

Проектный расчёт надёжности функционирования бесколлекторного двигателя БПЛА

Тахиров П.М., Астапов В.Н.
Самарский государственный технический университет
Самара, Россия (443100, Самара ул. Молодогвардейская, 244),
e-mail: takhirov.pm@mail.ru, asta-2009@mail.ru.

Аннотация

Надёжность двигателя беспилотного летательного аппарата (БПЛА) является критически важным параметром, влияющим на эксплуатационные характеристики, безопасность и эффективность выполнения задач.

Первостепенное значение имеет выбор конфигурации двигателя, который должен соответствовать требованиям по мощности, весу и размеру БПЛА. Электрические двигатели, как правило, предлагают высокую степень надёжности и низкие эксплуатационные расходы, тогда как ДВС обеспечивают большую дальность полета и возможность работы в более сложных условиях.

Надёжность двигателей также зависит от материалов и технологий, используемых при производстве.

Кроме того, важно учитывать эксплуатационные условия, такие как температурные режимы, влажность, уровень загрязнённости и вибрации, которые могут негативно влиять на работу двигателя. Проведение регулярного мониторинга работоспособности и диагностики может значительно повысить общую надёжность и работоспособность подобных систем.

В заключение, надёжность двигателя БПЛА напрямую влияет на эффективность выполнения заданий и может быть обеспечена за счет комплексного подхода, включающего выбор оптимальной конфигурации двигателя, использование качественных материалов, мониторинг и управление эксплуатацией. Это позволяет минимизировать риски отказа и увеличить срок службы БПЛА.

Ключевые слова:

БПЛА, надёжность, двигатель, эффективность, логическая схема, GPS, электронный регулятор скорости.

Annotation

The reliability of an unmanned aerial vehicle (UAV) engine is a critical parameter that affects the operational performance, safety and mission efficiency.

Of primary importance is the choice of engine configuration, which must match the power, weight and size requirements of the UAV. Electric engines generally offer high reliability and low operating costs, while ICEs provide longer range and the ability to operate in more challenging conditions.

Engine reliability also depends on the materials and technologies used in production.

In addition, it is important to consider operating conditions such as temperature, humidity, pollution and vibration, which can negatively affect engine performance. Regular performance monitoring and diagnostics can significantly improve the overall reliability and operability of such systems.

In conclusion, UAV engine reliability directly affects mission efficiency and can be ensured through an integrated approach that includes the selection of the optimal engine configuration, the use of high-quality materials, monitoring and operation management. This minimizes the risk of failure and increases the service life of the UAV.

Keywords:

Unmanned aerial vehicle, reliability, engine, efficiency, logic circuit, GPS, electronic speed controller.

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность двигателя беспилотного летательного аппарата (БПЛА) является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность и безопасность его эксплуатации. В условиях современного развития технологий, когда БПЛА находят все более широкое применение в таких сферах, как военное дело, доставка грузов, мониторинг окружающей среды и сельское хозяйство, требования к надёжности и производительности их двигателей становятся критически важными [1].

При управлении БПЛА требуется контролировать большое количество параметров, которые выполняются последовательно несколькими потоками управляющего процессора, от грамотного распределения задач зависит стабильность и надёжность работы БПЛА [2].

Двигатели БПЛА могут быть как электрическими, 15.11.2024 так и тепловыми (двигателями внутреннего сгорания), и каждый тип имеет свои преимущества и ограничения. Электрические двигатели характеризуются высокой надёжностью, низким уровнем шума и простотой в эксплуатации, однако они ограничены по времени полета из-за емкости аккумуляторов. С другой стороны, ДВС обеспечивают большую мощность и длительность работы, но требуют более сложного обслуживания и могут быть менее надёжными в сложных условиях.

Надёжность двигателя напрямую связана с конструкцией, выбором материалов, технологией производства и эксплуатационными условиями. Поэтому, для обеспечения долговечности и бесперебойной работы БПЛА, необходим комплексный подход к разработке и эксплуатации двигательных систем. Это включает в себя проведение регулярного технического обслуживания, мониторинга состояния и диагностики, а также внедрение новых технологий и материалов.

Таким образом, исследование надёжности двигателей БПЛА представляет собой важную задачу, которая включает как теоретические, так и практические аспекты. В данном контексте акцент будет сделан на анализ факторов, влияющих на надёжность, обзор современных технологий двигателей, а также на подходы к повышению надёжности в условиях реальной эксплуатации [3].

1 УСТРОЙСТВО БПЛА

БПЛА состоит из следующих основных компонентов:

Корпус, крылья и рули, двигатель, аппаратура управления, бортовая электроника, передатчик и приемник.

Управляется с помощью программного обеспечения, которое запрограммировано на контроллере полета или встроенном компьютере. Вот некоторые из основных компонентов системы управления: контроллер полета, автопилот, компьютер, устройства управления [4].

Регулятор скорости (ESC, от английского Electronic Speed Controller): используется в различных приложениях, включая беспилотные летательные аппараты (БПЛА), радиоуправляемые модели и электромобили. Функции ESC регулятора: управление скоростью, изменение направления вращения, защита от перегрузок, обратная связь и диагностика, блокировка при отсутствии сигнала:

Принцип работы:

ESC получает сигналы управления от радиопередатчика через приемник.

ESC обрабатывает поступившие сигналы и определяет, сколько энергии необходимо подать на двигатель для достижения заданной скорости.

На основе обработанных данных ESC управляет транзисторами, которые регулируют ток, подаваемый на двигатель.

ESC автоматически переключает ток между фазами двигателя, обеспечивая его плавное и эффективное вращение.

Базовые ESC обеспечивают простое управление скоростью и направлением, часто используются в радиоуправляемых моделях.

Смарт ESC оснащены дополнительными функциями, такими как программируемые режимы работы, возможность подключения к компьютеру для настройки и мониторинга, а также функции защиты.

ESC с обратной связью используют датчики для мониторинга параметров двигателя и могут адаптироваться к изменяющимся условиям, обеспечивая более точное управление [5].

Выделяют классы БПЛА:

Класс 1. БПЛА самолетного типа взлетной массой до 10 кг с электрическим двигателем.

Класс 2. БПЛА самолетного типа взлетной массой до 100 кг с двигателем внутреннего сгорания.

Класс 3. БПЛА самолетного типа взлетной массой до 1000 кг.

Класс 4. БПЛА вертолетного типа [6].

Анализ эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с электрическим двигателем включает в себя несколько ключевых аспектов, таких как эффективность, надежность, стоимость эксплуатации и влияние различных условий на производительность.

Бесколлекторный двигатель обычно состоит из следующих основных компонентов: статор, ротор, электронный контроллер [7].

Принцип работы:

Создание магнитного поля: когда на обмотки статора подается электрический ток, создается магнитное поле.

Взаимодействие магнитных полей: Постоянные магниты на роторе взаимодействуют с магнитным полем статора. Это взаимодействие создает вращающий момент, который заставляет ротор вращаться.

Электронное управление: контроллер определяет, когда и как подавать ток на обмотки статора.

Обратная связь: некоторые системы используют обратную связь для регулирования скорости и крутящего момента, что позволяет двигателю работать более эффективно [8].

2 РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ

Рассчитаем надежность функционирования бесколлекторного двигателя БПЛА типа «квадрокоптер». Для этого составим логическую схему системы, представленную на Рисунке 1.

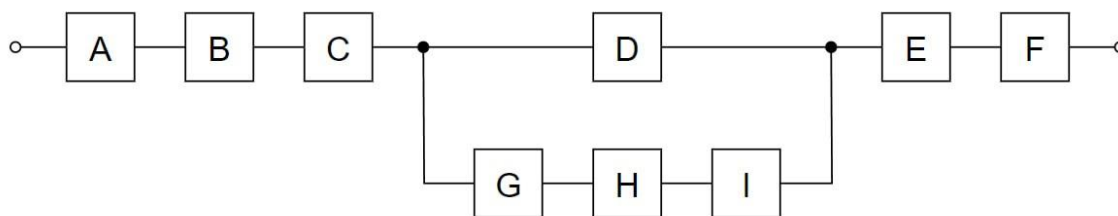


Рисунок 1 – Логическая схема системы автоматического регулирования

В схеме: А – магнитный датчик; В – линия связи 1; С – блок управления; D – линия связи 2; E – ESC регулятор; F – обмотка двигателя, G – линия связи 3; H – контроллер питания; I – аккумулятор.

2.1 Расчет показателей надежности

В Таблице 1 приведены показатели интенсивности отказов элементов, входящих в состав системы.

Таблица 1 – Интенсивность отказов элементов

Обозначение	Элемент	Значение интенсивности отказов, ч ⁻¹
A	Магнитный датчик	$0,53 \cdot 10^{-6}$
B	Линия связи 1	$1,9 \cdot 10^{-6}$
C	Блок управления	$0,27 \cdot 10^{-6}$
D	Линия связи 2	$1,9 \cdot 10^{-6}$
E	Регулятор скорости	$0,35 \cdot 10^{-6}$
F	Обмотка двигателя	$10,1 \cdot 10^{-6}$
G	Линия связи 3	$1,9 \cdot 10^{-6}$
H	Контроллер питания	$0,38 \cdot 10^{-6}$
I	Аккумулятор	$2,2 \cdot 10^{-6}$

Примем следующие допущения при построении математической модели надежности системы:

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

Согласно приведенной схеме, вероятность безотказной работы системы будет выражаться формулой:

$$P(t) = P_A(t) * P_B(t) * P_C(t) * [1 - (1 - P_D(t)) * (1 - P_G(t) * P_H(t) * P_I(t))] * P_E(t) * P_F(t). \quad (1)$$

Интенсивность отказов данной системы находится по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{-P'(t)}{P(t)} \quad (2)$$

Для вычислений воспользуемся программой Matlab. На Рисунке 2 представлен код вычислений.

```

Command Window

>> clear
t=[0:10:10^6];
A=0.53*10^-6; B=1.9*10^-6; C=0.27*10^-6; D=1.9*10^-6; E=0.35*10^-6;
F=10.1*10^-6; G=1.9*10^-6; H=0.38*10^-6; I=2.2*10^-6;

PA=exp(-A.*t); PB=exp(-B.*t); PC=exp(-C.*t); PD=exp(-D.*t); PE=exp(-E.*t);
PF=exp(-F.*t); PG=exp(-G.*t); PH=exp(-H.*t); PI=exp(-I.*t);

P=PA.*PB.*PC.*(1-(1-PD).*(1-PG.*PH.*PI)).*PE.*PF;
P1=diff(P);
P1=[0,P1];
L=-P1./P;

plot(t,L);
grid on;

```

Рисунок 2 – Код вычислений в программе Matlab

На Рисунке 3 представлен график интенсивности отказов системы во времени.

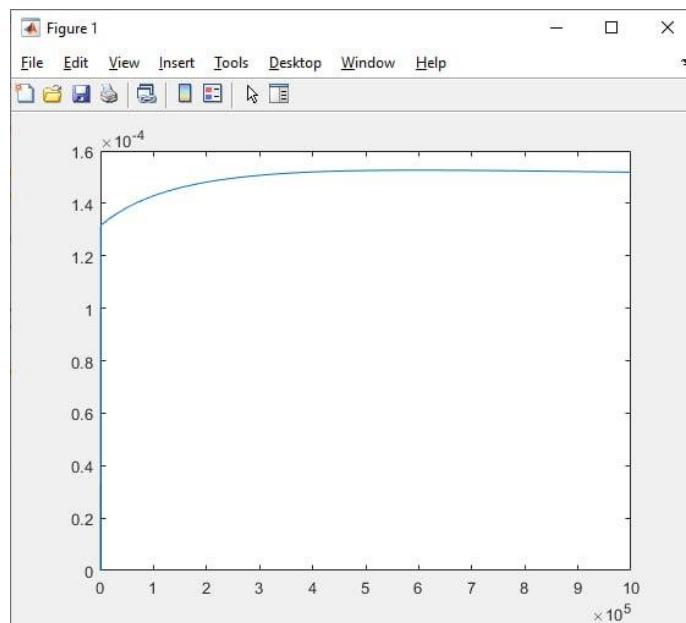


Рисунок 3 – График интенсивности отказов системы во времени

2.2 Повышение надежности системы

К способам повышения надежности систем относят:

1. Увеличение надежности отдельных элементов (замена приборов, исполнительных механизмов, а также устройств с более высокими характеристиками надежности);
2. Упрощение системы при проектировании;
3. Резервирование элементов системы;
4. Систематический контроль и обслуживание системы.
5. Обучение персонала процессам на программах-тренажерах [9, 10].

Для рассматриваемой системы автоматического регулирования введем резервирование каждого элемента системы. Схема системы с резервированием приведена на Рисунке 4.

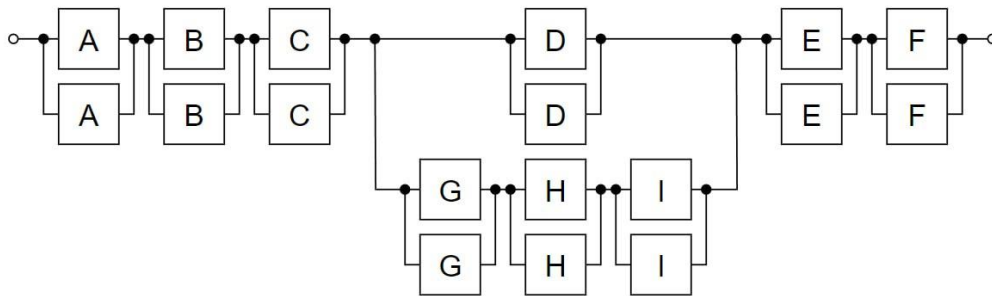


Рисунок 4 – Логическая схема системы с резервированием

Вероятность безотказной работы на каждом из участков будет соответственно равна:

$$P_{i\text{Res}}(t) = 1 - [(1 - \exp(-\lambda_i * t))^2], \quad (3)$$

где i – соответствующий участок.

Тогда вероятность безотказной работы зарезервированной системы будет находиться по формуле:

$$P_{\text{Res}}(t) = P_{A\text{Res}}(t) * P_{B\text{Res}}(t) * P_{C\text{Res}}(t) * [1 - (1 - P_{D\text{Res}}(t)) * (1 - P_{G\text{Res}}(t) * P_{H\text{Res}}(t) * P_{I\text{Res}}(t))] * P_{E\text{Res}}(t) * P_{F\text{Res}}(t). \quad (4)$$

Интенсивность отказов данной системы находится по формуле:

$$\lambda_1(t) = \frac{-P'_{\text{res}}(t)}{P_{\text{res}}(t)}. \quad (5)$$

Код вычислений с резервированием системы в программе Matlab представлен на Рисунке 5.

10^{-4}										
$\lambda_1(t)$, 10^{-4}	0,86	1,07	1,19	1,26	1,32	1,36	1,38	1,4	1,42	1,43
$\sigma(t)$	1,65	1,38	1,26	1,20	1,15	1,12	1,10	1,09	1,07	1,06

Таким образом, из данных Таблицы 2 видно, что резервирование системы позволяет снизить интенсивность отказов в начале эксплуатации более чем в 1,5 раза, сохраняя срок службы системы до конца срока эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было рассмотрено устройство БПЛА и принцип работы бесколлекторного двигателя. В практической части работы был произведен расчет параметров надежности функционирования бесколлекторного двигателя БПЛА. В качестве метода повышения надежности был выбран метод резервирования. Для оценки выполненного повышения надежности системы было произведено сравнение результатов вычисления интенсивности отказов резервированной и нерезервированной системы.

Проектный расчет надежности функционирования бесколлекторного двигателя БПЛА требует комплексного подхода, включающего анализ конструкции, эксплуатационных условий и использования современных технологий. Надежность двигателя является ключевым фактором, определяющим общую эффективность и безопасность БПЛА. Учитывая вышеизложенные аспекты, можно обеспечить высокую надежность работы двигателя, что в свою очередь повысит общую надежность и безопасность полета беспилотного летательного аппарата.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Надежность БПЛА – [Электронный ресурс]. URL: [\(https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%91%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82_\(%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%BD,_%D0%91%D0%9F%D0%9B%D0%90\)\)](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%91%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82_(%D0%B4%D1%80%D0%BE%D0%BD,_%D0%91%D0%9F%D0%9B%D0%90)) (дата обращения: 19.10.24);
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023616935, Рос. Федерация. Программа-тренажер расчета надежности типовых одноконтурных систем автоматического регулирования температуры, давления, уровня и расхода вещества / С.А. Ельков (РФ), Н.А. Осмаков (РФ), Н.А. Сизова (РФ), В.Н. Якимов (РФ).

– Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 04.04.2023. Заявка № 2023615374, 23.03.2023.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024664991, Рос. Федерация. Программа-имитатор многопроцессорной системы параллельной обработки данных с общей памятью / В.Н. Якимов (РФ), Н.А. Сизова (РФ), С.А. Ельков (РФ), Н.А. Осмаков (РФ). – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 26.06.2024. Заявка № 2024663948, 19.06.2024.

4. Устройство дронов и других небесных беспилотников – [Электронный ресурс]. URL:https://dzen.ru/a/ZM1_6dVH_wml_o1g (дата обращения: 19.10.24);

5. Иванов М.В., Зайцев В.Е., Галиев Р.Д., Хакимьянов А.Р. ESC регуляторы оборотов: эффективный способ управления бесколлекторными двигателями беспилотных летательных аппаратов // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. Кызыл. 2024. С 39-47.

6. БПЛА в условиях арктического региона – [Электронный ресурс]. URL:<https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/473748-bpla-v-usloviyakh-arkticheskogo-regiona/> (дата обращения: 20.10.24);

7. Бесколлекторный двигатель постоянного тока – [Электронный ресурс]. URL:https://innodrive.ru/articles/beskollektornyi_dvigatel_postoyannogo_toka/ (дата обращения: 21.10.24);

8. Устройство бесколлекторного электродвигателя – [Электронный ресурс]. URL:<https://technogroupp.com/articles/beskollektornyj-elektrodvigatel-postoyannogo-toka/> (дата обращения: 22.10.24);

9. Якимов В.Н., Сизова Н.А., Осмаков Н.А., Ельков С.А. Программа-тренажер разработки автоматизированных систем управления для нефте-технологических процессов // Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак 26–28 сентября 2024 г. – Стерлитамак: Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, 2024. – С. 460-465.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665792, Рос. Федерация. Программа-тренажер для обучения проектированию автоматизированных систем управления нефтетехнологическими процессами / Н.А. Сизова (РФ), В.Н. Якимов (РФ), Н.А. Осмаков (РФ), С.А. Ельков (РФ). – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2024. Заявка № 2024664102, 19.06.2024.