

Государственное образовательное автономное учреждение
дополнительного образования Ярославской области
ЦЕНТР ДЕТСКО-ЮНОШЕСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТВОРЧЕСТВА

Методическое пособие для обучающихся 11-17 лет
в объединении

«Беспилотные летательные аппараты»

**«ПОДБОР И РАСЧЕТ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ МУЛЬТИКОПТЕРА»**

Педагог дополнительного
образования Летков Д.В.

Ярославль
2018

Оглавление

Введение	3
1. Теория	4
1.1 Бесколлекторные двигатели и их характеристики	4
1.2 Электронные регуляторы оборотов	6
1.3 Пропеллеры	7
1.4 Аккумуляторные батареи (АКБ)	8
Емкость литий-полимерного аккумулятора и его размер	9
2. Расчет винтомоторной группы (ВМГ) в специализированном электронном калькуляторе.....	11
3. Замер тяги ВМГ	12
Заключение	14
Список использованных источников.....	15

Введение

Начиная с 2012-2013 года направление мультикоптеров развивается с каждым годом все более быстрыми темпами. Этому способствует всеобщий интерес, удешевление комплектующих, а также огромное разнообразие применения мультироторных систем от развлекательных направлений до промышленного использования.

Однако, с ростом индустрии мультикоптеров на рынок выпущено очень много вариантов комплектующих, и правильный подбор их для своей модели мультироторной системы у многих вызывает затруднение. В связи с этим ниже я попытаюсь раскрыть основные понятия, характеристики и методы подбора комплектующих для собственного проекта мультикоптера в зависимости от направления его применения, будь это гоночный аппарат, грузоподъемный, платформа для фото видеосъемки и так далее.

1. Теория

1.1 Бесколлекторные двигатели и их характеристики

В интернете есть очень много информации об устройстве, принципе работы и плюсах бесколлекторных двигателей (далее БК), сравнительно с коллекторными двигателями. Поэтому мы поговорим об основных характеристиках, влияющих на работу БК двигателей.

На картинке 1 представлены два популярных двигателя.



Картинка 1.

Эти двигатели показывают следующие характеристики:

- BR2204 (BR - Brushless (с англ. бесщеточный, т.е. бесколлекторный), 2204 - диаметр и высота статора, соответственно 22 и 4 мм.)

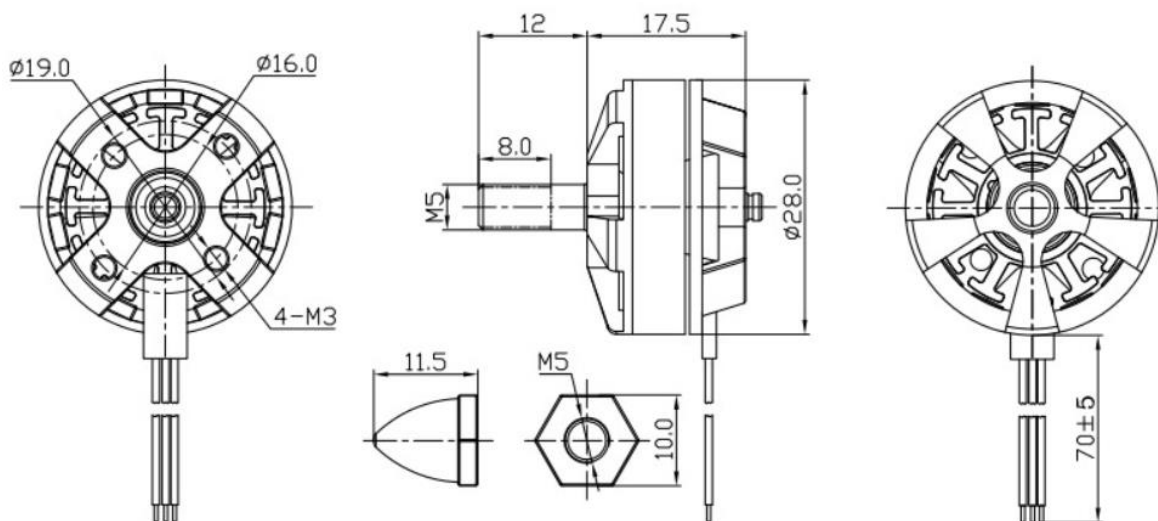
- 2300KV - если не углубляться в теорию, то это число оборотов двигателя в минуту при подаче на него 1 вольта напряжения. Именно этот параметр в основном влияет на подбор мотора для разных вариантов мультикоптера, об этом поговорим ниже.

- CW и CCW - с англ. Clockwise и Counter-clockwise, соответственно предполагаемое вращение мотора по часовой и против часовой стрелки. Данный параметр предполагает в основном наличие самозатягивающихся гаек (с левой и правой резьбой). Так как из теории мы знаем, что направление мотора легко меняется в прошивке регулятора оборотов двигателя, либо перекрещивания двух любых проводов от двигателя к регулятору.

С сайта производителя или продавца мы можем получить более подробную информацию о моторе, например, такие как тяга двигателя в граммах в зависимости от подаваемого напряжения и используемого

пропеллера, а также вес двигателя, его энергопотребление и эффективная мощность в граммах на ватт.

На картинке 2 ниже мы можем увидеть эти и другие характеристики:



MOTOR PERFORMANCE DATA

MODEL	KV (rpm/V)	Voltage (V)	Prop	Load Current (A)	Pull (g)	Power (W)	Efficiency (g/W)	Lipo Cell	Weight (g) Approx
D2204	2300	7.4	6x3	5.8	220	43	5.1	2-3S	25
		11.1	5043	9.5	365	105	3.5		
			6x3	10.5	408	117	3.5		

Картинка 2.

Итак, как и писалось выше, один из важных параметров это KV. Для примера возьмем аналогию со спортивным автомобилем. Мощный мотор такой машины способен обеспечить быстрый разгон и высокую максимальную скорость. Но что произойдет, если попробовать сдвинуть несколько тонн груза на таком автомобиле? Ничего особенного - груз не сдвинется с места, а вся мощность мотора уйдет в пробуксовку. С другой стороны, трактор, обладающий малой мощностью, но высоким крутящим моментом и большими колесами, легко справится с такой задачей. Если вернуться в мир мультикоптеров, то моторы с высоким KV идеально подойдут для быстрого вращения маленьких пропеллеров, в то время, как моторы с низким KV будут легко вращать большие пропеллеры на больших дронах с высокой грузоподъемностью.

Если говорить о конкретных значениях показателя KV, то для легких гоночных дронов он составляет в среднем 2000-2600, а у

коптеров, способных поднимать тяжелые грузы, KV обычно варьируется в пределах 200-900.

1.2 Электронные регуляторы оборотов

Одним из минусов БК двигателя является обязательное применение электронных регуляторов оборотов (далее ESC, с англ. electronic speed controller - что дословно обозначает электронный контроллер скорости) для запуска двигателя. На картинке ниже представлен один из распространенных ESC.



На лицевой части ESC как правило нанесены все необходимые характеристики, но также мы можем посмотреть их на сайте производителя или страничке продавца.

Из картинки выше мы видим две основные характеристики.

- 30A - Мощность ESC в амперах.
- 2-4S LIPO - рекомендованное напряжение литий полимерного аккумулятора. Зная, что один элемент аккумулятора (1S) имеет вольтаж 4.2 вольта, в полностью заряженном состоянии, не сложно посчитать диапазон напряжений $2*4.2$ - $4*4.2$, т.е. от 8.4 до 16.8 вольт.

ESC могут быть со встроенным понижающим регулятором напряжения на 5 вольт, такие регуляторы помечаются надписью plush и могут питать к примеру радиоприемник, но на мультикоптерах они практически не используются, создавались они как правило для авиа и автомоделей.

Чтобы правильно подобрать ESC для своего мотора, необходимо в характеристиках мотора посмотреть его потребляемую мощность. Например, по таблице, представленной на картинке 2 мы можем увидеть потребляемый ток при максимальной нагрузке (Load

current), он составляет 10.5 Ампер. Самые распространенные номиналы ESC 10, 12, 15, 20, 30 ампер и так далее, соответственно мы должны взять ESC с небольшим запасом, т.е. 12-15 ампер, если взять ESC к примеру мощностью 20А то он тоже будет полноценно работать и не сожжет ваш двигатель, но стоимость его выше. На такой шаг обычно идут, когда планируют в будущем заменить моторы на более мощные. Также не забудьте посмотреть на диапазон напряжений работы двигателя, в нашем примере на картинке 2 мы видим в табличке Lipo Cells 2-3S, т.е. от 8.4 до 12.6 вольт. А ESC позволяет использовать до 4S т.е. до 16.8 вольт, соответственно при выборе АКБ мы должны ограничиться напряжением работы регулятора, т.к. при подаче большего напряжения на мотор мы рискуем его сжечь, либо получить слишком высокие обороты не совместимые с нормальной работой подшипников, что приводит к механическому повреждению двигателя либо его перегреву.

1.3 Пропеллеры



В мире существует множество различных видов пропеллеров для мультикоптеров, различаются они как материалами, размерами, видом крепления и другими характеристиками, рассмотрим основные характеристики пропеллеров для мультикоптера.

- **Материал:** для небольших аппаратов в основном используются пластиковые пропеллеры, они недорогие, прочные и при этом имеют отличные тяговые характеристики. Для более крупных и дорогих мультикоптеров используют карбоновые пропеллеры, они более легкие, соответственно снижают как общий вес

аппарата, так и инерцию раскручивания пропеллера, а это увеличивает энергоэффективность всей силовой установки в целом.

- Диаметр и шаг: как правило указываются непосредственно на пропеллере, к примеру 5030 (иногда указывается 5х3, что равносильно), что означает диаметр пропеллера 5 дюймов, и шаг равный 3. Шаг может быть определен как расстояние, которое пропеллер может пройти в некоей твердой среде за один полный оборот (вспомните, как входит в доску самый обыкновенный шуруп). При прочих равных условиях, величина шага определяется наклоном (углом атаки) лопастей квадрокоптера, т.е. чем больше шаг, тем больше наклон лопасти относительно плоскости вращения пропеллера.

Подбор пропеллера достаточно сложная задача, на начальных этапах можно порекомендовать использование специальных программ (калькуляторов) для расчета и подбора силовой установки, в которой также можно произвести и подбор нужного пропеллера. Об одном из таких калькуляторов будет рассказано ниже.

1.4 Аккумуляторные батареи (АКБ)



Для обеспечения энергией современные мультироторные системы используют в основном два вида АКБ

- LiPo - Самые распространенные, имеют множество форм факторов и различных характеристик

- Li-ion (форм фактор 18650) - Менее распространенные, как правило используются для аппаратов, рассчитанных на долгий полет. Спаиваются вручную из отдельных элементов под конкретную задачу.

Поговорим о LiPo аккумуляторах как наиболее часто используемых.

Напряжение и количество элементов(S)

LiPo аккумуляторы, собраны из отдельных элементов (или как говорят моделисты банок), соединенных последовательно (от английского serial — S). Каждая банка имеет номинальное напряжение 3.7 Вольта и максимальное при полной зарядке 4.2 Вольта. Следовательно, говоря про напряжение аккумулятора, часто ссылаются на количество банок, из которых он состоит («S»), даже если на самом АКБ не указано количество элементов, то оно легко вычисляется, для этого надо подсчитать число проводов на балансном разъеме и вычесть один. Например, 1S = 1 банка = 3.7 В, 2S = 2 банки = 7.4 В и так далее.

LiPo разработаны для безопасной работы в диапазоне напряжений от 3 В до 4.2 В. Разряд ниже 3 В может вызвать необратимые изменения, потерю емкости или даже повредить аккумулятор. Перезаряд выше 4.2 В опасен и, как правило, приводит к возгоранию аккумулятора.

Емкость литий-полимерного аккумулятора и его размер

Емкость измеряется в мА*ч (миллиампер в час). «мА*ч» по сути означает каким током нужно разряжать аккумулятор, чтобы он разрядился за 1 час.

Например, имеется аккумулятор 1300 мА*ч (1,3 А*ч), потребуется ток 1,3 А чтобы разрядить его за 1 час. Если ток будет удвоен (т.е. 2,6 А), тогда время разряда сократится вдвое ($1,3 / 2,6 = 0,5$). Если разряжать током 39А, то аккумулятор разрядится за 2 минуты ($1,3 / 39 = 1 / 30$ часа или 2 минуты).

Увеличение емкости аккумулятора позволит увеличить полетное время, но вес и размер аккумулятора тоже увеличится. Нужно искать компромисс между емкостью и весом, которые влияют на полетное время и управляемость коптера.

Токоотдача, С-рейтинг

Существуют различные варианты разъемы подключения АКБ к мультикоптеру.

Самый популярный разъем XT-60 (номер 1 на картинке 3), цифра 60 в наименовании разъема означает максимальный пропускаемый ток 60А. Существуют также разъемы XT-30 и XT-90. Также встречаются в использовании разъемы T-PLUG (номер 2 и 3 на картинке 3). Для более высокой силы тока используют разъем номер 14 на картинке 3.



Картинка 3

На всех LiPo АКБ обязательно присутствует балансный разъем (номер 20 на картинке 3), он необходим для зарядки каждого из элементов аккумуляторной батареи в отдельности, чтобы получить одинаковый заряд на каждом элементе.

Попробуем подобрать АКБ зная потребление тока нашей ВМГ, для примера возьмем данные из таблицы на картинке 2. Для двигателя 2204 с пропеллером 6x3 энергопотребление при полной нагрузке составляет 10.5А (Load Current). Если мы собираем модель квадрокоптера, значит у нас 4 двигателя, и нагрузку надо умножить на 4, получается максимальное потребление энергии (максимальное потребление силы тока) квадрокоптера составляет $10.5 \cdot 4 = 42$ ампера. Из формулы выше мы знаем, что Максимальный разрядный ток = С-рейтинг * Емкость, нам нужен максимальный разрядный ток аккумулятора не менее 42 ампер. Получается формула с двумя неизвестными $42 = \text{С-рейтинг} \cdot \text{Емкость}$, так как от емкости напрямую зависит время полета, этот параметр можно подобрать позже, а вот С-рейтинг на существующей линейке аккумуляторов известен и

варьируется от 10 до 100, при том чем выше C-рейтинг тем дороже АКБ. Возьмем среднее значение, к примеру 40 и подставим все данные в формулу: $42=40 * \text{Емкость}$, отсюда получаем $\text{Емкость}=42*40=1680 \text{ mAh}$, тем самым мы получили параметры АКБ с минимальными параметрами, теперь можно варьировать одним из параметров, например, если мы хотим построить гоночный квадрокоптер то нам не требуется высокая емкость акб, а требуется высокая токоотдача, а значит высокий C-рейтинг, а если же мы строим аппарат для долгих полет то нам требуется большая емкость АКБ.

2. Расчет винтомоторной группы (ВМГ) в специализированном электронном калькуляторе

Наверное, самый популярный калькулятор для расчета можно найти на сайте www.ecalc.ch (прямая ссылка есть в списке использованных источников). В этом калькуляторе можно ввести все планируемые параметры своего мультикоптера, произвести расчет и получить примерные результаты по времени полета и совместимости подобранных компонентов в целом. Далее если расчет прошел неудачно, можно варьировать одним или несколькими параметрами (например, диаметр винта или мощность мотора) пока не получится оптимальная конструкция с нужными характеристиками.

Все данные без гарантий - Точность: +/-15% **xcopterCalc - Калькулятор для Мультикоптеров** News | Toolbox | Easy View | Help | Tutorial | Language: русский

Основное	Вес модели: 850 г 30 унций	Кол-во винтов: 4 одиночных	Размер рамы: 400 мм 15.75 дюйма	Ограничение угла крена: Нет	Высота над уровнем моря: 500 м 1640 футов	Температура воздуха: 25 °C 77 °F	Давление воздуха (QNH): 1013 гПа 29.91 дюйма рт.ст.	
Аккумулятор	Тип (ток разряда / макс. ток C) - состояние заряда: выбрать... Номинал: 3 S	Сборка: 1 P	Емкость банки: мАч мАч ч всего	Макс. разрядка: 85%	Сопротивление: Ом	Напряжение: В	Ток отдачи (C): С постоянная С макс.	Вес: г унций
Регулятор	Тип: выбрать...	ток: А пост. А макс.	Сопротивление: Ом	Вес: г унций	Навесное оборудование			Потребление: А Вес: г унций
Мотор	Производитель - Тип (KV) - Охлаждение: выбрать... хорошее	KV (без нагрузки): об/В	Ток без нагрузки: А @ В	Предел (до 15с): Вт	Сопротивление: Ом	Длина корпуса: мм дюйма	Кол-во магнитов:	Вес: г унций
ПроPELLER	Тип - угол кручения: выбрать... 0°	Диаметр: 10 дюйма 254 мм	Шаг: 4.7 дюйма 119 мм	Кол-во лопастей: 2	Ман. пост./Газ. пост.: 12 / 10	Передаточное число: 1 : 1	<input type="button" value="Расчитать"/>	

Нагрузка (в С)

Время висения

Элект. мощность

Температура

Тяговооруженность

Удельная тяга

Конфигурация

Примечания:	Мотор @ Оптимальный режим	Мотор @ Максимальный режим	Мотор @ Висение	Параметры ВМГ	Коптер:
Нагрузка (в С): - С	Ток: - А	Ток: - А	Ток: - А	Вес ВМГ: - г	Полетный вес: - г
Напряжение под нагрузкой: - В	Напряжение: - В	Напряжение: - В	Напряжение: - В	Газ (лог): - %	Крен макс.: - °
Номинальное напряжение: - В	Обороты: - об/мин	Обороты: - об/мин	Обороты: - об/мин	Газ (линейный): - %	Скорость макс.: - км/ч
Энергия: - Wh	Элект. мощность: - Вт	Элект. мощность: - Вт	Элект. мощность: - Вт	Тяговооруженность: - 1	Макс. скороподъемность: - м/с
Общая емкость: - мАч	Механ. мощность: - Вт	Механ. мощность: - Вт	Механ. мощность: - Вт	Ток @ Висение: - А	Ометаемая площадь: - дм²
Использованная емкость: - мАч	Эффективность: - %	Удельная мощность: - Вт/кг	Удельная мощность: - Вт/кг	Мощность(вх.) @ Висение: - Вт	Отказ двигателя: -
Мин. Полетное время: - мин		Эффективность: - %	Эффективность: - %	Эффективность @ Висение: - %	
Смешанное полетное время: - мин		Температура: - °C	Температура: - °C	Ток @ макс.: - А	
Время висения: - мин		Эффективность: - %	Эффективность: - %	Мощность(вх.) @ макс.: - Вт	
Вес: - г		Сила тока: - А	Удельная тяга: - г/Вт	Мощность(вх.) @ макс.: - Вт	
				Эффективность @ макс.: - %	

v.googleadservices.com/pagead/clkjs+L&ka=C&0M/Wk00M/GNEPQWwSu9Yw37npVtVqM0X7pQYDkAIQASCCUgY5I8X0HqABJYQ3QLAQOpAATUUIZWDIA-qAMByAPJkEuQFP0F0C3WmWAcq11JwOkbkbkmpjGelbkk-178F5luGB2b6Lk8Bp65hV7M7M7C

Основные настройки, которые надо указать:

- Полный вес модели (можно указывать без ВМГ (моторы и пропеллеры). При выборе пропеллеров и моторов калькулятор сам считает их вес
- Количество винтов – для простоты, в нижнем правом углу, калькулятор рисует полученную конфигурацию
- Размеры рамы - расстояние по диагонали, между осями моторов
- Аккумулятор (АКБ) - из списка выбираем нужный, или максимально похожий аккумулятор и состояние заряда «номинал», в поле «Р» пишем количество параллельно соединенных АКБ (если используется схема с несколькими АКБ)
- Регулятор (ESC) - из списка выбираем свой регулятор скорости или любой с аналогичными параметрами.
- В навесном оборудовании пишем суммарное потребление и вес всего дополнительного оборудования, которое планируется для установки, например, камера, светодиодные ленты, механизмы сброса груза и другое.
- Мотор - выбираем из предложенного списка, если нужного нет, то максимально похожий по параметрам.
- Пропеллер - выбирается тип пропеллера из списка. Угол кручения (угол атаки), диаметр винта и его шаг можно узнать из спецификации

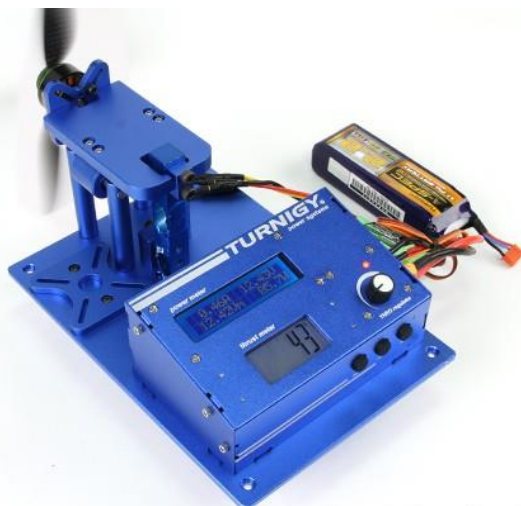
Далее можно нажать кнопку «рассчитать», и смотреть результаты. Не забываем, что расчет примерный и не дает 100 процентных результатов, но при этом хорошо отражает как изменяются характеристики полета при изменении компонентов мультикоптера.

3. Замер тяги ВМГ

В эпоху радиоуправляемых самолетов, до появления мультикоптеров, замер тяги проводился достаточно простыми способами. Одним из них было использование обычного домашнего безмена, либо специализированного электронного, один конец которого крепился к заднему колесу самолёта, а второй к вбитому в землю штырю, при подаче полного газа на двигатель, можно было увидеть на безмене тягу силовой установки в граммах.

Технологии развиваются и на данный момент существует множество вариантов для замера тяги ВМГ.

Например, специализированные стенды, один из них представлен на картинке 4.



Картинка 4.

Такой стенд позволяет не только оценить тягу ВМГ в граммах, но и оценить потребление тока силовой установкой, что пригодится при расчете общего потребления тока всего мультикоптера, а значит при подборе аккумуляторной батареи.

Существует также множество несложных самоделок на основе электронных кухонных весов, с ними можно ознакомиться на просторах интернета (например, по ссылке http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view_entry/3609/)

Узнав тягу нашей силовой установки, мы уже можем определить правильно ли мы подобрали комплектующие, какой вес мы сможем поднять нашим мультикоптером.

Например: мы хотим собрать квадрокоптер, у которого ВМГ выдает тягу в 1400 грамм, соответственно 4 таких у ВМГ выдадут тягу $4 \cdot 1400 = 5600$ грамм. Вычитаем собственный вес квадрокоптера со всеми комплектующими и АКБ (к примеру, 1600 грамм) и получаем $5600 - 1600 = 4000$ грамм. То есть наш квадрокоптер теоретически поднимет 4 килограмма, но не стоит забывать, что при этом все комплектующие будут при этом работать на максимуме, и расход энергии будет очень высоки, а также необходимо оставить запас мощности для маневрирования квадрокоптера и удержания заданного положения в пространстве. Поэтому реально эта цифра для нормального долгого полета может быть в 2-3 раза ниже. Реальные же значения можно получить только реальными испытаниями.

Заключение

Выбор комплектующих под ваш проект не так прост, как кажется на первый взгляд, чтобы получить оптимальный вариант, необходимо знать не только теоретическую информацию, но и проводить испытания и оптимизировать вашу конструкцию. Информация, представленная в данном методическом пособии, поможет вам освоить базовые навыки подбора комплектующих, оптимальные же комплектующие, дающие лучшую эффективность именно для вашей модели, можно подобрать путем экспериментов и испытаний.

Список использованных источников

<http://mykvadrocopter.ru/propellery-dlya-kvadrokoptera/>

<https://drongeek.ru/profi/propellery-dlya-kvadrokoptera>

<https://www.ecalc.ch/xcoptercalc.php>

<http://www.parkflyer.ru/ru/product/1977753/>

http://www.parkflyer.ru/ru/blogs/view_entry/3609/

<http://2a3a.ru/connectors/>

<https://blog.rcdetails.info/kakie-byvayut-lipo-akkumulyatory-rukovodstvo-dlya-nachinayushhih-pilotov-dronov-i-kopterov/>