

Проектный расчёт надёжности системы управления БПЛА

Танаев О.А., Астапов В.Н.

Самарский государственный технический университет
Самара, Россия (443100, Самара ул. Молодогвардейская, 244),
e-mail: tanaev.oleg@list.ru, asta-2009@mail.ru.

Аннотация

Контур питания двигателей является одним из основных контуров беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и играет ключевую роль в обеспечении их работы. Надёжность контура питания двигателей является важным аспектом для обеспечения безопасности и эффективности полетов. Неисправность или выход из строя данного контура может привести к потере управления, аварийной посадке или даже катастрофе. Поэтому обеспечение надёжности контура питания двигателей и его постоянный мониторинг являются критическими задачами для производителей и операторов БПЛА. Улучшение технологий и строгие проверки качества могут помочь предотвратить непредвиденные ситуации и обеспечить бесперебойную работу беспилотных летательных аппаратов.

В данной работе будет рассмотрена надёжность контура питания двигателей БПЛА типа квадрокоптер, с резервированием и без, а также рассчитаны такие параметры надёжности как вероятность безотказной работы и интенсивность отказов.

Ключевые слова:

БПЛА, квадрокоптер, надёжность, вероятность, аккумулятор, датчики, регулятор скорости, управление, повышение надёжности.

Annotation

The engine power circuit is one of the main circuits of unmanned aerial vehicles (UAVs) and plays a key role in ensuring their operation. The reliability of the engine power circuit is an important aspect to ensure flight safety and efficiency. A malfunction or failure of this circuit can lead to loss of control, an emergency landing, or even a disaster. Therefore, ensuring the reliability of the engine power circuit and its constant monitoring are critical tasks for manufacturers and operators of UAVs. Improved technology and rigorous quality checks can help prevent unforeseen situations and ensure the smooth operation of unmanned aerial vehicles.

In this paper, the reliability of the power supply circuit for quadcopter-type UAV engines, with and without redundancy, will be considered, as well as reliability parameters such as the probability of trouble-free operation and failure rate.

Keywords:

UAV, quadcopter, reliability, probability, battery, sensors, speed controller, control, reliability improvement.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация — это процесс применения технологий и систем для выполнения задач с минимальным участием человека. Основная цель автоматизации заключается в повышении эффективности функционирования, снижении затрат и минимизации ошибок, связанных с человеческим фактором, повышении надёжности и точности.

В современном мире важно увеличение надёжности, это позволяет выполнять задачи быстрее и более эффективно, что особенно важно в ситуациях, требующих срочного

реагирования, таких как поисково-спасательные операции или мониторинг природных катастроф.

На сегодняшний день беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более популярными и востребованными в различных областях, начиная от военной сферы и производственного мониторинга до гражданских приложений, таких как наблюдение за окружающей средой, поиск и спасение, агрокультура и даже развлечения, что показывает актуальность данной темы. Важным аспектом в работе любого БПЛА является обеспечение его стабильности, управляемости и надежности во время полета.

1 Описание функционирования БПЛА

Основной важной частью квадрокоптера является рама, на нее крепятся все компоненты. Форма и размер рамы оказывают значительное воздействие на аэродинамику, летные характеристики квадрокоптера, жесткость всей конструкции и распределение веса.

Следующим важным компонент – это аккумулятор. На сегодняшний день подавляющая часть БПЛА используют литий-полимерные (Li-Po) батареи. Такой выбор связан с рядом преимуществ Li-Po аккумуляторов – они имеют меньший вес, обладают хорошей емкостью, стабильно поддерживают выходное напряжение, обеспечивают высокую скорость зарядки по сравнению с их конкурентами - никель-кадмиевыми (Ni-Cd) и никель-металлогидридными (Ni-Mh) батареями.

Стабильность полета квадрокоптера полностью зависит от полетного контроллера. На нем установлены датчики, которые мгновенно регистрируют информацию о малейших изменениях углов ориентации квадрокоптера. Затем эти данные поступают в микропроцессор контроллера, который производит сложные математические расчеты и определяет, с какой скоростью должен крутиться каждый мотор в данный момент времени. После каждого расчета полученные сведения подаются на регуляторы оборотов (ESC) для исполнения. То, как ESC регуляторы взаимодействуют с двигателями, влияет на скорость и тягу дрона, а также его поведение в воздухе. Во время полета контроллер по протоколу специального интерфейса посылает данные, в которых содержится информация о необходимых действиях (увеличить или уменьшить обороты двигателей), регуляторам оборотов. Но так как двигатели являются трехфазными, то на них нельзя просто подать напряжение, требуется попеременно подавать напряжение на определенные участки обмотки. Данную работу осуществляют регуляторы оборотов. Основными датчиками являются: гироскоп, акселерометр, магнитометр, барометр и GPS. Структурная схема БПЛА представлена на рис. 1 [123].

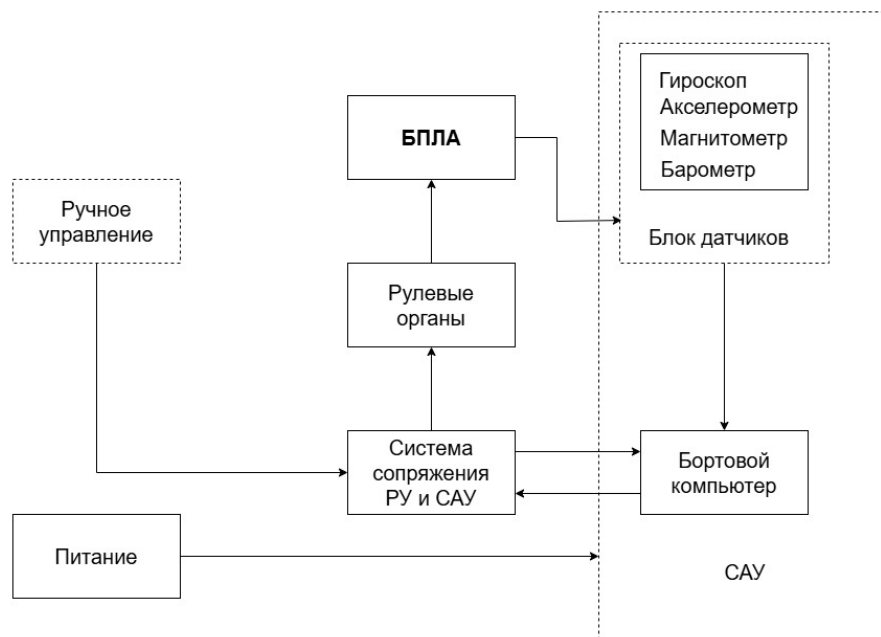


Рисунок 1 – Структурная схема БПЛА

Изменение высоты полета, маневрирование и изменение скорости полета квадрокоптера обеспечивает двигательная установка. Как правило, используют бесколлекторный тип двигателей. Данное решение обосновывается преимуществом бесколлекторных двигателей – они обладают большей надежностью, износоустойчивостью, имеют меньший вес и размер по сравнению с коллекторным типом [4].

2 Расчет надежности системы

Произведем расчет надежности системы управления на примере контура питания двигателей БПЛА типа квадрокоптер. Логическая схема расчета надежности представлена на рис. 2

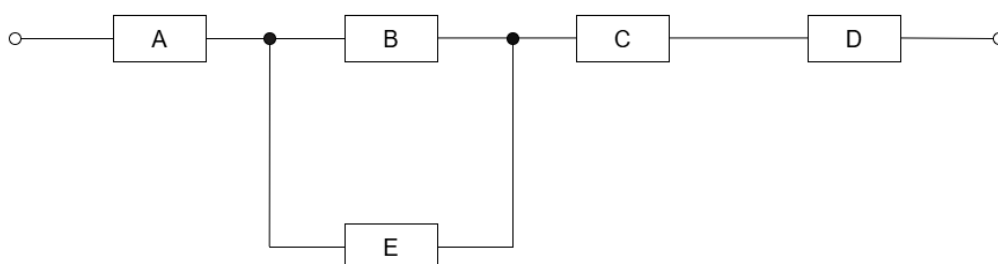


Рисунок 2 – Логическая схема расчета надежности системы. А – аккумулятор, В – жгут распределения питания, С – регулятор скорости, D – бесколлекторный двигатель, E – плата распределения питания.

Приведем значения интенсивности отказов элементов беспилотного летательного аппарата в таблице 1.

Таблица 1 – Интенсивность отказов элементов БПЛА

Обозначение	Элемент	Интенсивность отказов (λ), ч ⁻¹
A	Интенсивность отказов Li-Po аккумулятора	$0,95 \cdot 10^{-6}$
B	Интенсивность отказов клеммных соединений концов жгута распределения питания	$2 \cdot 10^{-6}$
C	Интенсивность отказов регулятора скорости	$0,5 \cdot 10^{-6}$
D	Интенсивность отказов бесколлекторного двигателя	$0,72 \cdot 10^{-6}$
E	Интенсивность отказов платы распределения питания	$0,8 \cdot 10^{-6}$

2.1 Расчет показателей надежности

Перед расчетами примем следующие допущения:

1. Все элементы прошли период приработки;
2. Отказы элементов независимы;
3. Справедлив экспоненциальный закон распределения.

Согласно приведённой выше схеме, ее вероятность безотказной работы будет выражаться формулой:

$$P(t) = \exp[-(\lambda_A + \lambda_C + \lambda_D)t] \cdot (\exp[-\lambda_E t] + \exp[-\lambda_B t] - \exp[-(\lambda_B + \lambda_E)t])$$

где λ – интенсивность отказов элемента, A, B, C, D, E – индексы определенных элементов системы; t – время.

Построим график интенсивности отказов системы, предварительно рассчитав ее по формуле (расчёт производится в программе Matlab) [5,6]:

$$\lambda(t) = \frac{-P'(t)}{P(t)}$$

Ниже, на рис. 3, представлен код вычислений в программе Matlab.

```

A=0.95*10^-6;
B=2*10^-6;
C=0.5*10^-6;
D=0.72*10^-6;
E=0.8*10^-6;
t=[0:50:10^7];
P=exp(-(A+C+D).*t).*(exp(-E.*t)+exp(-B.*t)-exp(-(B+E).*t));
P1=diff(P);
P1=[0,P1];
L=-P1./P;
plot(t,L);
grid ON

```

Рисунок 3 – код вычислений в программе Matlab

В результате получим график интенсивности отказов от времени, представленный на рис. 4.

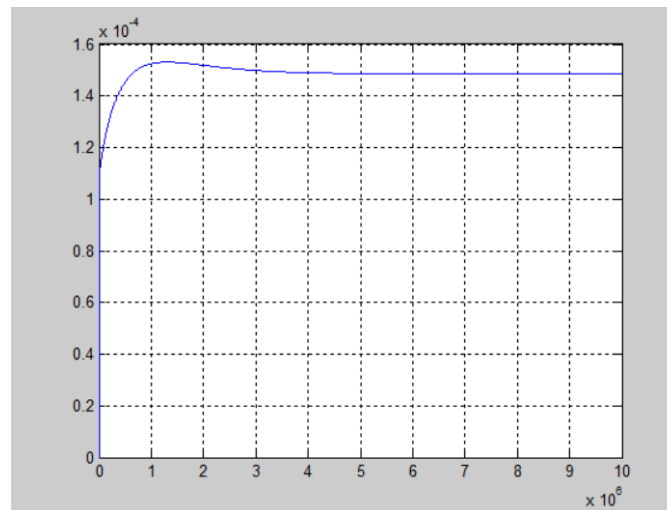


Рисунок 4 – График интенсивности отказов системы

2.2 Повышение надежности системы

Повышение надежности можно достичь с помощью следующих некоторых способов [7,8,9]:

- 1) Увеличение надежности элементов, использование устройств с более высокими показателями надежности.
- 2) Резервирование элементов системы.
- 3) Правильная эксплуатация системы.
- 4) Своевременное обслуживание системы.

Для повышения надежности рассматриваемой системы применим резервирование каждого элемента по отдельности. Соответственно схема примет вид, представленный на рис. 5.

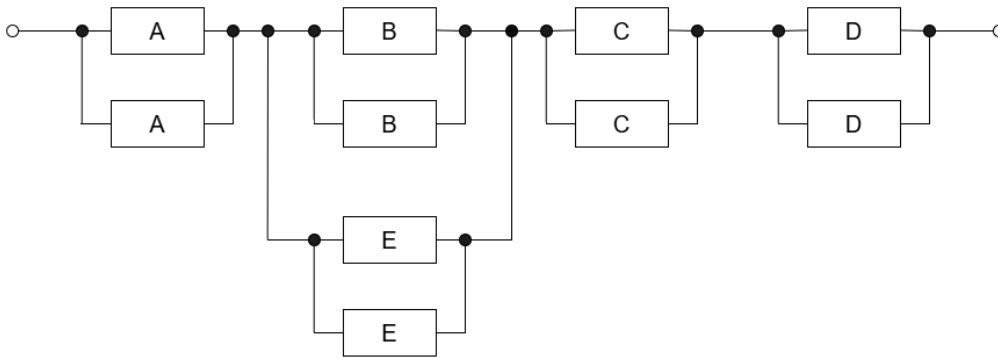


Рисунок 5 – Логическая схема расчета надежности для резервированной системы

И вероятность безотказной работы для каждого элемента будет иметь вид:

$$P_{ires}(t) = 1 - [(1 - \exp(-\lambda_i * t))^2]$$

Тогда вероятность безотказной работы системы будет рассчитываться следующим образом:

$$P_{res}(t) = P_{ares}(t) \cdot P_{cres}(t) \cdot P_{dres}(t) [1 - (1 - P_{bres}(t))(1 - P_{eres}(t))]$$

Найдем интенсивность отказов данной системы с помощью программы Matlab:

$$\lambda_{res}(t) = \frac{-P_{res}'(t)}{P_{res}(t)}$$

Код с вычислениями для резервированной системы представлен на рис. 6.

```
A=0.95*10^-6;
B=2*10^-6;
C=0.5*10^-6;
D=0.72*10^-6;
E=0.8*10^-6;
t=[0:50:10^7];
P=exp(-(A+C+D).*t).*(exp(-E.*t)+exp(-B.*t)-exp(-(B+E).*t));
P1=diff(P);
P1=[0,P1];
L=-P1./P;
PAres=1-((1-exp(-A.*t)).^2);
PBres=1-((1-exp(-B.*t)).^2);
PCres=1-((1-exp(-C.*t)).^2);
PDres=1-((1-exp(-D.*t)).^2);
PEres=1-((1-exp(-E.*t)).^2);
Pres=PAres.*PCres.*PDres.*(1-(1-PBres).*(1-PEres));
Pres1=diff(Pres);
Pres1=[0,Pres1];
L1=-Pres1./Pres;
figure (1);
plot(t,L1);
hold on;
plot(t,L);
grid ON
```

Рисунок 6 – код вычислений в программе Matlab

График интенсивности отказов для резервированной системы представлен на рис. 7.

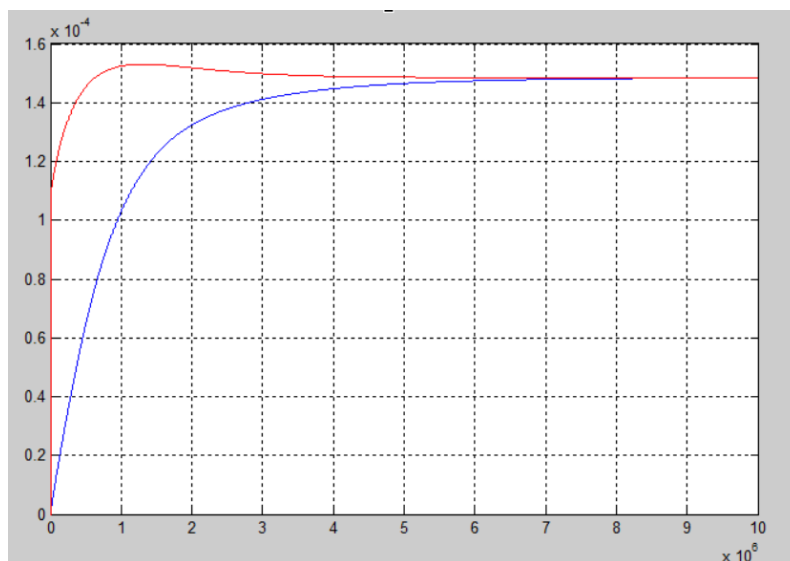


Рисунок 7 – График интенсивности отказов для резервированной системы

Определим изменения после внедрения резервирования в систему по формуле (1) и внесем результаты в таблицу 2.

$$\sigma(t) = \frac{\lambda(t)}{\lambda_{res}(t)} \quad (1)$$

Таблица 2 – Сравнение интенсивности отказов после резервирования системы

$t, 10^5$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda(t)$	0,0001 525	0,0001 519	0,0001 498	0,0001 49	0,0001 487	0,0001 486	0,0001 485	0,0001 485	0,0001 485	0,0001 485
$\lambda_{res}(t)$	0,0001 041	0,0001 324	0,0001 412	0,0001 448	0,0001 465	0,0001 474	0,0001 479	0,0001 482	0,0001 483	0,0001 484
$\sigma(t)$	1,46	1,14	1,06	1,03	1,015	1,008	1,004	1,002	1,001	1,0006

Из данных Таблицы 2 видно, что резервирование системы позволяет снизить интенсивность отказов в начале эксплуатации практически в 1,5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была рассмотрена система функционирования беспилотного летательного аппарата типа квадрокоптер, для контура питания двигателей БПЛА произведен расчет вероятности безотказной работы и интенсивности отказов. Также были построены графики интенсивности отказов для системы с резервированием и без.

Анализ данных графиков показал, что после резервирования системы интенсивность отказов системы становится значительно меньше. Полученные результаты позволяют говорить о применимости подобной методики настройки и тестирования программно-технического комплекса различной степени сложности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1) Основы теории надежности электромеханических комплексов: учебное пособие / П.П. Павлов, Р.С. Литвиненко. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – 92 с.;
- 2) Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении: учебное пособие / Ю. М. Правиков, Г. Р. Муслина. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 122 с.;
- 3) Основы надежности и работоспособности технических систем: учеб. пособие / Ю. В. Баженов, М. Ю. Баженов; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. – 267 с.;
- 4) Урок 6. Двигатели. [Электронный ресурс]. URL: <https://fpv-club.ru/2023/10/08/%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%BA-6-%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B8/> (дата обращения: 05.10.2024);
- 5) Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие: в 2 ч. / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011.;
- 6) Надежность при последовательном и параллельном соединениях элементов. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/5443860/page:3/> (дата обращения: 29.09.2024);
- 7) Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем / Р. С. Литвиненко, Р. Г. Идиятуллин, А. Э. Аухадеев // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 2 (14). – С. 17–22.;
- 8) ГОСТ 27.203-83. Надежность в технике. Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности [Текст]. – Введ. 1984–07–01.;
- 9) Основы теории надежности и диагностика: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Н.Я.Яхьяев, А. В. Кораблин. М.: Издательский центр «Академия», 2009. — 256 с.