ни у ноутбуков, ни у планшетов такого интерфейса нет. Зато есть другой, который называется **USB-порт**.

Впрочем, я отвлекся. У датчика, который нашелся у меня, а это модуль на основе MPU-6050, в качестве интерфейса используется I<sup>2</sup>C. Чтобы не быть голословным, я немного расскажу об этом интерфейсе, полистав статьи в Интернете.

Оказывается, интерфейс был разработан фирмой Philips для обмена данными между компонентами электроники в устройстве. Обмен данными происходит последовательным образом, а два провода SDA (Serial Data, последовательные данные) и SCL (Serial Clock, тактирование) служат двунаправленными линиями.



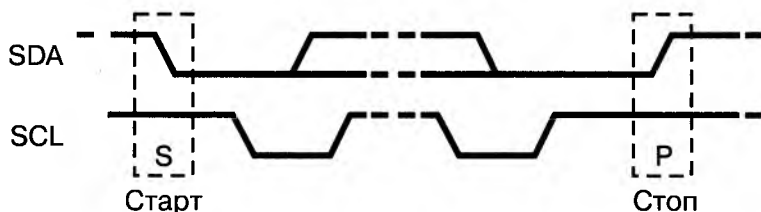
### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Это подразумевает, что оба устройства должны подключаться транзисторами с открытым коллектором или открытым стоком, а у линий должны быть подтягивающие резисторы.*

Чтобы избежать конфликтов на линии обмена данными, одно из устройств обязательно **главное** (или ведущее, или Master), а остальные, их может быть много, **ведомые** (подчиненные, Slave).

Ведомые устройства имеют адреса, нужно же их как-то различать. Общение начинает ведущий (**рис. 14.1**). Начинает он его с перевода линии SDA из высокого состояния в низкое в тот момент, когда линия SCL находится в высоком состоянии.

Завершает работу на линии тоже ведущий, переводя линию SDA из низкого состояния в высокое при высоком уровне на



*Рис. 14.1. Начало и завершение работы ведущим интерфейса I<sup>2</sup>C*

линии SCL. Передача данных может ограничиваться одним байтом, но может осуществляться в пакетном режиме.

У меня нет собеседника, задающего важные для него вопросы. Однако я и сам себе могу быть новичком, чтобы выделить что-то важное.

**Новичок:** А SCL – это тактовые сигналы?

Да, это тактовые сигналы, которые всегда формирует ведущий. Когда ведущий формирует сигнал «Старт», остальные устройства ожидают передачи адреса от главного. Все изменения на линии данных возможны только тогда, когда линия синхроимпульсов SCL находится в состоянии низкого уровня.

Первым на шине данных выставляется старший бит данных, а после передачи восьми битов ведущий ожидает подтверждения от ведомого, который должен выставить низкий уровень на линии SDA при высоком тактовом уровне, а ведущий, следуя протоколу обмена через интерфейс I<sup>2</sup>C, освобождает линию данных.



#### **ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Если ведомое устройство занято другой работой, линия SDA остается в высоком состоянии, а ведущий может отправить сигнал «Стоп» для завершения работы. Но ведомое устройство может удержать линию SCL в низком состоянии, заставляя ведущего ожидать, когда ведомое устройство будет готово к общению.*

При передаче адреса ведомому устройству младший бит адреса может быть в одном из двух состояний:

- ♦ нулевом, если ожидается запись данных в ведомое устройство;
- ♦ единичном, если предстоит чтение данных от ведомого.

Поскольку при адресации первоначально использовалось семь битов адреса, устройств на линии I<sup>2</sup>C могло быть не более 127.

**Новичок:** *И сейчас тоже можно работать только с таким количеством устройств?*

Нет, в более поздней спецификации протокола была введена десяти битовая адресация. Я не работал с интерфейсом I<sup>2</sup>C, а все, что написано выше, я прочитал в Wiki и руководстве к гироскопу. Поэтому мне хотелось бы не только «верить на слово», но и убедиться воочию в том, что происходит на линиях интерфейса I<sup>2</sup>C.

На помощь, как это часто бывает, я призываю **Arduino** (рис. 14.2).

Среди примеров программы Arduino есть библиотека *Wire* с примерами:

Файл→Примеры→Wire.

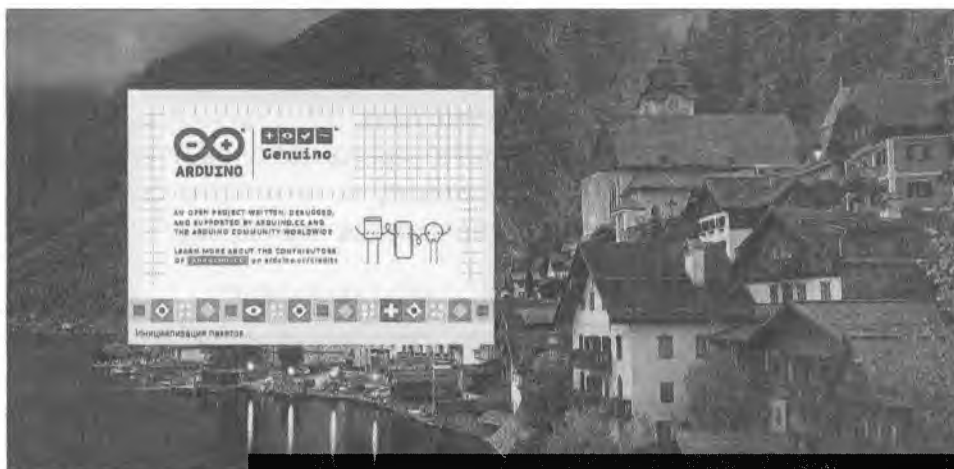
Ими я и хочу воспользоваться. Если вы не найдете эту библиотеку, то поищите ее на сайте Arduino. Достаточно в поисковике, например, в Яндекске (рис. 14.3), ввести:

*arduino wire download.*



### СОВЕТ.

*Эту страницу есть смысл добавить в закладки, если вы намереваетесь работать с Arduino и интерфейсом I<sup>2</sup>C.*



**Рис. 14.2.** Запуск программы Arduino

Reference | Language | Libraries | Comparison | Changes

## Wire Library

This library allows you to communicate with I2C / TWI devices. On the Arduino boards with the 96 layout (1.0 pinout), the SDA (data line) and SCL (clock line) are on the pin headers close to the AREF pin. The Arduino Due has two I2C / TWI interfaces SDA1 and SCL1 are near to the AREF pin and the additional one is on pins 20 and 21.

As a reference the table below shows where TWI pins are located on various Arduino boards.

Board	I2C / TWI pins
Uno, Ethernet	A4 (SDA), A5 (SCL)
Mega2560	20 (SDA), 21 (SCL)
Leonardo	2 (SDA), 3 (SCL)
Due	30 (SDA), 21 (SCL), SDA1 SCL1

As of Arduino 1.0, the library inherits from the Stream functions, making it consistent with other read/write libraries. Because of this, `send()` and `receive()` have been replaced with `read()` and `write()`.

**Note**

There are both 7- and 8-bit versions of I2C addresses. 7 bits identify the device, and the eighth bit determines if it's being written to or read from. The Wire library uses 7 bit addresses throughout. If you have a datasheet or sample code that uses 8 bit address, you'll want to drop the low bit (i.e. shift the value one bit to the right), yielding an address between 0 and 127. However the addresses from 0 to 7 are not used because are

**Functions**

- `begin()`
- `requestFrom()`
- `beginTransmission()`
- `endTransmission()`
- `write()`
- `available()`
- `read()`
- `setClock()`
- `onReceive()`
- `onRequest()`

**Рис. 14.3.** Страница библиотеки Wire на сайте Arduino

И вот почему. Я предполагаю использовать два модуля Arduino Uno для проведения этого опыта. В примерах есть две программы, которые меня интересуют:

- ♦ программа `master_reader`, которая предположительно делает запрос от мастера на чтение;
- ♦ программа `slave_sender`, отвечающая ведущему.

Вот код первой программы:

```
#include <Wire.h>
void setup() {
  Wire.begin();
          // подключение шины i2c (мастер без
адреса)
  Serial.begin(9600);
          // настройка вывода на монитор
}
void loop() {
  Wire.requestFrom(8, 6); // запрос 6 байт от ведомого №8
  while (Wire.available()) {
          // ведомый может отправить меньше
  char c = Wire.read();
          // получение байта как символа
  Serial.print(c); // вывод на монитор
  }
  delay(500);
}
```

**У меня нет сомнений в том, что программа загрузится, как и в том, что и вторая программа не избежит этого:**

```
#include <Wire.h>
void setup() {
  Wire.begin(8); // подключаем шину i2c с адресом №8
  Wire.onRequest(requestEvent); // регистрируется событие
}
void loop() {
  delay(100);
}
// функция, которая определяет,
```

```
// есть ли запрос от мастера
// эта функция регистрирует событие, см. setup()
void requestEvent() {
  Wire.write(«hello «);
                // отклик с сообщением из 6 байтов
// как запрошено мастером
}
```



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Но, включая монитор порта (Инструменты → Монитор порта), вы не увидите ничего. Нет событий, поскольку нет шины.*

Вам нужно соединить выводы двух модулей Arduino.

**Новичок:** *Но как это сделать правильно?*

Ответ на это виден сразу: как только вы обратите взор на страницу библиотеки Wire — для Arduino Uno следует соединить выводы A4 и A5.

Впрочем, у меня модуль, который я рассматривал, накрыт модулем Ethernet, а без него можно увидеть выводы SDA и SCL рядом с выводом опорного напряжения AREF.



#### СОВЕТ.

*И не забудь соединить выводы GND, если оба модуля не включены в порты USB, то есть, один из модулей питается от внешнего адаптера!*

Теперь можно видеть на экране монитора результат общения двух Arduino (**рис. 14.4**).

Но меня в данном случае интересуют сигналы на шине I<sup>2</sup>C. Нужно подключить осциллограф. Первая осциллограмма подтверждает, что на шине ведущим выставляется адрес и запрос на чтение, а ведомый отправляет 6 байт данных (**рис. 14.5**).



Рис. 14.4. Наблюдение на экране монитора за общением двух модулей

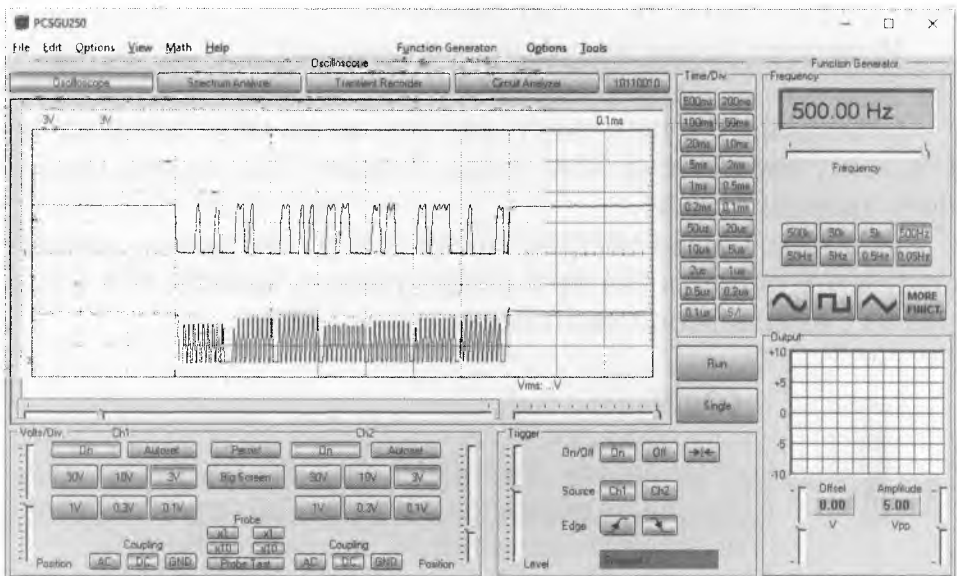
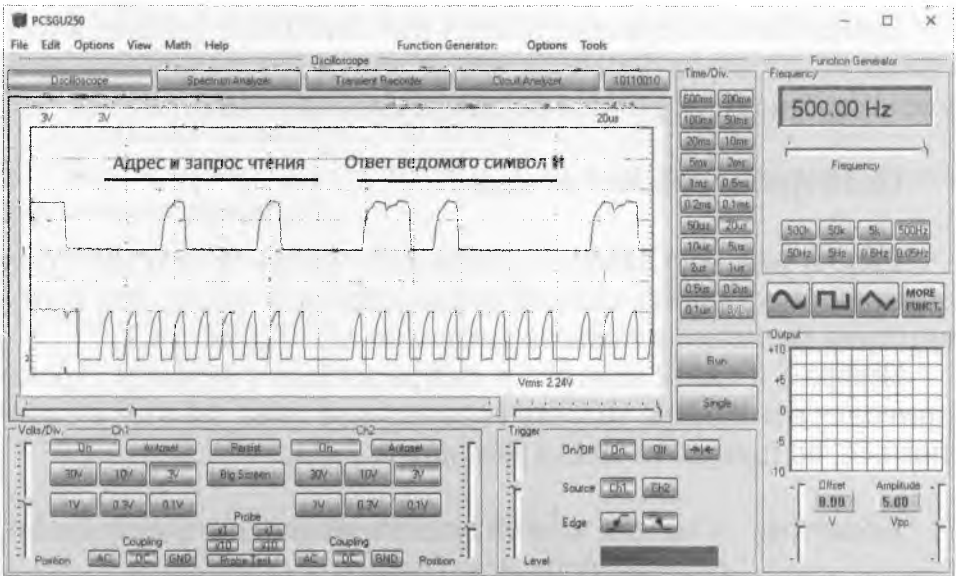


Рис. 14.5. Вся осциллограмма общения через интерфейс I<sup>2</sup>C

## Какие сигналы на шине видит осциллограф

Теперь попробуем рассмотреть подробнее сигналы на шине. Каждый «сеанс связи» сопровождается девятью такто-



**Рис. 14.6.** Осциллограммы начала диалога

выми импульсами, которые генерирует ведущий (рис. 14.6). Начинает он диалог с перевода линии SDA (верхний график на диаграммах) в низкий уровень. За ним следует адрес ведомого устройства и характер запроса, чтение или запись.

Действительно, ведущий опускает линию SDA, а затем формирует тактовые импульсы. По тактовым импульсам прочитав, что отправляет ведущий:

000100010.

Первые семь битов — это 0001000 или 8, что отвечает адресу, заданному программой. Пока все правильно.

Восьмой бит — это единица, предполагающая запрос на чтение. Это тоже правильно.

А девятый бит, когда линия SDA остается на низком уровне.

**Новичок:** Я помню, это подтверждение от ведомого устройства, что оно готово к работе и ничем другим не занято.



Прочитаем следующие восемь бит: 01101000 (девятый бит сейчас не в счет, он означает, что диалог будет продолжен). Это число шестнадцатеричное **68** или десятичное **104**.

**Новичок:** *И что это за число?*

Дело в том, что давным-давно для передачи текстов придумали сопоставлять каждой букве алфавита число. Это соответствие записано в таблице символов ASCII (рис. 14.7).

Цифра 6 в левой колонке и цифра восемь в верхней строке приводят нас к букве «h», что справедливо (рис. 14.4), а я, признаться, по привычке искал заглавную букву.

**Новичок:** *А ничего, что на осциллограмме импульсы «недостаточно прямоугольные».*

Меня тоже это смущает! Причина может оказаться банальной — подтягивающих резисторов в проделанном мною опыте не было. Отсюда и затягивание переднего фронта.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Среди примеров программ есть программа-сканер шины I<sup>2</sup>C, она может очень пригодиться.*

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	NUL	SOH	STX	ETX	EOT	ENQ	ACK	BEL	BS	HT	LF	VT	FF	CR	SO	SI
1	DLE	DC1	DC2	DC3	DC4	NAK	SYN	ETB	CAN	EM	SUB	ESC	FS	GS	RS	US
2		!	"	#	\$	%	&	'	(	)	*	+	,	-	.	/
3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[	\	]	^	_
6	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{		}	~	DEL

Рис. 14.7. Таблица символов ASCII

А я хочу добавить, что за простотой программ, которые мы использовали в опыте, стоит большая работа программистов, которой мы пользуемся, когда записываем:

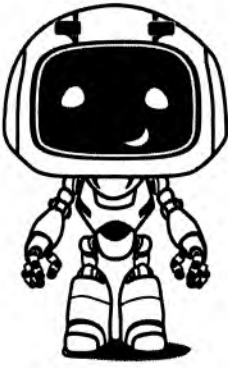
```
#include <Wire.h>.
```

Мы записали: `Wire.begin()`, но за этим следует вызов нескольких функций:

```
void TwoWire::begin(void)
{
  rxBufferIndex = 0;
  rxBufferLength = 0;
  txBufferIndex = 0;
  txBufferLength = 0;
  twi_init();
}
void twi_init(void)
{
  // инициализация состояния
  twi_state = TWI_READY;
  twi_sendStop = true; // значение по умолчанию
  twi_inRepStart = false;
  // активация подтяжки для twi.
  digitalWrite(SDA, 1);
  digitalWrite(SCL, 1);
  // инициализация twi пределителя и скорости обмена данными
  cbi(TWSR, TWPS0);
  cbi(TWSR, TWPS1);
  TWBR = ((F_CPU / TWI_FREQ) - 16) / 2;
  /* twi формула скорости обмена из справки к
  atmega128 стр.204:
  SCL Frequency = CPU Clock Frequency / (16 + (2 * TWBR))
  Заметьте: TWBR должно быть 10 или больше для режима
  ведущего.
  Это 72 для 16mhz монтажной платы со 100kHz TWI */

  // разрешение для twi модуля запросов и twi прерывания
  TWCR = _BV(TWEN) | _BV(TWIE) | _BV(TWEA);
}
```

Вот такая «простая» функция. Остается только поблагодарить тех, кто написал библиотеку функций для нас.



# ПРИРУЧАЕМ МОДУЛЬ

# ТРЕХОСЕВОГО ГИРОСКОПА И АКСЕЛЕРОМЕТРА MPU-6050

## Модули гироскопа, акселерометра и барометра

Интерфейс интерфейсом, но с модулем MPU-6050 возникли проблемы. Дело в том, что какие-то модули и датчики у меня есть, но не все, конечно. Однако и этот достаточно сложный модуль стоит не так дорого (рис. 15.1).

The screenshot shows a product listing for an MPU-6050 module on the 'Electronicians' website. The product is described as a 3-axis digital gyroscope and accelerometer module for Arduino. The price is listed as 62.17 rubles per unit, with a total price of 106.06 rubles for one unit. The shipping cost is 43.89 rubles via Russian Federation service. The estimated delivery time is 23-32 days.

1 Комплект: ИС I2C GY-521 MPU-6050 MPU6050 3 Оси Датчики Аналоговый Гироскоп + 3 Осяевой Акселерометр Модуль Для Arduino С Выводами 3-5 В DC
Посмотреть название на английском
★★★★★ 4.9 (1772 отзыва(ов))
2052 заказа(ов)
Цена: 62,17 руб. / шт.
Цена со скидкой: 62,17 руб. / шт. (10%) (199,19 руб.25%)
Создать еще больше в приложении
Отправить цену
Доставка: 43,89 руб. в Russian Federation службой AliExpress Saver Shipping
Расчетное время доставки: 23-32 дн.
Количество: 1 шт. (559 шт. - максимум на посту(а)ле)
Общая стоимость: 106,06 руб.

Рис. 15.1. Модуль гироскопа и акселерометра



*Рис. 15.2. Модуль барометра для моделей*

Модуль гироскопа я решил заказать на Алиэкспресс, а попутно заказал и модуль барометра (рис. 15.2). Тоже недорогой модуль.

И приобрел я эти модули не столько по причине их необходимости для ремонта, но, просто, самому стало интересно, как это работает?

Когда пришла бандероль с покупкой, я, грешным делом, подумал, что датчики в посылку вложить забыли. И только открыв пакет, убедился в своей ошибке. Но вы поймете, почему я ошибся. Я сделал фото «на память» (рис. 15.3).

Надеюсь, вы не подумали, что зажигалка гигантская, нет, она обычная, это датчики такие маленькие, что авиамоделлисты должны быть очень довольны – для них каждый грамм «на вес золота». Но и автомобили или модели катеров, согласитесь, им тоже важны габариты.



*Рис. 15.3. Модули гироскопа и барометра*

## || Принцип действия гироскопа

Я сейчас читаю с экрана монитора, что написано про гироскоп в Wiki.

**Гироскоп** (от др.-греч. *γῆρος* — круг + *σκοπέω* — смотрю) — устройство, способное реагировать на изменение углов ориентации тела, на котором оно установлено, относительно инерциальной системы отсчета. Простейший пример гироскопа — юла (волчок).

Термин впервые введен Ж. Фуко в своем докладе в 1852 году во Французской Академии Наук. Доклад был посвящен способам экспериментального обнаружения вращения Земли в инерциальном пространстве. Этим и обусловлено название «гироскоп».

До изобретения гироскопа человечество использовало различные методы определения направления в пространстве. Издавна люди ориентировались визуально по удаленным предметам, в частности, по Солнцу. Уже в древности появились первые приборы, основанные на гравитации: отвес и уровень. В средние века в Китае был изобретен компас, использующий магнетизм Земли. В Древней Греции были созданы астролыбия и другие приборы, основанные на положении звезд.

Гироскоп изобрел Иоанн Боненбергер и опубликовал описание своего изобретения в 1817 году. Однако французский математик Пуассон еще в 1813 году упоминает Боненбергера как изобретателя этого устройства. Главной частью гироскопа Боненбергера был вращающийся массивный шар в кардановом подвесе.

В 1832 году американец Уолтер Р. Джонсон придумал гироскоп с вращающимся диском. Французский ученый Лаплас рекомендовал это устройство в учебных целях. В 1852 году французский ученый Фуко усовершенствовал гироскоп и впервые использовал его как прибор, показывающий изменение направления (в данном случае — Земли), через год после изобретения маятника Фуко, тоже основанного на сохранении вращательного момента.

*Именно Фуко придумал название «гироскоп». Фуко, как и Боненбергер, использовал карданов подвес. Не позже 1853 года Фессель изобрел другой вариант подвески гироскопа.*

*Преимуществом гироскопа перед более древними приборами являлось то, что он правильно работал в сложных условиях (плохая видимость, тряска, электромагнитные помехи). Однако вращение гироскопа быстро замедлялось из-за трения.*

*Во второй половине XIX века было предложено использовать электродвигатель для разгона и поддержания вращения гироскопа. Впервые на практике гироскоп был применен в 1880-х годах инженером Обри для стабилизации курса торпеды. В XX веке гироскопы стали использоваться в самолетах, ракетах и подводных лодках вместо компаса или совместно с ним.*

Я не знаю точной грани между любопытством и любознательностью, поэтому все, что опишу далее, я отнес бы к любопытству. Работает купленный мною модуль MPU6050 через интерфейс I<sup>2</sup>C (или, в другом написании, I2C).

## Подключаем гироскоп

**Новичок:** *Мы будем писать программу самостоятельно? То есть, это вы будете писать программу, а я буду спрашивать.*

Нет, чтобы не писать программу самостоятельно, будем использовать готовую программу для Arduino Uno, которую можно найти среди библиотек на сайте [18] (рис. 15.4).

Каждый раз, загружая очередную библиотеку в архивированном виде, я забываю, что программа Arduino может не прочитать ее. Забываю, что нужно разархивировать библиотеку, добравшись до нужных файлов, выделить эти файлы (и примеры, если они есть), заархивировать их вновь в zip архив. Теперь можно использовать:

Скетч → Подключить библиотеку →  
Добавить .ZIP библиотеку...



Рис. 15.4. Сайт, где можно загрузить библиотеку для MPU6050

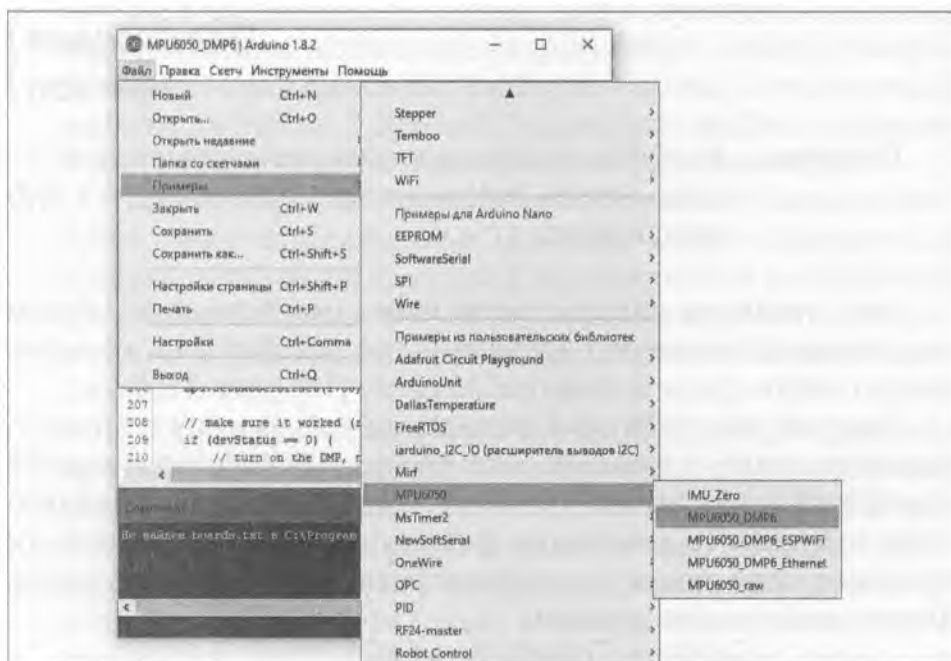


Рис. 15.5. Примеры в библиотеке, загруженной с сайта

**СОВЕТ.**

*На начальном этапе работы можно использовать одну из готовых программ, которые есть в примерах (рис. 15.5).*

Не зная, что выбрать, я выбираю первую попавшуюся программу, отмеченную на рис. 15.5. Мне пока не понятно, что такое DMP6. Возможно, я этого не исключаю, я позже пойму это. Не подключая модуль, я загружаю программу в Arduino Uno.

**ВНИМАНИЕ.**

*Не подключаю я модуль по той причине, что питание модуля гироскопа 3,3 вольта. Важно не перепутать при подключении!!!*

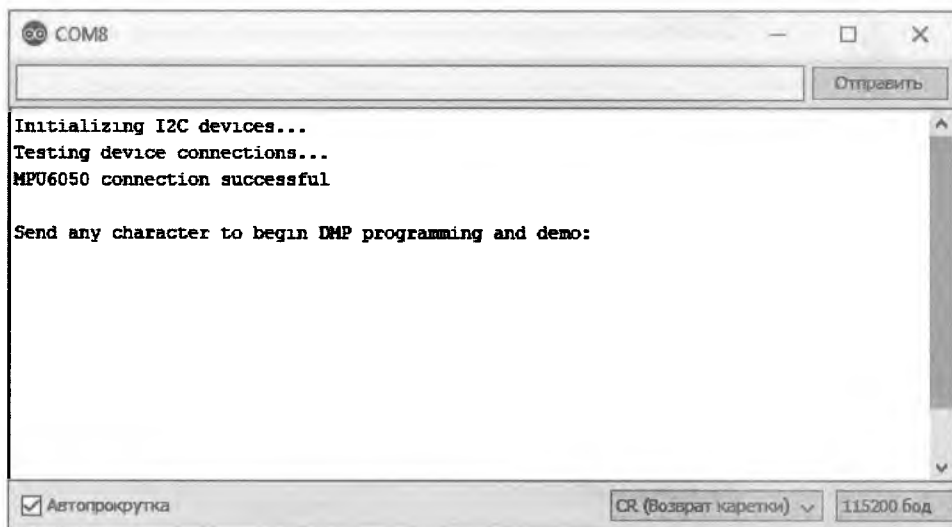
Поэтому, загрузив программу, я отключаю модуль Arduino от USB-порта, чтобы правильно подключить гироскоп. На плате гироскопа подписаны выводы, но их довольно много. Я знаю, что интерфейс для подключения гироскопа I<sup>2</sup>C, использует линии SCL и SDA. Прав я или нет, покажет опыт, но я соединяю эти линии с выводами модуля Arduino, обозначенными как SCL и SDA.

Еще раз проверив, что питание (вывод Vcc на плате гироскопа) подключено к выводу 3.3V на плате Arduino, я соединяю кабель с USB-портом. Обращаюсь к монитору порта, настроенному на скорость обмена данными 115200, программы Arduino, чтобы увидеть такие сообщения (рис. 15.6).

Ясно, что программа просит отправить какой-нибудь символ, что иницирует работу программы по программированию DMP. Я не знаю, что за DMP, но надеюсь, что это не испортит гироскоп. Поэтому ввожу какой-то символ с клавиатуры и нажимаю кнопку Отправить, на что программа отвечает сообщением про ожидание прерывания.

Просмотрев текст программы, я нахожу, что вывод *int* модуля гироскопа следует соединить с выводом 2 модуля

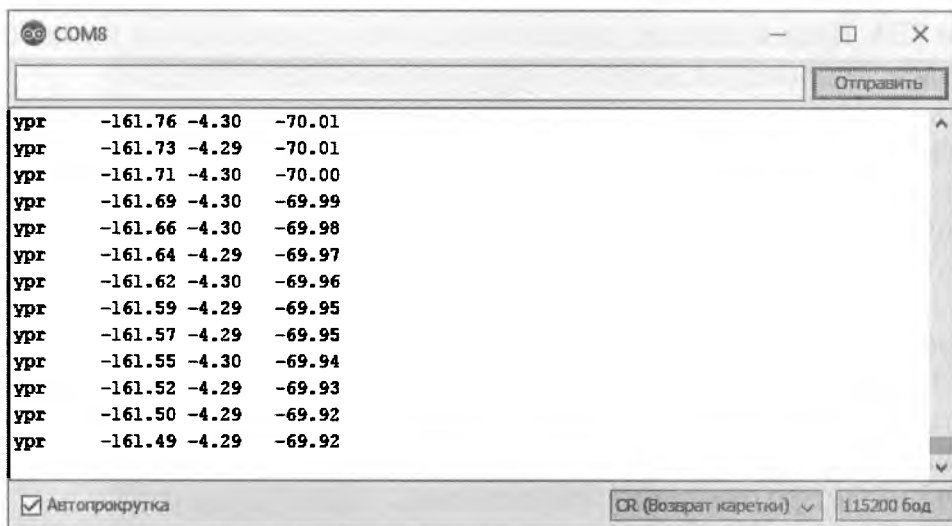




*Рис. 15.6. Первый запуск программы для гироскопа*

Arduino. Соединив эти выводы, вновь запускаю программу, отправляю символ и наблюдаю за работой программы (рис. 15.7).

Мне ясно, что гироскоп работает, но не ясно, что я получаю под загадочным для меня именем `ург`.



*Рис. 15.7. Работа программы с модулем гироскопа*



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Позже я выяснил, что ург – это сокращение от yaw/pitch/roll (рыскание/тангаж/поворот). То есть, основные параметры полета.*

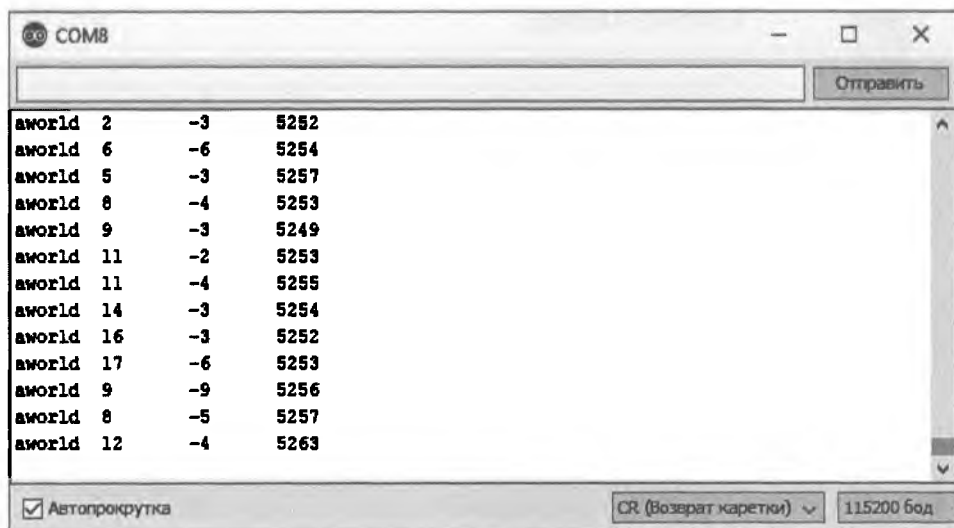
Читая комментарии к программе, я натыкаюсь на предложение раскомментировать строку `#define OUTPUT_READABLE_QUATERNION`, если я хочу увидеть кватернион в формате `[w, x, y, z]`. После удаления символов комментария в этой строке программа выводит на монитор следующие данные (рис. 15.8).

```
COMB
Отправить
ypr -166.05 -4.25 -69.33
quat 0.28 -0.24 -0.52 0.77
ypr -166.03 -4.25 -69.32
quat 0.28 -0.24 -0.52 0.77
ypr -166.02 -4.25 -69.33
quat 0.28 -0.24 -0.52 0.77
ypr -166.02 -4.25 -69.33
quat 0.28 -0.24 -0.52 0.77
ypr -166.00 -4.25 -69.33
quat 0.28 -0.24 -0.52 0.77
ypr -165.99 -4.25 -69.33
quat 0.28 -0.24 -0.52 0.77
ypr -165.98 -4.25 -69.33
Автопрокрутка CR (Возврат каретки) 115200 бод
```

Рис. 15.8. Новый вывод данных

**Новичок:** *В программе много закомментированных строк. Для чего они? Или они не нужны? Тогда зачем их оставили?*

Читая комментарии в программе дальше, я понимаю, что программа очень универсальна. Закомментировав прежнюю установку, раскомментировав новую строку, можно получить такой вывод (рис. 15.9) на мониторе порта.



*Рис. 15.9. Еще один формат вывода*



*Рис. 15.10. Результат поиска в Интернете*

**Новичок:** *В комментариях дальше упоминается еще что-то, что это?*

Не знаю, что и сказать. Похоже, гироскоп дает не только координаты в плоскости, но и координаты в пространстве — в комментариях упоминается гравитация.

Вероятно, следует обратиться к описанию модуля гироскопа, нужно внимательнее прочитать все, что написано в программе. Это правильный подход. Однако я пока не собираюсь программировать Arduino для полетов, поэтому хочу найти что-то более простое и понятное.

Введя в строку поиска на Яндексе `arduino mpu6050`, я обнаруживаю такой вариант (рис. 15.10).

Может быть, и вам пригодится ссылка на этот ресурс [22]. Автор урока использует другую библиотеку, добавив ссылку на нее в свой рассказ. Я скачиваю библиотеку, провожу манипуляции, чтобы превратить ее в zip-файл, который легко импортируется в программу Arduino.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Среди установленных ранее библиотек появляется новая, которую я назвал Kalman, когда архивировал содержимое скачанных файлов.*

Есть и пример, но он ориентирован на вывод данных через интерфейс I<sup>2</sup>C на дисплей, библиотеки которого у меня нет.

Но автор урока предлагает свою программу, которую можно скачать на его странице. Что я и делаю. Хотелось бы сказать: к своему удовольствию. Но нет.

Предыдущая программа что-то «зацепила» в настройках модуля MPU-6050, отчего монитор порта показывает мне одно и то же, как я не меняю положение модуля (рис. 15.11).

**Новичок:** *Придется, видимо, разбираться. Или нет?*



*Рис. 15.11. Работа программы из урока*

Будем разбираться. Читая обсуждение статьи, я вижу, что не только у меня все так плохо, у других не лучше. Один из участников обсуждения предлагает исправленный код программы:

```
#include <Wire.h>
#include «Kalman.h»
Kalman kalmanX;
Kalman kalmanY;
uint8_t IMUAddress = 0x68;
/* IMU Data */
int var;
int16_t accX;
int16_t accY;
int16_t accZ;
int16_t tempRaw;
int16_t gyroX;
int16_t gyroY;
int16_t gyroZ;
double accXangle; // Расчет углов, используя акселерометр
double accYangle;
double temp;
double gyroXangle = 180; // Расчет углов, используя гироскоп
```

```
double gyroYangle = 180;
double compAngleX = 180; // Расчет углов, используя компас
double compAngleY = 180;
double kalAngleX; // Расчет углов с фильтром Kalman
double kalAngleY;
uint32_t timer;
void setup() {
  Wire.begin();
  Serial.begin(9600);
  i2cWrite(0x6B,0x00); // Запрещаем ждущий режим
  kalmanX.setAngle(180); // Задаем начальные углы
  kalmanY.setAngle(180);
  timer = micros();
  var=0;
}
void loop() {
  while (var<100){
    /* Обновляем все значения */
    uint8_t* data = i2cRead(0x3B,14);
    accX = ((data[0] << 8) | data[1]);
    accY = ((data[2] << 8) | data[3]);
    accZ = ((data[4] << 8) | data[5]);
    tempRaw = ((data[6] << 8) | data[7]);
    gyroX = ((data[8] << 8) | data[9]);
    gyroY = ((data[10] << 8) | data[11]);
    gyroZ = ((data[12] << 8) | data[13]);
    /* Рассчитываем углы, основываясь на разных датчиках и
    алгоритмах */
    accYangle = (atan2(accX,accZ)+PI)*RAD_TO_DEG;
    accXangle = (atan2(accY,accZ)+PI)*RAD_TO_DEG;
    double gyroXrate = (double)gyroX/131.0;
    double gyroYrate = -((double)gyroY/131.0);
    gyroXangle += kalmanX.getRate()*((double)(micros()-
    timer)/10000); // Расчет углов гироскопа, используя
    // несмещенную скорость
    gyroYangle += kalmanY.getRate()*((double)(micros()-
    timer)/10000);
    kalAngleX = kalmanX.getAngle(accXangle, gyroXrate,
    (double)(micros()-timer)/10000);
    // Расчет углов,
    // используя фильтр Kalman
```

```

kalAngleY = kalmanY.getAngle(accYangle, gyroYrate,
(double)(micros()-timer)/10000);
timer = micros();
var++;}
uint8_t* data = i2cRead(0x3B,14);
accX = ((data[0] << 8) | data[1]);
accY = ((data[2] << 8) | data[3]);
accZ = ((data[4] << 8) | data[5]);
tempRaw = ((data[6] << 8) | data[7]);
gyroX = ((data[8] << 8) | data[9]);
gyroY = ((data[10] << 8) | data[11]);
gyroZ = ((data[12] << 8) | data[13]);
/* Расчет углов на базе разных датчиков и алгоритмов */
accYangle = (atan2(accX,accZ)+PI)*RAD_TO_DEG;
accXangle = (atan2(accY,accZ)+PI)*RAD_TO_DEG;
double gyroXrate = (double)gyroX/131.0;
double gyroYrate = -((double)gyroY/131.0);
gyroXangle += kalmanX.getRate()*((double)(micros()-
timer)/1000000); // Расчет углов гироскопа, используя
// несмещенную скорость
gyroYangle += kalmanY.getRate()*((double)(micros()-
timer)/1000000);
kalAngleX = kalmanX.getAngle(accXangle, gyroXrate,
(double)(micros()-timer)/1000000);
// Расчет углов, используя
// фильтр Kalman
kalAngleY = kalmanY.getAngle(accYangle, gyroYrate,
(double)(micros()-timer)/1000000);
timer = micros();
Serial.println();
Serial.print («X:»);
Serial.print(kalAngleX,0);
Serial.print (« »);
Serial.print («Y:»);
Serial.print(kalAngleY,0);
Serial.println (« »);
// Максимальная скорость выборки акселерометра 1kHz
delay (1000);}
void i2cWrite(uint8_t registerAddress, uint8_t data){
Wire.beginTransmission(IMUAddress);
Wire.write(registerAddress);

```

```
Wire.write(data);
Wire.endTransmission(); // Отправляем stop
}
uint8_t* i2cRead(uint8_t registerAddress, uint8_t
nbytes) {
uint8_t data[nbytes];
Wire.beginTransmission(IMUAddress);
Wire.write(registerAddress);
Wire.endTransmission(false); // Не освобождайте шину
Wire.requestFrom(IMUAddress, nbytes); // Отправляем
повторный
// start и затем освобождаем шину после чтения
for(uint8_t i = 0; i < nbytes; i++)
data [i]= Wire.read();
return data;
}
```

В этом варианте модуль реагирует на положение (рис. 15.12).

Казалось бы, что еще желать? Но в какой-то момент на мониторе появляется:

180×180.

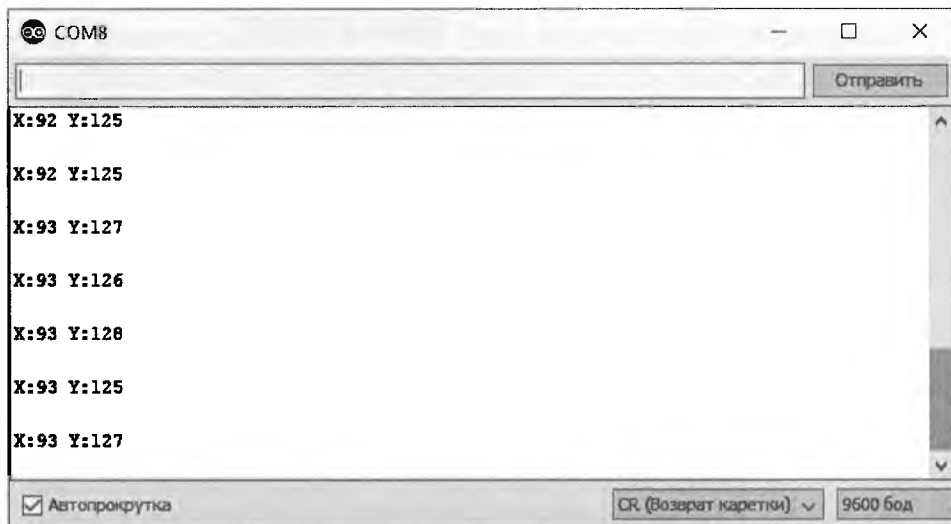


Рис. 15.12. Работа модифицированной программы



И все вновь останавливается. Поскольку модуль соединен с Arduino проводами, я не могу исключить потери связи.

**Новичок:** *Получается — любопытство любопытством, но изучение мат. части никто не отменял?*

Похоже, мой воображаемый собеседник еще и язвит... После некоторой возни с датчиком у меня даже появляется мысль, не лучше бы было, если бы сыну подарили вертолет, а не квадрокоптер? Может, с вертолетом было бы проще разобраться?

## || Может проще || создать вертолет?

Похоже, у всех, кто начинает интересоваться беспилотниками, появляется такая же мысль. У моего собеседника, новичка, она возникла быстро.

**Новичок:** *А не проще ли мне сделать вертолет?*

А вертолет будет летать сам? Ему не нужны датчики? Ему не нужно разбираться с датчиками, потому что винт один, а на хвост можно веревочку накинуть?

Все не так просто!



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Вертолету тоже понадобится гироскоп. Он нужен для того, чтобы правильно сориентировать вертолет в пространстве, без него вертолет может перевернуться, может завалиться набок. Добавьте к этому ветер, который тоже сказывается на полете модели. Обязательным для вертолета будет автомат перекоса несущего винта. Добавьте к нему рулевой винт.*

Процесс подъема вертолета в небо и сам полет происходит вследствие того, что изменяется угол атаки несущих лопастей, что синхронизировано с тягой двигателя. Для этой синхронизации и служит автомат управления углом атаки, или «автомат перекоса», рассмотренный ранее в **главе 8**. Он достаточно сложен, самодельный автомат перекоса вертолета сделать не так-то просто. Не так просто собрать раму, сделать винты и корпус.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Все происходит у модели так же, как мы уже знаем, происходит у настоящих вертолетов (глава 8).*

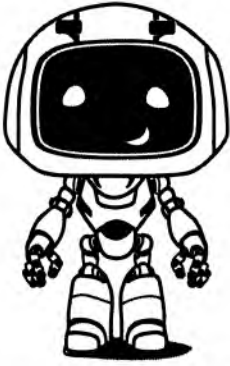
Добавьте к этому тот же бортовой компьютер, элементы радиоуправления, сервоприводы и аккумулятор. Над каждым элементом конструкции придется хорошо поразмыслить.

С вертолетом все гораздо сложнее, чем с квадрокоптером!



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Написав и прочитав написанное в этой главе, я понял, что лучше продолжать разбираться с квадрокоптером. И у меня возник вопрос о том, как беспилотник летает тогда, когда его не видно?*



# БЕСПИЛОТНИК БЕЗ ПРИСМОТРА

## || Самостоятельный полет беспилотника

**Новичок:** *При управлении беспилотником-игрушкой я могу видеть, куда я хочу его направить. Но если дать команду взлетать, аппарат поднимается, и его не видно. Не будет ли он подниматься до тех пор, пока его занесет в космос?*

Любой летательный аппарат имеет прибор, показывающий высоту. У беспилотника этой цели служит барометр, который показывает высоту полета. Есть такой модуль. Более того, добавляют компас и используют **GPS**. А всем этим управляет бортовой компьютер. В него могут заноситься полетные данные, которым он будет неукоснительно следовать.

Опытные моделисты советуют начинающим купить готовый полетный контроллер. Например, в Интернет-магазине ридиоуправляемых моделей RC MyAIR [15] можно найти такие модели.

**MultiWii 328P** представляет собой контроллер мультикоптера с базовой инерциально-навигационной системой, который может быть запрограммирован соответственно вашим требованиям. Эта версия MultiWii контроллера имеет под-

держку спутниковых приемников DSM2\*. С расширенными возможностями и возможностью полного программирования это устройство может контролировать любой тип самолета. Это идеальный контроллер полета для ваших многороторных авиамodelей.

Контроллер **Pixhawk PX4 32-bit Open Source Autopilot Flight Controller** (полетный автопилот-контроллер с открытым кодом) V2.4.8 с **Safety Switch Buzzer**. Совместим с **Alexmos2.2** или микропрограммным обеспечением ниже, совместим с новейшим микропрограммным обеспечением **German BruGi\_050**, по умолчанию подсказки прошивки **Russian2.2**. Новое поколение 32-битовых процессоров с надежным управлением, модуль интегрирован с **PX4FMU + PX4IO**.

Но, если вы достаточно опытны в обращении с электроникой, вы можете собрать свой бортовой компьютер на **Arduino [2]**.

Собственно, если говорить о беспилотном полете, то начать его следовало бы с взлета, а завершить посадкой. Я не задумывался об этом, но будь то самолет или вертолет — каждому из них нужно подняться в воздух, чтобы безопасно начать маневрировать.

**Новичок:** *А барометр? Он же показывает высоту полета?*

## Возможности датчиков расстояния ||

Не думаю, что барометр позволит различить атмосферное давление на расстоянии в несколько десятков сантиметров, что было бы достаточно для авиамodelи, имеющей небольшие габариты.

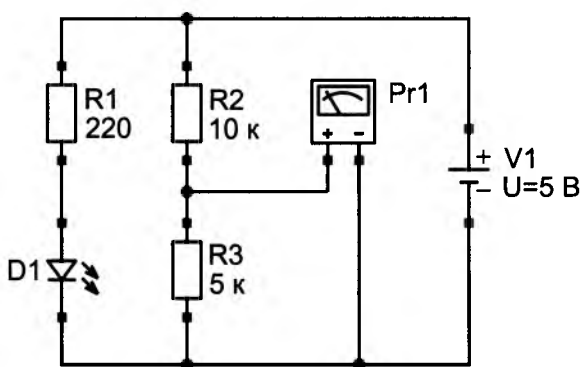
Из датчиков расстояния я знаю, например, датчики с фотоприемником и излучателем света. Сегодня есть светодиоды очень яркие, а фотоприемники достаточно чувствительные. Свет, излучаемый светодиодом, отражается от препятствия и попадает в фотоэлемент.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Чем ближе датчик к препятствию, тем больше сигнал от фотоприемника.*

Можно провести такой опыт (**рис. 16.1**): включим фоторезистор R3 с дополнительным резистором, включим светодиод с токоограничительным резистором и будем измерять с помощью АЦП модуля Arduino падение напряжения на фоторезисторе.



**Рис. 16.1.** Схема опыта с фотодатчиком

Начальное сопротивление фоторезистора будет определять в этом опыте внешняя засветка. Программа для Arduino достаточно лаконична:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600); // инициализация монитора порта
}
void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0); // чтение напряжения
  Serial.println(sensorValue);
  // вывод значения на монитор порта
  delay(1000); // пауза в 1 секунду
}
```

В качестве отражателя можно использовать зеркало, получив такие результаты (**рис. 16.2**).

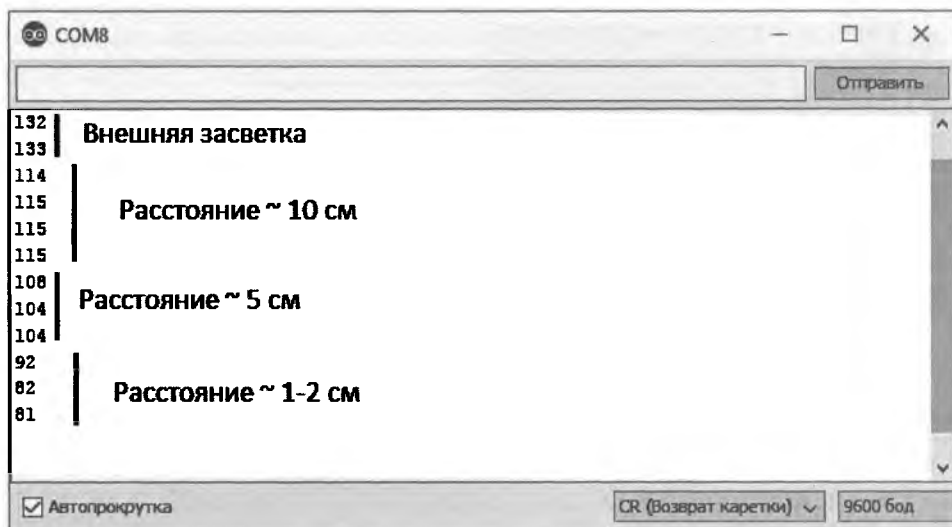


Рис. 16.2. Опыт с оптопарой

Хотя на улице пасмурно, внешняя засветка существенно влияет на результаты проведения эксперимента. Однако и без влияния внешней засветки можно сказать, что в таком режиме датчик будет отображать расстояние в 10—20 см. Можно попробовать питание светодиода импульсным напряжением, так работают пульты телевизоров, но телевизору нужно только получить сигнал управления, а нам нужно измерять расстояние.

**Новичок:** *А есть другие датчики?*

## Используем ультразвуковой датчик

Есть другой датчик, который предназначен для измерения расстояния: ультразвуковой датчик, работа которого основана на измерении времени прохождения звуковым импульсом расстояние от излучателя до преграды и обратно. Когда-то я купил несколько штук на Алиэкспресс, его и сегодня можно купить, стоит он недорого (рис. 16.3).



Рис. 16.3. Ультразвуковой датчик

### Новичок: И чем хорош такой датчик?

К достоинству датчика относится то, что на результат измерения не влияет погода за окном, ни солнечная, ни пасмурная. На точность измерения, правда, влияет температура воздуха, что не мешает использовать датчики в автомобильных устройствах парковки. Измерять расстояния от 3 см до 60 см с погрешностью в 3 мм — это совсем неплохо.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*При увеличении расстояния до 5 метров погрешность возрастает, это так, но нужна ли такая точность при взлете и посадке модели?*

У датчика четыре вывода:

- ♦ два из них предназначены для питания, что естественно;
- ♦ два других являются выводами управления.

На вывод, обозначенный как *Trig*, подается короткий импульс высокого уровня 10—15 мкс. Следуя «заявке», датчик отправляет несколько коротких звуковых сигналов на частоте 40 кГц, которые принимает приемник датчика. Если препят-

ствии не обнаружено, то на выходе, обозначенном как *Echo*, формируется импульс длительностью около 38 миллисекунд.

Я предполагаю проверить работу этого датчика с модулем Arduino, поскольку есть программа, которая по принятому результату определяет расстояние. Конечно, зная скорость распространения звука в воздухе, можно и самому рассчитать это расстояние.

**Новичок:** *Но есть ли смысл изобретать велосипед?*

Среди примеров, полученных с программой Arduino, я не нахожу нужного раздела, поэтому, как обычно, обращаюсь к поиску в Интернете. Это вскоре приносит свои плоды — я скачиваю нужный файл библиотеки UltraSonic (Ultrasonic-HC-SR04-master.zip).

У программы Arduino есть возможность добавить подобный архив библиотеки:

Скетч → Подключить библиотеку →  
Добавить .ZIP библиотеку.

Но предварительно нужно распаковать полученный файл и добраться до самой библиотеки, которую вновь заархивировать. Теперь достаточно указать этот файл архива, чтобы получить желаемое (рис. 16.4). Как обычно, этот процесс дольше описывать, чем реализовывать.

В папке с библиотекой есть примеры, в частности есть пример работы с датчиком, а результат выводится на монитор порта:

```
#include <Ultrasonic.h>
Ultrasonic ultrasonic(9,8); // (вывод Trig, вывод Echo)
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  Serial.print(ultrasonic.Ranging(CM)); // CM или INC
  Serial.println(« cm» );
  delay(1000);
}
```





*Рис. 16.4. Библиотека ультразвукового датчика*



*Рис. 16.5. Результаты работы ультразвукового датчика на экране монитора порта*

Подключение датчика к модулю Arduino должно быть ясно из комментария программы, где не указано только подключение к выводам Arduino +5 В и GND. Если препятствия не обнаруживается, то программа дает значение в 51 см. Приближая ладонь к датчику, я получаю такие результаты (рис. 16.5).

**Новичок:** *Что ж, расстояния в полметра, пожалуй, достаточно даже для довольно большой модели самолета или вертолета. Я не говорю про игрушку-квадрокоптер.*

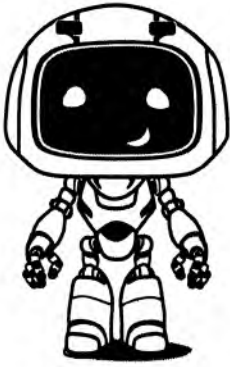
Но такую игрушку можно снабдить вторым датчиком, расположенным сверху, чтобы игрушка не долетала до потолка. Интересно, так ли устроена сломавшаяся игрушка?..



### **ВЫВОД.**

*Ультразвуковой датчик хорошо использовать при взлете и посадке. Но после взлета, наверное, высоту определяют барометром.*

И такой модуль у меня тоже есть.



# ВЫСОТА ПОЛЕТА или МОДУЛЬ БАРОМЕТРА

## Используем модуль барометра

Как во многих случаях, эксперимент начинается с загрузки библиотеки [17]. Модуль работает через интерфейс I<sup>2</sup>C, с которым мы знакомы. Библиотек функций для барометра, как и для других модулей, нашлось две.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Главное, оба файла после распаковки обнаруживают примеры работы с модулем.*

Например, проверим такую тестовую программу (хотя модель и другая):

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP085.h>
/* This is an example for the BMP085 Barometric
Pressure & Temp Sensor. Designed specifically to work
with the Adafruit BMP085 Breakout ----> https://www.adafruit.com/products/391
```

These displays use I2C to communicate, 2 pins are required to interface.  
Adafruit invests time and resources providing this open source code, please support Adafruit and open-source hardware by purchasing products from Adafruit!  
Written by Limor Fried/Ladyada for Adafruit Industries.  
BSD license, all text above must be included in any redistribution \*/

```
// Подключите VCC модуля BMP085 к 3.3V (НЕ К 5.0V!)
// Соедините GND с GND Arduino
// Соедините SCL на '168/' 328 Arduino Uno с выводом A5
// Соедините SDA на '168/' 328 Arduino Uno с выводом A4

Adafruit_BMP085 bmp;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  if (!bmp.begin()) {
    Serial.println(«Could not find a valid BMP085 sensor,
check wiring!»);
    while (1) {}
  }
}

void loop() {
  Serial.print(«Temperature = «);
  Serial.print(bmp.readTemperature());
  Serial.println(« *C»);
  Serial.print(«Pressure = «);
  Serial.print(bmp.readPressure());
  Serial.println(« Pa»);

  // Рассчитываем высоту по принятой «стандартной» барометрии
  // давление 1013.25 millibar = 101325 Pascal
  Serial.print(«Altitude = «);
  Serial.print(bmp.readAltitude());
  Serial.println(« meters»);
  Serial.print(«Pressure at sealevel (calculated) = «);
  Serial.print(bmp.readSealevelPressure());
  Serial.println(« Pa»);
```

```
// вы можете получить более точное измерение высоты,  
// если вы знаете текущее давление по уровню моря, которое  
// может меняться с погодой и т.п. Если оно 1015 millibars,  
// это эквивалентно 101500 Pascals.  
Serial.print(«Real altitude = »);  
Serial.print(bmp.readAltitude(101500));  
Serial.println(« meters»);  
Serial.println();  
delay(500);  
}
```

Загрузив программу в модуль Arduino, конечно, после того, как сам модуль барометра был правильно подключен к Arduino, открываем окно монитора, чтобы прочесть данные, полученные от модуля барометра (рис. 17.1).

**Новичок:** *Мне, наверное, должно быть стыдно, но давление в 99232 паскалей мне ни о чем не говорит.*

Мне тоже. Радует, что мир не без добрых людей — нахожу в Интернете программу перевода с языка науки на язык обывателя (вреде меня), получаю ответ:

744,2882645025 мм ртутного столба.

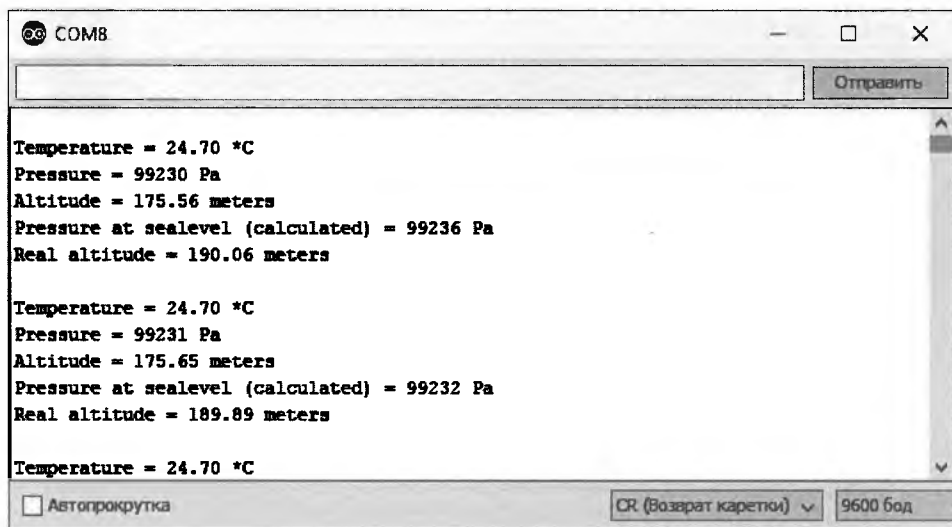
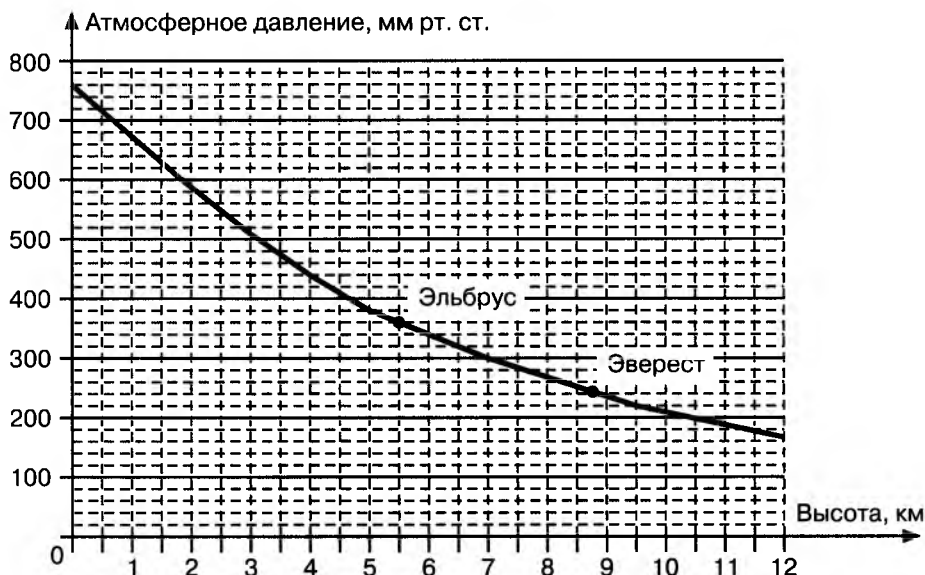


Рис. 17.1. Данные тестовой программы от Adafruit



**Рис. 17.2.** График зависимости атмосферного давления от высоты

Сравниваю это с показанием домашнего барометра, который тоже пользуется этим «столбом»: 742 мм. Пересчет осуществлялся при 0 °С, а мой модуль показывает, что температура 24,7 °С. И обычный барометр, висящий на стене, имеет право на ошибку. Главное, показания двух барометров похожи.

Но мир и не без злых людей. Бродя по Интернету, чтобы познакомиться с определением высоты по атмосферному давлению, нахожу рассказ о соотношении высоты и давления, которое, оказывается, нелинейно. И график зависимости такой (рис. 17.2).



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Что ж, если учитывать, что атмосферное давление зависит от погоды, учитывая, что оно может измениться в течение дня, то подобная нелинейность не будет помехой для моей игрушки (если и когда она вновь поднимется в воздух).*

## || Определение высоты || в реальном самолете

Мне никогда не приходило в голову задуматься, как определяется высота при полете реального самолета, для которого она очень важна. Заглянем в Большую Советскую Энциклопедию. Читаем там следующее.

**ВЫСОТОМЕР** – авиационный, прибор для измерения высоты полета летательного аппарата над землей. Различают барометрические высотомеры и радиовысотомеры. Принцип действия барометрический. Высотомер основан на однозначной зависимости атмосферного давления от высоты полета.

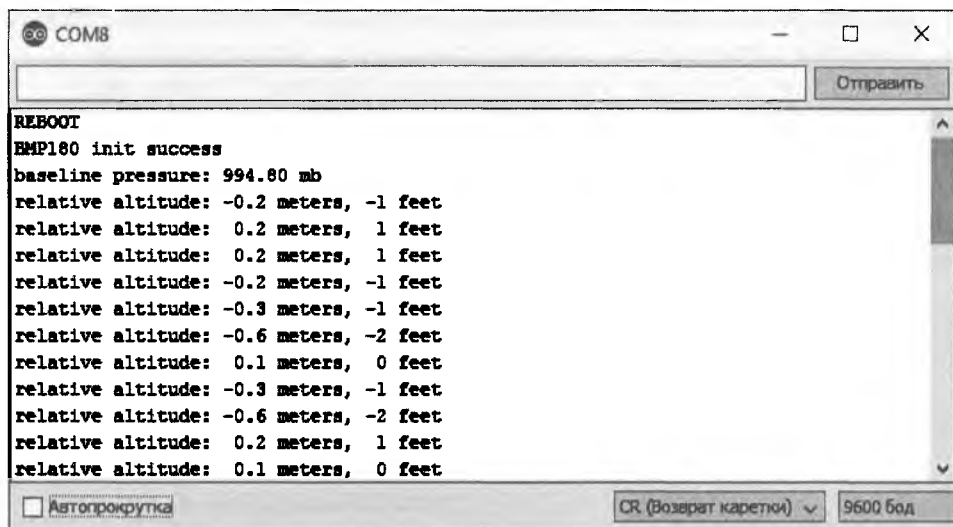
Давление воспринимается anerоидной коробкой высотомера. Ее деформация, пропорциональная изменению давления, а, следовательно, и высоте полета, посредством системы рычагов вызывает соответствующий поворот стрелок прибора. Шкала прибора градуируется в километрах, сотнях и десятках метров высоты. Высотомер имеет кремальеру для принудительного поворота стрелок прибора.

С ее помощью прибор может быть установлен на показания абсолютной высоты (высоты относительно уровня, на котором давление  $101325 \text{ н/м}^2 = 760 \text{ мм рт. ст.}$  и температура  $15^\circ\text{C}$ ), относительной высоты (высоты относительно места взлета) и истинной высоты (высоты над пролетаемой местностью).

Принцип действия радиовысотомера основан на измерении времени между посылкой и приемом электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве с постоянной скоростью. Показания радиовысотомера соответствуют истинной высоте полета. А. Л. Горелик.

Статью я прочитал, сознаюсь, с интересом, отложив другие, не менее интересные, дела. Но вот, что я нашел в примерах другой библиотеки функций (рис. 17.3).

**Новичок:** А в разных программах давление одинаковое?



*Рис. 17.3. Работа программы, определяющей относительную высоту*

Проверим. Миллибары и миллиметры ртутного столба связаны соотношением:

$$1000 \text{ мб} = 750,064 \text{ мм рт. ст.}$$

Можно рассчитать:

$$(994,8/1000) \times 750,064 = 746,1636672.$$

Но для людей ленивых, как я, можно найти в Интернете калькулятор:

$$994,80 \text{ мб} = 746,163452 \text{ мм рт. ст.}$$

Вот эта программа:

```

/* SFE_BMP180 altitude example sketch
Этот скетч показывает вам, как использовать Bosch
BMP180 датчик давления в качестве альтиметра.
https://www.sparkfun.com/products/11824
Подобно большинству датчиков давления BMP180 измеряет
абсолютное значение давления. Но оно меняется с
высотой, поэтому вы можете использовать эти данные для
получения значения высоты.
  
```



Но давление также меняется с погодой, поэтому вы должны вначале определить опорное давление, известное как `baseline altitude` (базовая линия высоты). Затем вы сможете измерять изменение этого давления с высотой.

Подключение модуля

- (GND) to GND

+ (VDD) to 3.3V

(ВНИМАНИЕ: не подключайте модуль к 5V, что может привести к его повреждению!)

Вам предстоит также соединить выводы I2C интерфейса (SCL и SDA) к вашему Arduino. Выводы могут различаться у разных моделей Arduino:

У некоторых Arduino помечены вывод: SDA SCL

Uno, Redboard, Pro: A4 A5

Mega2560, Due: 20 21

Leonardo: 2 3

Оставьте вывод, если он есть, IO (VDDIO) свободным. Этот вывод предназначен для соединения BMP180 с системой, где низкий логический уровень такой, как 1.8V.

Развлекайтесь! – Ваши друзья из SparkFun.

Библиотека `SFE_BMP180` использует уравнения с данными с плавающей точкой, разработанные проектом Weather Station Data Logger: <http://wmrx00.sourceforge.net/>

Наш пример кода использует «beerware» лицензию. Вы можете творить с ним все, что захочется. Нет, действительно, все, что угодно. А, если сочтете его полезным, можете купить мне когда-нибудь пива.

V10 Mike Grusin, SparkFun Electronics 10/24/2013

V1.1.2 Updates for Arduino 1.6.4 5/2015

\*/

// Ваш скетч должен #include эту библиотеку и

// библиотеку Wire.

```
// (Wire - это стандартная библиотек, включенная в Arduino.):

#include <SFE_BMP180.h>
#include <Wire.h>

// Вам нужно создать SFE_BMP180 объект,
// здесь именуемый «pressure»:
SFE_BMP180 pressure;

double baseline; // давление базовой линии, baseline

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(«REBOOT»);
  // Инициализация датчика (важно получить калибровочные
  // значения, запоминаемые устройством).
  if (pressure.begin())
  Serial.println(«BMP180 init success»);
  else -----
  {
    // Стоп, что-то пошло не так, как правило,
    // это проблемы с соединением, посмотрите комментарии
    // выше, проверьте правильность подключения.
    Serial.println(«BMP180 init fail (disconnected?)\n\n»);
    while(1); // Pause forever.
  }
  // Получим давление базовой линии:
  baseline = getPressure();
  Serial.print(«baseline pressure: «);
  Serial.print(baseline);
  Serial.println(« mb»);
}

void loop()
{
  double a,P;
  // Получим новое прочитанное давление:

  P = getPressure();
```

```
// Покажем разностную относительную высоту между
// новым считыванием и считыванием базовой линии:

a = pressure.altitude(P,baseline);

Serial.print(«relative altitude: «);
if (a >= 0.0) Serial.print(« »); // добавим пробел для
// положительных значений
Serial.print(a,1);
Serial.print(« meters, «);
if (a >= 0.0) Serial.print(« »); // добавим пробел для
// положительных значений
Serial.print(a*3.28084,0);
Serial.println(« feet»);

delay(500);
}
double getPressure()
{
char status;
double T,P,p0,a;

// Вы должны вначале выполнить измерение температуры,
// чтобы выполнить чтение давления.
// Начинаем измерение температуры:
// Если запрос успешен, требуется некоторое количество ms,
// чтобы дождаться ответа.
// Если запрос неудачен, вернется 0.

status = pressure.startTemperature();
if (status != 0)
{
// Ждем завершения измерения:
delay(status);

// Извлекаем завершенное измерение температуры:
// Заметьте, что измерение сохраняется в переменной T.
// Используйте '&T' для передачи адреса T в функцию.
// Функция возвращает 1,если все удачно, и 0, если нет.

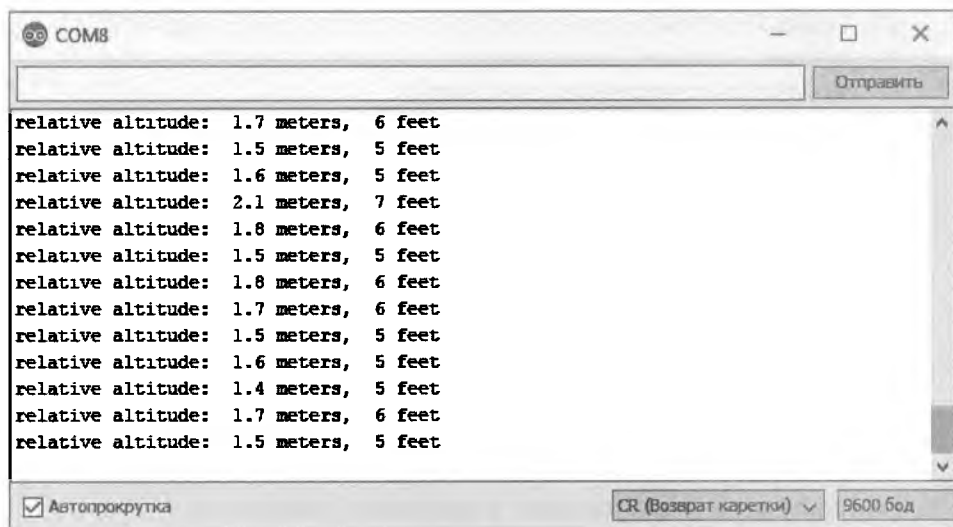
status = pressure.getTemperature(T);
```

```
if (status != 0)
{
// Начинаем измерение давления:
// Параметр является установкой дискредитации, от 0 до 3
// (выше разрешение, дольше ждать).
// Если запрос удачен, возвращается количество ms ожидания.
// Если запрос неудачен, возвращается 0.

status = pressure.startPressure(3);
if (status != 0)
{
// Ждать завершения измерения:
delay(status);

// Извлекаем завершенное измерение давления:
// Заметьте, что измерение сохраняется в переменной P.
// Используйте '&P', чтобы передать адрес P.
// Заметьте также, что функция требует предыдущего
// измерения температуры (T).
// (Если температура стабильна, вы можете делать одно
// измерение температуры для нескольких измерений давления.)
// Функция возвращает 1, если все хорошо, и 0, если нет.

status = pressure.getPressure(P,T);
if (status != 0)
{
return(P);
}
else Serial.println(«error retrieving pressure
measurement\n»);
}
else Serial.println(«error starting pressure
measurement\n»);
}
else Serial.println(«error retrieving temperature
measurement\n»);
}
else Serial.println(«error starting temperature
measurement\n»);
}
```



*Рис. 17.4. Изменения данных при перемещении датчика*

И вот, чем меня программа заинтересовала (рис. 17.4).

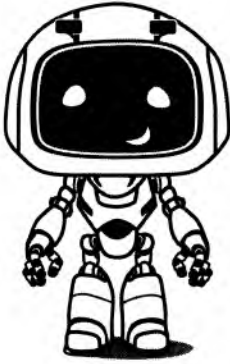
Вы догадались! Я поднял датчик вместе с модулем Arduino на высоту около 2 метров. То есть, если вы используете датчик на своем беспилотнике, вы сможете использовать относительную высоту по стартовой позиции, а не измерять ее относительно уровня моря. Я, к слову, удивился, что смотрю из окна на высоте около 190 метров (рис. 17.1), это, видимо, от того, что моря из моего окна не видно.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Ошибка измерения высоты в 0,5 метров, наверное, не столь важна при полете на высоте 100 метров, но теперь мне становится ясно, что при посадке лучше использовать ультразвуковой датчик.*

При размышлениях о высоте полета, я заинтересовался самым маршрутом. И я решил посмотреть, как работает GPS.



# ПРОКЛАДЫВАЕМ И КОНТРОЛИРУЕМ МАРШРУТ, ИСПОЛЬЗУЕМ GPS

Для солидных беспилотников можно использовать GPS-навигатор, чтобы отслеживать маршрут передвижения. Относительно недорогую модель можно купить на Алиэкспресс (рис. 18.1).



Рис. 18.1. GPS-трекер



## ПРИМЕЧАНИЕ.

*Работа навигатора требует наличия SIM-карты, поскольку команды отправляются через SMS-сообщения, так же приходит ответ.*

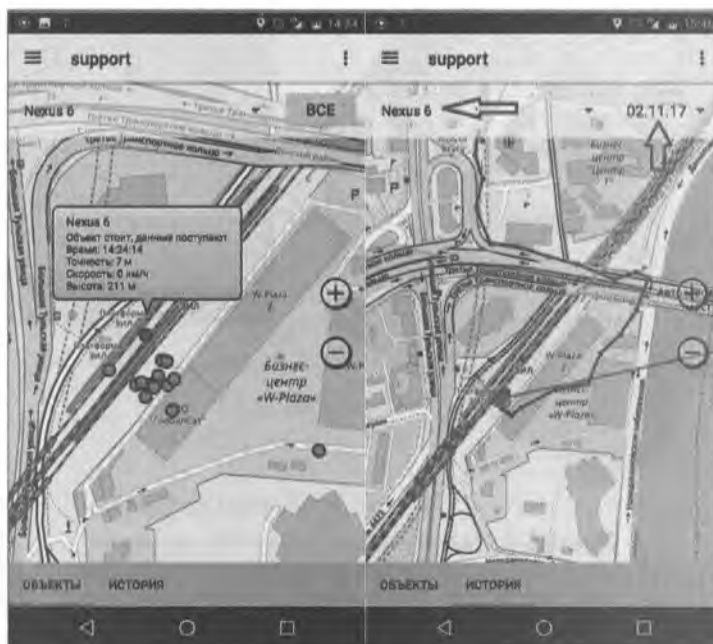
Если верить описанию, формат команды выглядит так:

begin123456

Здесь **123456** — это пароль «по умолчанию», который вы можете изменить при настройке. Настройка описана в руководстве, там же вы найдете команду записи номера управляющего телефона.

Навигатор при наличии подключения к Интернету вашего тарифного плана у вашего провайдера может обращаться к серверу (рис. 18.2), например, для получения информации о маршруте.

Рис. 18.2. Сайт, предлагающий услуги GPS-навигации



*Рис. 18.3. Отображение маршрута через GPS-навигатор*

Для личного пользования услуга может быть бесплатной. Располагая планшетом или смартфоном, вы получите маршрут на карте (рис. 18.3).



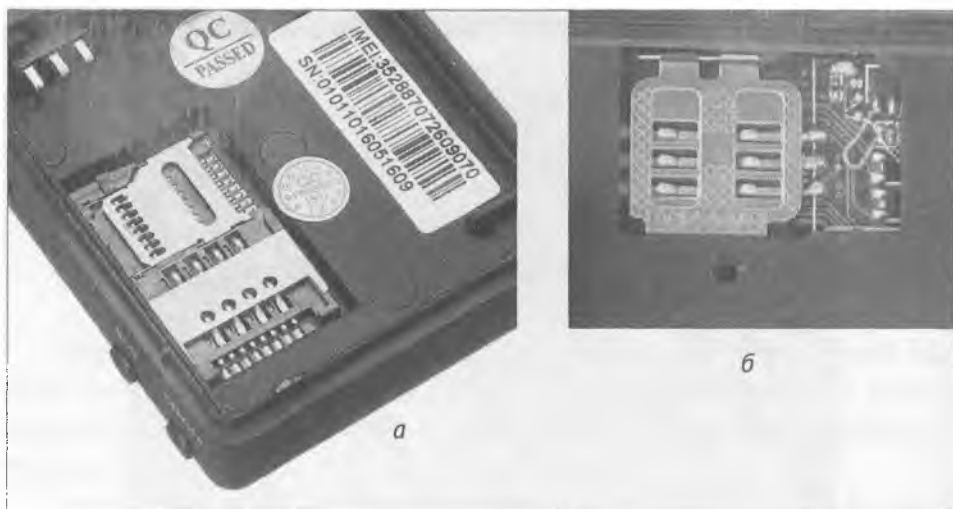
### СОВЕТ.

*Если вы решите купить GPS-трекер, то обратите внимание перед покупкой на гнездо для SIM-карты (рис. 18.4).*

Оба гнезда правильные, но первое, похоже, предназначено для установки карты одного образца, тогда как в руководстве гнездо для карты другого образца.

**Новичок:** *Можно ли использовать любую карту в любом гнезде?*





**Рис. 18.4.** Разные гнезда для SIM-карты:  
 а) гнездо для SIM-карты у трекера на Алиэкспресс;  
 б) гнездо для SIM-карты в руководстве

Это предстоит выяснять отдельно.



### **ВНИМАНИЕ.**

*Ваша модель будет работать с GPS-навигатором только там, где есть уверенная связь с вашим провайдером.*

Подумайте — нужно ли это вам? А при наличии желания использовать навигатор, посмотрите, не сможете ли вы найти GPS-модуль, который поддерживал бы работу с Arduino, например, такой (рис. 18.5).

Есть над чем подумать!?

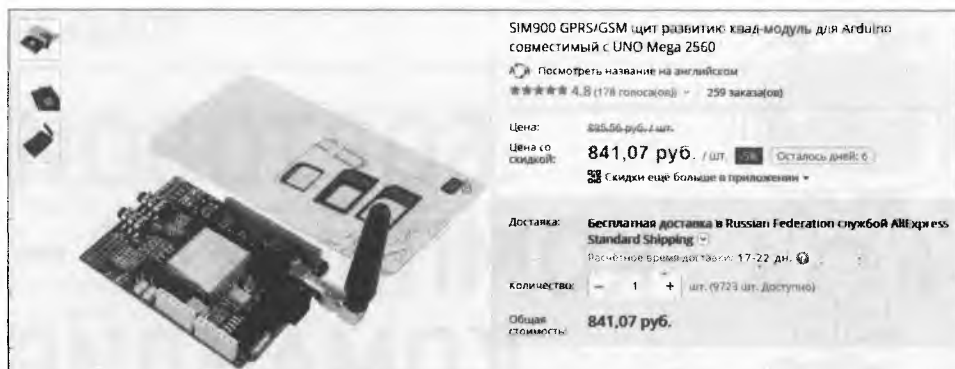


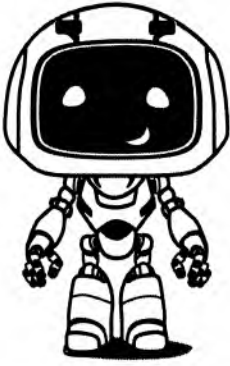
Рис. 18.5. GPS-модуль для Arduino



### ВНИМАНИЕ.

*Если законодательство, касающееся незаконного использования электронных средств слежения без разрешения суда, не изменилось, то использование трекера может повлечь за собой уголовное преследование.*

Да, гироскоп, барометр и GPS, но что было про бортовой компьютер (полетный контроллер)?



# БОРТОВОЙ КОМПЬЮТЕР – КОМАНДИР КВАДРОКОПТЕРА

Рассмотренные мною датчики дали мне некоторое представление о том, как может быть обустроен беспилотник, будь то самолет или квадрокоптер, катер или фрегат. Но датчики не могут управлять работой аппарата.

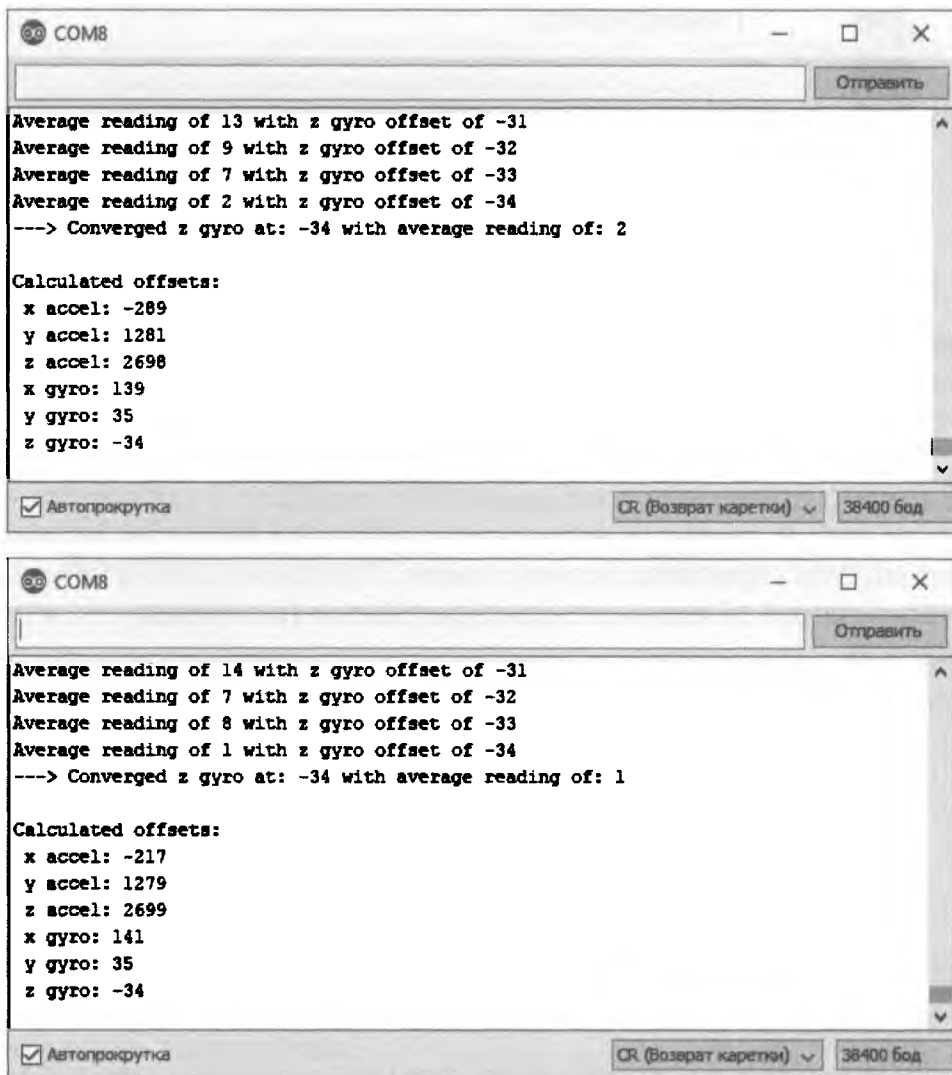
**Новичок:** *Поэтому все опыты были с Arduino?*

Да. Датчики нужно подключить к бортовому компьютеру. Сегодня даже автомобиль имеет компьютер.

Одна из статей в Интернете, описывающая сборку собственного квадрокоптера на Arduino, показалась мне проще остальных, ее я и стал читать, повторяя рекомендации.

Первое, что предстояло сделать — откалибровать гироскоп-датчик. Программа калибровки называется MPU6050\_calibration.ino. У меня не получилось найти zip-файл с программой. Поэтому я скопировал найденный по имени программы текст, открытый в браузере, непосредственно в новый файл программы Arduino.

После того, как программа была загружена в Arduino Uno с подключенным модулем три6050, после того, как программа отобразила в мониторе порта весь процесс своей работы и



*Рис. 19.1. Результаты калибровки гироскопа*

завершила его, я сделал снимок экрана для сохранения полученных данных. Позже я засомневался в чем-то, и повторил все еще раз, сделав второй снимок экрана (рис. 19.1).

Результаты с небольшим разбросом одинаковы. А нужна калибровка, как следует из статьи, для добавления этих данных в программы, связанные с гироскопом, поскольку получены при горизонтальном расположении датчика.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Я уже пробовал подключать гироскоп-датчик к Arduino, загружать программы, наблюдал на мониторе что-то, что, сказать по правде, не понял в полной мере.*

Следуя рекомендации, я копирую из браузера предлагаемый текст программы (автор дает ссылку на эту программу), вставляю в новый скетч, загружаю программу в модуль Arduino. Что делать дальше я пока не знаю, поэтому включаю монитор...

Мне уже знакомо предложение ввести любой символ. Знакомо появление сообщения, что ожидается первое прерывание. Я пытаюсь вспомнить, как подключается вывод *int* модуля гироскопа, но не помню. Приходится отыскивать упоминание об этом в тексте программы (я переведу то, что нашел).



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*В дополнение к подключению 3,3V, GND, SDA и SCL этот скетч зависит от вывода MPU-6050 INT, который должен соединяться с выводом внешнего прерывания Arduino #0. Для Arduino Uno и Mega 2560 это вывод I/O 2.*

Отыскивая, к какому выводу следует подключить прерывание, просматривая текст программы и сравнивая его с текстом предыдущей, я нахожу почти сразу отличие:

```
#include <I2Cdev.h>
#include <PID_v1.h>
```

Я давно скачал и добавил библиотеки I2Cdev и PID, видимо, по этой причине компиляция программы управления квадрокоптером не дала мне знать, что есть отличия программы от прежних программ. Продвигаясь дальше по тексту программы,

я нахожу место, где следует ее подправить по результату калибровки, как и было написано в статье:

```
// загрузить и конфигурировать DMP
(DigitalMotionProcessing)
Serial.println(F(«Initializing DMP...»));
devStatus = mpu.dmpInitialize();

// подставьте ваши собственные поправки гироскопа,
// масштабированные для минимальной чувствительности
mpu.setXAccelOffset(-289);
mpu.setYAccelOffset(1281);
mpu.setZAccelOffset(2698);
mpu.setXGyroOffset(139);
mpu.setYGyroOffset(35);
mpu.setZGyroOffset(-34);

// убедитесь, что это работает (возвращает 0, если так)
```

Вот зачем нужно было калибровать гироскоп. И, наконец, есть текст, который позволит мне подключить осциллограф, чтобы проверить, как работает программа:

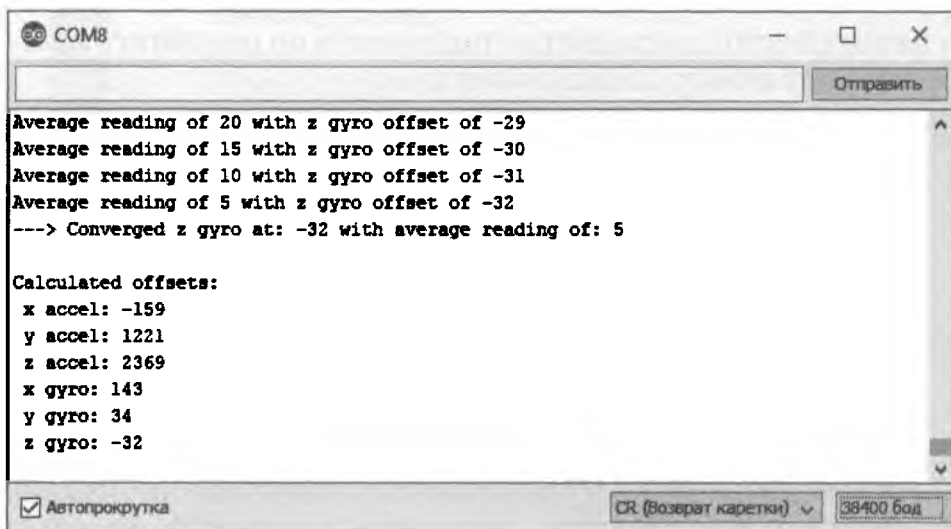
```
const int prop1 = 9;
const int prop2 = 5;
const int prop3 = 6;
const int prop4 = 3;
```

Константы `prop1...prop4`, как я понимаю, относятся к четырем винтам квадрокоптера, а 9, 5, 6 и 3 — это выводы ШИМ Arduino, которые будут через транзисторы управлять коллекторными двигателями.

Для полной уверенности в правильности своих действий я повторяю калибровку (рис. 19.2).

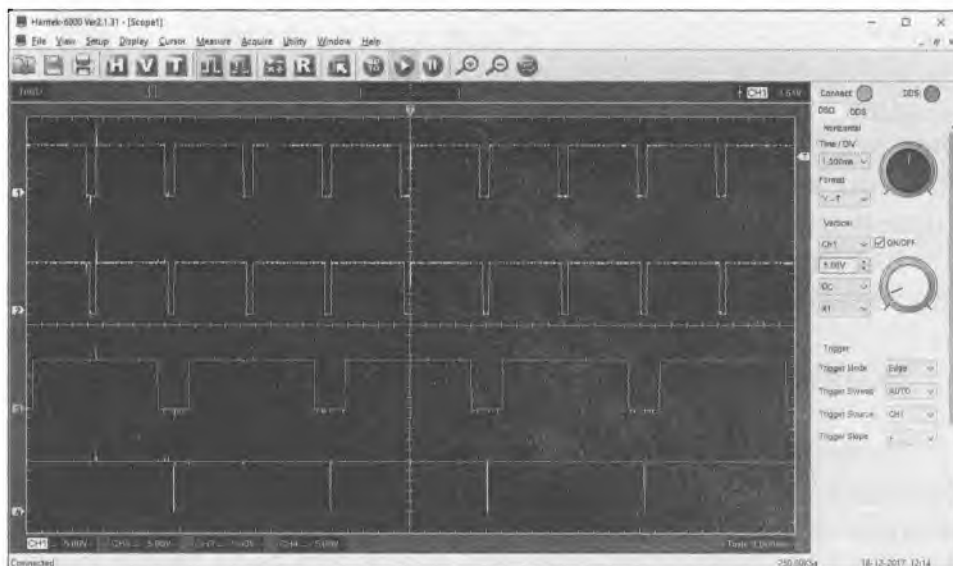
**Новичок:** *Почему изменились числа при калибровке?*

Изменения в данных калибровки, в первую очередь, вызваны тем, что первый раз при выполнении программы модуль гироскопа был перевернут. Ведь так было удобнее его проверять в горизонтальном положении. Сейчас я вернул ему правильное положение.



*Рис. 19.2. Калибровка перед проверкой работы программы*

Исправив данные в программе управления, подключив осциллограф к четырем выводами модуля Arduino Uno, отмеченным значком «~», я загружаю программу и подключаюсь к монитору порта. Это необходимо, чтобы отправить символ, запускающий работу программы.



*Рис. 19.3. Первое наблюдение за сигналами управления двигателями*

На экране осциллографа я наблюдаю сигналы (рис. 19.3).

При этом монитор последовательного порта программы Arduino показывает данные (рис. 19.4).

Меняя положение гироскопа, я вижу изменение сигналов на экране осциллографа (рис. 19.5).

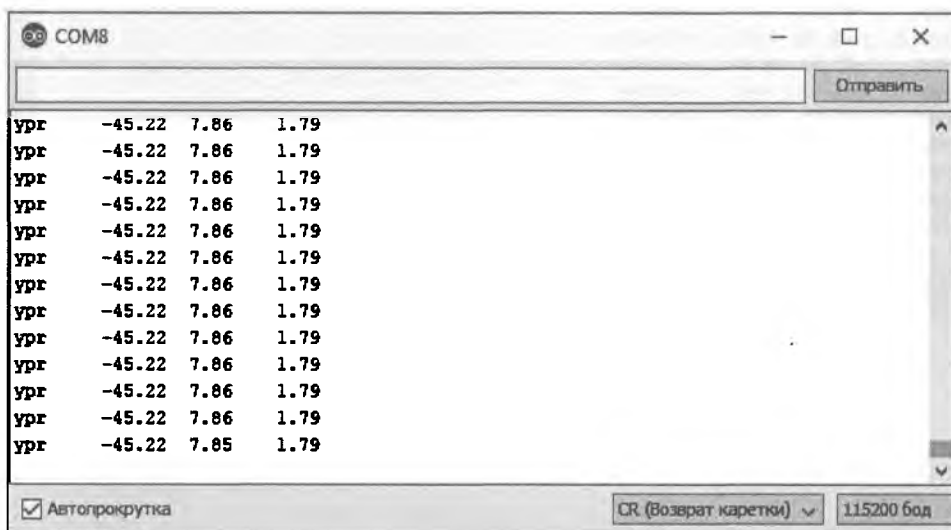


Рис. 19.4. Данные монитора порта, соответствующие осциллограмме рис. 19.3

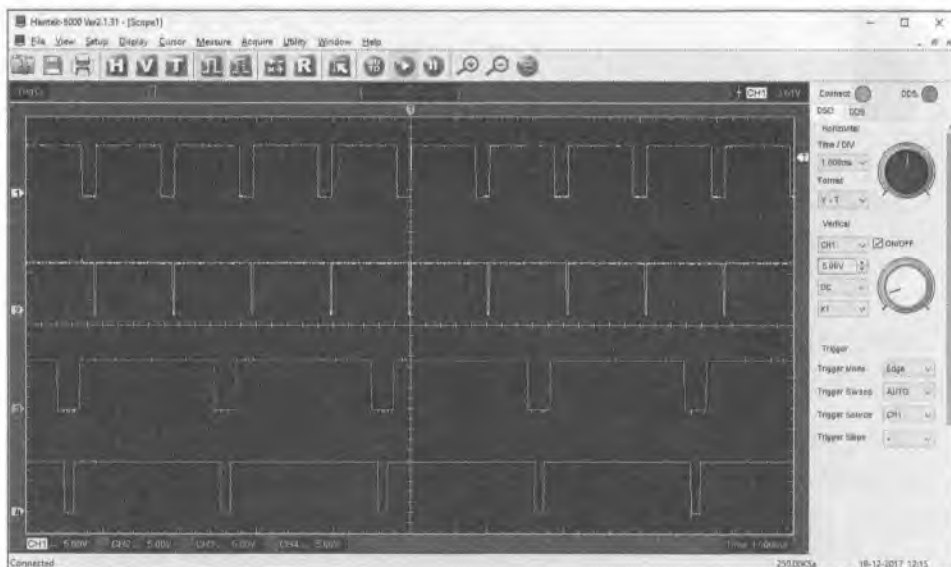
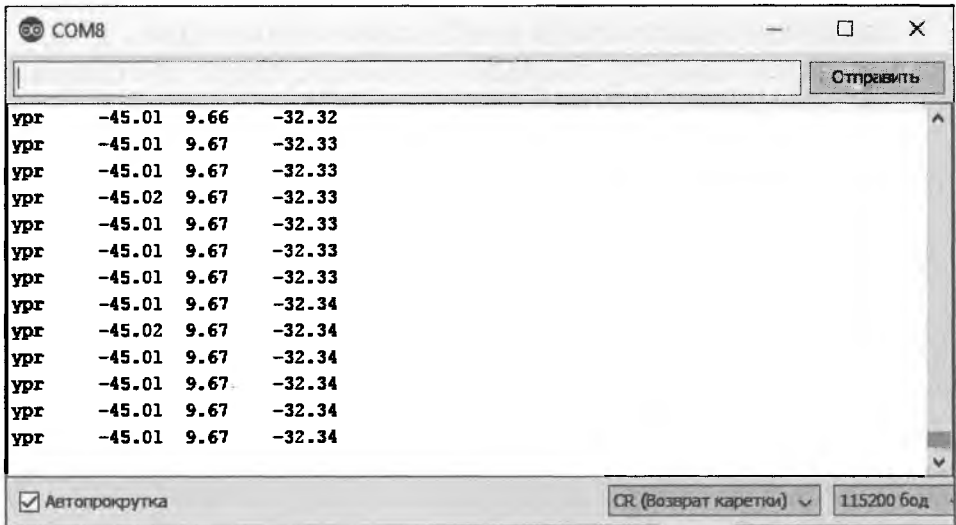


Рис. 19.5. Новая осциллограмма после изменения положения гироскопа





*Рис. 19.6. Новые данные монитора последовательного порта*

И вот, как меняются данные на экране монитора (рис. 19.6).



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Я приведу программу, о которой рассказываю, чтобы и вы могли посмотреть ее, особенно, если надумаете что-то изменить или что-то добавить.*

```
// I2C device class (I2Cdev) demonstration Arduino
// sketch for
// MPU6050 class using DMP (MotionApps v2.0)
// 6/21/2012 by Jeff Rowberg <jeff@rowberg.net>
// Updates should (hopefully) always be available at
// https://github.com/jrowberg/i2cdevlib
//
// Changelog:
// 2013-05-08 - added seamless Fastwire support
//           - added note about gyro calibration
// 2012-06-21 - added note about Arduino 1.0.1 +
Leonardo
```

```
// compatibility error
// 2012-06-20 - improved FIFO overflow handling and
// simplified read process
// 2012-06-19 - completely rearranged DMP
// initialization code and simplification
// 2012-06-13 - pull gyro and accel data from FIFO packet
// instead of reading directly
// 2012-06-09 - fix broken FIFO read sequence and change
// interrupt detection to RISING
// 2012-06-05 - add gravity-compensated initial reference
// frame acceleration output
// - add 3D math helper file to DMP6 example sketch
// - add Euler output and Yaw/Pitch/Roll output formats
// 2012-06-04 - remove accel offset clearing for better
// results (thanks Sungon Lee)
// 2012-06-01 - fixed gyro sensitivity to be 2000 deg/sec
// instead of 250
// 2012-05-30 - basic DMP initialization working
/* =====
I2Cdev device library code is placed under the MIT
license
Copyright (c) 2012 Jeff Rowberg
```

Permission is hereby granted, free of charge, to any person obtaining a copy of this software and associated documentation files (the «Software»), to deal in the Software without restriction, including without limitation the rights to use, copy, modify, merge, publish, distribute, sublicense, and/or sell copies of the Software, and to permit persons to whom the Software is furnished to do so, subject to the following conditions:

The above copyright notice and this permission notice shall be included in all copies or substantial portions of the Software.

THE SOFTWARE IS PROVIDED «AS IS», WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO THE WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE AND NONINFRINGEMENT. IN NO EVENT

SHALL THE AUTHORS OR COPYRIGHT HOLDERS BE LIABLE FOR ANY CLAIM, DAMAGES OR OTHER LIABILITY, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, TORT OR OTHERWISE, ARISING FROM, OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE SOFTWARE OR THE USE OR OTHER DEALINGS IN THE SOFTWARE.

```

===== */

// библиотеки I2Cdev и MPU6050 должны быть установлены
// иначе файлы .cpp/.h для обоих классов должны
// быть включены в путь к вашему проекту
#include «I2Cdev.h»
#include <PID_v1.h>
#include «MPU6050_6Axis_MotionApps20.h»
// #include «MPU6050.h»
// не нужно, если включено MotionApps

// требуется библиотека Arduino Wire,
// если реализация I2Cdev I2CDEV_ARDUINO_WIRE
// используется в I2Cdev.h
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
#include «Wire.h»
#endif

// класс по умолчанию адреса I2C это 0x68 или
// здесь адреса I2C могут передаваться в качестве параметров
// AD0 low = 0x68 (определен для SparkFun breakout
// и InvenSense evaluation board)
// AD0 high = 0x69
MPU6050 mpu;
// MPU6050 MPU(0x69); // <-- использовать для AD0 high
/* =====
ПРИМЕЧАНИЕ: В дополнение к соединениям 3.3v, GND, SDA и
SCL этот скетч зависит от MPU-6050 вывода INT, который
соединяется с внешним прерыванием Arduino: #0 вывод.
Для Arduino Uno и Mega 2560 это I/O вывод 2.
===== */
/* =====
ПРИМЕЧАНИЕ: программа Arduino v1.0.1 с Leonardo board
генерирует ошибку при компиляции, когда используется
Serial.write(buf, len). Teapot вывод использует этот
метод.

```

Решение требует модификации для файла Arduino USBAPI.h, которая, к счастью, проста, но раздражает. Это будет исправлено в следующем IDE выпуске. Больше информации вы найдете:

<http://arduino.cc/forum/index.php/topic,109987.0.html>

<http://code.google.com/p/arduino/issues/detail?id=958>

=====\*/

```
// раскомментируйте «OUTPUT_READABLE_QUATERNION», если
// вы хотите видеть актуальные компоненты кватерниона
// в формате [w, x, y, z] (не лучшим для анализа на
// удаленном узле, как Processing или похожем)
//#define OUTPUT_READABLE_QUATERNION
```

```
// раскомментируйте «OUTPUT_READABLE_EULER»,
// если вы хотите видеть углы Euler, Эйлера
// (в градусах), рассчитанных по кватернионам,
// полученным из FIFO.
// Заметьте, что углы Euler зависят от фиксации подвески
// (за дополнительной информацией обратитесь к
// http://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal\_lock)
//#define OUTPUT_READABLE_EULER
```

```
// раскомментируйте «OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL»,
// если вы хотите видеть yaw/pitch/roll углы (в градусах,)
// рассчитанные по кватернионам, полученным из FIFO.
// Заметьте, что это требует расчета вектора гравитации.
// Также заметьте, что yaw/pitch/roll углы зависят от gimbal
// lock, фиксации подвески (больше информации на:
// http://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal\_lock)
#define OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
```

```
// раскомментируйте «OUTPUT_READABLE_REALACCEL»,
// если вы хотите видеть компоненты ускорения с
// удаленной гравитацией. Это ускорение системы отсчета
// не является компенсацией для ориентации,
// так что, +X всегда +X согласно датчику,
// даже без эффекта гравитации.
// Если вы хотите компенсировать ускорение для ориентации,
// используйте вместо этого OUTPUT_READABLE_WORLDACCEL.
//#define OUTPUT_READABLE_REALACCEL
```

```
// раскомментируйте «OUTPUT_READABLE_WORLDACCEL», если вы
// хотите видеть компоненты ускорения с удаленной гравитацией
// и подстройкой ориентации относительно мировых рамок
// (yaw, рыскание относительно к начальной ориентации,
// поскольку в этом случае отсутствует магнетометр).
// В некоторых случаях может пригодиться.
// #define OUTPUT_READABLE_WORLDACCEL

// раскомментируйте «OUTPUT_TEAPOT», если вы хотите совпадения
// выхода с форматом для InvenSense teapot demo
// #define OUTPUT_TEAPOT
#define LED_PIN 13
    // (Arduino is 13, Teensy is 11 and ++ is 6)
bool blinkState = false;
// MPU переменные для control/status
bool dmpReady = false;
    // будет true, если DMP init было успешно
uint8_t MPUIntStatus;
    // хранит байт статуса прерывания от MPU
uint8_t devStatus;
    // возвращает статус после каждой операции
// устройства (0 = удачно, !0 = ошибка)
uint16_t packetSize;
    // ожидаемый размер DMP пакета
    // (по умолчанию 42 байта)
uint16_t fifoCount; // подсчет всех текущих байтов в FIFO
uint8_t fifoBuffer[64]; // FIFO буфер хранения
// переменные orientation/motion
Quaternion q; // [w, x, y, z] контейнер кватерниона
VectorInt16 aa;
    // [x, y, z] измерения датчика ускорения
VectorInt16 aaReal;
    // [x, y, z] измерения датчика ускорения
// без гравитации
VectorInt16 aaWorld;
    // [x, y, z] измерения датчика ускорения
// world-frame
VectorFloat gravity; // [x, y, z] вектор гравитации
float euler[3]; // [psi, theta, phi] контейнер углов Euler
float ypr[3]; // [yaw, pitch, roll] yaw/pitch/roll контейнер
// и вектор гравитации
```

```

// структура пакета для InvenSense teapot demo
uint8_t teapotPacket[14] = { '$', 0x02, 0,0, 0,0, 0,0,
0,0, 0x00, 0x00, '\r', '\n' };

//=====
//= Stablization set up stuff, настройки стабилизации =
//=====

double pdif, rdif;
double setpitch, setroll;
double pitch, roll;

// Предопределенные настройки
// желательная скорость стабилизации ротора
// не оставлять около 255, поскольку затем коптеру
// будет тяжело управлять кораблем. Нужна комната,
// чтобы изменять скорость разных роторов

#define UP 230
int spd = UP;
PID pitchPID(&pitch, &pdif, &setpitch,2,5,1, DIRECT);
PID rollPID(&roll, &rdif, &setroll,2,5,1, DIRECT);

//=====
//= INTERRUPT DETECTION ROUTINE, обнаружение прерывания =
//=====

volatile bool mpuInterrupt = false;
    // обнаруживает, перейдет ли вывод прерывания
    // MPU в состояние высокого уровня
void dmpDataReady() {
mpuInterrupt = true;
}
//=====
// === INITIAL SETUP, начальные установки ===
//=====

void setup() {
// подключаем шину I2C (библиотека I2Cdev
// не делает этого сама)

```

```
#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
Wire.begin();
TWBR = 24; // 400kHz I2C clock (200kHz if CPU is 8MHz)
#elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
Fastwire::setup(400, true);
#endif

// инициализация последовательной коммуникации
// (115200 выбрано потому, что это требуется для
// Teapot Demo вывода, но это в действительности
// может быть многовато для вас, завист от вашего проекта)
Serial.begin(115200);
while (!Serial); // ожидание для Leonardo enumeration, другие
// могут продолжать немедленно

// ПРИМЕЧАНИЕ: 8MHz или медленнее для ведущего процессора
// подобного Teensy @ 3.3v или Arduino
// Pro Mini работает на 3.3v и не поддерживает эту скорость
// обмена надежно из-за слишком рассогласованного времени
// обмена с тактами процессора. Вы должны использовать
// 38400 или меньшую скорость в этих случаях или использовать
// внешний кварц для тактирования UART.

// инициализация устройства
Serial.println(F(«Initializing I2C devices...»));
mpu.initialize();

// проверка соединения
Serial.println(F(«Testing device connections...»));
Serial.println(mpu.testConnection() ? F(«MPU6050 con-
nection successful») : F(«MPU6050 connection failed»));

// ожидаем готовности
Serial.println(F(«\nSend any character to begin DMP
programming and demo: «));
while (Serial.available() && Serial.read());
// пустой буфер
while (!Serial.available()); // ждем данных
while (Serial.available() && Serial.read());
// пустой буфер
```

```
// загружаем и конфигурируем DMP
Serial.println(F(«Initializing DMP...»));
devStatus = mpu.dmpInitialize();

// подставьте ваши собственные поправки гироскопа,
// масштабированные для минимальной чувствительности
mpu.setXAccelOffset(-159);
mpu.setYAccelOffset(1221);
mpu.setZAccelOffset(2369);
mpu.setXGyroOffset(143);
mpu.setYGyroOffset(34);
mpu.setZGyroOffset(-32);

// убедитесь, что это работает (returns 0, если так)
if (devStatus == 0) {
// возвращает DMP, теперь, что все готово
Serial.println(F(«Enabling DMP...»));
mpu.setDMPEnabled(true);

// разрешает обнаружение прерывания Arduino
Serial.println(F(«Enabling interrupt detection (Arduino
external interrupt 0)...»));
attachInterrupt(0, dmpDataReady, RISING);
mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

// устанавливает наш DMP Ready флаг, теперь main loop() функция
// знает, что все хорошо, можно использовать
Serial.println(F(«DMP ready! Waiting for first inter-
rupt...»));
dmpReady = true;

// берет ожидаемый размер пакета DMP для последующего сравнения
packetSize = mpu.dmpGetFIFOPacketSize();
} else {
// ERROR!
// 1 = отказ загрузки начальной памяти
// 2 = DMP отказ обновления конфигурации
// (если продолжается отказ в работе, код будет 1)
Serial.print(F(«DMP Initialization failed (code «));
Serial.print(devStatus);
```



```

Serial.println(F(«»)»));
}

// конфигурация кода стабилизации
//=====
pdif = 0.0;
rdif = 0.0;
setpitch = 0.0;
setroll = 0.0;
pitch = 0.0;
roll = 0.0;

pitchPID.SetMode(AUTOMATIC);
rollPID.SetMode(AUTOMATIC);

pitchPID.SetOutputLimits(-30, 30);
rollPID.SetOutputLimits(-30, 30);
}

const int prop1 = 9;
const int prop2 = 5;
const int prop3 = 6;
const int prop4 = 3;

//=====
//=== MAIN PROGRAM LOOP ===
//=====

void loop() {
// если программирование не удалось,
// не пытайтесь что-то делать
if (!dmpReady) return;

// ждем прерывания MPU или доступности
// дополнительного пакета
while (!mpuInterrupt && fifoCount < packetSize) {
int p1 = spd + (rdif / 2) + (pdif / 2);
int p2 = spd - (rdif / 2) + (pdif / 2);
int p3 = spd + (rdif / 2) - (pdif / 2);
int p4 = spd - (rdif / 2) - (pdif / 2);
}
}

```

```
if(p1 >= 255){
//уменьшаем скорость, чтобы сбалансировать
spd -= (p1 - 255);
continue;
}
if(p2 >= 255){
spd -= (p2 - 255);
continue;
}
if(p3 >= 255){
spd -= (p3 - 255);
continue;
}
if(p4 >= 255){
spd -= (p4 - 255);
continue;
}

analogWrite(prop1, p1);
analogWrite(prop2, p2);
analogWrite(prop3, p3);
analogWrite(prop4, p4);
// Serial.print(«p1:\t»);
// Serial.print(p1);
// Serial.print(«p2:\t»);
// Serial.print(p2);
// Serial.print(«p4:\t»);
// Serial.print(p3);
// Serial.print(«p4:\t»);
// Serial.println(p4);

// другие детали поведения программы здесь
// если вы параноик, вы можете часто
// тестировать, чтобы увидеть другие детали
// если MPUInterrupt истинно, и, если так, «break;» от
// while() loop, чтобы немедленно обработать, данные MPU
}

// сбрасываем флаг прерывания и получаем
// байт статуса INT_STATUS
MPUInterrupt = false;
```

```

mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

// получим текущий счет FIFO
fifoCount = mpu.getFIFOCount();

// проверка переполнения (этого не случится
// пока наш код не будет слишком неработоспособный)
if ((mpuIntStatus & 0x10) || fifoCount == 1024) {
// сброс, так что мы можем продолжать чисто
mpu.resetFIFO();
Serial.println(F(«FIFO overflow!»));

// иначе проверим прерывание готовности данных DMP
// (это будет случаться часто)
} else if (mpuIntStatus & 0x02) {
// ждем правильной длины доступных данных, должно быть
// ОЧЕНЬ короткое ожидание
while (fifoCount < packetSize) fifoCount = mpu.getFIFOCount();

// читаем пакет из FIFO
mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize);
// проследив счет FIFO, в случае, когда > 1, пакет доступен
// (это позволит нам сразу читать дальше без ожидания
// прерывания)
fifoCount -= packetSize;

// отображает углы Euler (Эйлера) в градусах
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
pitch = (ypr[1] * 180/M_PI);
roll = (ypr[2] * 180/M_PI);
#ifdef OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
Serial.print(«ypr\t»);
Serial.print(ypr[0] * 180/M_PI);
Serial.print(«\t»);
Serial.print(pitch);
Serial.print(«\t»);
Serial.println(roll);
#endif

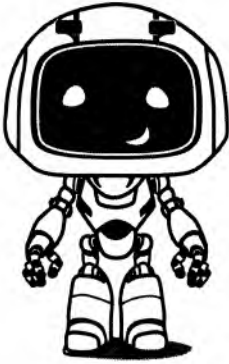
```

```
// Обновляем Pиды
pitchPID.Compute();
rollPID.Compute();

// Увеличиваем spd, если мы уменьшали spd
if (spd < UP) {
  spd++;
}
}
```

Это, вы понимаете, не весь текст программы, часть его скрывается за лаконичными строками `#include`. Но мне этого хватило, чтобы познакомиться с тем, кто будет «пилотом» беспилотника.

**Новичок:** *В бортовой компьютер можно загрузить программу полета. Но если эту программу придется менять в полете?*



# СВЯЗЬ «ЗЕМЛИ» С «ПИЛОТОМ» БЕСПИЛОТНИКА

## || Радиосвязь в управлении беспилотником

Задавая вопрос об изменении плана полета, следует вспомнить...

**Новичок:** *Я понял, как отправлять аппарат в полет?*

Правильно, мы опрашиваем аппарат в полет с пульта. А пульт, естественно, должен иметь радиосвязь. Я не радиоинженер. Не буду даже уверять, что полностью владею информацией. И о пультах уже упоминалось ранее, как и про протоколы радиосвязи. Я попробую еще раз пересказать все то, что сам прочитал по этому вопросу, и можно подумать, какой пульт управления лучше выбрать?

Основные вопросы при выборе радиоуправления:

- ♦ цена оборудования;
- ♦ совместимость пультов управления с уже имеющимся приемником;
- ♦ количество каналов управления (главный критерий выбора).

**СОВЕТ.**

*Пульт управления лучше покупать вместе с приемником, хотя это дорогостоящее оборудование. Самый дешевый, наверное, пульт имеет 4 канала управления (рис. 20.1).*



**Рис. 20.1.** Недорогой пульт управления на 4 канала с приемником в магазине *rc-today.ru*

Четырех каналов управления должно хватать для управления такими функциями:

- ◆ газ (быстрее, медленнее);
- ◆ повороты (влево, вправо);
- ◆ подъем (вверх, вниз);
- ◆ наклоны при поворотах.

**Новичок:** *Если нужны дополнительные функции, то будут нужны и дополнительные каналы?*

Безусловно! У беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для производственных целей, каналов может быть очень много, если учитывать, что они могут осуществлять самостоятельный полет по предварительному заданию. У них могут быть резервные каналы, на которые беспилотник переходит, если связь становится плохой.

**Новичок:** *И кроме авиамodelей, есть и модели кораблей, модели автомобилей.*

Конечно, и об этом тоже не следует забывать.

## || Стандарты передачи управляющего сигнала

Радиоуправляемые модели существуют давно. За это время появилось много стандартов. Можно встретить загадочную аббревиатуру, например: PWM, PPM, SBUS, DSM2, DSMX, SUMD. И к этому добавляются разные частоты для управления моделями. Я могу сослаться на оригинальные статьи, которые читал [23], но постараюсь изложить это в той мере, в какой запомнил и понял сам.

**PWM** — это наиболее широко применяемый способ передачи управляющего сигнала. Широтно-импульсная модуляция подразумевает сохранение периода повторения импульсов при изменении соотношения длительностей высокого и низкого уровня.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Для моторов постоянного тока, каковыми являются моторы моделей самолетов, вертолетов и т. д., изменение скважности импульсов (так называют соотношение длительностей) равносильно изменению питающего напряжения. Передавать такой сигнал на радиочастоте проще всего.*

**PPM** — это позиционированная импульсная модуляция. Как я понял, для самолета выглядит все так:

- ♦ мы управляем мотором модели самолета и двумя серводвигателями;

- ♦ для каждого из моторов формируется свой широтно-импульсный сигнал, и от каждого из них берется по одному импульсу.

Полученные последовательности трех импульсов с короткими промежутками разделяют более длинной паузой (рис. 20.2). Такой сигнал, представляющий три PWM сигнала, модулируется высокой частотой. Так я это понял.

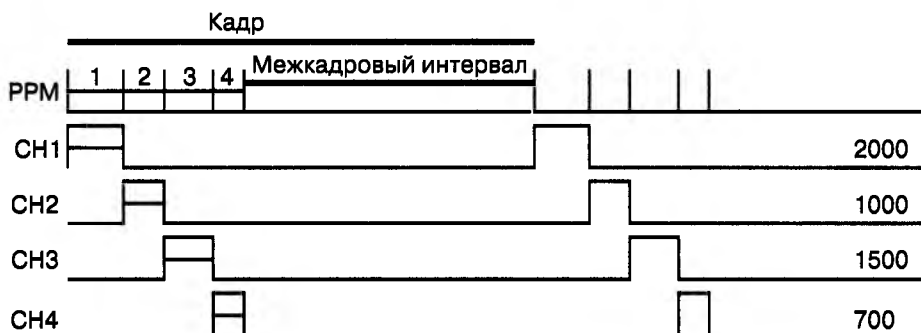


Рис. 20.2. Сигнал PPM

**SBUS** — это разновидность последовательной передачи данных. Многие микроконтроллеры имеют встроенный модуль последовательного обмена данными (UART). SBUS инвертирует сигналы UART, что, наверное, получается при добавлении транзисторного ключа к выводу Tx микроконтроллера.

**DSM2** — протокол разработан для Spektrum приемопередатчиков управления летающими аппаратами. Передаваемые каждые 11 мс или 22 мс 16 байт от UART содержат в первых двух байтах, например, информацию:

- ♦ об идентификаторе канала;
- ♦ о положении сервопривода.

За этими байтами следует 14 байтов данных.

Массив 16 битовых чисел отправляется, начиная с 15 бита (MSB). Последним приходит 0 бит (LSB). Протокол предусматривает смену канала связи, если прежний работает неудовлетворительно.

DSMX следующее поколение после DSM2. И это не единственные протоколы работы пультов управления и приемников аппаратов.



Рабочие частоты для управления моделями 27 МГц, 72 МГц, 433 МГц, 900 МГц, 1,3 ГГц и 2,4 ГГц. Из которых частота 27 МГц применялась давно, и хорошо себя зарекомендовала: дальность и малая чувствительность к помехам в виде препятствий. Но это не тогда, когда рядом работает такой же передатчик.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Сейчас частота 2,4 ГГц используется чаще остальных.*

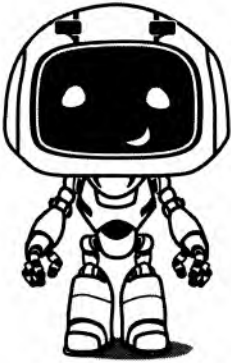
В первую очередь, достоинство частоты 2,4 ГГц, если сравнивать с управлением на частоте 27 МГц — это небольшая антенна! Это очень важно и для пульта управления, и особенно для приемника, расположенного на модели.

Пульты управления имеют два джойстика, но разные модели могут различаться тем, что делает каждый из них. Не помню, все модели пультов или только дорогие модели позволяют подключить их к программе симулятору полета. Практика виртуальных полетов очень помогает сберечь летательный аппарат.

**Новичок:** *А все-таки, что лучше: создать свой пульт управления или взять готовый?*

Если бы мне задали такой вопрос, я бы ответил: создавать свой пульт с радиоканалом — это интересно, но я предпочел бы купить готовый.

Прочитав про радиоканал на частоте 2,4 ГГц, я вспомнил, что у меня есть модули nRF24L01, работающие на этой частоте.



# ЗНАКОМЬТЕСЬ: МОДУЛИ РАДИОСВЯЗИ С ЧАСТОТОТАМИ 2,4 ГГц И 433 МГц

Я и раньше встречал рассказ на одном из сайтов [6] о том, как создать передатчик и приемник с модулями nRF24L01, которые с внешней антенной могут работать на расстоянии до километра. Модули используют интерфейс SPI, который отличается от интерфейса I<sup>2</sup>C, в первую очередь, наличием отдельных линий для приема и передачи данных.

Для упорядочения работы по протоколу SPI разделяют:

- ♦ ведущее устройство (как и Master в I<sup>2</sup>C);
- ♦ ведомые устройства, которых может быть несколько.

Для обращения к ним ведущее устройство использует линии выбора ведомого устройства.

**Новичок:** *А сколько этих линий?*

Этих линий будет столько, сколько ведомых устройств есть в аппарате (рис. 21.1).

Выводы SS служат для выбора одного из устройств на шине SPI. Как работает этот интерфейс можно посмотреть в программе ISIS, используя готовый проект с сайта [12], спасибо автору статьи, который не только рассказал о работе карты SD.

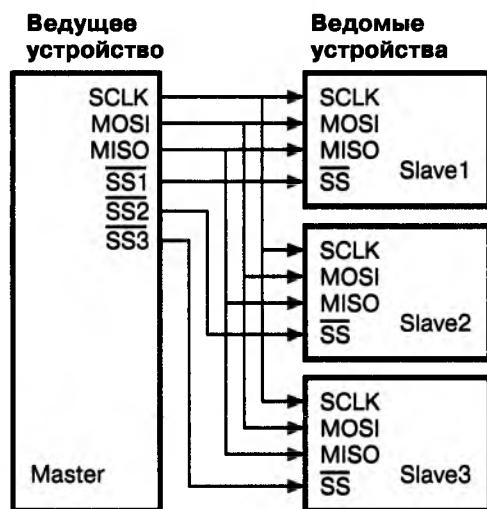


Рис. 21.1. Включение устройств интерфейса SPI



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

Автор статьи подготовил и программу для микроконтроллера, и образ карты SD для эксперимента.

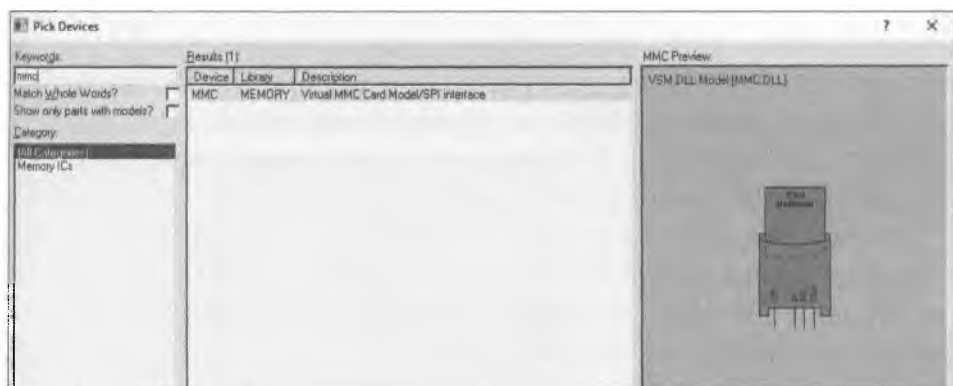
Модель карты SD есть в программе ISIS (Proteus); для поиска достаточно ввести в строку *Keywords* название модели *mmc* (рис. 21.2).



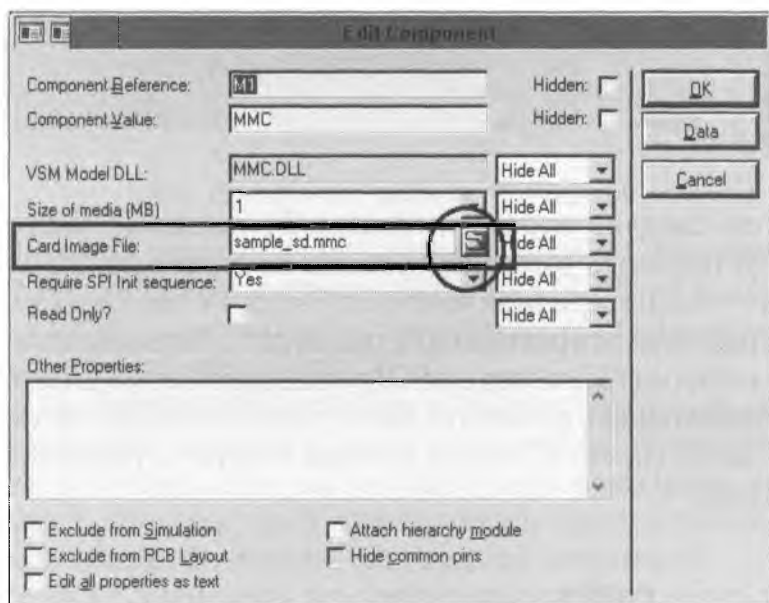
#### ПРИМЕЧАНИЕ.

Обратите внимание, что микроконтроллер, используемый автором, базовый для модуля *Arduino Uno*.

При использовании готового проекта, если вы поместили папку в удобное для вас место, не меняя в ней ничего, дополнительных усилий не требуется. Но, если вы захотите изменить



**Рис. 21.2.** Поиск модели SD-карты



**Рис. 21.3.** Выбор образа карты

содержание SD-карты, вам потребуется в свойствах карты указать ее образ (рис. 21.3) с помощью отмеченной справа кнопки.

**Новичок:** А... причем здесь SD карта?

Упреждая все вопросы о роли карты SD, ведь говорим-то мы о радиомодуле, я хочу заметить, что эту карту можно

использовать в качестве «черного ящика» авиамоделей! Можно, вероятно, записать на карту сигналы модели парохода, которые воспроизводит соответствующей командой. И, сознаюсь, модели nRF24L01 для Proteus я не нашел, иначе рассказал бы про интерфейс с помощью модели радиомодуля.

Итак. Общение с картой SD начинается с ее инициализации. Доверимся автору статьи — для этого сигналы линии MOSI (на модели DI) и SS (на модели CS, выбор кристалла) переводятся в высокий логический уровень.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Напомню, что активный уровень выбора кристалла — низкий.*

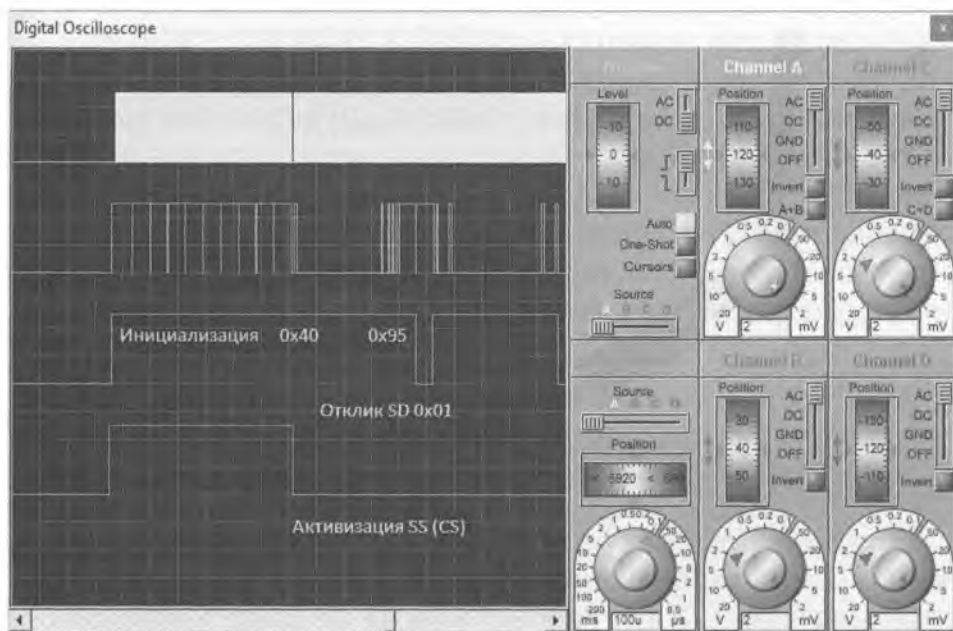
Затем следует подать не менее 74 тактовых импульсов. Чтобы установить высокий уровень на линии MOSI, отправляют шестнадцатеричное число 0xFF. Для 74 тактовых импульсов потребуется отправить 0xFF раз десять. Затем активируется сигнал выбора (SS, на модели CS) установкой его в низкий уровень, чтобы подать команду CMD0 (число 0x40) без аргументов и с CRC 0x95. На это SD-карта должна ответить, установив 0x01 (рис. 21.4).



#### СОВЕТ.

*Я рекомендую вам прочитать статью и рассмотреть, если у вас есть программа Proteus или осциллограф. Вам будет понятнее то, как работает интерфейс SPI.*

А я хочу еще раз поблагодарить автора статьи, поскольку мне, например, статья однажды помогла найти неисправность гнезда для SD-карты.



*Рис. 21.4. Начало работы с SD-картой*

Вернемся к радиомодулю, который работает похожим образом. Ведущий отправляет команды, nRF24L01 их выполняет. Сегодня модуль с антенной можно приобрести на Алиэкспресс относительно недорого (**рис. 21.5**).

Еще дешевле он обойдется, если вы решите сделать антенну самостоятельно. Стоимость одного модуля без антенны сегодня порядка 40 рублей. Если вы закажете несколько штук, а в этом есть смысл, то за доставку вам придется платить только один раз, и я посчитал бы это очень выгодной покупкой.

В один из дней меня заинтересовала работа этого радиомодуля в паре с модулем Arduino, о чем я упоминал в своей книге [1].

Когда-то мне приходилось сталкиваться с тем, что есть необходимость с нескольких пультов управлять разными устройствами, но так, чтобы работа пультов была независимой. Узнав, что модуль nRF24L01 имеет множество каналов управления, я занялся опытами с ним.

**Новичок:** *Опыты с помощью Arduino?*



Рис. 21.5. Модуль nRF24L01 с антенной на Aliexpress

Конечно, поскольку для Arduino есть несколько библиотек функций, предназначенных для упрощения написания программного кода. В тот момент у меня не было возможности наблюдать за всеми линиями интерфейса, но и в двухканальном варианте удалось проверить все этапы обработки команд (рис. 21.6).

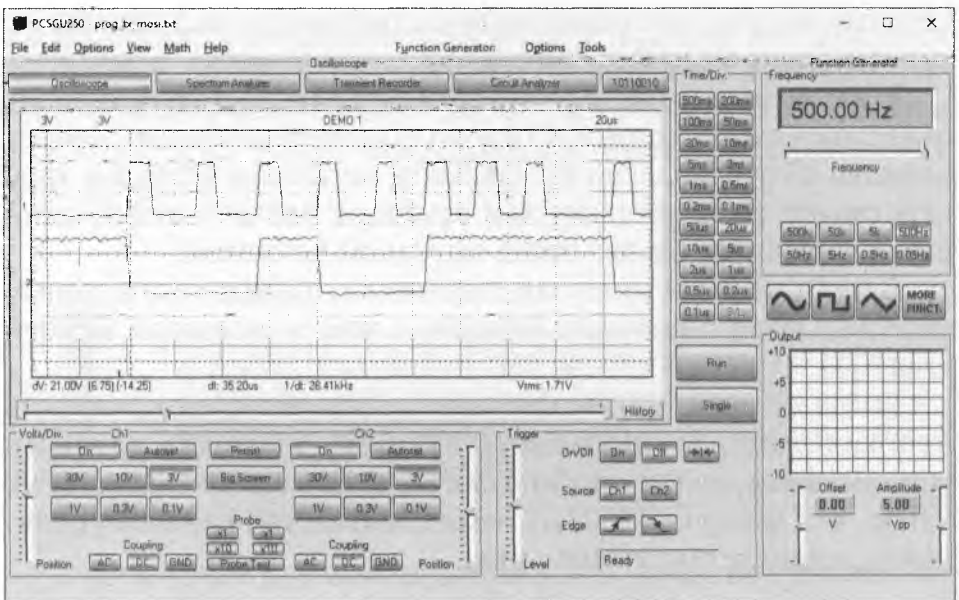
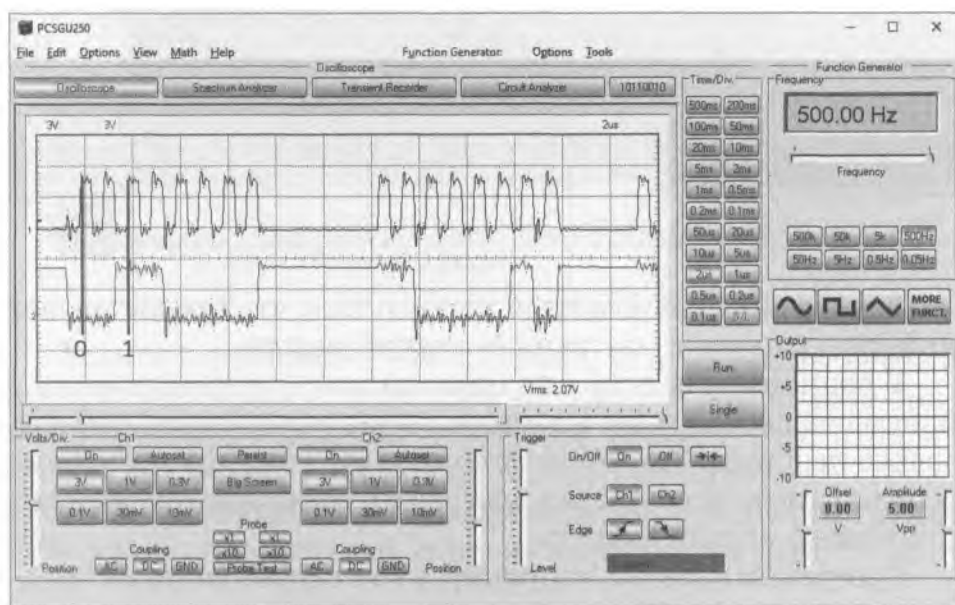


Рис. 21.6. Команда радиомодулю, линия MOSI

Команда — записать в регистр состояния: легко убедиться, что это число **00100111**. Чтение происходит по заднему фронту тактовых импульсов (на верхней диаграмме). То, каким фронтом производить чтение, можно изменить программно. В данном случае я использовал программный интерфейс SPI, но у модуля Arduino есть и аппаратный модуль этого интерфейса. Вид сигнала несколько отличается, как и способ чтения — по переднему фронту тактовых импульсов. Вот пример сигнала на шине MISO (рис. 21.7).



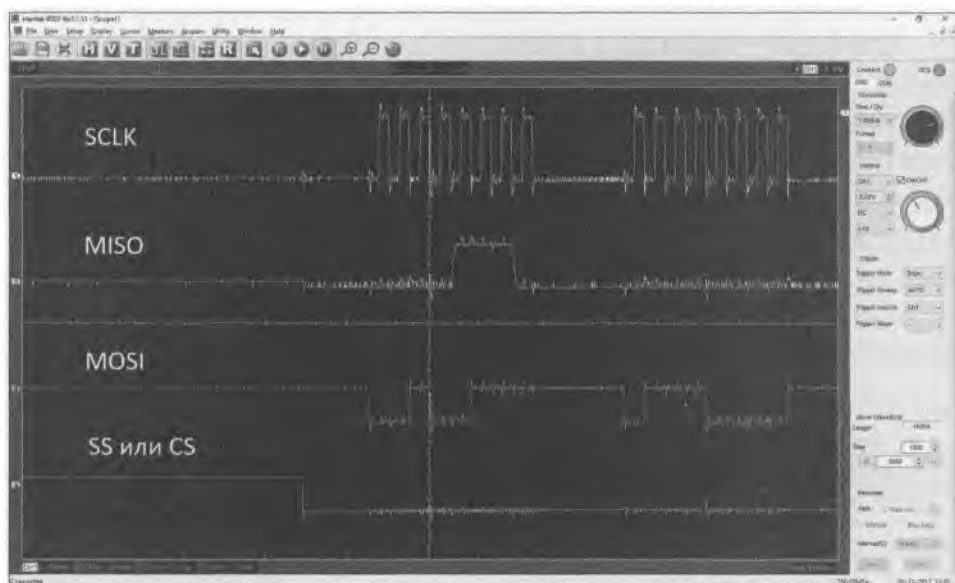
**Рис. 21.7.** Отклик радиомодуля

Как вы видите, можно разобраться в том, что говорит ведущий, что отвечает ведомый. Но удобнее с этим разбираться тогда, когда вы можете видеть все четыре линии (рис. 21.8).

Для подключения к Arduino Uno я использовал выводы:

- ◆ CE – вывод 9;
- ◆ CS (SS) – вывод 10;
- ◆ MOSI – вывод 11;
- ◆ MISO – вывод 12;
- ◆ SCLK – вывод 13.





*Рис. 21.8. Наблюдение за всеми линиями интерфейса радиомодуля*

Для питания радиомодуля хватило того, что предоставляет Arduino — внешнего питания не потребовалось.

У радиомодуля есть еще один сигнал — переключение с приема на передачу. Но в данном случае радиомодуль работал только на прием. Так произошло потому, что я для получения осциллограмм использовал программу сканирования каналов с помощью модуля Arduino.

Программа полезна, например, в том случае, когда вы предварительно оцениваете ситуацию, но может использоваться и для перехода модели на запасную частоту. Эта программа сканирует все каналы модуля nRF24L01, определяя интенсивность работы других устройств на частоте канала.

Называется программа **scanner** и она есть в примерах библиотеки RF24. Не могу не привести вид монитора порта Arduino при работе этой программы (рис. 21.9). Верхние две строки — это номер канала. Ниже числа отображают интенсивность работы на данном канале.

Приведенный рисунок показывает и количество каналов, и «занятость» каждого из каналов.

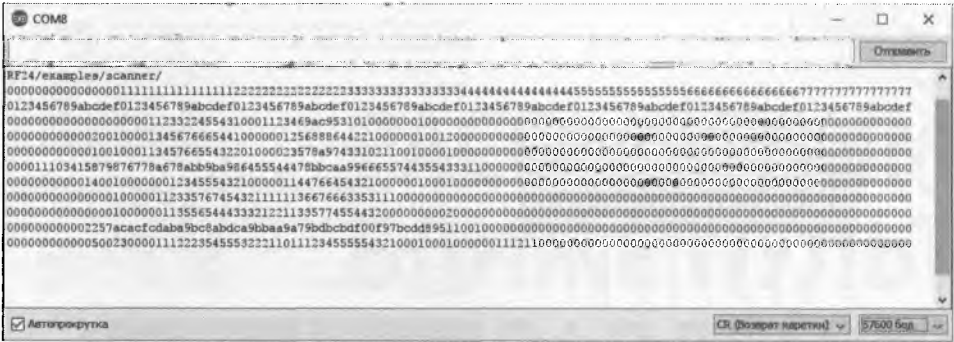


Рис. 21.9. Работа программы сканирования каналов на 2,4 ГГц



**ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Поскольку исходный код программы доступен, вы можете использовать его для программы связи своего аппарата в той части, где нужен переход на резервный канал.*

Если использовать PPM протокол, если ваш летательный аппарат будет использоваться в чистом поле, вы можете применить радиоуправление на частоте 443 МГц. Этот вариант проще, поскольку передатчик только заполняет ваш сигнал несущей частотой, то есть, вам достаточно подвести сигнал PPM к входу передатчика, который выглядит так (рис. 21.10).



Рис. 21.10. Приемник и передатчик для работы на частоте 433 МГц



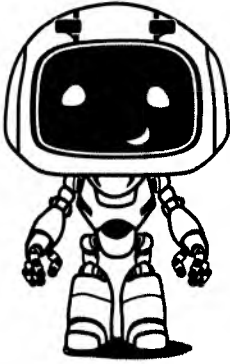
**Рис. 21.11.** Антенны для приемника и передатчика на 433 МГц

Для радиоканала на этой частоте лучше приобрести антенну, что показывает опыт многих начинающих. На Алиэкспресс есть недорогие антенны (рис. 21.11).



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Будьте внимательны, если задумаете собрать свой беспилотник! Законодательство предписывает регистрировать такие летательные аппараты, если они тяжелее 250 граммов.*



# РАССМОТРИМ БЛИЖЕ ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНИКОМ

**Кнопка – ||  
простейший элемент управления**

Пульт управления беспилотником может быть устроен по-разному. Самый простой пульт может иметь несколько кнопок и пару джойстиков. Более сложный пульт обустраивают дисплеем, на котором может отображаться, например, карта с трассой перемещения беспилотника.

Кнопки управления — это самый простой во всех отношениях элемент управления.

## **СОВЕТ.**



*Не забудьте в программе учесть возможный дрейзг контактов.*

Передавать состояние кнопки по радиоканалу тоже не самая сложная задача. Подойдут любые решения.

## || Сложнее — || с работой джойстиков

Сегодня мышка у меня — беспроводная, работающая по радиоканалу с интерфейсом Bluetooth, в днище которой есть окошко, подсвеченное красным светом. А у меня, я уверен, лежит где-нибудь старенький представитель этих грызунов, у которого был шарик, катающийся по столу.

Джойстик пульта управления устроен, если не так, то похожим образом (рис. 22.1).

С точки зрения электрической схемы его устройство незамысловато. Два переменных резистора запитываются постоянным напряжением 5 вольт. Движки этих потенциометров можно подключить к АЦП микроконтроллера, чтобы считать напряжение.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Когда ручка джойстика в центральном положении, переменные резисторы находятся тоже в среднем положении. Перемещая ручку джойстика, мы получаем информацию о новом положении в виде некоторых чисел.*

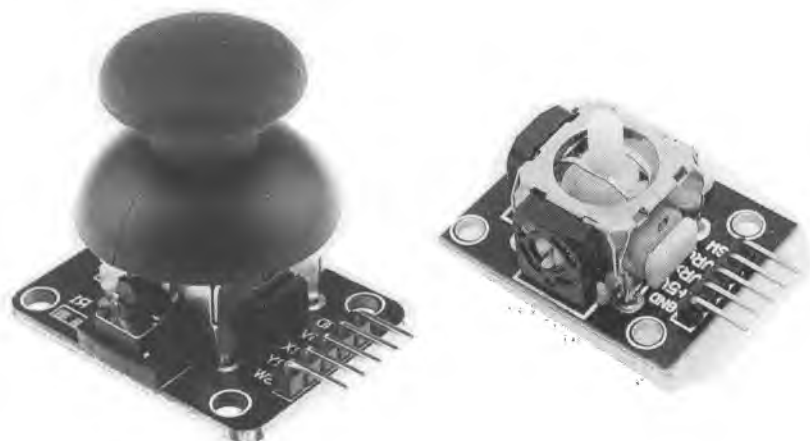


Рис. 22.1. Джойстик для пульта управления беспилотником

Передача этих значений по радиоканалу — не та задача, что может «озадачить». Озадачит создателей собственных конструкций обработка этих указаний. Но это относится к работе бортового компьютера, управляющего полетом самолета или рассеканием вод озера катером.

Когда-то давно я попытался представить себе работу АЦП. Позже я узнал, что существуют разные варианты устройства этих преобразователей аналоговых сигналов в цифровые данные. Но та схема работы АЦП, которую я тогда использовал, оказалась вполне достаточной в дальнейшем, когда бы мне ни пришлось столкнуться с этим вопросом.

Представил я себе работу АЦП таким образом: есть шестнадцатеричный цифровой счетчик, управляемый тактовым генератором. К его выходам подключена резисторная матрица, у которой сопротивления подобраны так, чтобы на выходе получилась ступенчатая функция (рис. 22.2).

Напряжение от генератора ступенчатого напряжения поступает на один вход компаратора, а преобразуемый сигнал

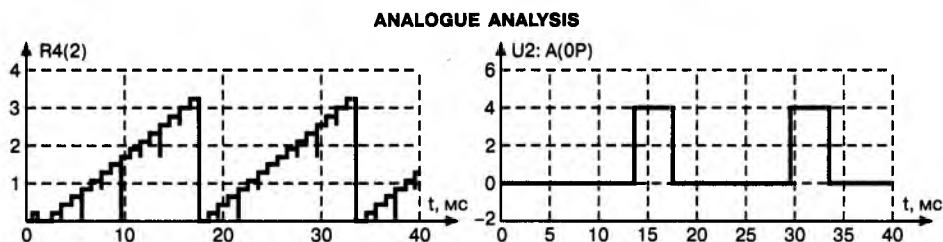
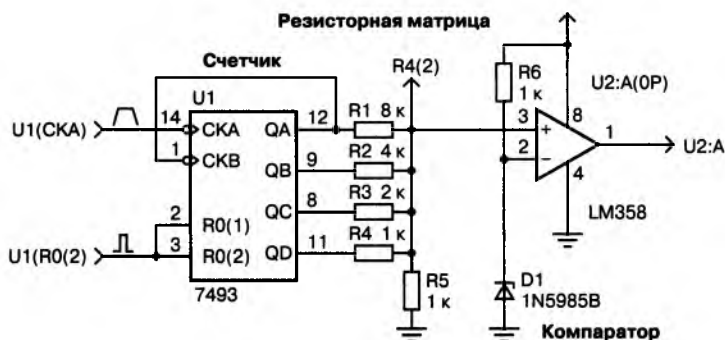


Рис. 22.2. Генератор ступенчатого напряжения

подается на второй вход компаратора. На **рис. 22.2** в качестве сигнала, который предстоит перевести в цифровую форму, используется напряжение стабилитрона D1. При срабатывании компаратора, то есть, при том, что очередная ступенька генератора превысит напряжение сигнала, при срабатывании компаратора прочитывается двоичное число на выходе счетчика. В итоге мы преобразовали аналоговый сигнал напряжения в цифровое значение.

В устройстве джойстика «замысловатой» оказывается механика. Мне очень хотелось посмотреть, как это устроено у реальной модели, но разбирать джойстик не захотелось, пришлось самому придумывать, как это могло бы быть сделано (**рис. 22.3**).

Ручка джойстика приводит в движение шарик, который связан с ручками двух взаимно перпендикулярно расположенных потенциометров. Движение шарика передается потенциометрам. Если правильно рассчитать диаметры ручек потенциометров и шарика, то движение ручки джойстика из одного крайнего положения в другое, приведет к соответствующему перемещению ползунка резистора. Что и требуется. Я уверен, что механика реального джойстика выполнена лучше, но даже такая схема механики не оставляет белых пятен в моем представлении о работе джойстика.



**Рис. 22.3.** Как мог бы быть устроен джойстик

**Новичок:** *Где можно узнать подробнее о работе джойстика?*

Про то, как устроен джойстик с точки зрения электрической схемы, как его подключить к модулю Arduino, вы можете прочитать, например, здесь [15] или здесь [5].

Здесь же можете скачать программу для Arduino, позволяющую проверить джойстик. А, если вы надумаете самостоятельно разработать пульт, то можете переделать программу, как это сделал я, надеюсь, автор программы не обидится и не рассердится.

```
/*Тестировалось на Arduino IDE 1.8
Дата тестирования 09.01.2017г.
*/

int Xin= A0; // Вывод, к которому подключен VRX
int Yin = A1; // Вывод, к которому подключен VRY
int KEYin = 3; // Вывод, к которому подключен VRY

void setup ()
{
  pinMode (13, OUTPUT);
  pinMode (KEYin, INPUT_PULLUP); // Установим вывод 3 как
  вход
  Serial.begin (9600); // Задаем скорость передачи данных
}

void loop ()
{
  int xVal, yVal, buttonVal; // Создаем переменные

  xVal = analogRead (Xin); // Считываем значение с порта
  Xin
  yVal = analogRead (Yin); // Считываем значение с порта
  Yin
  buttonVal = digitalRead (KEYin); // считываем состояние
  кнопки

  Serial.print("X = "); // Выводим текст
  Serial.println (xVal, DEC); // Выводим смещение по x
```



```
Serial.print ("Y = "); // Выводим текст
Serial.println (yVal, DEC); // Выводим смещение по y

Serial.print("Кнопка: "); // Выводим текст
if (buttonVal == HIGH) // Если buttonVal = 1, кнопка не
нажата
{
Serial.println ("не нажата"); // Выводим текст
digitalWrite(13, LOW);
}
else // Если buttonVal = 0 кнопка нажата
{
Serial.println ("нажата"); // Выводим текст
digitalWrite(13, HIGH);
}
delay (2000); // Ждем 2000 мс или 2 секунды
}
```

Загрузив программу в модуль Arduino, открыв монитор порта, настроенный на скорость обмена данными на 9600, можно наблюдать следующее (рис. 22.4).

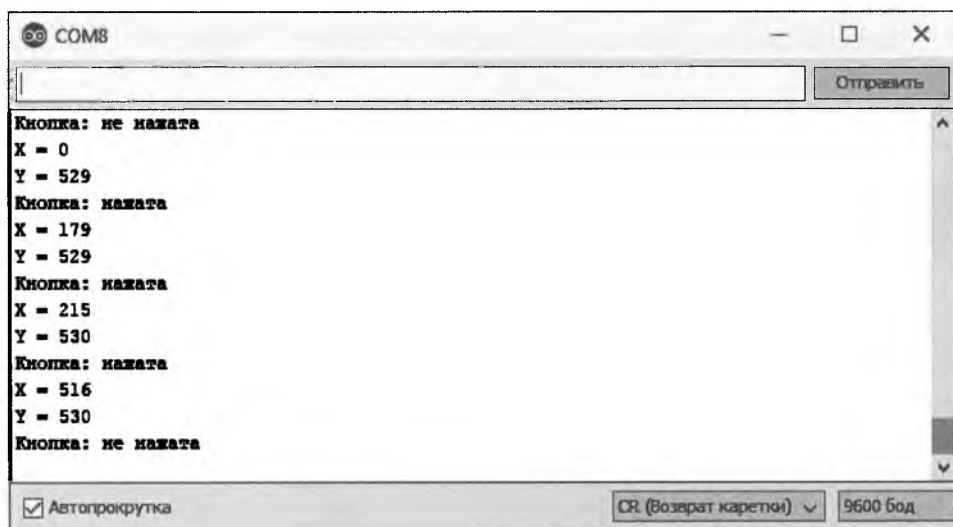


Рис. 22.4. Работа программы проверки джойстика

## Замечание по самостоятельной разработке пульта управления

Если вы хотите самостоятельно разрабатывать пульт управления, использующий джойстики, вам, возможно, больше понравится работать не с языком программы Arduino, а с графическим языком. Пытаясь найти описание механики работы джойстика в Интернете, я наткнулся и на такой вариант программы, написанной для FLProg.



### ПРИМЕЧАНИЕ.

*FLProg – это программа создания кода для модуля Arduino на основе двух языков программирования промышленных контроллеров.*

Программа интересна и сама по себе, но и приведенный ниже пример может быть интересен радиолюбителям (рис. 22.5).

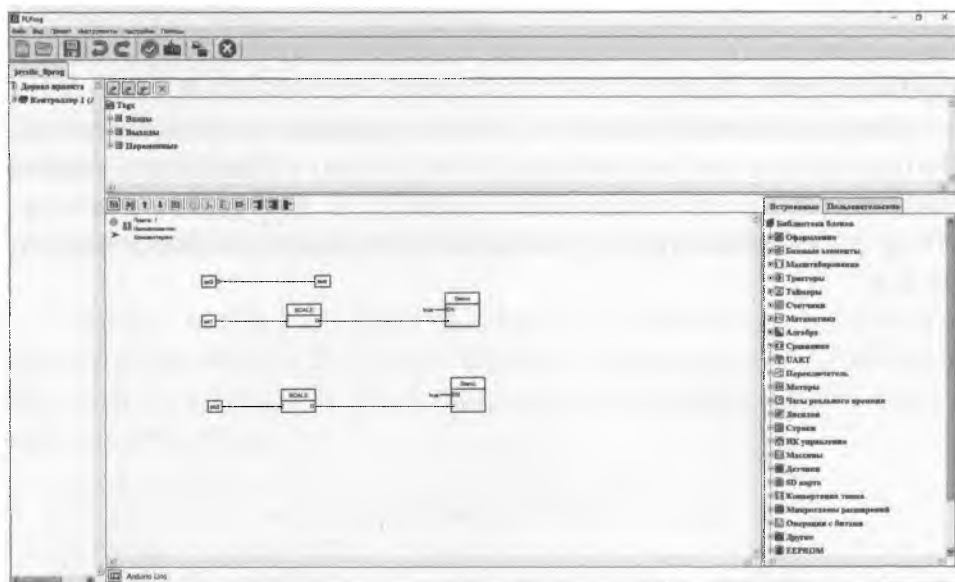
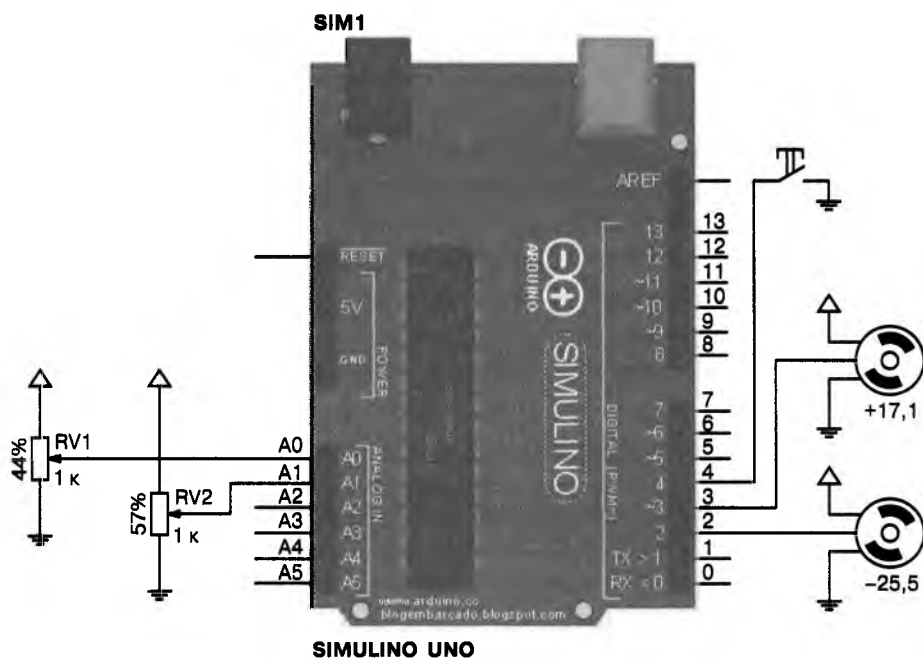


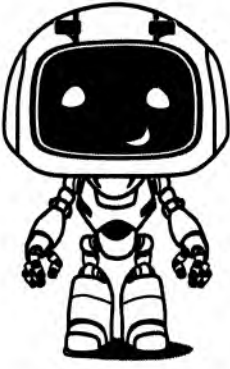
Рис. 22.5. Пример программы для работы с джойстиком



*Рис. 22.6. Проверка работы программы, созданной в FLProg*

Правда, проверить работу программы можно либо подключив серводвигатели, либо выполнив моделирование, как это сделал я (рис. 22.6).

Вот такие эксперименты можно проделать с джойстиком. Выполняя все эксперименты, я не только удовлетворил свое любопытство, но узнал много нового, а что самое главное, готов разобрать игрушку-квадрокоптер, хотя и понял далеко не все.



# В ЗАВЕРШЕНИИ ПОГОВОРИМ О «НЕПОНЯТКАХ»

## Нюансы управления с помощью PWM сигналов микроконтроллера

При рассмотрении радиоуправления я убедился, что можно использовать и модуль с рабочей частотой 2,4 ГГц, и модуль с частотой 433 МГц. Оба модуля при должном построении обеспечат 4 канала управления. Мне понятно, что у модели квадрокоптера четыре моторчика, скоростью которых предстоит управлять с помощью PWM микроконтроллера. И я, признаться, знал, что у Arduino есть несколько выводов для сигнала PWM. Но я никогда не задумывался, можно ли на эти выводы вывести разные сигналы?

**Новичок:** *А это можно – вывести разные сигналы?*

Сейчас, когда я об этом задумался, я решил проверить это экспериментально. Вот простейшая программа для Arduino, в которой на выводы 3, 5, 6, 9 отправляются сигналы PWM с разной скважностью:

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  pinMode(3, OUTPUT);  
  pinMode(5, OUTPUT);  
  pinMode(6, OUTPUT);
```

```
pinMode(9, OUTPUT);
}

void loop() {
// put your main code here, to run repeatedly:
analogWrite(3, 10);
analogWrite(5, 90);
analogWrite(6, 150);
analogWrite(9, 200);
}

```

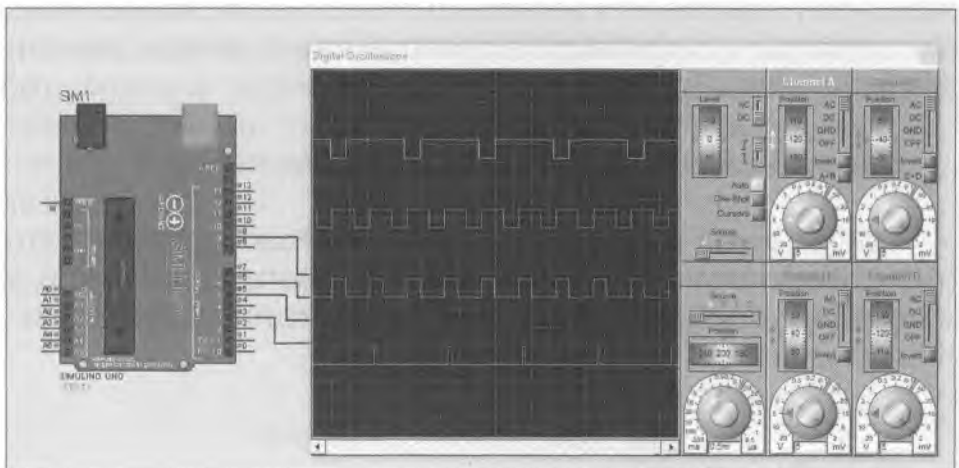
Проверить результат работы программы можно в программе ISIS (рис. 23.1).

Впрямь, на каждом из выходов сигнал с заданной скважностью, что и требуется для питания моторчиков квадрокоптера. Но есть еще один момент, который я хочу проверить, поскольку никогда этого не делал.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Четыре винта квадрокоптера должны вращаться постоянно. А что будет, если изменить скорость вращения винта «на ходу»? Не вызовет ли это перебоев у других винтов?*



**Рис. 23.1.** Четыре сигнала управления для четырех моторов квадрокоптера

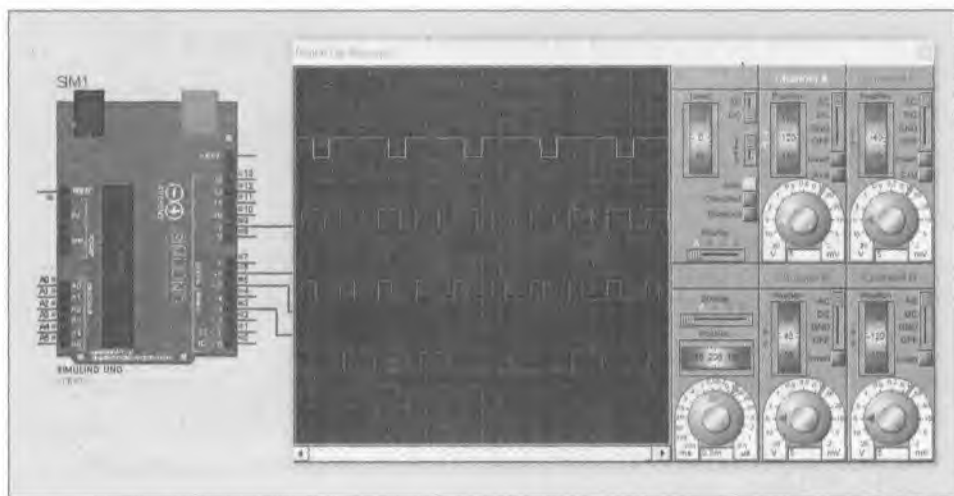
**Вот такая программа позволит мне проверить и это:**

```
void setup() {
// put your setup code here, to run once:
pinMode(3, OUTPUT);
pinMode(5, OUTPUT);
pinMode(6, OUTPUT);
pinMode(9, OUTPUT);
}

void loop() {
// put your main code here, to run repeatedly:
for (byte i = 0; i < 10; i++) {
one *=i;
analogWrite(3, 10 + one);
analogWrite(5, 90);
analogWrite(6, 150);
analogWrite(9, 200);
}
for (byte i = 0; i < 10; i++) {
one *=i;
analogWrite(3, 100 - one);
analogWrite(5, 90);
analogWrite(6, 150);
analogWrite(9, 200);
}
}
```

**Скважность импульсов на одном из выходов меняется, что меняет скорость вращения винта, а импульсы на других выходах должны оставаться неизменными (рис. 23.2). Или не должны?**

**Как и следовало ожидать, изменения скважности импульсов на одном выходе не затрагивают сигналы на других выходах. Теперь понятно, что с помощью Arduino можно успешно управлять винтами квадрокоптера по четырем каналам.**



*Рис. 23.2. Опыт по изменению скважности импульсов на одном выходе*

## || Электронный регулятор скорости

Есть еще одна загадочная для меня сущность — ESC. Аббревиатура говорит, что это просто электронный регулятор скорости. По рассказам очевидцев внутри модуля микроконтроллер, транзисторный ключ и, не обязательно, стабилизатор напряжения. По моим представлениям ESC выполняет обязанности, которые я рассматривал выше, но для одного двигателя. В статьях, которые я нашел в Интернете, чаще рассказывают о работе ESC с бесколлекторными двигателями.

**Новичок:** *А что есть для обычных, коллекторных двигателей?*

В тех же статьях я встречал, что регуляторы скорости могут работать и с коллекторными моторчиками. Применение в качестве ключей полевых транзисторов позволяет управлять большими мощностями, поскольку сопротивление полностью включенного транзистора составляет несколько миллиом.

**ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Но это накладывает определенные ограничения даже на провода, соединяющие ESC с батареей питания.*

Для бесколлекторных двигателей регулятор осуществляет преобразование сигнала о требуемой скорости вращения в трехфазные импульсы. Причем некоторые модели считывают данные датчиков скорости вращения двигателей, подстраивая ее к заданному значению.

У щеточных двигателей ESC использует противоЭДС для определения скорости вращения, что тоже относится к функциям регулятора. Вот такое устройство носит название ESC.

**ПРИМЕЧАНИЕ.**

*Если бы я начал создавать свой первый летательный аппарат, я не решился бы, наверное, использовать бесколлекторный двигатель, но трехфазное управление заставило меня задуматься, как бы это могло выглядеть при использовании Arduino?*

Не знаю, насколько точно соответствие, но среди примеров есть программа *stepper\_speedControl*. Загрузив оттранслированный hex-файл в программу ISIS, я могу наблюдать нечто похожее на то, как я себе представлял напряжения для бесколлекторного двигателя (рис. 23.3).

Но программа, видимо, предназначена для обслуживания шагового двигателя, поскольку в другой программе явно используются четыре обмотки (рис. 23.4).

**Новичок:** *А обязательно использовать бесколлекторные двигатели?*



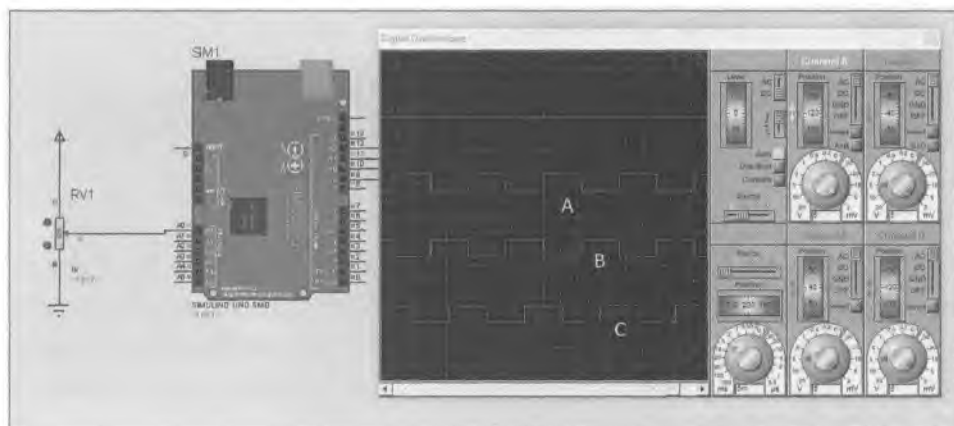


Рис. 23.3. Трехфазное напряжение для двигателя

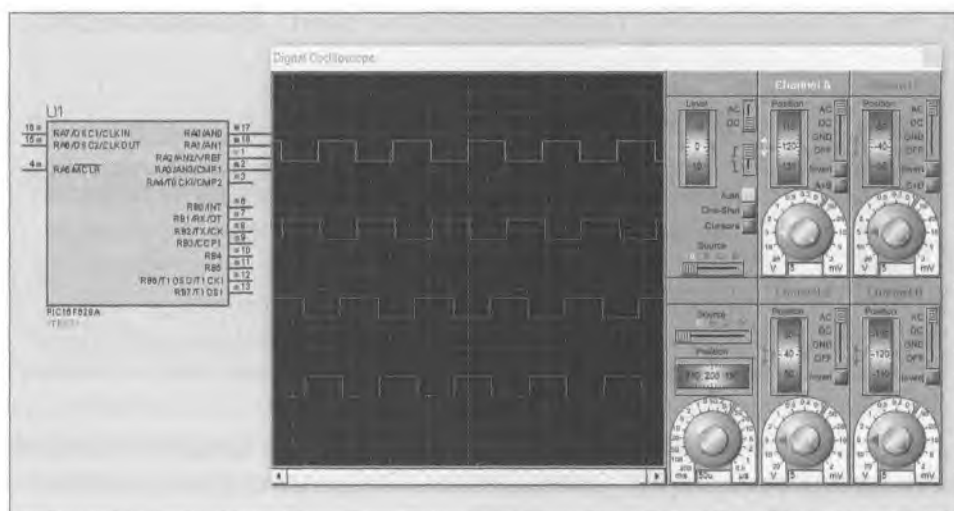


Рис. 23.4. Питательное напряжение для шагового двигателя

Я скажу так, я бы предпочел начать с более простых и дешевых коллекторных двигателей, например, с таких (рис. 23.5).

Если такие двигатели запитать от модуля Arduino сигналами, похожими на те, что на рис. 23.2, добавив ключевые транзисторы 2N2222A, то по моему разумению получится проще. Однако я сам этого не делал, не мне советовать.



Рис. 23.5. Четыре двигателя с пропеллерами для квадрокоптера

## Моделирование компонентов PID-регулятора

**Новичок:** *А меня интересует еще одно непонятное, но, видимо, весьма важное и интересное — PID-регулирование. Разъясните?*

Попробую пояснить. Откроем статью в Википедии, рассказывающую об этом. Я споткнулся там о формулу:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d (de(t)/dt)$$

Дальнейшее чтение раскрыло мне в первую очередь происхождение аббревиатуры — пропорциональное (P), интегральное (I), дифференциальное (D). А формула, как выяснилось, описывает PID-регулятор. Его структура показана на рис. 23.6.

Радиолюбителям будет понятнее, если сказать, что:

- ♦  $e(t)$  — это входной сигнал, но, речь идет об устройстве с обратной связью, за вычетом сигнала обратной связи;
- ♦  $u(t)$  — это сигнал управления.

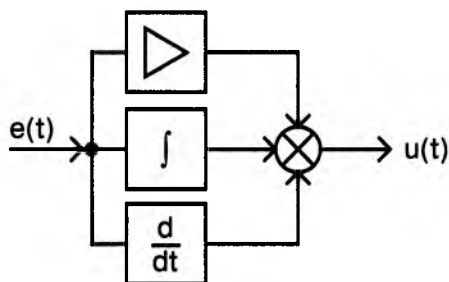


Рис. 23.6. Структура PID-регулятора

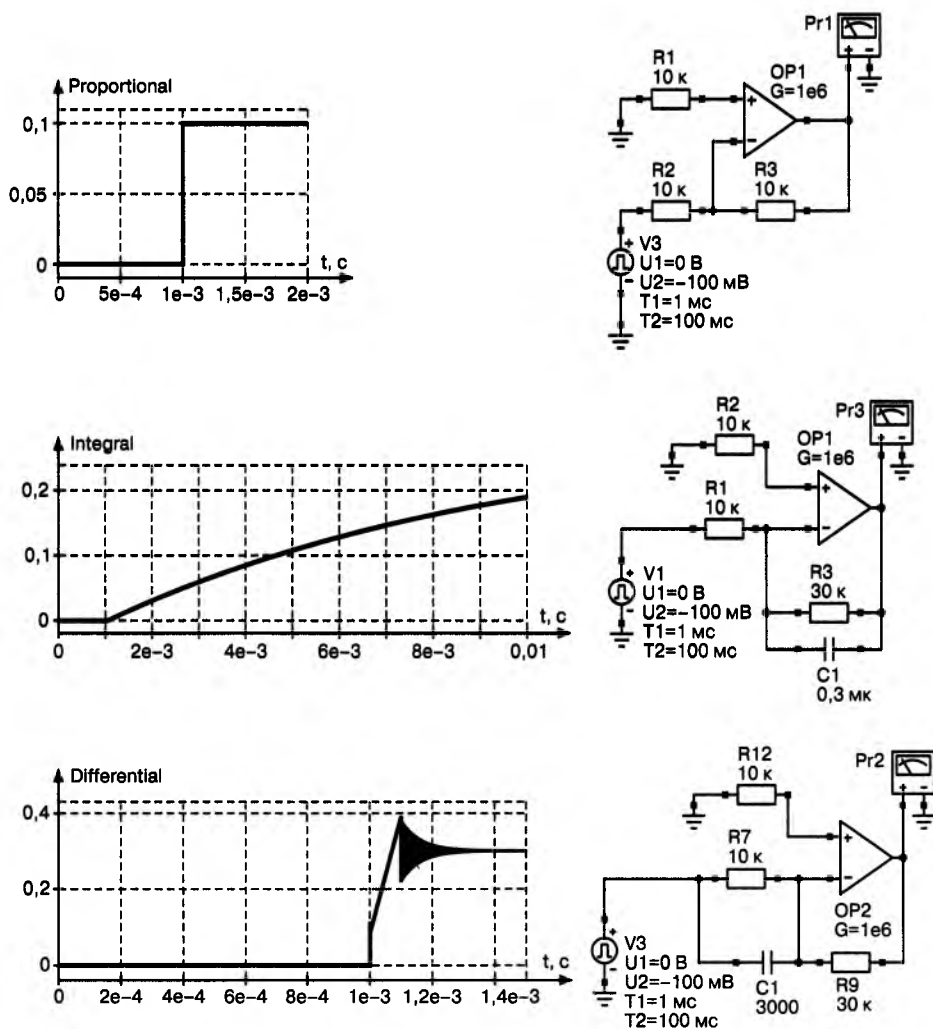


Рис. 23.7. Моделирование компонентов PID-регулятора

Процесс управления может проходить по-разному. Это зависит не только от устройства, но от коэффициентов PID-регулятора.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Если коэффициенты  $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$  выбраны неудачно, ошибка регулирования может долго затухать и даже расходиться.*

Мне, признаться, понятнее моделирование электрических схем. Поэтому я намерен посмотреть на составляющие PID-регулятора (рис. 23.7), используя простую схему.

А, следуя структурной схеме, я сложу все компоненты в единой электрической цепи (рис. 23.8).

В данном случае, конечно, сигнал генератора  $V_3$  не представляет разность входного и сигнала обратной связи, но в остальном, надеюсь, модель близка к структурной схеме.



#### ПРИМЕЧАНИЕ.

*Генератор формирует отрицательное напряжение только по той причине, что сигналы приходят на инвертирующие входы, а выход хотелось получить в области положительного напряжения.*

**Новичок:** *А как бы эту схему испробовать с учетом обратной связи.*

Знаешь что, мой друг, надоело. Я тебя выдумал, я тебя и «развыдумаю». И это в последний раз. Не хочу использовать сложную электрическую схему, но попробую это сделать так (рис. 23.9).

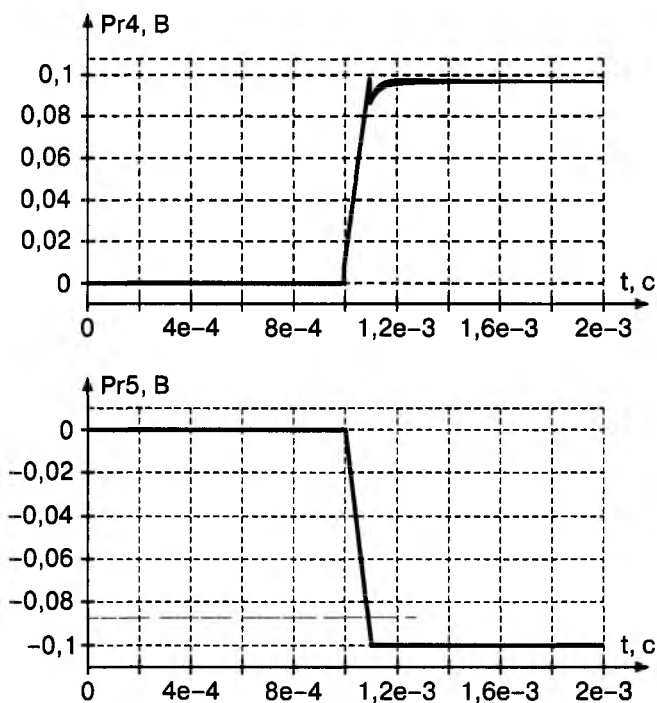
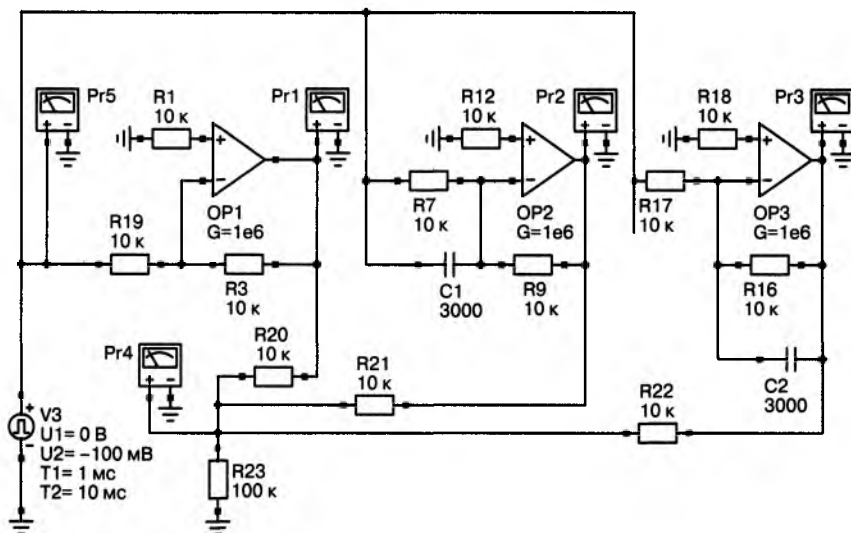
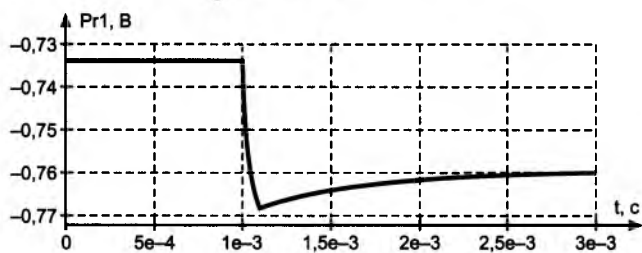
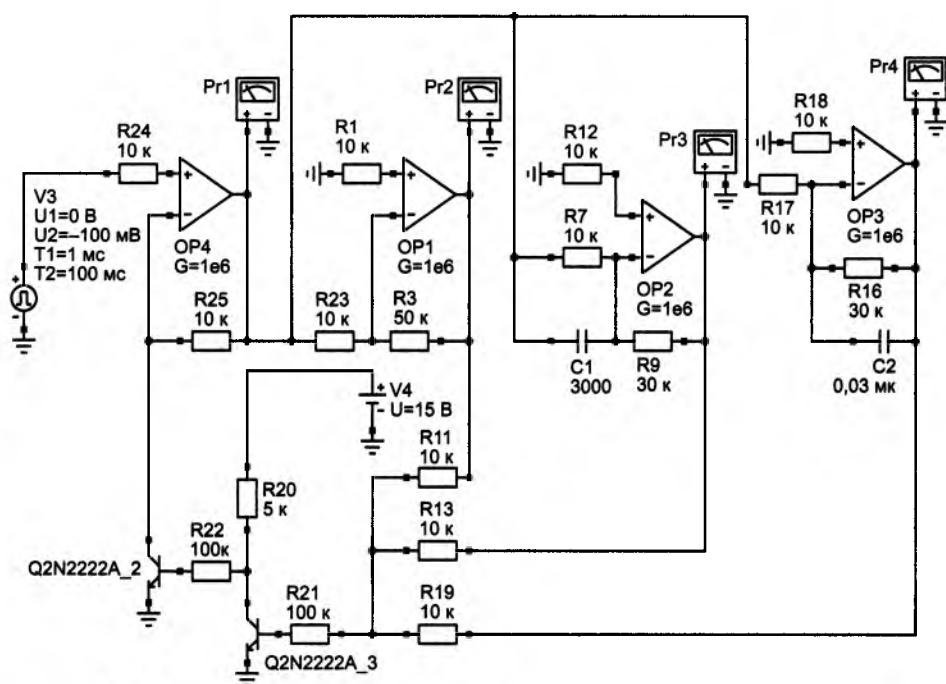


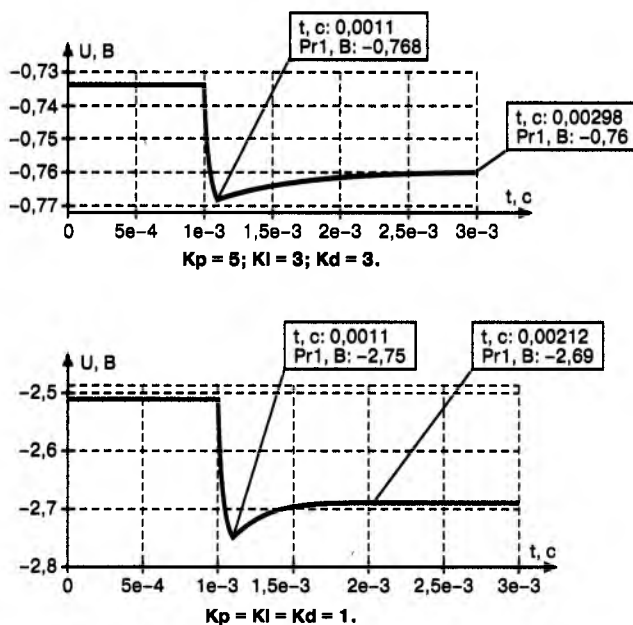
Рис. 23.8. Модель PID-регулятора



transient  
simulation

TR1  
Stop=3 мс  
Points=10100

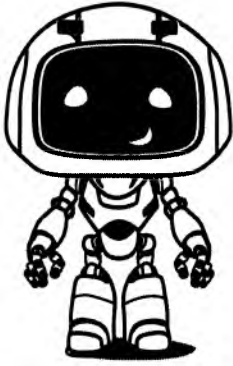
Рис. 23.9. Моделирование с ООС



**Рис. 23.10.** Результат моделирования при разных настройках PID-регулятора

Предполагая, что усиление компонентов PID-регулятора отвечает коэффициентам уравнения, можно получить такой результат на выходе ОР4 (рис. 23.10).

Я не уверен в правильности своих рассуждений и моделирования, но некоторое представление о том, что такое PID-регулятор, я получил. Вы может прочитаете больше об этом в статье [20]. А следуя советам опытных моделеров, я не буду пытаться самостоятельно писать программу, используя PID-регулирование. Я, скажу честно, и не хотел этого делать изначально. Я только хотел понять, что такое PID, чтобы не искать его на плате среди резисторов и микросхем.



# ГЛАВА ПОСЛЕДНЯЯ: КОГДА Ж НАСТУПИТ ЛЕТО?!

Разбираясь с компонентами квадрокоптера, я многое узнал и проникся уважением к тем, кто в полной мере осуществляет создание беспилотников. Об этом я и постарался описать в этой истории, которую обязательно дам прочитать сыну, чтобы и он понял, сколько труда было вложено в его игрушку.

Я привык перед тем, как вскрывать прибор или устройство, осматривать его. И при первом осмотре мне показалось, что я не первый, кто игрушку вскрывает. А после разборки и осмотра внутренностей стало ясно, что один из проводов поврежден. Допрос сына подтвердил мое предположение — он сознался, что у них что-то получилось, что они вскрыли игрушку, а когда закрыли, она перестала летать.

В моей практике это только второй случай, когда в неисправности чего-либо виноват «проводок, который отпал». Неисправность легко устраняемая, после чего квадрокоптер вновь стал «летабельным». Но отправится до лета в коробку и на антресоли. Так оно надежнее.

Вот такая получилась новогодняя история. «Хотите, верьте, хотите, нет!» (рис. 24.1).



**Рис. 24.1.** «Когда ж наступит лето?!»



# ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

1. Гололобов В.Н. Ардуино для любознательных или паровозик из Ромашкова. — СПб.: Наука и Техника. — 2017
2. <http://arduino-diy.com/arduino-kvadrokopter-svoimi-rukami> — бортовой компьютер на Arduino
3. <http://avia.pro/blog/vint-samoleta-lopasti-samoleta-propeller>
4. <http://avia-simply.ru/vozdushnij-vint/>
5. <http://blog.rchip.ru/podklyuchenie-dvukhosevogo-dzhoystika-k-arduino/> — еще, где можно прочитать про схему джойстика
6. <http://сhem.net/uprav/uprav93.php> — приемник и передатчик
7. <http://fishingday.org/aerosani-dlya-rybalki-svoimi-rukami/>
8. <http://idi-online.com/articles/interesno/vozdushnyj-dozor>
9. <http://msd.com.ua/pochemu-i-kak-letaet-samolet/kak-rabotaet-vozdushnyj-vint/>
10. <http://poznayka.org>
11. <http://poznayka.org/s78938t1.html>
12. <http://s-engineer.ru/mikrokontroller-rabotaem-s-sd-kartoj-bez-fajlovoj-sistemoj/> — модель SD-карты для Proteus
13. <http://www.aviaspektr.ru>
14. [http://www.rcmyair.ru/cms.php?id\\_cms=10](http://www.rcmyair.ru/cms.php?id_cms=10) — про вертолет
15. <https://arduino-kit.ru/catalog/id/dvuhkoordinatnyi-djoystik> — про электрическую схему джойстика
16. <https://econet.ru/articles/67312-bespilotniki-s-gibkimi-krylyami-letuchey-myshi>
17. <https://github.com/adafruit/Adafruit-BMP085-Library> — библиотека для работы с нужными датчиками
18. <https://github.com/jrowberg/i2cdevlib> — сайт, где можно скачать библиотеки функций.
19. [https://github.com/sparkfun/BMP180\\_Breakout\\_Arduino\\_Library](https://github.com/sparkfun/BMP180_Breakout_Arduino_Library) — библиотека для работы с нужными датчиками

20. <https://habrahabr.ru/post/227425/> — статья о ПИД регуляторе и квадрокоптере

21. <https://hi-news.ru/technology/skladyvaemye-krylya-zashhityat-bespirotniki-ot-stolknovenij.html>

22. <https://lesson.iarduino.ru/page/urok-11-podklyuchenie-giroskopa-gy-521-mpu-6050-k-arduino/> — сайт с уроками

23. <https://oscarliang.com/?s=PWM%2C+PPM%2C+SBUS> — пояснения к управлению

24. <https://specnazspn.livejournal.com>

25. <https://vitusaf.livejournal.com/37877.html>

26. <https://www.popmech.ru/technologies/news-344342-bespirotnik-nauchilsya-prizemlyatsya-kak-ptitsa/>

27. <http://infocopter.ru/kak-podobrat-akkumulyator-dlya-kvadrokoptera/>

28. <https://ypapa.ru/mjx-c4002.html>

29. <https://coptertime.ru/catalog/gimbal/dvuhosevoy-podves-tarot-t2-2ddd/>

# Издательство НАУКА И ТЕХНИКА

для любознательных читателей



Гололобов В. Н.  
**ЭЛЕКТРОНИКА  
ДЛЯ ЛЮБОЗНАТЕЛЬНЫХ**  
+ виртуальный диск. —  
СПб.: Наука и Техника, 2018. — 320 с.

ISBN 978-5-94387-877-0

419 p.

Чтобы смартфон исправно работал, над его созданием трудились много людей. Это ученые, математики, физики, химики, инженеры-технологи, инженеры, специализирующиеся на электронике, и программисты. Над сборкой, проверкой и наладкой устройства трудились техники и рабочие. Все это для того, чтобы вы могли

воспользоваться плодами электроники: поговорить по телефону, посмотреть кино или поучаствовать в борьбе за лайки.

Эта книга написана специально для вас, начинающих увлекательное восхождение к вершинам электроники. Помогает освоению диалог автора книги с новичком. А еще помощниками в овладении знаниями становятся измерительные приборы, макетная плата, книги и ПК. Компьютер сегодня хороший, а в чем-то и необходимый, инструмент.

На протяжении всего рассказа вы можете использовать бесплатную программу моделирования электрических цепей. Понадобятся для освоения электроники и эксперименты в «живом виде», без этого трудно приобрести опыт. В этом вопросе вам поможет безопасная макетная плата.

Сочетая эксперименты на ПК и реальные опыты с электронными компонентами, вы быстрее поймете назначение и работу не только базовых элементов, но и их многочисленных комбинаций. Словом, вам предстоит долгий путь, и очень важно, чтобы это был добрый путь.

Книга сопровождается ВИРТУАЛЬНЫМ ДИСКОМ, описание которого приведено в конце книги. Предназначена для широкого круга любознательных читателей, увлеченных электроникой, микроконтроллерами, техническим творчеством и занимательными самоделками.

**Ванюшин М. Б.**  
**Электротехника**  
**для любознательных.** — СПб.: Наука и  
Техника, 2017. — 320 с.

**ISBN 978-5-94387-873-2**

**399 р.**

Электротехника — замечательная отрасль человеческих знаний. На электричестве базируется вся наша цивилизация. При этом изучение свойств электричества — процесс интересный. Хорошо, если вы начинаете освоение еще в школьные годы.

Знакомство с миром электротехники принесет много полезного и интересного любознательному читателю. В ходе опытов и экспериментов пытливый читатель познакомится с основополагающими принципами и законами электротехники, поймет, как работают электросети, электрические машины, даже научится самостоятельно рассчитывать простые электрические цепи.

Информация книги будет полезна и слушателем технических учебных заведений, и тем, кто хочет расширить свой кругозор в области электроники и электротехники. Книга предназначена для широкого круга читателей.



**Гололобов В. Н.**  
**ARDUINO для любознательных или**  
**паровозик из Ромашково + вирту-**  
**альный диск.** — СПб.: Наука и Техника,  
2018. — 368 с.

**ISBN 978-5-94387-879-4**

**449 р.**

Эта книга написана для тех, кто хотел бы начать работать с микроконтроллерами. Оптимальным для этого оказывается модуль Arduino. Он не требует программатора, и проект Arduino предлагает удобную среду разработки программ для модуля Arduino.

Появление проекта Arduino привлекло к нему столь пристальное внимание, что было создано много разновидностей модуля, различающихся и ценой, и возможностями. Разработано много дополнительных модулей (шилдов), позволяющих



превратить, например, модуль Arduino Uno в web-сервер. Написан ряд полезных программ для модуля Arduino.

С модулем Arduino можно успешно работать и в Windows, и в Linux, чему производители сегодня уделяют большое внимание. Но успех приходит только с опытом. А опыт начинается с первого шага, который вам предлагается сделать. В ходе беседы автора книги и любознательного новичка все сложности изучения микроконтроллеров вообще и проекта Arduino, в частности, остаются позади.

Книга сопровождается ВИРТУАЛЬНЫМ ДИСКОМ, который содержит проекты, о которых рассказывается в книге, сведения о среде разработки, программы для модуля Arduino, datasheets к микроконтроллерам Arduino Nano, Arduino Uno и многое другое. Обновляемый виртуальный диск размещен на странице этой книги на сайте издательства [www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru).

Книга предназначена для широкого круга любознательных читателей, увлеченных микроконтроллерами, техническим творчеством, электронными самоделками.



**Белов А.В.**

**Программирование ARDUINO.**

**Создаем практические устройства  
+ виртуальный диск. —**

СПб.: Наука и техника, 2018. — 272 с.

ISBN 978-5-94387-882-4

379 р.

Книга посвящена созданию практических устройств с использованием модуля Ардуино. Этот модуль в настоящее время стал очень популярным. Он оказался настолько удачной разработкой и получил настолько широкое распространение в мире, что сегодня признан идеальной основой для изучения премудростей микроконтроллерной техники.

Для данной книги автор специально разработал ряд практических схем и устройств, на основе которых читатель постепенно, от простого к сложному, сможет научиться писать программы и разрабатывать свои устройства на основе модуля Ардуино. Книга содержит подробное описание каждой включенной в нее программы. Вы узнаете как создается алгоритм, как разрабатывается схема и как пишется программа. Параллельно, на тех же примерах, идет изучение языка программирования Ардуино.

Все функции, операторы и другие элементы этого языка подробно описываются перед тем, как они будут использованы в очередной конкретной программе. Сотни тысяч плат Ардуино используются каждый день, стимулируя людей во всем мире создавать что-то новое и интересное.

Книга предназначена для широкого круга радиолюбителей и для всех, кто изучает языки программирования и учится создавать электронные устройства.

ВИРТУАЛЬНЫЙ ДИСК содержит тексты всех программных примеров из книги, инсталляционный пакет среды разработки IDE, архивы используемых в книге программных библиотек, видеоролики, набор вспомогательной справочной информации и многое другое.

**Белов А.В.**

**ARDUINO: от азов программирования до создания практических устройств.** — СПб.: Наука и Техника, 2018. — 480 с.

**ISBN 978-5-94387-884-8**

**599 р.**

Читатель пройдет путь от основ цифровой логики, булевой алгебры до программирования микроконтроллеров и создания на них практических устройств. В книге подробно рассматриваются принципы работы микропроцессорной системы, архитектура построения микроконтроллеров семейства AVR, составляющего основу модулей Arduino. Именно на них выполнены все устройства, на базе которых идет обучение. Модуль Arduino оказался настолько удачной разработкой, что сегодня признан идеальной основой для изучения микроконтроллерной техники.

Основной частью книги являются практический курс по схемотехнике и программированию, состоящий из 15 практических уроков. Для каждого урока автор специально разработал реальное устройство на основе модуля Arduino. Переходя последовательно от простого к сложному, читатель научится писать программы, а также освоит искусство схемотехники.

Одновременно на тех же примерах идет изучение языка программирования Arduino. Все функции, операторы и другие элементы этого языка подробно описываются перед тем, как о них пойдет речь при описании конкретной программы.



Неоценимую помощь в изучении оказывает ВИРТУАЛЬНЫЙ ДИСК, содержащий инструментальные программы, дополнительные библиотеки для Arduino, видео презентации и полный набор Arduino-скетчей из книги в электронном виде и многое другое.

Книга создана специально для начинающих конструкторов микроконтроллерной техники, студентов и всех, кто хочет досконально изучить секреты и премудрости микроэлектроники.



**Гололобов В.Н.**  
**Компьютер в лаборатории радиолюбителя. —**

СПб.: Наука и Техника, 2018. — 384 с.

ISBN 978-5-94387-883-1

419 p.

Радиолюбители часто сталкиваются с проблемой нехватки приборов для проверки и настройки создаваемых ими устройств. Особенно это относится к начинающим радиолюбителям, для которых покупка осциллографа, а без него не обойтись, — большая финансовая проблема.

Сегодня у каждого радиолюбителя есть компьютер или планшет. А ПК — это целая лаборатория, включающая все необходимые приборы в виде программ моделирования. Можно провести опыты с простыми электрическими схемами, позволяющими изучить свойства основных радиокомпонентов, можно экспериментировать со схемами сложных устройств. Таков диапазон работы не только дорогостоящих коммерческих программ, но и их бесплатных аналогов.

Для загрузки программы в большинство микроконтроллеров нужен программатор, который подключается к компьютеру. А роботы, даже самые простые, требуют для своего создания не только использование микроконтроллеров, но и умения создавать свои программы. Это невозможно без компьютера.

О том, как компьютер становится полезным инструментом в лаборатории радиолюбителя, и рассказано в этой книге: от простых экспериментов в программах моделирования до работы с микроконтроллерами. Книга предназначена для широкого круга радиолюбителей.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ к книге, листинги программ, рассмотренных в книге, справочную информацию и многое другое можно скачать с сайтов автора и издательства Наука и Техника.



# Книжный магазин

издательства «Наука и Техника»

приглашает за покупками

... ➤ **Предлагаем широкий ассортимент технической литературы ведущих издательств (более 2000 наименований):**

- Компьютерная литература
- Радиоэлектроника
- Телекоммуникации и связь
- Транспорт, строительство
- Научно-популярная медицина, педагогика, психология

... ➤ **Чем привлекателен наш магазин:**

- низкие цены;
- ежедневное пополнение ассортимента;
- поиск книг под заказ;
- обслуживание за наличный и безналичный расчет;
- гибкая система скидок;
- комплектование библиотек;
- обеспечение школ учебниками по информатике;
- возможна доставка.

**Наш адрес:** г. Санкт-Петербург  
пр. Обуховской Обороны д. 107  
ст. метро Елизаровская

**Справки о наличии книг по тел. 412-70-26**

**E-mail: [admin@nit.com.ru](mailto:admin@nit.com.ru)**  
(рассылка ассортиментного прайс-листа по запросу)

Мы работаем с 10 до 19 часов без обеда и выходных  
(в субботу и воскресенье до 18 час)





Издательство «Наука и Техника»

## КНИГИ ПО КОМПЬЮТЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ, МЕДИЦИНЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

### Уважаемые читатели!

Книги издательства «Наука и Техника» вы можете:

- **заказать** в нашем интернет-магазине **БЕЗ ПРЕДОПЛАТЫ** по **ОПТОВЫМ** ценам

**www.nit.com.ru**

- более 3000 пунктов выдачи на территории РФ, доставка 3—5 дней
- более 300 пунктов выдачи в Санкт-Петербурге и Москве, доставка — на следующий день



- **приобрести в магазине издательства по адресу:**

Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, д.107

М. Елизаровская, 200 м за ДК им. Крупской

Ежедневно с 10.00 до 18.30

Справки и заказ: тел. (812) 412-70-26

- **приобрести в Москве:**

«Новый книжный» Сеть магазинов  
ТД «БИБЛИО-ГЛОБУС»

тел. (495) 937-85-81, (499) 177-22-11  
ул. Мясницкая, д. 6/3, стр. 1, ст. М «Лубянка»  
тел. (495) 781-19-00, 624-46-80

Московский Дом Книги,  
«ДК на Новом Арбате»

ул. Новый Арбат, 8, ст. М «Арбатская»,  
тел. (495) 789-35-91

Московский Дом Книги,  
«Дом технической книги»

Ленинский пр., д.40, ст. М «Ленинский пр.»,  
тел. (499) 137-60-19

Московский Дом Книги,  
«Дом медицинской книги»

Комсомольский пр., д. 25, ст. М «Фрунзенская»,  
тел. (499) 245-39-27

Дом книги «Молодая гвардия»

ул. Б. Полянка, д. 28, стр. 1, ст. М «Полянка»  
тел. (499) 238-50-01

- **приобрести в Санкт-Петербурге:**

Санкт-Петербургский Дом Книги  
Буквоед. Сеть магазинов

Невский пр. 28, тел. (812) 448-23-57  
тел. (812) 601-0-601

- **приобрести в регионах России:**

г. Воронеж, «Амиталь» Сеть магазинов  
г. Екатеринбург, «Дом книги» Сеть магазинов  
г. Нижний Новгород, «Дом книги» Сеть магазинов  
г. Владивосток, «Дом книги» Сеть магазинов  
г. Иркутск, «Продалить» Сеть магазинов  
г. Омск, «Техническая книга» ул. Пушкина, д.101

тел. (473) 224-24-90  
тел. (343) 289-40-45  
тел. (831) 246-22-92  
тел. (423) 263-10-54  
тел. (395) 298-88-82  
тел. (381) 230-13-64

## Мы рады сотрудничеству с Вами!