Лекция 14

БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

14.1Прикладное применение беспилотных летательных аппаратов

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА), это беспилотный самолет, который управляется дистанционно или автономно на основе заранее запрограммированных полетных планов. БПЛА часто используются в военных целях для выполнения миссии, которые являются слишком опасными для пилотируемых самолетов.

Они также используются в прикладных задачах, таких как аэрофотосъемка и перевозки различных грузов. БПЛА типа – helicopter имеет преимуществ над БПЛА с фиксированным крылом (planner), они могут взлетать и приземляться вертикально, что позволяет парить в фиксированной точке.

На рис. 3.1 приведена модель квадрокоптера (quadcopter) [17], это, в своем роде – золотая середина в зависимости от веса, возможности улучшения, установки дополнительных модулей, мощности для подъема полезной нагрузки, стоимости, сложности установки, ремонта, времени полета.



Рисунок 3.1. Модель квадрокоптера в полете

Квадрокоптер – это симметричный летательный аппарат с четырьмя роторами одинакового размера, двигающийся посредством

регулирования скорости вращения двигателей с пропеллерами. Благодаря использованию нескольких роторов обеспечивается боль-

шая маневренность и скорость и возможность зависать в воздухе. Каждый из роторов на квадрокоптере производит тягу и крутящий момент. Учитывая, что передние и задние двигатели вращаются против часовой стрелки, а два других вращаться по часовой стрелке, в результате – крутящий момент приближен к нулю. До недавнего времени, развитие мултикоптеров находилось в стагнации.

Управлять четырьмя независимыми роторами оказалась невероятно трудно и невозможно без помощи дополнительных вычислительных мощностей. В последние годы наблюдается бурное развитие БПЛА, оснащенных автономными устройствами управления.

В настоящее время исследования и разработки БПЛА получают высокую поддержку, поскольку БПЛА могут применяться в таких областях, как спасательно-поисковые, военные, кинопроизводства, сельское хозяйство и других. Они стали известны как «роботизированный летательные аппарата». БПЛА дают значительные преимущества при их использовании для воздушного наблюдения, разведки и инспекции в сложных и опасных условиях.

По сравнению с пилотируемыми самолетами, БПЛА лучше подходят для выполнения работ, опасных для жизни человека, или там, где исследуемые объекты труднодоступны. Низкие риски и уверенность в успешном выполнений возложенной на нее миссии – два сильных аргумента для дальнейшего расширения использования БПЛА.

Кроме того, многие другие технологические, экономические и политические факторы способствовали развитию и эксплуатации БПЛА. Снижение стоимости современных микропроцессоров дало толчок в развитие автономных систем для БПЛА, что сделало возможным использование их в коммерческих, исследовательских, военных и даже любительских целей.

Беспилотные летательные аппараты уже были успешно использованы в военных операциях в различных регионах мира. Эти факторы привели к увеличению финансирования и большого количества производственных заказов.

БПЛА могут работать в опасных и загрязненных средах, а также могут эксплуатироваться в средах, в которых обычные пилотируемыми летательные аппараты не способны работать. Некоторые исследования рынка предсказывают, что мировой рынок БПЛА будет расширяться.

Эти исследования также показали, что расходы на БПЛА будут в три раза больше в течение следующего десятилетия, составив около

$55 млрд. В течение следующих 5-7 лет, рынок БПЛА в США достигнет $16 млрд. В США, как показано на рисунке 3.2, финансирование исследований в области разработки БПЛА резко возрос после 2001 года [18].

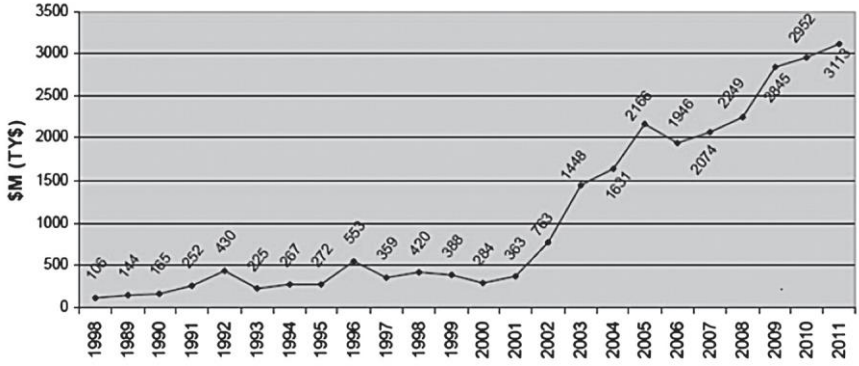


Рисунок 3.2. Финансирование исследований в области разработки БПЛА департаментом обороны США

Научные исследования в этой области получили мощный толчок. В действительности большая часть рынка – это крупные военные подрядчики, участвующие в разработке и производстве беспилотных летательных аппаратов. В настоящее время БПЛА широко распространены среди городских служб, разработчиков и исследователей (рис. 3.3, 3.4) [17].



Рисунок 3.3. Миниквадрокоптер

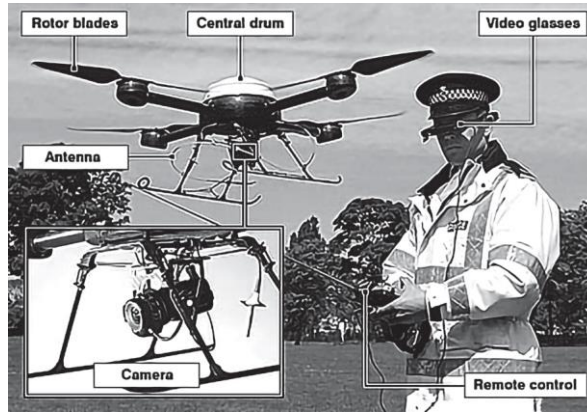


Рисунок 3.4. Полицейский с дроном наблюдения

В ближайшие годы могут произойти большие изменения, т.к. многие исследователи работают над усовершенствованием и разработкой приложений для БПЛА. И возможная область применения для автономного БПЛА может достигнуть более широкого спектра использования.

Модель квадрокоптера

Структура квадрокоптера представляет собой жесткую фиксированную связь между четырьмя двигателями. Движение четырех лопастей приводит к тому, что они направляет поток воздуха вниз, тем самым вызывая силу тяги в обратном направлении. Для описания модели квадрокоптера обычно используется 2 системы отношений: *G*-система (ground) – инерциальная система отсчета определяется землей и *B*-система (body) – фиксированная система тела (устройства) (рис. 3.5, 3.6) [17]. *G*-система (O_G, X_G, Y_G, Z_G) определяется по X_G, Y_G, Z_G по направлению на север, запад и вверх соответственно.

B-система (O_B, X_B, Y_B, Z_B) определяется по X_B, Y_B, Z_B по направлению от квадрокоптера вперед, вправо и вниз соответственно. Начало этой системы – центр массы квадрокоптера.

Пусть G – это система положения квадрокоптера в системе координат, а именно вектор 6 степеней свободы, составленный линейным положением и угловым положением: $\xi = (\Gamma^G \Theta^G) = (X, Y, Z, \phi, \theta, \psi)$, где $\Gamma^G = (X, Y, Z)$ $[m]$ обычные декартовы координаты, и $\Theta^G = (\phi, \theta, \psi)$ $[rad]$ – вращение оси крена, тангажа, рыскания вокруг X^G, Y^G *и* Z^G, соответственно.

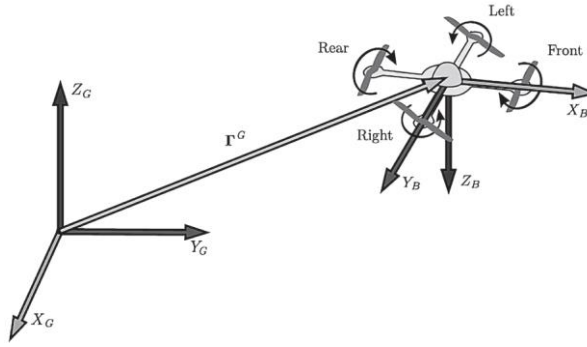


Рисунок 3.5. Системы и соответствующие отношения квадрокоптера (G-система и B-система)

Так как обе системы относительно друг друга находятся в неподвижной системе координат, можно определить трансформацию Γ^G и вращение углов Эйлера (*Z-Y-X*) по формуле (3.1) [17].

$$\boldsymbol{R}_{\varepsilon} = \boldsymbol{R}(\chi)\,\boldsymbol{R}(\varepsilon)\,\boldsymbol{R}(\chi) = \begin{bmatrix} c\phi c & -s & 0 \\ s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\varepsilon & 0 & s\varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\varepsilon & 0 & c\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\phi & -s & 0 \\ s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi c\varepsilon & -s & c\phi s\varepsilon \\ s\phi c\varepsilon & c & s\phi s\varepsilon \\ -s\varepsilon & 0 & c\varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\phi & -s & 0 \\ s\phi & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\phi c\varepsilon c\phi - s\phi s & -c\phi c\varepsilon s\phi - s\phi c & c\phi s\varepsilon \\ s\phi c\varepsilon c\phi + c\phi s & -s\phi c\varepsilon s\phi + c\phi c & s\phi s\varepsilon \\ -s\varepsilon c\phi & s\varepsilon s\phi & c\varepsilon \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

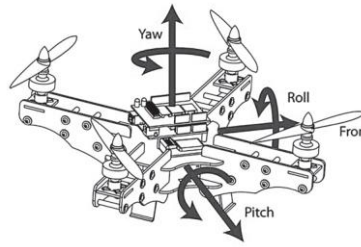


Рисунок 3.6. Модель вектора направлений поворота квадрокоптера

В инерциальной системе координат, ускорение квадрокоптера происходит из-за тяги, тяжести и линейного трения. Можно получить вектор тяги в инерциальной системе координат с помощью матрицы R для отображения вектора тяги от рамы квадрокоптера к инерциальной системе отсчета. Таким образом, линейное движение можно получить по формуле (3.2)

$$m\ddot{x} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + RT_B + F_D \tag{3.2}$$

где $\ddot{x}$ это положение квадрокоптер, g является ускорение силы тяжести, F_D это сила сопротивления, T_B является вектором тяги в раме квадрокоптера.

Можно использовать центр массы квадрокоптера в качестве центра отсчета инерционный системы для выражения уравнения вращения. Уравнение вращения можно получить из уравнения Эйлера для динамики твердых тел, выраженной в векторной форме, по формуле (3.3)

$$I\dot{\omega} + \omega \times (I\omega) = \tau \tag{3.3}$$

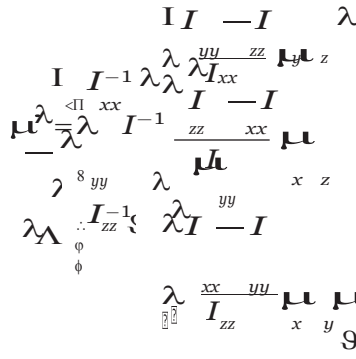
где ω является вектором угловой скорости, I это матрица инерции, τ представляет собой вектор моментов внешних сил. (7.3) можно переписать в виде (3.4)

$$\dot{\omega} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = I^{-1}\left(\tau - \omega \times (I\omega)\right). \tag{3.4}$$

Можно смоделировать квадрокоптер, как две тонких однородных стержня пересекающихся в начале координат с точечной массой (двигателей) в конце каждого из них. Имея это в виду, можно заметить, что симметрия приводит к диагональной матрицы инерции (3.5) вида

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Таким образом, можно получить окончательный результат в виде (3.6)



(3.6)

14.2 Структура беспилотного летательного аппарата

Система любого БПЛА предполагает наличие минимального набора оборудования и комплектующих, а именно: полетный контроллер, радио оборудование, силовую установку, источник питания и корпус (рис. 3.7, 3.8, 3.9) [17]. В частности, это и есть минимальные требования для построения прототипа БПЛА, но также можно добавлять некоторые компоненты для улучшения полетных характеристик и расширения функционала устройства.

- ***Силовая установка*** квадрокоптера состоит из четырех двигателей и лопастей и четырех регуляторов скоростей, управляющих оборотами каждого двигателя.
- ***Радио аппаратура*** – это ряд устройств, позволяющих дистанционно управлять БПЛА. В частности, для управления квадрокоптера необходимо иметь четырехканальный пульт управления на определенной частоте.
- ***Полетный контроллер:*** основная плата управления, обеспечивающая функционирование квадрокоптера. В качестве «мозга» платы управления используется микроконтроллер, зачастую это либо маломощные Atmega328, либо более современные Atmega2560 или ARM-контроллеры. Плата управления позволяет выполнять следующие функции:
  - Стабилизация аппарата в воздухе.
  - Удержание высоты (при помощи барометра) и позиции (при помощи GPS).
  - Автоматический полет по заданным заранее точкам (опцио-

нально).

- Передача на землю текущих параметров полета с помощью модема или Bluetooth (опционально).
- Обеспечение безопасности полета (возврат в точку взлета при потере сигнала, автопосадка).
- Подключение дополнительной периферии: OSD, светодиодной индикации и другое.

Количество функций зависит от наличия на борту квадрокоптера соответствующей периферии. В дешевых контроллерах ряд функций может отсутствовать

- ***Источник питания*** – это аккумулятор, достаточный емкий и мощный, для удержания аппарата в воздухе на определенное время. В частности выбор химического элемента и типа аккумулятора является основной проблемой при построений дронов, т.к. необходимо учитывать несколько факторов, все зависит от конечной цели. А также от того, для решения каких задач предназначен дрон.
- ***Корпус*** – каркас, на котором размещается вся система. Для каждой задачи критически важно правильно подобрать размеры и формы для дрона.



Рисунок 3.7. Структура и схема системы управления квадрокоптера



Рисунок 3.8. Компоненты квадрокоптера

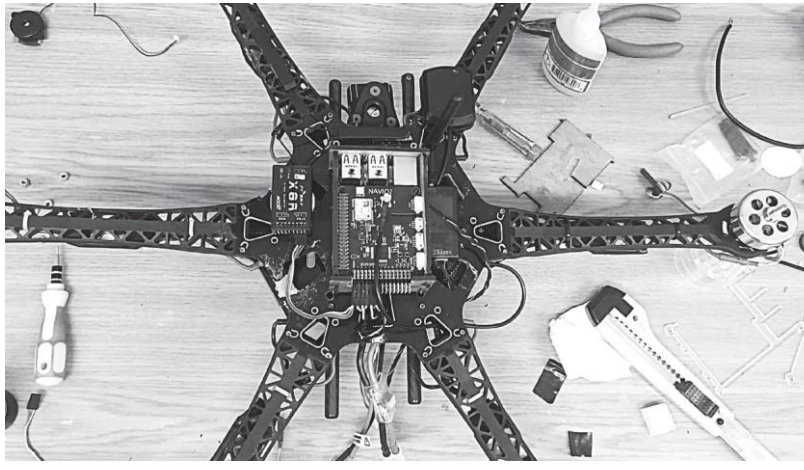


Рисунок 3.9. Компоненты гексакоптера

Силовая установка

Силовая установка любого дрона состоит из двигателей, электронного регулятора хода и пропеллеров. При выборе двигателей, общее

правило заключается в том, что суммарно все двигатели должны быть в состоянии обеспечить вдвое больше тяги, чем вес самого дрона. Если тяга, обеспечиваемая моторами, слишком мала, дрон не будет хорошо реагировать на сигналы.

Также, если тяга слишком большая, дрон может стать слишком резким и не стабильным, трудным для управления, а также быстро израсходует запас энергии. Обычно спецификация, которая поставляется с двигателем, предоставляется продавцом или изготовителем. Необходимо найти информацию о мощности, тяге, оборотов в минуту и т.д. Чтобы выбрать двигатель сначала нужно знать, сколько веса планируется поднять на дроне, а затем выработать тягу, необходимую для подъема дрона.

На рисунках 3.10 и 3.11 приведен трехфазный бесколлекторный двигатель DT750 hexTronik 750kv [17].

Kv(rpm/v)	750
Weight (g)	78
Max Current(A)	18
Resistance(mh)	0
Max Voltage(V)	11
Power(W)	0
Shaft A (mm)	4
Length B (mm)	37
Diameter C (mm)	40
Can Length (mm)	10
Total Length E (mm)	77

Spec.
Required Voltage: 11.1v
Suggested Battery Capacity: 1300mAh +
Suggested Prop: 11x3.8 or 11x4.7
Max current draw: 18A (with 11x4.7 prop)
Max thrust: 1000g+
No Load Current: 1.4A
Shaft: 4M (perfectly suited to Towerpor/GWS SF Slow Fly props)
Weight: 78g
Diameter: 41mm
Overall length: 77mm
Kv: 750rpm/v
Comes with mount as shown in Image

Рисунок 3.10. Техническая характеристика двигателя

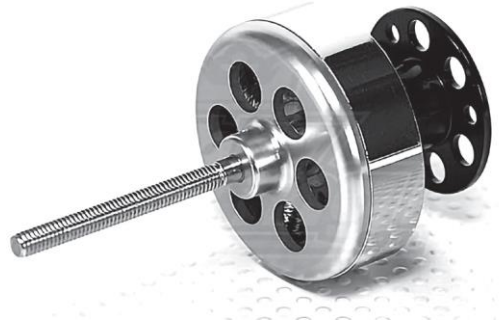


Рисунок 3.11. Двигатель DT 750

Двигатель может дать максимальную тягу 1120 грамм при подключении на него батарею с номиналом напряжения равной 14.8 вольт, т.е. 6 двигателей могут дать суммарно 6720 грамм или 6.7 кг полезной нагрузки. Если гексакоптер при полной комплектации весит 2980 грамм, то это дает еще 3740 грамм на тягу для дополнительного оборудования и времени полета. Гексакоптер использует 6 пропеллеров: 3 по часовой стрелке и 3 против часовой стрелки [17].



Рисунок 3.12. Пропеллеры

Электронный регулятор хода (англ. ESC, Electronic Speed Controller) – устройство для управления оборотами электродвигателя, применяемое на радиоуправляемых моделях с электрической силовой установкой. Электронный регулятор хода позволяет плавно варьировать электрическую мощность, подаваемую на электродвигатель. В отличие от более простых резистивных регуляторов хода, электронный регулятор хода обладает значительно более высоким КПД, не расходуя энергию аккумуляторной батареи на бесполезный нагрев.



Рисунок 3.13. Электронный регулятор хода

Электронные регуляторы хода (рис. 3.13) [17] в первую очередь классифицируются в зависимости от типа электродвигателя, для управления которыми они предназначены:

- Для коллекторных электродвигателей.
- Для бесколлекторных бездатчиковых электродвигателей.
- Для бесколлекторных электродвигателей с датчиками Холла.

А также, в зависимости от типа моделей:

- Для моделей самолетов и мотопланеров.
- Для автомоделей.
- Для судомоделей.
- Для моделей вертолётов.

Все регуляторы также различаются в зависимости от максимального рабочего тока, напряжения батареи, возможностью работы с аккумуляторами различного типа. Регуляторы хода для бесколлекторных электродвигателей принципиально отличаются от регуляторов хода для коллекторных моторов: помимо управления мощностью, подводимой к электромотору, они должны определять положение ротора в каждый момент времени, чтобы точно задавать фазы трех питающих напряжений, необходимых для работы бесколлекторного электромотора. Эти регуляторы обычно дороже регуляторов хода для коллекторных двигателей на ту же электрическую мощность

Аккумулятор

Как правильно выбрать аккумулятор для дрона? Батареи большего размера увеличивает время полета. Однако увеличение времени полета не пропорционально увеличению размера батареи.

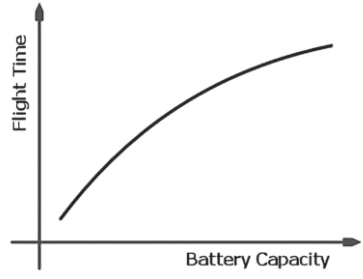


Рисунок 3.14. График времени полета от емкости батареи

На рисунке 3.14 видно, что по мере того, как батарея становится больше, увеличение времени полета становится неэффективным [17]. В

конце концов она достигнет точки, где он просто не получает больше времени полета с большим аккумулятором. В основном это связано из-за веса батареи. Есть методы, с помощью которых можно подобрать соответствующий вес батареи и ее номинал (рис. 3.15) [17].

	A	B	C	D	E
1	Turnigy Nano 3S Battery (25C - 50C)				
2	Capacity (mah)	Weight (g)	Cap VS Weight	Price ($)	Cap VS Price
3	1600	181	8.84	15.39	103.96
4	1800	207	8.70	17.25	104.35
5	2200	239	9.21	21.13	104.12
6	2650	275	9.64	30.25	87.60
7	3000	299	10.03	37.36	80.30
8	3300	337	9.79	40.97	80.55
9	4000	433	9.24	38.31	104.41
10	4500	467	9.64	46.27	97.26
11	5000	523	9.56	56.33	88.76
12	6000	623	9.63	68.78	87.23

Рисунок 3.15. Несколько видов батарей

Используя эту модель, можно рассчитать время полета для любой батареи. Конечно, это только оценочные приблизительные вычисления, но это дает общее представление о том, какие батареи лучше подходят.

Прежде всего нужно собрать данные. Основные данные – это время полета при различных нагрузках. Также можно собрать некоторые другие данные, чтобы определить какая максимальная полезная нагрузка у дрона, такие данные как, напряжения на разных точках подачи дросселя газа (оборотов двигателей), ток и другое.

2	Standard Setup with all equipments and same 2200mah Battery						
3	Total Initial weight: 1193 + 239						
4	Round	Load (g)	Time	Time (s)	Actual Capacity Used (mah)	Hover Throttle	mah / second
5	1	0	08:14	494	1922	63	3.89
6	2	110	07:18	438	1900	68	4.34
7	3	220	06:13	373	1878	70	5.03
8	4	340	05:55	355	1908	73	5.37
9	5	405	05:20	320	1900	79	5.94
10	6	515	N/A	N/A	N/A	85+	N/A

Рисунок 3.16. Потребляемый ток

Приведем пример: была использована батарея 2200 mAh 3S Lipo в качестве эталона, и протестировано время полета при различной массе

нагрузки (0 г, 110 г, 220 г, 340 г, 405 г, 515 г). Данные, которые были собраны из 6 испытательных полетов, приведены на рисунке 3.16 [17].

На рисунке 3.17 приведен график зависимости потребления тока в секундах к нагрузке в граммах [17].

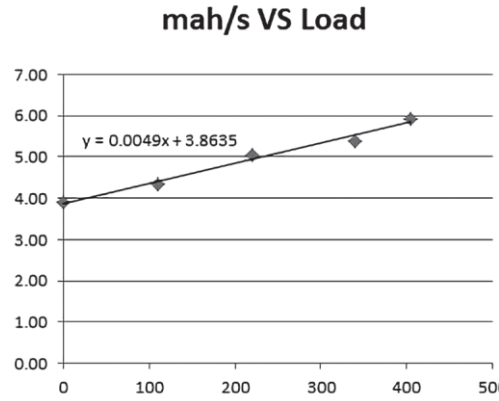


Рисунок 3.17. График зависимости потребления тока в секундах к нагрузке в граммах

Понятно, что данная функции не должна быть линейной, но сила батареи падает в пределах этого диапазона, так что можно небречь погрешностью для получения общего представления.

Capacity	Cap at 3.5V (86%)	Bat Weight	Extra Load	mah/s	Est. Flight Time	in Minute
2200	1892	239	0	3.86	489.71	08:10
2650	2279	275	36	4.04	564.12	09:24
3000	2580	299	60	4.16	620.57	10:21
3300	2838	337	98	4.34	653.36	10:53
4000	3440	433	194	4.81	714.57	11:55
4500	3870	467	228	4.98	777.00	12:57
5000	4300	523	284	5.26	818.25	13:38
6000	5160	623	384	5.75	898.16	14:58

Рисунок 3.18. Приблизительное время полета для различной мощности по весу

Расчетное время полета примерно равно эффективному (86% от всего объема) объему батареи, деленный на мА · ч/с. Например, для

6000 mAh батареи, эффективная емкость 5160 mah, а скорость потре- бления электроэнергии 5.75 mAh/c, так что время полета будет 898.16 секунд, почти 15 минут (рис.3.18) [17]. На рисунке 3.19 приведен гра- фик зависимости времени полета на объем батареи, полученный во время экспериментов [17].

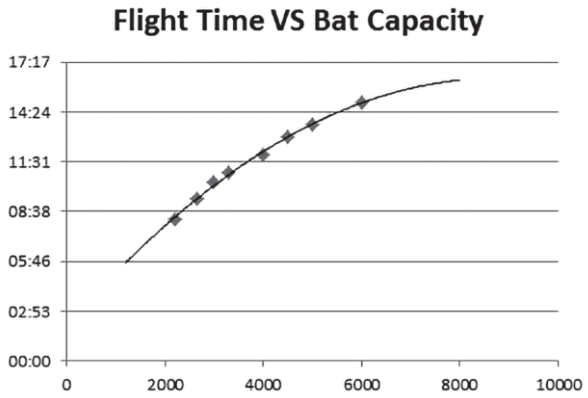


Рисунок 3.19. График зависимости времени полета на объем батареи