

УДК 519.873

**В.И. КОРТУНОВ, В.М. ИЛЮШКО, А.В. МАЗУРЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ**

*Приведен анализ результатов испытаний беспилотных систем (БС), выявлены основные элементы аппаратного и программного обеспечения с наименьшей надежностью. Рассмотрены существующие подходы решения вопросов оценки и методы повышения надежности программного обеспечения, как на этапе создания, так и на этапе тестирования. Предлагается решение задачи повышения надежности беспилотного комплекса осуществлять с учетом принципов структурного построения сложных программных средств и за счет обеспечения различных видов защиты в зависимости от требований к БС и имеющихся технологий программирования.*

**Ключевые слова:** Беспилотный комплекс, электрооборудование, интегрированная инерциальная система, надежность программного обеспечения, технология программирования

### **Введение**

Беспилотные системы создаются для применения в различных областях как хозяйственного так и военного назначения. Спектр выполняемых задач в военной области от видеонаблюдения до активного применения невозвращаемых беспилотных ЛА (БпЛА), а в хозяйственной области от фотографирования зданий и земельных участков, до выполнения специальных заданий по доставке полезной нагрузки в опасную зону.

Перечень фирм и компаний, производящих собственные БпЛА в замкнутом цикле, не очень много, хотя производителей такой техники на основе готовых компонент достаточно много.

Перечень компаний еще сужается, если привести данные о производителях собственного электронного оборудования и автопилотов [1].

Создание такой техники имеет как научные так технологические аспекты от систем питания до прикладного программного обеспечения, что не под силу малым компаниям.

В Национальном аэрокосмическом университете «ХАИ» созданием микро-миниБпЛА с электроприводом и сопутствующих подсистем было начато в 2006 году, а к 2011 году были разработаны следующие комплексы на базе электрического двигателя: воздушный комплекс видеонаблюдения «КБ АВИА Э1», летающая платформа для фотографирования зданий и сооружений на основе электровертолета «КБ АВИА Эв1», беспилотный аппарат сельскохозяйственного назначения для разбрасывания биологических веществ «АК-10с». Создаваемая беспилотная техника должна отвечать высоким требованиям

по надежности, так как существует вероятность отказов, а, следовательно, и создание аварийной или опасной ситуаций для использования по назначению.

В статье рассмотрены вопросы узких мест при проектировании БС по параметрам надежности и даны рекомендации по её повышению.

### **1. Состав и характеристики беспилотных систем**

Рассмотрим подробно состав и назначение беспилотного комплекса на примере мультиротора, для которого подробное изложение истории развития таких БпЛА и достижений компаний можно ознакомиться в [2].

Электронное оборудование такого комплекса можно считать типовым и состоящим из: радиоканалов телеметрии и управления; канала передачи видеозображения; автопилота и электроприводов с ШИМ-управлением; наземной станции управления (НСУ), а также систем электропитания. Беспилотный комплекс на основе БпЛА типа мультиротора предназначен для ведения видеонаблюдения за наземной обстановкой с БпЛА, выполняющего полуавтоматический или автоматический полет по заданному маршруту и передающий текущее изображение с видеокамеры на наземную станцию наблюдения и управления, а также выполнения фотографии с помощью фотокамеры.

Характеристики системы представлены в табл. 1.

В состав комплекса входит:  
беспилотный ЛА;

полезная нагрузка (видеокамера фиксирована, оптико-электронная система наблюдения с ТВ радиоканалом);

переносной пульт управления;

наземная станция управления (НСУ) и видеонаблюдения со специальным программным обеспечением.

Таблица 1

Характеристики системы

№	Параметр	Значение
1	Максимальная продолжительность полета	20 мин
2	Максимальная дальность полета	5 км
3	Максимальная высота полета	1500 м
4	Время разворачивания	10 мин
5	Время подготовки к вылету	10 мин
6	Время сборки	10 мин
7	Дальность обнаружения людей по ТВ	150 м
8	Дальность обнаружения транспортных средств по ТВ	400 м

Конструктивно БпЛА представляет собой раму центрально-симметричной конструкции, на концах которой расположены роторы. Данный тип конструкции известен так же под именем «мульти-ротор». Размеры БпЛА по внешним элементам конструкции:

в диаметре – до 1 м;

высота – до 0,5 м.

Масса компонентов БпЛА - полезной нагрузки до 1,5 кг, взлетная масса до 4,0 кг.

*Тяговая система* (двигатель-винт) состоит из бесщеточных электрических двигателей мощностью 350 Вт и винтами – прямого и обратного вращения.

*Система управления БпЛА.* Система управления представляет собой полнофункциональный автопилот на основе интегрированной инерциально-спутниковой системы. Блок инерциальных датчиков (3 скоростные гироскопа и 3-х осевой акселерометр), магнитометр, бародатчик высоты, спутниковый навигационный приемник обеспечивают управление БпЛА в автоматическом режиме по маршруту. Управление происходит подачей ШИМ-сигналов на двигатель через регуляторы скорости. Вычислительная платформа на базе микроконтроллера C8051SF120, программное обеспечение микроконтроллера написано на языке С.

*Система передачи данных* или командно-телеметрическая линия включает бортовой модем, подключенный к вычислителю автопилота, и назем-

ный модем, подключенный к компьютеру НСУ. Характеристики модема - частота рабочая 2,4 ГГц/900 МГц (частота работы настраивается); скорость передачи – 19 200 б/сек. Антенна бортовая – всенаправленная типа «штырь», антенна наземная – всенаправленная и направленная на БпЛА. Система передачи данных обеспечивает связь в пределах прямой видимости до 5 км с направленной антенной.

При пропадании связи происходит возвращение БпЛА в точку старта или продолжение выполнения маршрута в отсутствии связи (опция выбирается по требованиям).

*Полезная нагрузка.* В качестве полезной нагрузки используется камера VC-C4-R с возможностью управления по двум осям (тангажу и курсу) или её аналог. Камера не стабилизируется в осях поворота.

Характеристики камеры представлены в табл. 2.

*Переносной пульт управления.* Пульт управления представляет собой пульт многоканального ручного управления с возможностью управления БпЛА и полезной нагрузкой, а так же переключения режимов работы и выбора канала настройки параметров автопилота. Характеристики пульта: несущая частота – 2,4 ГГц; дальность действия в пределах прямой видимости – 3 км.

*Наземная станция управления.* Наземная станция управления состоит из компьютера типа ноутбука, радиомодема телеметрического канала, ТВ-приемника, антенн на штативе, адаптера питания и аккумулятора 12В, соединительных кабелей. Специальное программное обеспечение позволяет создавать маршрут полета на электронной карте местности, дистанционно передать маршрут полета и организовать подачу специальных команд типа «возврат домой», остановка двигателей и др.

Программное обеспечение НСУ выполняет следующие функции:

- прием данных с БпЛА по каналу радиомодема;
- передачу данных на БпЛА и команд управления (смена маршрута полета, возврат домой);
- отображение текущих параметров БпЛА на мониторе;
- создание и редактирование маршрута полета по электронной карте местности;
- отображение текущего видеоизображения на мониторе компьютера или на выносном мониторе (видеоочках).

Вычислительная платформа НСУ – Windows XP.

Запись видео производится отдельным видеорегистратором.

Таблица 2  
Характеристики камеры

№	Параметр	Значение
1	Угол наклона (тангажа)	1-90 град.
2	Угол направления (курс)	+/-170 град
3	Масштаб	16-кратное
4	Фокусное расстояние	От 4 до 64 мм
5	Угол обзора	От 47 град до 3 град
6	Управление диафрагмой	Есть
7	Потребляемая мощность	12 Вт
8	Разрешение	350x420 ТВ строк
9	Количество пикселей	470 000

## 2. Тестирование и выполнение полетов

Бортовое электрооборудование и аппаратура НСУ тестировалась на различных БПЛА, как самолетного так и вертолетного типов.

Самолетный вариант на базе БПЛА «КБ АВИА Э1» на протяжении трех лет выполнил более 80 полетов, что послужило основой тестирования и доработки программного обеспечения.

Использование программно-аппаратного оборудования по управлению на других типах БПЛА самолетного типа позволили выявить различные ошибки, как бортового так и наземного НСУ на этапах взлета с катапульты и посадки с парашютом.

Беспилотный комплекс «КБ АВИА Эв1» с 2009-2011 гг. проходил тестирование на различных типах электровертолетов, а базе электровертолета TIREX600 выполнено фотографирование одиночных зданий для последующей обработке изображений с целью получения панорамного и объемного изображений.

Общее полетное время за три года составило более 100 часов. Специфика выполнения миссии при фотографировании потребовала нестандартных режимов полета БПЛА, что в свою очередь потребовало доработки ПО и дополнительного тестирования.

## 3. Надежность элементов беспилотных систем

Основными причинами аварий беспилотных систем являются:

- отказы технических систем из-за дефектов изготовления и нарушений режимов эксплуатации (пайка, соединение, механическое повреждение при монтаже, транспортировке и эксплуатации);

- отказы программно-аппаратных средств из-за проявления ошибок, допущенных на этапе проектирования;

- ошибочные действия операторов наземной станции управления;

- внешние негативные воздействия на элементы комплекса.

Невыполнение полетного задания, связанное с негативным действием, например постановкой помех по радионавигационной системе, должно быть предусмотрено на программном уровне и решить проблему путем прекращения миссии и возврата БПЛА.

Надежность всей системы определяется надежностью составных элементов от планера до аккумулятора. Поскольку технические элементы комплекса разнообразны от конструкций из пластика до встроенных микроконтроллерных систем, то и должны быть разнообразны и подходы к оценке надежности.

Практика тестирования и применения беспилотных систем показала наиболее слабые места в обеспечении надежности – это программное обеспечение (средства) как верхнего так нижнего уровня. Вследствие его сложности при создании для обеспечения вычислительной устойчивости, обмена данными многих устройств, многоконтурной логики работы электронного оборудования, и возможности тестирования только при реальных полетах, для полного выявления ошибок потребовалось множество полетов с затратным обеспечением по транспорту, временем проведения из-за погодных условий, с привлечением технического персонала и др. затрат.

Особенность разрабатываемого ПО в том, что не все ошибки можно протестировать на земле. Возможно, часть ПО тестировать на симуляторах, моделирующих полет БПЛА, но в целом отработать ПО можно только в полетном режиме. Да и важным остается вопрос, как повысить надежность и как «измерить» надежность.

Рассмотрим существующие подходы решения вопросов оценки и повышения надежности [4].

## 4. Обеспечение надежности ПО беспилотных систем

Считаем, что надежность ПО – есть вероятность его работы без отказов в течении определенного периода времени, тогда параметр надежности – среднее время работы между проявлениями ошибок. Отказ ПО – это появление в нем ошибки. Считаем в

ПО имеется ошибка, если оно не выполняет того, что ожидает от него пользователь.

Надежность программного обеспечения определяется не только внутренним свойством программы, но и результатом действия его пользователей. Таким образом, надежность ПО зависит от внутренних факторов (наличием ошибок и защиты от отказов программы) и внешних факторов (действий оператора, сбоев аппаратуры, от взаимодействия с другой программой) [4].

Одним из важнейших общих показателей надежности, представляющих интерес для практики, является вероятность безошибочного функционирования ПО. Проверка правильности функционирования разработанного ПО (корректности, устойчивости) и удовлетворение его требованиям осуществляются на этапе отладки или тестирования. Как правило, основным фактором отладки является затраченное время.

Поэтому в ряде моделей оценивания надежности программ наряду с необходимым временем их функционирования при решении конкретных задач рассматривается и второй временной фактор - время отладки этих программ до использования по назначению.

Существующие активные методы повышения надежности ПО совершенствуются за счет развития средств автоматизации при написании и тестировании программ. Сложность ПО и высокие требования по их надежности требуют выработки принципов структурного построения сложных программных средств, обеспечивающих гибкость модификации ПО и эффективность его отладки.

К таким принципам можно отнести:

- модульность и строгую иерархию в структурном построении программ;
- унификацию правил проектирования, структурного построения и взаимодействия компонент ПО;
- унификацию правил организации межмодульного интерфейса;
- поэтапный контроль полноты и качества решения функциональных задач.

Повышение надежности ПО возможно так же за счет обеспечения различных видов защиты.

1. Защита от сбоев аппаратуры. Такая защита обеспечивается организацией т. н. «двойных или тройных просчетов», что для ПО реального времени затруднительно.

2. Защита от влияния «чужой» программы. Под «чужой» программой понимается программа, выполняемая параллельно по отношению к программе и относится, прежде всего, к функциям операционных систем. Таким образом, собственное ПО является «заложником» операционной системы.

3. Защита от отказов «своей» программы. Это собственно обеспечивается надежностью самого ПО, как этапе проектирования так и тестирования.

4. Защита от ошибок оператора (пользователя). Речь идет не об ошибочных данных, поступающих от пользователя ПО (защита от них связана с обеспечением устойчивости ПО к входным данным), а о действиях пользователя, приводящих к разрушительному изменению состояния внешней информационной среды ПО, несмотря на корректность используемых при этом данных. Защита от таких действий частично обеспечивается выдачей предупредительных сообщений о попытках изменить состояние внешней информационной среды ПО с требованием подтверждения этих действий. (Пример, команда выпуск парашюта)

5. Защита от несанкционированного доступа. В этом случае каждому пользователю ПО предоставляется определенные информационные и процедурные ресурсы (услуги). Этот вид защиты должен обеспечить, чтобы каждый пользователь ПО мог использовать только то, что ему предоставлено (санкционировано). Пример, изменение настроек системы управления.

Вариант визуализации телеметрической информации наземного ПО показан на рис. 1.

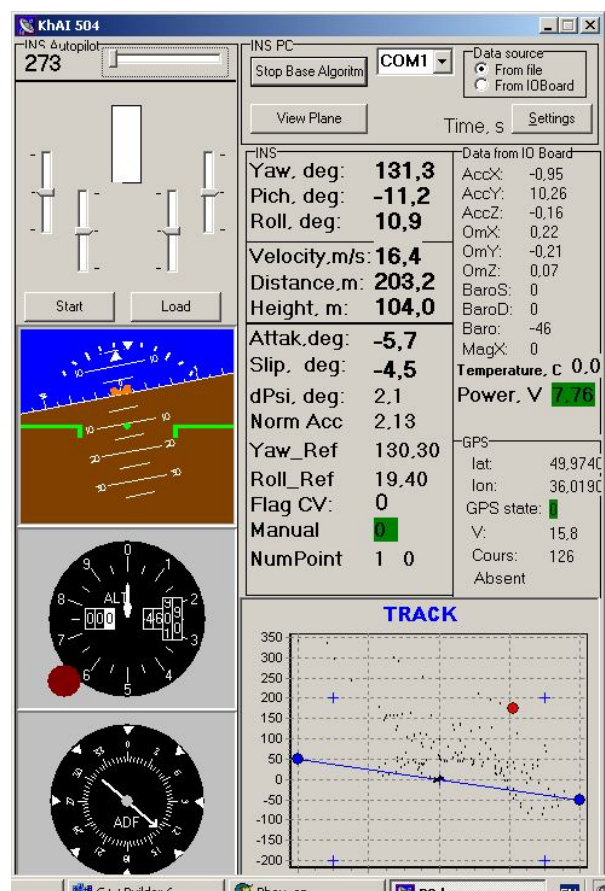


Рис. 1. Визуализация данных телеметрии

## 5. Анализ надежности аппаратных средств

Аппаратные средства как радиоэлектронные устройства бортового и наземного оборудования содержат встроенные микроконтроллерные системы, которые выполняют основные функции по управлению БПЛА.

Следовательно, о надежности оборудования можно судить по надежности микроконтроллеров (МК) [3]. Рассмотрим следующие виды параметров, определяющие надежность МК.

Не чувствительность к помехам по питанию. Этот показатель для большинства МК выдержан на высоком уровне, о чем свидетельствует их применение в различных областях техники от игрушек до космических систем.

В большинстве случаев электропитание электрооборудования БПЛА происходит от общего аккумулятора, а некоторых – отдельным, поэтому этот показатель обеспечивается.

*Нечувствительность к помехе сигнала*, если он подходит по напряжению в заданный паспортный диапазон.

*Слабая чувствительность к внешней температуре*. МК даже для коммерческой версии обеспечивают температурный режим -30...+50, что достаточно при эксплуатации БС.

*Устойчивость к вибрации и слабым ударам*. Это требование является обязательным даже для коммерческой версии, но в большинстве случаев применяют еще специальные средства защиты, которые эффективны.

Для подтверждения надежности МК можно сослаться на надежность автомобильной электроники, которая работоспособна при большом диапазоне температур, вибраций, «шоков», скачков питания и др.

На основе опыта эксплуатации беспилотной техники и в ходе проводимых испытаний при неудачных полетах с падением БПЛА наиболее устойчивыми элементами к шокowym нагрузкам оказались печатные платы электронных устройств. Вследствие малых масс электронных компонент на плате и «хорошей» пайки платы оставались работоспособными после шокowych перегрузок в сотни г.

В целом считаем, что надежность устройств с МК высока в сравнении с другими элементами.

## Заключение

Для беспилотных систем возможны два пути повышения надежности - повышение надежности элементов и изменение структуры системы (изменение структуры понимается как введение дополнительных, избыточных элементов, включающихся в работу при отказе основных).

Использовать разные подходы для разных типов БС. До дальности действия до 50 км путем повышения надежности отдельных элементов и конструктивной сборкой элементов в узел, свыше 50 км повышение надежности элементов видится изменением структуры системы (двукратное резервирование системы управления для реализации функции).

Повышение надежности ПО возможно путем применения современных технологий программирования, применения различных видов защиты, длительного тестирования (выполнения полетов), применения симуляторов для тестирования части ПО (формирования параметров движения и управления полетом).

Надежность БС при внешних негативных воздействиях на элементы комплекса необходимо обеспечивать прежде всего на программном уровне путем реконфигурации решения задач управления («возвращение домой» при этих действиях), выдачи сообщений на НСУ для принятия решений оператором.

## Литература

1. *О производителях собственного электронного оборудования и автопилотов [Электронный ресурс]*. – Режим доступа: <http://www.teknol.ru>. – 15.01.2012 г.
2. *Ерохин, Е. Мультикоптеры: новый вид [Электронный ресурс] / Е. Ерохин, А. Коломиец. – 12 с. – Режим доступа: <http://www.uav.ru/articles/multicopters.pdf>. – 15.01.2012 г.*
3. *Никулин, С.М. Надежность элементов радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / С.М. Никулин. - М.: Энергия. - 1979. – 84 с.*
4. *Майерс, Г. Надежность программного обеспечения [Текст] / Г. Майерс; пер. Ю.Ю Галимо; под ред. В.Ш. Кауфман. – М. : Мир, 1980. – 280 с.*

Поступила в редакцию 12.03.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры В.А Краснобаев, Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко, Харьков, Украина.

## ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ БЕЗПІЛОТНИХ СИСТЕМ

*В.І. Кортунів, В.М. Ілюшко, О.В. Мазуренко*

Наведено аналіз результатів випробувань безпілотних систем (БС), виявлені основні елементи апаратного і програмного забезпечення з найменшою надійністю. Розглянуто існуючі підходи вирішення питань оцінки та методи підвищення надійності програмного забезпечення, як на етапі створення, так і на етапі тестування. Пропонується вирішення завдання підвищення надійності безпілотного комплексу здійснювати з урахуванням принципів структурної побудови складних програмних засобів і за рахунок забезпечення різних видів захисту в залежності від вимог до БС і наявних технологій програмування.

**Ключові слова:** Безпілотний комплекс, електрообладнання, інтегрована інерціальна система, надійність програмного забезпечення, технологія програмування

## MODELING ALGORITHM OF THE CONTROLLED MARKOV CHAIN

*V.I. Kortunov, V.M. Ilushko, A.V. Mazurenko*

The analysis of the results of the tests of unmanned aircsystems (AS), identified the main elements of hardware and software from the lower reliability. Considered are the current approaches address the evaluation and the methods of improvement of reliability of the software, as at the stage of creation, so and at the stage of testing. A solution of the increase of reliability of the AS to implement based on the principles of the structural construction of complex software tools and by providing various types of protection in partic-depending on the requirements of the AS and the existing technologies of programming.

**Key words:** Unmanned complex, electrical equipment, integrated inertial system, the reliability of the software, the technology of programming.

**Кортунів Вячеслав Іванович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектування радіоелектронних систем ЛА Національного аерокосмічного університета ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Ілюшко Віктор Михайлович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. виробництва радіоелектронних систем ЛА Національного аерокосмічного університета ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Мазуренко Александр Владимирович** – канд. техн. наук, доц. кафедри проектування радіоелектронних систем ЛА Національного аерокосмічного університета ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.