

Электроника



Валерий Яценков

ТВОЙ ПЕРВЫЙ КВАДРОКОПТЕР: теория и практика



Валерий Яценков

ТВОЙ ПЕРВЫЙ КВАДРОКОПТЕР: теория и практика

Санкт-Петербург
«БХВ-Петербург»
2016

УДК 629.735.4+379.826
ББК 39.55я92
Я92

Яценков В. С.

Я92 Твой первый квадрокоптер: теория и практика. — СПб.: БХВ-Петербург, 2016. — 256 с.: ил. — (Электроника)

ISBN 978-5-9775-3586-1

Детально изложены практические аспекты самостоятельного изготовления и эксплуатации квадрокоптеров. Рассмотрены все этапы: от выбора конструкционных материалов и подбора компонентов с минимизацией финансовых затрат до настройки программного обеспечения и ремонта после аварии. Уделено внимание ошибкам, которые часто совершают начинающие авиамodelисты. В доступной форме даны теоретические основы полета мультироторных систем и базовые понятия работы со средой Arduino IDE. Приведено краткое описание устройства и принципа работы систем GPS и Глонасс, а также современных импульсных источников бортового питания и литий-полимерных батарей. Подробно изложен принцип работы и процесс настройки систем OSD, телеметрии, беспроводного канала Bluetooth и популярных навигационных модулей GPS Ublox. Рассказано об устройстве и принципах работы интегральных сенсоров и полетного контроллера. Даны рекомендации по подбору оборудования FPV начального уровня, приведен обзор программ для компьютеров и смартфонов, применяемых при настройке оборудования квадрокоптера.

*Для читателей,
интересующихся электроникой, робототехникой, авиамodelизмом*

УДК 629.735.4+379.826
ББК 39.55я92

Группа подготовки издания:

Главный редактор	<i>Екатерина Кондукова</i>
Зам. главного редактора	<i>Игорь Шишигин</i>
Зав. редакцией	<i>Екатерина Капалыгина</i>
Редактор	<i>Анна Кузьмина</i>
Компьютерная верстка	<i>Ольги Сергиенко</i>
Корректор	<i>Зинаида Дмитриева</i>
Дизайн обложки	<i>Марины Дамбиевой</i>

Подписано в печать 30.11.15.
Формат 70×100^{1/16}. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,64.
Тираж 1500 экз. Заказ №
"БХВ-Петербург", 191036, Санкт-Петербург, Гончарная ул., 20.
Первая Академическая типография "Наука"
199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12/28

ISBN 978-5-9775-3586-1

© Яценков В. С., 2016
© Оформление, издательство "БХВ-Петербург", 2016

Оглавление

- От автора 11
- ЧАСТЬ I. ТЕОРИЯ 13
- Глава 1. Принцип работы квадрокоптера 15
- Глава 2. Обязательные компоненты квадрокоптера..... 19
 - Рама..... 19
 - Полетный контроллер 21
 - Принцип работы интегрального гироскопа..... 22
 - Принцип работы интегрального акселерометра 24
 - Принцип работы интегрального магнитометра (компаса)..... 26
 - Устройство интегрального барометра 28
 - Устройство ультразвукового сонара 30
 - Аппаратура радиоуправления..... 33
 - Функция Failsafe..... 36
 - Модуляция сигнала PPM..... 37
 - Формат сигналов PCM 39
 - Совместимость аппаратуры стандартов DSM2/DSMX 40
 - Сопряжение приемника и передатчика (биндинг) 41
 - Импульсы PWM, триммеры и субтриммеры..... 41
 - Расходы и экспоненты..... 42
 - Конвертер PPM-SUM 44
 - Приемник-спутник..... 46
 - Встроенная телеметрия 46
 - Антенны..... 46
 - Ненаправленные антенны 49
 - Направленные антенны 52
 - Системы слежения за направлением 53
 - Диверсификация антенн..... 55
 - Двигатели 56
 - Воздушные винты..... 58
 - Регуляторы оборотов..... 60

Батарея и зарядное устройство	62
Обозначения параметров силовой литиевой батареи	63
Зарядка литиевых батарей	64
Особенности эксплуатации и хранения	67
Подготовка батарей к хранению	68
Источник бортового питания	68
Последовательный линейный стабилизатор	69
Импульсные стабилизаторы-преобразователи	70
Индикатор разряда батареи	72
Глава 3. Дополнительные компоненты квадрокоптера	74
Оборудование видеоканала FPV	74
Видеокамеры	75
Видеоконмутатор	75
Стабилизированный подвес	76
Видеопередатчик и видеоприемник	78
Видеомонитор и видеоочки	79
Приемники GPS	80
Принцип определения координат	81
Геометрический фактор	83
Альманах и эфемериды	83
"Холодный" старт	84
"Теплый" старт	84
"Горячий" старт	84
Технология A-GPS	85
Антенны GPS	85
Поток данных GPS, протокол NMEA	86
Протокол U-BLOX (UBX)	87
Адаптер Bluetooth	88
Телеметрия и OSD	89
Универсальный радиоканал (радиомодем)	94
Бустеры и репитеры	95
Жидкокристаллические и OLED-дисплеи	97
Средства поиска: биперы, маячки, GPS-трекеры	99
Сервомашинки	101
ЧАСТЬ II. ПРАКТИКА	105
Глава 4. Подготовка к изготовлению квадрокоптера	107
Подбор силовых компонентов	108
Расчеты и оптимизация	108
Стойкость конструкции к авариям	111
Конструкционные материалы	113
Виброзащита	118
Избыточное демпфирование	119
Демпфирование подвеса камеры	120
Фиксация резьбовых соединений	121
Крепление моторов и винтов	121
Магнитоизоляция	124

Глава 5. Сборка и настройка квадрокоптера	126
Изготовление рамы.....	126
Балансировка воздушных винтов.....	129
Балансировка моторов.....	131
Сборка квадрокоптера.....	133
Настройка опций и параметров прошивки	134
Подключение платы контроллера к компьютеру.....	135
Среда разработки Arduino IDE	136
Настройка базовых опций кода прошивки	138
Тип рамы	139
Минимальный рабочий газ	139
Максимальный рабочий газ	140
Минимальный газ при включении	140
Скорость шины I ² C	140
Тип стандартной платы	141
Независимые сенсоры	141
Активация моторов (арминг)	141
Модификации радиоприемника.....	141
Скорость портов.....	142
Фильтр гироскопа	143
Функция Failsafe.....	144
Мертвая зона и нейтральная зона.....	144
Магнитное склонение	145
Альтернативная прошивка MahoWii.....	146
Функциональные режимы контроллера.....	147
Конфигуратор MultiWiiConf.....	150
Калибровка акселерометра	150
Конфигуратор MultiWii WinGUI.....	154
Терминал для работы с COM-портами	156
Программы для мобильных устройств	157
EZ-GUI Ground Station.....	157
NAZE32 Configurator	158
MultiWii Configuration Tool.....	159
Калибровка регуляторов оборотов.....	159
Настройка канала радиоуправления.....	160
Первое включение и первый взлет.....	162
Триммирование акселерометров.....	164
Настройка PID.....	165
Базовая настройка параметра <i>P</i>	166
Настройка <i>I</i> и <i>D</i> для плавного стабильного полета.....	167
Настройка <i>I</i> и <i>D</i> для активного пилотирования и акро.....	167
Глава 6. Подключение и настройка внешних модулей	168
Подключение адаптера USB-COM.....	168
Подключение источника питания	169
Подключение звукоизлучателя.....	171
Подключение ультразвукового сонара	173
Подключение светодиодной подсветки.....	175
Подключение посадочных огней.....	179

Подключение приемника по шине S-BUS	180
Подключение и настройка адаптера Bluetooth	181
Настройка модулей HC-06 и HC-07	182
Настройка модулей HC-05	184
Установка связи модуля с компьютером	185
Подключение радиомодема	186
Подключение модемов к компьютеру, проверка и настройка	187
Подключение наземного модема к мобильным устройствам	190
Подключение бортового модема к полетному контроллеру	191
Подключение модема к порту SERIAL3 полетного контроллера	191
Подключение и настройка приемника GPS	192
Подключение приемника к компьютеру	193
Получение доступа к сервису AssistNow Online	195
Изменение текущих настроек	196
Подключение приемника к полетному контроллеру	199
Подключение приемника GPS с прошивкой MahoWii	200
Подключение дисплея	201
Монохромный OLED дисплей CRIUS CO-16	201
Настройка параметров через меню дисплея	202
Проблемы с подключением дисплеев CRIUS OLED и их решение	202
Самодельный цветной дисплей	204
Запись прошивки в контроллер дисплея	207
Настройка прошивки	208
Монтаж и подключение оборудования FPV	209
Видеокамера	210
Видеопередатчик и приемник	211
Видеоочки и монитор	215
Подключение подвеса к контроллеру	216
Настройка при помощи EZ-GUI Ground Station	217
Настройка подвеса при помощи конфигулятора MultiWiiConf	218
Настройка подвеса в прошивке MahoWii	219
Настройка модуля MinimOSD	219
Структура экрана KV_Team_OSD v.2.3	226
Службное меню прошивки KV_Team_OSD	226
Подключение датчиков тока и напряжения к модулю OSD	229
Подключение датчиков тока и напряжения к контроллеру	232
Настройка аппаратного измерителя тока и потребленной энергии	233
Настройка программного измерителя потребленной энергии	234
Глава 7. Обслуживание и ремонт квадрокоптера	235
Предполетная проверка	235
Характерные неполадки	235
Ремонт квадрокоптера после аварии	237
Осмотр и поиск дефектов	237
Ремонт двигателей	238
Разборка двигателя	239
Проверка и замена вала	240
Проверка и замена подшипников	241
Чистка и смазка подшипников	242

ПРИЛОЖЕНИЯ245

Приложение 1. Управление коптером со смартфона246

Приложение 2. Сетка частот каналов видеотракта249

**Приложение 3. Команды управления и конфигурирования
при помощи рукояток пульта.....251**

Приложение 4. Описание электронного архива.....252

Предметный указатель253

*Посвящаю эту книгу
самым дорогим для меня людям:
дочери Полине, супруге Ольге
и, конечно же, моей маме —
с любовью и благодарностью за поддержку*

От автора

Уважаемый читатель!

Автор не ставил перед собой задачу создать исчерпывающую энциклопедию или настольный справочник. Вы держите в руках руководство для новичков, назначение которого — помочь вам построить свой первый квадрокоптер, обойдясь без нелепых технических ошибок и чрезмерных денежных затрат. Интеллектуальная цена вхождения в это сложное хобби весьма высока. Автор постарался сберечь для вас главную ценность — время.

В книге плотно переплетаются теория и практика, иначе в авиамоделизме нельзя. Материал не обязательно читать по порядку. Обращайтесь к нужным главам и разделам по мере работы над своей конструкцией. Рекомендуем, прежде всего, ознакомиться с общими принципами работы квадрокоптера и определиться с набором компонентов, которые необходимо приобрести. Поскольку наиболее выгодный путь для покупки компонентов — это заказ в интернет-магазинах, то с момента заказа до получения может пройти несколько недель. Пока заказанные компоненты находятся в пути, вы можете более подробно изучить теорию и установить на компьютер необходимое программное обеспечение.

Это важно: автору пришлось пойти на сознательные упрощения и сокращения некоторых сегментов информации, чтобы сделать ее более доступной. Далее вы самостоятельно будете развиваться в наиболее интересном для вас направлении: видеосъемка, FPV, развлекательные полеты, маршрутные полеты по GPS и т. д. Все, о чем вы прочтете, проработано и проверено автором на практике.

Подбор компонентов и программного обеспечения для первого квадрокоптера основан на опыте тысяч ваших предшественников из разных стран и означает лишь, что собранный по нашим рекомендациям аппарат будет недорогим, надежным, простым в управлении и полетит сразу после окончания сборки. Зачастую выбор компонентов и программного обеспечения является поводом для ожесточенных "религиозных войн" на форумах. Пока воздержитесь от участия в них и не воспринимайте слишком серьезно противоречивые мнения сторон.



ЧАСТЬ I

ТЕОРИЯ

- Глава 1.** Принцип работы квадрокоптера
- Глава 2.** Обязательные компоненты квадрокоптера
- Глава 3.** Дополнительные компоненты квадрокоптера

ГЛАВА 1



Принцип работы квадрокоптера

Квадрокоптеры, которым посвящена эта книга, являются частным случаем *мультикоптеров* — многороторных устройств, которые держатся в воздухе, управляются и перемещаются только за счет несущих пропеллеров. В этом мультикоптеры схожи с вертолетами. Для простоты и краткости в обиходной речи мультикоптеры часто называют просто *коптерами*. Мы тоже будем использовать этот термин в случаях, когда количество роторов не играет роли.

Классический квадрокоптер представляет собой крестообразную раму, на концах которой вертикально закреплены моторы (рис. 1.1).

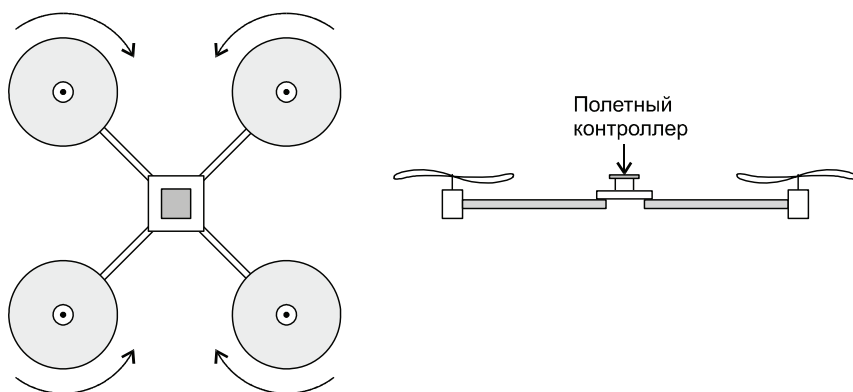


Рис. 1.1. Схема конструкции простейшего квадрокоптера

Воздушные винты, расположенные на диагональных лучах рамы, создают суммарную вертикальную тягу. Синхронно регулируя обороты моторов, можно заставить квадрокоптер подниматься вверх, зависать или опускаться. Если изменить обороты моторов неравномерно, то квадрокоптер отклонится от горизонтального положения и полетит в сторону отклонения. Например, при увеличении оборотов двух задних моторов его задняя часть приподнимется и квадрокоптер полетит вперед. За счет неравномерного изменения оборотов всех моторов квадрокоптер способен лететь в произвольном направлении.

Очевидно, что при наклоне рамы за счет появления горизонтальной составляющей вектора тяги V_x уменьшится вертикальная составляющая V_y и квадрокоптер начнет терять высоту. Это явление иногда называют "соскальзыванием", потому что коптер начинает двигаться вниз по диагональной траектории (рис. 1.2), словно скользя по склону. Поэтому для поддержания высоты при наклоне квадрокоптера обороты всех моторов должны возрасти на некую одинаковую компенсирующую величину.

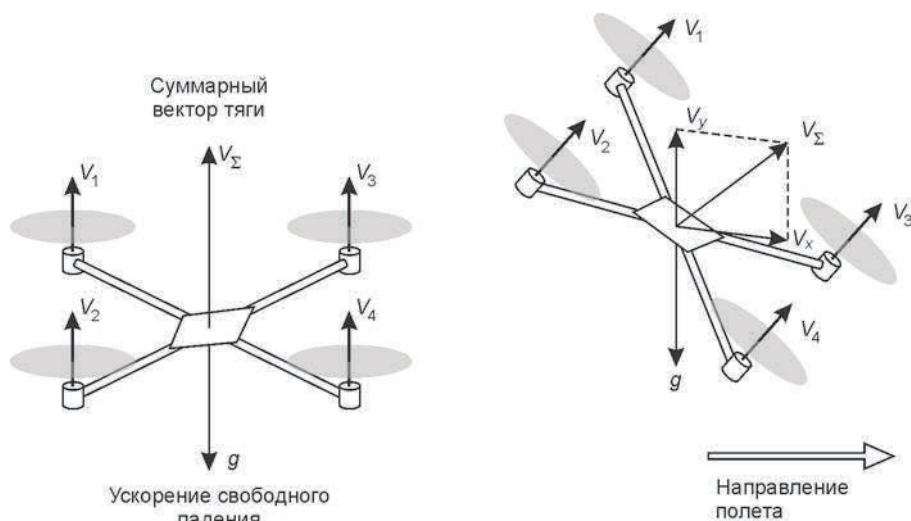


Рис. 1.2. Векторы тяги квадрокоптера

Вращающиеся винты создают реактивный крутящий момент, который старается развернуть квадрокоптер в сторону, противоположную вращению винта. Поэтому в квадрокоптере два винта вращаются по часовой стрелке и два против часовой стрелки, взаимно уравновешивая реактивные моменты. Если увеличить обороты моторов, вращающихся по часовой стрелке, и в равной мере уменьшить обороты у вращающихся против часовой стрелки, то суммарная вертикальная тяга не изменится, однако реактивный момент раскомпенсируется и рама начнет поворачиваться против часовой стрелки. Аналогично можно заставить квадрокоптер поворачиваться по часовой стрелке.

Угловые отклонения по осям следовало бы называть "тангаж", "крен" и "рыскание", но на практике прижились англоязычные термины, которые читателю следует запомнить: **Pitch** (наклон вперед-назад), **Roll** (наклон вправо-влево), **Yaw** (вращение в горизонтальной плоскости) и **Throttle** (общий газ) — рис. 1.3.

Оборотами моторов в режиме реального времени управляет специальная вычислительная система на основе достаточно быстродействующего микроконтроллера, так называемый *полетный контроллер*. Он постоянно опрашивает встроенные гироскопы, акселерометры, барометр, сигналы от приемника радиуправления и на основе полученных данных рассчитывает управляющие сигналы для каждого мотора в отдельности.

Теперь, когда мы рассмотрели общие принципы работы квадрокоптера, можно проанализировать достоинства и недостатки этого типа летательных аппаратов.

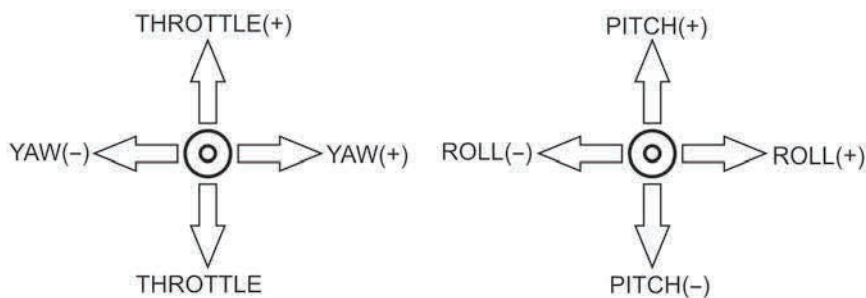


Рис. 1.3. Соответствие отклонений коптера рычагам на пульте

Достоинства.

□ Простота конструкции и низкая стоимость ущерба при аварии.

Как мы уже говорили, квадрокоптеры держатся в воздухе только за счет несущих пропеллеров и этим похожи на вертолет. Однако полноценная модель вертолета имеет весьма сложную и точную механическую часть — автомат перекоса, позволяющий управлять положением вертолета в пространстве. Кроме этого, вертолет оснащен механизмом отбора мощности на хвостовой винт и узлом переменного шага этого винта. Только простые и дешевые маленькие модели вертолетов не имеют автомата перекоса, но и управляются они намного хуже. По сравнению с вертолетом механическая часть даже у большого профессионального квадрокоптера предельно проста и не зависит от размеров модели. Это жестко закрепленные на лучах рамы моторы, на валы которых надеты воздушные винты.

Автомат перекоса вертолета требует сложной и длительной регулировки даже при наличии опыта. Каждая авария вертолета, даже незначительная, как правило, дорого обходится владельцу (автор убедился в этом на собственном опыте). Причем в запасе приходится держать широкий ассортимент различных запчастей. Самодельный квадрокоптер можно разбить почти полностью и восстановить за один выходной день, пользуясь в основном подручными материалами. В запасе достаточно иметь пару запасных валов и подшипников для моторов, один-два регулятора оборотов, десятков винтов правого и левого вращения и материал для изготовления лучей рамы.

□ Простота управления и обучения.

Несмотря на то, что квадрокоптер, как и вертолет, управляется за счет смещения вектора тяги, он более стабилен в воздухе (чем крупнее, тем стабильнее). Управление квадрокоптером интуитивно более понятно и легче осваивается. Кроме того, благодаря наличию полетного контроллера, правильно собранный и минимально настроенный квадрокоптер способен висеть в воздухе практически без участия пилота.

□ Простота самостоятельного изготовления.

Если заранее приобрести минимальный набор необходимых компонентов и иметь обычные инструменты, то изготовить простой, но качественный квадро-

коптер можно за один-два выходных дня. При создании рамы можно обойтись парой кусков фанеры и несколькими деревянными рейками, и это не ухудшит летные качества устройства.

□ Возможности для творчества.

К сожалению, в последнее время радиолюбителям все труднее найти прикладную область для своего хобби. Многие из того, что можно было бы изготовить своими руками, проще и дешевле купить в готовом виде, с промышленным качеством. В схожей ситуации сейчас и программисты-любители. Писать любительские прикладные программы стало либо слишком сложно, либо незачем.

Квадрокоптеры придают новый смысл многим увлечениям. Можно участвовать в разработке открытого программного обеспечения или создавать свое; разрабатывать с нуля и изготавливать на самодельном станке с ЧПУ сложные детали конструкции; экспериментировать с аэровидеосъемкой или работать паяльником. Менять и развивать конструкцию самодельного квадрокоптера можно практически бесконечно.

Недостатки.

□ Полное отсутствие летучести.

Квадрокоптер хорошо летает, только пока полностью исправен. Стоит выйти из строя одному из моторов или полетному контроллеру, как летательный аппарат потеряет управление и рухнет, беспорядочно кувыркаясь. В аналогичной ситуации вертолет способен к авторотации, т. е. тормозит падение за счет вращения несущего винта набегающим потоком воздуха, а самолет способен планировать. Даже наличие шести или восьми несущих винтов не спасает мультикоптеры от крушения. Некоторым опытным пилотам удавалось спасти гекса- и октакоптеры при отказе одного из моторов, но это исключение из правила.

□ Высокий порог знаний.

Можно купить готовый квадрокоптер и запускать его, не задумываясь, как он работает. Но если вы решили сами строить квадрокоптер или модернизировать покупной, то придется хотя бы на начальном уровне научиться понимать радиосхемы, паять, прошивать микроконтроллеры, читать технические тексты на английском языке, разбираться в принципе работы GPS и т. д.

□ Низкая динамика и управляемость.

Обратная сторона стабильности квадрокоптеров — вялость и инерционность в управлении. Особенно вяло квадрокоптеры управляются по курсу (Yaw). Поэтому на квадрокоптере невозможно исполнить традиционные фигуры высшего пилотажа самолетов или инверсный полет, как на модели вертолета. Впрочем, при наличии опыта на коптере можно эффектно исполнить переворот или пролет по кругу с вращением вокруг оси. Но здесь надо понимать, что каждый летательный аппарат хорош для своих целей, и вялость в управлении вряд ли является недостатком, когда речь идет о полетах по камере, видеосъемке или развлечении в выходной день. Для динамичных полетов имеет смысл приобрести или построить модель спортивного самолета, у которой, кстати, тоже будут специфические недостатки.

ГЛАВА 2



Обязательные компоненты квадрокоптера

Компоненты квадрокоптера можно условно разделить на две группы: основные, без которых эксплуатация устройства невозможна или опасна, и дополнительные, наличие которых зависит от потребностей владельца. В этой главе мы рассмотрим основные компоненты.

Рама

На рис. 2.1 изображены основные варианты конструкции рамы. На практике возможны различные вариации и гибриды, но в любом случае рама состоит из лучей и, в большинстве случаев, центральной несущей части. Иногда встречаются рамы, состоящие только из трубчатых деталей, а также миниатюрные рамы, изготовленные из листового текстолита, одновременно являющегося печатной платой для электронных компонентов. Моторы всегда крепятся на концах лучей. Основным показателем размера квадрокоптера является расстояние между осями моторов по диагонали.

По расположению моторов относительно направления полета выделяют два основных типа рам: "+" и "X". Подвидом рамы типа "X" является рама типа "H".

Наиболее популярны рамы типа "X". Очевидное преимущество такой рамы — удобное расположение видеокамеры, когда лучи рамы не попадают в кадр. У рамы типа "X" более высокая устойчивость к мелким авариям. Наиболее частой аварией, особенно в период обучения, является цепляние земли при быстром наклонном пролете или "заваливании", либо падение под углом. В случае "+"-образной рамы весь удар чаще приходится на один луч, который сильно страдает, тогда как при распределении удара на два луча ущерб обычно ограничивается сломанными пропеллерами. Кроме того, большинству пилотов психологически комфортнее управлять именно типом "X". В свою очередь, квадрокоптер с рамой типа "+" несколько быстрее и острее реагирует на команды "вправо-влево" и "вперед-назад", поэтому больше подходит любителям динамичного пилотирования.

Рама типа "H" удобна при построении миниатюрных коптеров, а также полноразмерных конструкций из карбоновых трубок и часто используется при построении

специализированных коптеров для видеосъемки и полетов по GPS, т. к. предоставляет больше места для монтажа оборудования.

Необходимо подчеркнуть, что для полетных контроллеров, с точки зрения системы стабилизации полета, конструкция рамы вообще не имеет значения. Достаточно лишь указать в настройках тип рамы и угол, под которым смонтирована плата контроллера относительно направления полета.

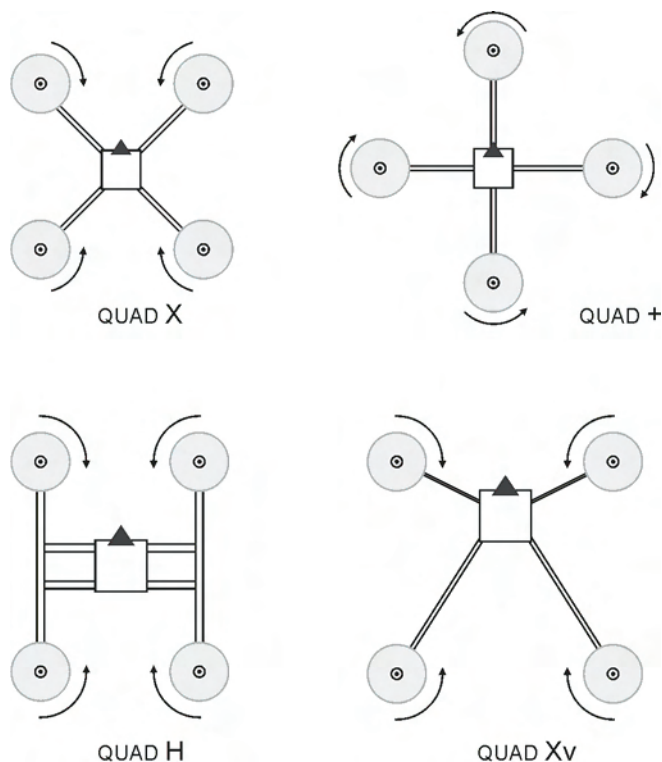


Рис. 2.1. Варианты конструкции рамы квадрокоптера

Рама, которую мы условно обозначили "Quad Xv", имеет несимметричные лучи. Такая рама часто используется при фото- и видеосъемке с воздуха. Дело в том, что для любого квадрокоптера должно соблюдаться условие *симметрии по весу*. Иначе говоря, *центр тяжести конструкции должен находиться в точке пересечения диагоналей квадрата, образованного осями моторов*. Если вы крепите в передней части рамы тяжелую фото- или видеокамеру, то удлиненные задние лучи играют роль противовеса. Однако и в этом случае моторы, как правило, расположены по диагоналям воображаемого квадрата.

Что будет, если центр тяжести смещен? Разумеется, полетный контроллер постарается поддерживать раму в строго горизонтальном положении за счет различия в оборотах моторов. Если дисбаланс невелик, то в статичном режиме, без внешних воздействий, квадрокоптер достаточно долго будет висеть ровно. Но при этом моторы будут работать в разных режимах нагрузки. У более нагруженных моторов

останется меньший динамический запас оборотов и мощности, чтобы отработать "команды" полетного контроллера на компенсацию порывов ветра или управляющие сигналы с пульта. В результате появится некомпенсированное отклонение от горизонтали и квадрокоптер начнет дрейфовать в сторону смещенного центра тяжести. Подготовленные пользователи могут применить специальные настройки программы контроллера для компенсации негативного эффекта от смещенного центра тяжести, но в общем случае асимметрии следует избегать.

Даже если рама полностью симметрична, у квадрокоптера всегда есть *условное направление "вперед"*, в котором он по умолчанию полетит при отклонении ручки пульта по оси Pitch вперед. Это направление привязано к полетному контроллеру, который монтируется на раме в строго определенном положении.

Рама может быть как со складными, так и с фиксированными лучами. На летные качества это не влияет, при выборе конструкции нужно исходить из соображений простоты изготовления, стоимости, удобства транспортировки, при условии соблюдения достаточной прочности. Рамы миниатюрных "наладонных" квадрокоптеров иногда представляют собой единое целое с печатной платой полетного контроллера и целиком изготавливаются из текстолита.

Поскольку в случае квадрокоптеров аэродинамика корпуса или рамы не имеет значения, на первый план выходят противоречивые требования минимального веса и максимальной прочности. Наиболее прочными и легкими являются цельноформованные пустотелые рамы из карбона, так называемые "скорлупки" или "корки", но они и самые дорогие. На втором месте рамы, детали которых изготовлены из листового карбона и карбоновых трубок. Далее идут рамы из всевозможных сочетаний различных материалов, включая сосновые рейки и фанеру. Обсуждению конструкционных материалов будет посвящен отдельный раздел, а сейчас настало время поговорить про "мозг" квадрокоптера.

Полетный контроллер

Зачем вообще нужен специальный полетный контроллер — вычислительная система, работающая в реальном времени по довольно сложным алгоритмам? Очевидно, что квадрокоптер необходимо непрерывно стабилизировать, парируя порывы ветра и неоднородность воздушных масс, а возможностей человеческого организма для этого недостаточно. Современный полетный контроллер оснащен набором миниатюрных интегральных сенсоров, непрерывно отслеживающих положение рамы в пространстве, воздействующие на нее угловые ускорения, атмосферное давление и направление силовых линий магнитного поля.

Классическим устройством для стабилизации объекта в пространстве либо измерения угловых ускорений является гироскоп. Все мы из школьных уроков физики знаем про механический гироскоп-волчок либо про вращающийся в свободном подвесе маховик. При попытке изменить угловое положение оси вращающегося маховика возникает противодействующая сила. В трехмерном пространстве произвольное изменение положения рамы квадрокоптера можно разложить на вращение

по трем взаимно ортогональным осям. Соответственно, возникают мгновенные угловые ускорения по каждой из этих осей. Эти ускорения могут быть измерены и использованы для выработки компенсирующей реакции в системе с обратной связью, которой в нашем случае является квадрокоптер, оснащенный полетным контроллером.

Современные датчики положения и ускорений представляют собой интегральные микросхемы размерами в несколько миллиметров. Внутри у них находится сложная электромеханическая структура из упругих подвесов, грузиков, пружин, конденсаторов и электронной части для усиления и обработки сигналов. Такие устройства принято обозначать аббревиатурой МЭМС (MEMS — MicroElectroMechanical System).

Принцип работы интегрального гироскопа

Чувствительным элементом интегрального гироскопа обычно являются два миниатюрных грузика, колеблющихся на упругом подвесе в противоположных направлениях (рис. 2.2). Источником колебаний грузиков являются гребенчатые электростатические двигатели. Грузики, вместе с электродами, расположенными на подложке, образуют конденсаторы, входящие в состав дифференциальной схемы, вырабатывающей сигнал, пропорциональный разности емкостей конденсаторов. Линейное ускорение одинаково воздействует на оба грузика и подложку, поэтому сигнал на выходе дифференциальной схемы не появляется. Когда возникает вращательное ускорение по оси ω , то на грузики начинает действовать сила Кориолиса F_C , отклоняя грузики в противоположных направлениях. Соответственно, емкость одного конденсатора увеличивается, а другого уменьшается, что порождает разностный сигнал, пропорциональный величине углового ускорения. Изначально, при включении, разностный сигнал на выходе гироскопа не нулевой, поэтому требуется процедура стартовой калибровки, когда микроконтроллер опрашивает показания гироскопов в состоянии покоя и принимает их за нулевые. Во время прохождения калибровки нельзя двигать коптер.

Но почему в конструкции квадрокоптера нельзя обойтись простейшей системой стабилизации на основе гироскопов, по одному на каждую ось вращения? Зачем

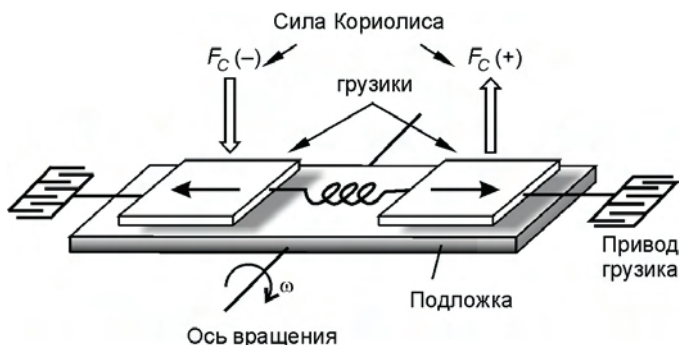


Рис. 2.2. Устройство интегрального гироскопа

нужны другие датчики и микроконтроллер со сложной программой? В реальных условиях квадрокоптер не отклоняется идеально лишь по одной оси. В общем случае отклонение комбинированное, с неким соотношением между осями. По этой причине необходимо устройство, которое будет обрабатывать сигналы от всех гироскопов и формировать управляющие сигналы для регуляторов оборотов моторов. Например, под влиянием случайного порыва ветра квадрокоптер отклонился по диагонали назад вправо. Значит, управляющая система должна увеличить обороты правого заднего мотора и уменьшить левого переднего, отклоняя раму вперед влево. Но моторы, регуляторы и пропеллеры не идеально одинаковые, и команду они отработают по-разному. Возникнет нескомпенсированный реактивный крутящий момент. Следовательно, одновременно с выравниванием квадрокоптера в горизонт полетный контроллер должен оперативно внести коррективы в обороты другой пары моторов, чтобы скомпенсировать вращение по курсу. И это самый простой пример, в котором мы не учитываем, что в то же самое время с пульта могут поступать сигналы управления. Впрочем, с вычислительной задачей для системы с тремя гироскопами способен справиться недорогой микроконтроллер начального уровня. Сейчас по такому принципу устроены простые игрушечные квадрокоптеры-"НЛЮ".

Такие игрушки неплохо летают в помещении, но для управления ими необходимо постоянно визуально контролировать, в каком положении находится квадрокоптер. Напомним, что интегральный гироскоп — это всего лишь датчик углового ускорения. Для него нет понятия "верх" или "низ", и ему безразлично, в каком *статическом* положении относительно горизонта он находится. Он лишь показывает мгновенное угловое ускорение относительно начального положения. Как только внешнее воздействие начнет поворачивать раму квадрокоптера вокруг одной из осей, то от соответствующего гироскопа немедленно поступит сигнал на процессор полетного контроллера. В ответ контроллер скорректирует обороты моторов так, чтобы скомпенсировать ускорение. Но как только внешнее воздействие прекратится, угловое ускорение станет равным нулю, и на основании сигналов одних лишь гироскопов контроллер не узнает, вернулся ли квадрокоптер в исходное положение. Это задача оператора, которую он может решать только при визуальном контроле.

А теперь представьте, что вы командой с пульта отклонили квадрокоптер на пять градусов вправо, а затем вернули рукоятку пульта в нейтральное положение. В соответствии с сигналом пульта контроллер сделает обороты всех моторов одинаковыми, но это вовсе не означает, что квадрокоптер вернется в горизонтальное положение. Гироскопам имеющийся *статический* наклон будет безразличен. Нет углового ускорения — на выходе гироскопа нулевое значение. Кроме того, гироскоп имеет ограниченную чувствительность: медленное вращение он просто не заметит. При гироскопической стабилизации оператор должен выравнивать коптер вручную.

На практике, квадрокоптер, оснащенный только гироскопами, не может стабильно висеть более минуты даже в помещении. Далее нужно вручную парировать его дрейф. Свое влияние на показания гироскопов оказывают изменение температуры корпуса и угловые ускорения, возникающие при вращении Земли.

Следовательно, для более продвинутой конструкции полетного контроллера необходим датчик, показывающий положение квадрокоптера относительно земной по-

верхности (если точнее, то относительно вектора ускорения свободного падения, который всегда направлен перпендикулярно земной поверхности, к центру Земли). Такой датчик есть в каждом современном смартфоне или планшете и называется *акселерометром*.

Принцип работы интегрального акселерометра

Акселерометр — это МЕМС-устройство, которое измеряет линейные ускорения. В состав интегрального акселерометра входят чувствительный элемент и электронная часть, осуществляющая предварительную обработку сигнала.

В очень упрощенном виде чувствительный элемент представляет собой токопроводящий грузик на гибком подвесе, помещенный между двумя электродами (рис. 2.3).

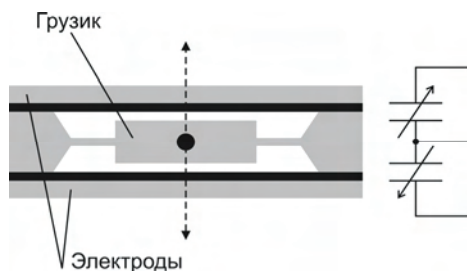


Рис. 2.3. Устройство чувствительного элемента акселерометра и его эквивалентная электрическая схема

Грузик и электроды образуют два конденсатора. При смещении грузика под действием ускорения емкость одного конденсатора уменьшается, а другого увеличивается. Так как заряд конденсаторов постоянен, то изменяется напряжение на выводах конденсаторов. Это изменение измеряется встроенной электронной схемой, результат измерения в цифровом виде выдается в ответ на запрос внешнего вычислительного устройства. Результат может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от направления вектора ускорения.

Реальный сенсор акселерометра устроен значительно сложнее, в нем детали конструкции выполняют несколько функций одновременно. Но для понимания принципа работы упрощенной схемы достаточно.

Все современные интегральные акселерометры, как правило, трехосевые. Три сенсора расположены внутри одного корпуса микросхемы перпендикулярно осям x , y и z . Вектор действующего на устройство ускорения вычисляется микроконтроллером через проекции вектора на три оси. Даже если устройство находится в покое, на него действует ускорение свободного падения g . Вектор $\vec{g}$ направлен вертикально вниз, к центру Земли. Если корпус акселерометра расположен строго горизонтально, то вектор земного тяготения совпадает с осью z и ускорение действует только на один сенсор. Но стоит наклонить акселерометр, как появятся составляющие вектора $\vec{g}$ по осям x и y , а составляющая по оси z пропорционально уменьшится. На основании величин проекций вектора земного тяготения на оси и их зна-

ка микроконтроллер вычисляет наклон квадрокоптера. Именно по такому принципу ваш смартфон или планшет определяет ориентацию экрана.

Поскольку датчики акселерометра не идеально одинаковые и печатная плата может быть смонтирована не идеально ровно, перед началом эксплуатации акселерометр необходимо откалибровать: поместить устройство строго горизонтально и сообщить бортовому контроллеру, что текущие показания акселерометра соответствуют горизонтали. Соответствующие корректировочные константы записываются во встроенную память микроконтроллера. В этом состоит различие между процедурами калибровки гироскопа и акселерометра: гироскоп калибруют после каждого включения питания, а также при длительном перерыве между взлетами, а акселерометр однократно, после окончания сборки коптера. После смены версии прошивки контроллера или изменения конструкции квадрокоптера акселерометр необходимо откалибровать заново!

Существенным недостатком MEMS-акселерометров является высокая чувствительность к вибрациям. Но вибрации — неизменный спутник винтокрылых аппаратов, поэтому необходимо принимать специальные меры по виброизоляции, а также балансировке воздушных винтов и моторов.

Именно появление доступных по цене трехосевых акселерометров определило взрывной рост популярности квадрокоптеров. Еще несколько лет назад акселерометры были, в основном, двухосевыми, а трехосевые стоили весьма дорого и были редкостью. С появлением игровой приставки Nintendo Wii и игровых манипуляторов WiiMotionPlus и Nunchuk ситуация кардинально изменилась. Малогабаритные трехосевые интегральные акселерометры и гироскопы стали доступны по вполне разумным ценам. Первые энтузиасты покупали платы манипуляторов Nintendo и подключали их к вычислителю на основе модуля Arduino. Затем к процессу подключились китайские производители, начавшие массовое производство полетных контроллеров с полным набором сенсоров "на борту". Отсюда исторически происходит название одной из самых популярных открытых прошивок MultiWii и платы контроллера MultiWii All-In-One (MWI AIOP).

Благодаря тому, что акселерометр определяет положение квадрокоптера относительно горизонтали, становится возможным автоматическое выравнивание устройства (автогоризонт). Как только ручки управления на пульте вернулись в нейтральное положение, полетный контроллер воспринимает это как команду выровнять квадрокоптер в горизонтальное положение, которое вы задали при калибровке. Есть и другие положительные моменты в использовании акселерометра. Предположим, командой с пульта мы наклонили квадрокоптер для полета вперед. Чтобы компенсировать уменьшение вертикальной тяги, необходимо равномерно увеличить обороты всех моторов пропорционально наклону. При отсутствии акселерометров можно приблизительно вычислить наклон квадрокоптера через угловое ускорение, его продолжительность и величину управляющего сигнала с пульта. Но проще и точнее угол наклона вычисляется по данным с акселерометров.

Разумеется, акселерометры измеряют не только ускорение свободного падения, но и *линейные* ускорения по любой из осей при движении квадрокоптера. В ряде случаев эта информация тоже бывает полезна.

С другой стороны, когда надо быстро определить скорость и знак *углового* ускорения, проще использовать гироскоп, который так же выдает эти данные более точно и в готовом виде. Таким образом, каждый сенсор хорош для своей задачи. В современных MEMS-микросхемах трехосевые гироскопы и трехосевые акселерометры часто объединяют в одном корпусе с размерами около $3 \times 3 \times 1$ мм. В этом же корпусе находится электронная схема для предварительной цифровой обработки данных, с внешним протоколом обмена SPI или I²C.

Чтобы определить курсовое направление рамы квадрокоптера, нужен еще один датчик — *интегральный компас*, или *магнитометр*. Квадрокоптер может лететь как угодно, вбок, назад, или по диагонали, поэтому "вперед" в нашем случае — это условное направление *рамы и контроллера*, относительно которого определяется фактическое направление полета. На плате контроллера направление "вперед" обычно обозначается стрелкой.

Принцип работы интегрального магнитометра (компаса)

В основе конструкции интегрального магнитометра (рис. 2.4) лежит анизотропный магниторезистивный эффект. Чувствительный элемент изготавливается из пермаллоевой пленки, способной изменять свое сопротивление в зависимости от направления протекающего через нее тока и направления вектора ее намагниченности. В свою очередь, вектор намагниченности пленки определяется направлением силовых линий магнитного поля, в котором находится чувствительный элемент.

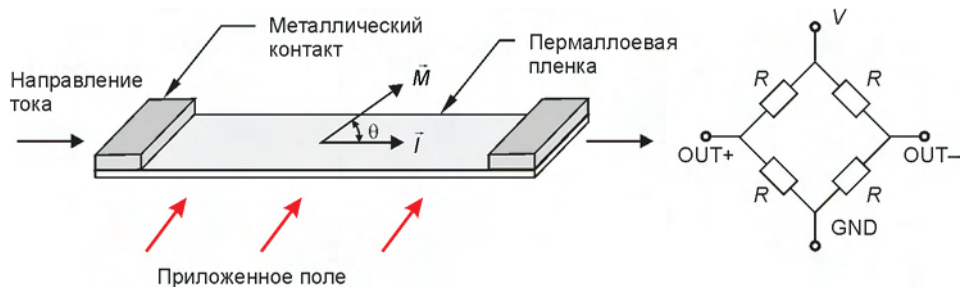


Рис. 2.4. Устройство интегрального магнитометра

Четыре пермаллоевых элемента соединяются в измерительный мост (см. рис. 2.4). При подаче постоянного напряжения на мост датчик начинает измерять интенсивность внешнего магнитного поля, направленного вдоль его чувствительной оси. Мостовой датчик имеет ось предпочтительного намагничивания, так называемую легкую ось, и наиболее чувствителен к полям, направленным перпендикулярно этой оси. В квадрокоптерах применяются трехосевые интегральные магнитометры, состоящие из трех независимых датчиков, ориентированных по трем ортогональным осям и электронной схемы. В спецификации магнитометра всегда указывают направление осей относительно корпуса (рис. 2.5).

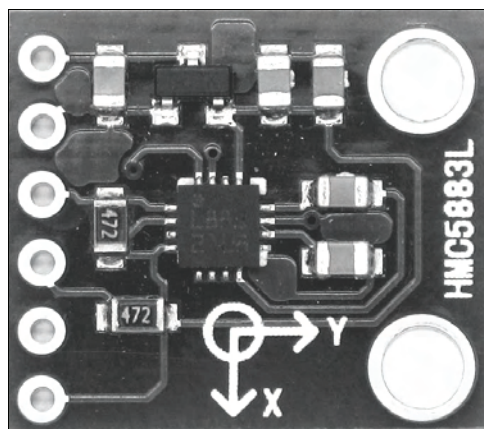


Рис. 2.5. Магнитометр HMC5883L на плате расширения

Магнитометры не подвержены вибрации, но на их показания влияют внешние близко расположенные металлические предметы. Помехи можно разделить на три основных класса.

- "Искажения твердого железа" (Hard Iron Distortion) — к магнитному полю земли добавляется постоянное магнитное поле от намагниченных предметов, например магнита звукоизлучателя. Намагниченными могут быть даже выводы радиодеталей, изготовленные из луженого железа. Эта постоянная составляющая может быть исключена при калибровке.
- "Искажения мягкого железа" (Soft Iron Distortion) — магнитное поле искажается посторонними предметами, не имеющими собственной намагниченности. Например, сплавы никеля, пермаллой искажают силовые линии поля. Такие искажения зависят от положения объекта в пространстве и труднее компенсируются. К счастью, в конструкции квадрокоптера обычно не бывает таких предметов. Детали из сплавов алюминия и меди не вносят искажения.
- Динамические или вихревые помехи. Это специфическая особенность электрических летательных аппаратов, особенно коптеров. Мощные токи, протекающие через проводники силовых цепей и батарею, порождают магнитные поля в окружающем пространстве. Причем напряженность этих полей постоянно меняется в зависимости от нагрузки на моторы.

Иногда магнитные помехи настолько сильны, что делают невозможным использование компаса и даже способны привести к аварии. К сожалению, переменные магнитные поля невозможно скомпенсировать программно и приходится применять специальные конструктивные меры. Для уменьшения наводок микросхему компаса стараются выносить с платы контроллера и поднимать вверх на 10–20 см над рамой. При укладке силовых проводов следует избегать образования петель, все провода должны иметь минимальную длину. Силовые провода рекомендуется перекручивать. Впрочем, в квадрокоптерах начального уровня вполне можно обходиться без компаса и при наличии магнитных помех просто отключать его в настройках.

Малогобаритные контроллеры, предназначенные для полетов внутри помещения, по очевидной причине компас не содержат.

Перед началом полетов магнитометр необходимо откалибровать, проведя процедуру вращения коптера по всем осям. Детали этой процедуры могут зависеть от применяемой прошивки контроллера.

Благодаря наличию компаса возможен интересный режим полета, именуемый Headfree. В этом режиме фиксируется курсовое положение квадрокоптера в момент активации моторов. Если в процессе полета развернуть раму квадрокоптера по Yaw, то условное направление "вперед", зафиксированное при взлете, не изменится. При наклоне правого стика пульта вперед квадрокоптер всегда будет лететь вперед, при наклоне вправо — всегда вправо и т. д., независимо от того, как в данный момент развернута рама. Считается, что этот режим удобен для начинающего пилота, а также при полетах на большом удалении, без видеоканала и средств телеметрии, когда визуальный контроль над положением рамы затруднен. Если пилот случайно развернул квадрокоптер, то это не отразится на управлении и поможет избежать аварии.

Используя компас, при настройке квадрокоптера не забудьте указать такой параметр, как *магнитное склонение* (не путайте с магнитным *наклонением*) для своей местности. *Магнитное склонение* — это угол между географическим и магнитным меридианами в точке земной поверхности. Магнитное склонение считается положительным, если северный конец магнитной стрелки компаса отклонен к востоку от географического меридиана, и отрицательным — если к западу. Значение магнитного склонения используется для определения истинного меридиана по показанию магнитного компаса. Узнать значение магнитного склонения для своей местности можно на сайте www.magnetic-declination.com или <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>. Обратите внимание, что сервисы дают значение в градусах и минутах, но при настройке компаса используется значение в градусах и десятичных долях градуса.

Остался еще один важный параметр полета — высота. Стабилизация высоты важна как для комфортного управления квадрокоптером, так и для безопасного полета, особенно в режиме автоматического возврата к точке старта по GPS. Для измерения высоты в квадрокоптерах используют либо интегральный барометр, либо внешний ультразвуковой сонар, либо оба устройства сразу. Поскольку они оба выполняют одинаковую задачу, мы немного забежим вперед и рассмотрим достоинства и недостатки ультразвукового сонара в этой главе, хоть сонар и является дополнительным оборудованием.

Устройство интегрального барометра

Измерение высоты полета барометрическим методом основано на зависимости атмосферного давления от высоты. Чем больше высота, тем ниже атмосферное давление. В миниатюрных интегральных барометрах применяется, как правило, тензорезисторный либо пьезорезонансный датчик. В первом случае чувствительным