



УДК 623.746.519
ГРНТИ 78.25.13

ТРЕБОВАНИЯ К НАДЕЖНОСТИ БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА

*А.М. АГЕЕВ, кандидат технических наук, доцент
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
А.С. ПОПОВ
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Приведены требования к надежности комплексов с беспилотными летательными аппаратами тактического, оперативного и стратегического назначения. Раскрыты особенности построения и функционирования бортового комплекса управления беспилотных летательных аппаратов различного класса. Показано, что подходы к заданию и обеспечению требований по надежности существенно зависят от класса и функционального назначения комплекса.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, надежность, бортовой комплекс управления, классификация, характеристики.

THE RELIABILITY REQUIREMENTS FOR ONBOARD CONTROL COMPLEXES OF DIFFERENT CLASSES UNMANNED AERIAL VEHICLES

*A.M. AGEEV, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
A.S. POPOV
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

Requirements are given to the reliability of complexes with unmanned aerial vehicles for tactical, operational and strategic purposes. The onboard control complex construction and functioning particular qualities of various classes unmanned aerial vehicles are revealed. It is shown that approaches to setting and ensuring reliability requirements essentially depend on the class and functional purpose of the complex.

Keywords: unmanned aerial vehicle, reliability, onboard control system, classification, characteristics.

Введение. Современные локальные конфликты характеризуются новым содержанием ведения боевых действий, в которых всё больше применяют беспилотные летательные аппараты (БЛА). Комплексы с БЛА за последние годы стали одним из символов войн нового столетия, войн, ведущихся быстро и эффективно, с минимальными потерями собственных сил, войн, где время на получение информации и принятие решений чрезвычайно сократилось. Для оперативного решения задач разведки, боевого применения и других задач все шире используются различные классы БЛА. Интерес к БЛА обусловлен их потенциальными достоинствами и преимуществами по сравнению с пилотируемыми летательными аппаратами (ЛА): сокращение боевых потерь дорогостоящей авиационной техники и летных экипажей; независимость предельных режимов полета БЛА от физиологических возможностей человека; существенно меньшие затраты на создание и эксплуатацию; возможность применения при отсутствии развитой обеспечивающей инфраструктуры; возможность применения в условиях сильного противодействия ПВО противника; относительная простота и дешевизна подготовки наземных экипажей БЛА [1].



Актуальность. Одним из основных свойств, которым должен обладать БЛА в независимости от класса является его надежность, определяемая, главным образом, состоянием бортового комплекса управления (БКУ) БЛА. Требования по надежности к БКУ БЛА задаются в зависимости от уровня решаемых задач и варьируются от минимальных для БЛА тактического назначения до предельно достижимых для БЛА стратегического назначения [2].

Эффективность использования БЛА в целом зависит от их *надёжности* [3]. На сегодняшний день наряду с комплексами с БЛА ближнего действия и малой дальности, требования к надежности, которых весьма низки, перед военно-промышленным комплексом страны стоит задача разработки комплексов средней и большой дальности большой продолжительности полета. Проведенный анализ показывает, что надежность таких аппаратов должна быть сопоставима, а в отдельных случаях выше, чем надежность пилотируемых ЛА, по причине отсутствия на борту пилота, способного парировать катастрофические последствия отказов в системе управления, ведущие к неконтролируемым режимам.

Классификация БЛА с позиции надежности. В работах [4, 5] приведены известные общепризнанные варианты отечественной и зарубежной классификации БЛА. Основываясь на функциональном предназначении каждого БЛА, сложности бортового оборудования и времени полета целесообразно разделить все БЛА самолетного типа на три класса, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация БЛА по уровню решаемых задач

Характеристика \ Класс БЛА	Тактические	Оперативные	Стратегические
Решаемые задачи	Оптическая разведка	Оптическая, инфракрасная и радиотехническая разведка, применение АСП, РЭБ	Оптическая, ИК, радиотехническая, радиолокационная, лазерная разведка, применение АСП, РЭБ
Взлетная масса, кг	0...10	10...100	250...50000
Дальность полета, км	0...20	20...100	100...5000
Продолжительность полета, ч	0...1	1...12	2...72

Такая классификация обуславливает возможность определить требования к надежности БЛА каждого класса. Наивысшему уровню надежности, используемому в авиации и определяемому как практическая невероятность отказа [6], соответствует вероятность отказа на час полета, равная $1 \cdot 10^{-9}$. Бортовые системы пилотируемых самолетов, наиболее ответственные в смысле функциональной значимости для безопасности полета (системы группы I), должны обеспечивать вероятность отказа на час полета не более $1 \cdot 10^{-8}$. То есть можно сказать, что предельной надежности БЛА соответствуют вероятность отказа на час полета в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-8}$. Именно эти количественные значения представляется целесообразным принять для класса стратегических БЛА.

Классу БЛА оперативного назначения можно поставить в соответствие надежность бортовых систем группы II пилотируемых самолетов, которые, исходя из выполнения условий отказобезопасности, должны обеспечивать вероятность отказа на час полета не более $1 \cdot 10^{-6}$, что достигается двух-трехкратным резервированием. Таким образом, для класса очень высокой надежности БЛА, целесообразно рекомендовать количественные значения вероятности отказа на час полета в диапазоне от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-6}$.

Минимальной надежностью, которой оперируют в пилотируемой авиации в качестве опорного уровня, является надежность нерезервированного электрогидравлического канала системы управления, вероятность отказа которого на час полета оценивается величиной $1 \cdot 10^{-3}$. Такой же уровень надежности (вероятность отказа от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ на час полета) имеют бортовые системы группы III пилотируемых самолетов, отказы которых не влияют на



безопасность полета. Такие системы, как правило, не требуют резервирования. Введенный нами класс надежности распространяется на тактические БЛА, для которых характерна малая взлетная масса (единицы килограмм и менее), практически исключая возможность резервирования, а также небольшая продолжительность полета, не превышающая 1-2 часа. Это позволяет рекомендовать для них требуемый уровень надежности, не превышающий надежность систем группы III пилотируемых самолетов. Таким образом, для класса надежности тактических БЛА принимаем количественные значения вероятности отказа на час полета в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$. Обобщенная шкала требуемой надежности БЛА различного класса представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Шкала требуемой надежности БЛА

Класс БЛА	Допустимая вероятность отказа на час полета	Кратность резервирования
Тактические	$1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	1
Оперативные	$1 \cdot 10^{-8} \dots 1 \cdot 10^{-6}$	2...3
Стратегические	$1 \cdot 10^{-9} \dots 1 \cdot 10^{-8}$	3...4

Надежность бортового комплекса управления. Для достижения требуемой надежности БЛА в целом необходимо, при проведении опытно-конструкторских работ, обеспечить безотказную работу одного из самых важных компонент БЛА – *бортового комплекса управления* (БКУ). Согласно статистике [7] (рисунок 1), более половины всех отказов, возникших по причинам, связанным с авиационной техникой, так или иначе связаны с комплексом управления. Это тем более усугубляет тот факт, что именно отказ подсистем комплекса управления полетом связаны с неминуемой потерей управляемости, пространственной ориентации и в конечном случае с аварийностью и потерями БЛА.

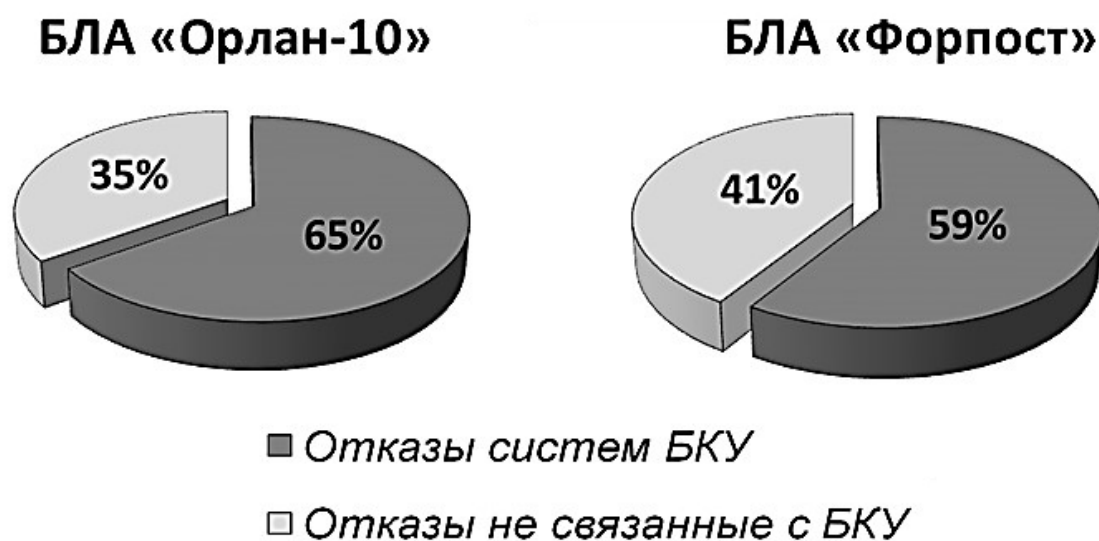


Рисунок 1 – Доля отказов бортового комплекса управления в комплексах с БЛА

Сравнительная характеристика БКУ различного класса. В составе БКУ можно выделить три основные системы: измерительную, вычислительную и исполнительную, архитектурные особенности которых также существенно отличаются в зависимости от класса.



Тактические БЛА из-за ограниченных массогабаритных и стоимостных характеристик имеют нерезервированные нераспределенные БКУ. И как следствие их измерительная и вычислительная система, как правило, аппаратно изготавливаются в одном корпусе.

В измерительных системах тактических БЛА применяют малогабаритные инерциальные навигационные системы (МИНС), простейшие приемники спутниковых навигационных систем. Основными недостатками измерительных систем тактических БЛА являются: малая точность и большие погрешности МИНС; малые размеры носителя, которые не позволяют резервировать блоки МИНС и применять датчики, основанные на других физических принципах; невозможность реализации автономного полета при пропадании сигнала от спутниковых навигационных систем.

В вычислительной системе БКУ тактических БЛА, как правило, используется ОСРВ типов FreeRTOS, MAVLink и LynxOS, которые состоят из монолитного ядра.

В исполнительной системе БКУ тактических БЛА самое широкое применение нашел электромеханический привод. В более совершенных решениях в блок сервоприводов встраивают синхронизированный контроллер сервоприводов, обеспечивающий большую точность управления сервопривода.

Оперативные БЛА имеют более сложный по конструкции и составу комплекс управления. Измерительная система обладает большим набором измерительных средств, что позволяет за счет реконфигурации и комплексирования информации повысить точностные характеристики. Некоторая информация, полученная от датчиков, внутри измерительной системы преобразуется в удобную для потребителей форму, что перераспределяет нагрузку с вычислительной системы и повышает надежность всего комплекса. В исполнительной части наиболее часто применено резервирование за счет многосекционных аэродинамических поверхностей.

Измерительная система БКУ оперативных БЛА конструируется с применением одного или нескольких блоков МИНС и может быть дополнена системой воздушных сигналов, радиовысотомером, магнитным компасом и др. Установка полноценной системы воздушных сигналов позволяет вычислять барометрическую высоту, различные виды скоростей и числа Маха. При этом необходимо подчеркнуть, что установка резервного блока МИНС не только повышает надежность, но и увеличивает точностные характеристики измерительной системы.

Вычислительная система комплексов управления оперативных и стратегических БЛА работает под руководством микроядерных операционных систем реального времени типов QNX Neutrino и VxWorks [8].

В исполнительной системе БКУ оперативных БЛА нашли широкое применение электромеханический и электрогидромеханический привод. С целью экономии массы чаще применяют электромеханический привод, несмотря на более низкие характеристики по сравнению с электрогидромеханическим.

БКУ стратегических БЛА имеют еще более сложную архитектуру. Все системы имеют многократное резервирование. Вычислительная система распределена по нескольким вычислителям, объединенных в одну бортовую вычислительную сеть с применением сетевых интерфейсов.

В состав измерительной системы БКУ стратегических БЛА кроме вышеперечисленных может входить все известное многообразие датчиков и измерителей. Оно позволяет обеспечить достаточное резервирование и комплексирование измерительной системы. Обобщенные характеристики измерительных систем БКУ БЛА различных классов представлены в таблице.

Вычислительные системы большей части стратегических БЛА построены на основе операционных систем реального времени типа VxWorks, имеющих архитектуру «клиент-сервер», построенных по технологии микроядра с двумя обособленными классами процессоров: серверами, предоставляющими те или иные службы, и клиентами, использующими эти службы. За счёт такой организации достигается быстродействие и детерминированность ядра системы, что также позволяет легко строить необходимую конфигурацию операционной системы. В



бортовых комплексах управления стратегических БЛА различные целевые функции комплекса реализуются в функциональном программном обеспечении (функциональных приложениях), выполняющих задачи управления полетом, навигации, управления общесамолетным оборудованием, целевыми нагрузками, радиосвязью и др. В том числе должно быть предусмотрено системное (специальное) программное обеспечение, обеспечивающее формирование, хранение и обработку баз данных, управление конфигурированием БКУ с целью обеспечения безотказности его функционирования.

Исполнительная система БКУ стратегических БЛА по своему составу очень схожа с пилотируемыми самолетами: применяются дублированные блоки и 4-х кратное резервирование рулевых приводов, высокоскоростные интерфейсы передачи данных. Исполнительная система стратегических БЛА строится не только с резервированием отклоняемых аэродинамических поверхностей, но и с применением резервированных многоканальных приводов. Основное применение в приводах рулевых поверхностей современных стратегических БЛА нашли гидравлические следящие приводы.

Обобщенные результаты сравнительного анализа архитектуры БКУ различного класса сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Сравнительная характеристика БКУ различного класса

Класс БЛА	Измерительная система		Вычислительная система				Исполнительная система		
	Применяемые датчики	Кратность резервирования	Тип ОС	Архитектура ОС	Тип и количество вычислителей	Кратность резервирования ядра	Тип привода	Количество секций рулей	Кратность резервирования исполнительных устройств
Тактические	МИНС, СНС	1	FreeRTOS, MAVLink, LynxOS	монолитное ядро	1	1	ЭМП	1	1
Оперативные	МИНС, СНС, СВС	2...3	QNX Neutrino	микро ядерная	2	2...4	ЭМП	2...3	1
Стратегические	БИНС, СВС, СНС, РЛС, РВ, курсовертикали, ДИСС, РСБН, РСДН	3...4	QNX Neutrino, VxWorks 653	микро ядерная, клиент-сервер, ФПО	2...15	4...8	ЭГП, ЭМП, аварийное пневмоуправление	3...4	2...4

Выводы. Анализ сформированных классов надежности БЛА с точки зрения достижения ее требуемого уровня показал следующее [9]:

- требуемые уровни надежности и пути их реализации для БЛА стратегического назначения практически не отличаются от аналогичных показателей для самолетов пилотируемой авиации;
- требуемые уровни надежности для БЛА тактического назначения невысоки и не требуют разработки каких-либо специфических путей их реализации, например, резервирования;
- наибольший интерес представляют БЛА оперативного и оперативно-тактического назначения, так как требуемые уровни их надежности достаточно высоки и могут быть обеспечены только с применением резервирования, реализация которого в этом случае ограничена незначительностью располагаемых массогабаритных ресурсов.



Это является основанием для проведения дальнейших исследований по разработке новых подходов к резервированию бортового оборудования БЛА в условиях жестких ограничений на количество каналов резервирования, в частности, к развитию концепции экономического резервирования и методов обеспечения функциональной избыточности бортовых комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боевые комплексы беспилотных летательных аппаратов. Часть 1. Системная характеристика боевых комплексов беспилотных летательных аппаратов. Научно-методические материалы / Под ред. А.Н. Максимова. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2005. 159 с.
2. Волобуев М.Ф. Классификация беспилотных летательных аппаратов по уровню требуемой надежности //Авиакосмическое приборостроение, 2016. Вып. 9. С. 39–48.
3. ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения.
4. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами Книга 1 Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА / под ред. чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. В.С. Вербы, д.т.н., проф. Б.Г. Татарского – М. Радиотехника, 2016. 325 с.
5. Современное состояние и перспективы развития беспилотных авиационных систем XXI века. Аналитический обзор по материалам зарубежных информационных источников / под ред. Е.А. Федосова. М.: НИЦ ФГУП ГосНИИАС, 2012. 215 с.
6. Авиационные правила. Часть 23. Нормы летной годности гражданских легких самолетов (АП-23). Международный авиационный комитет. М.: Авиаиздат, 2013.
7. Лазаренко Д.А., Лебедев Д.М. Шарый Ю.И. Анализ надежности многофункционального комплекса с беспилотным летательным аппаратом малой дальности «Орлан-10» // Проблемы эксплуатации авиационной техники в современных условиях: Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Люберцы, 24-25 ноября 2016 г. Люберцы: НИЦ (г. Люберцы) ЦНИИ ВВС Минобороны России, 2016. С. 177–180.
8. Операционные системы реального времени для авионики: обзор [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://rnd.cnews.ru/reviews/index_science.shtml?2008/05/05/299461_1, яз. рус. (дата обращения: 15.02.2018).
9. Волобуев М.Ф. Метод обоснования требований к комплексу с беспилотными летательными аппаратами и его подсистемам по уровням безотказности //Авиакосмическое приборостроение, 2017. Вып. 10. С. 44–51.

REFERENCES

1. Boevye komplekсы bespilotnyh letatel'nyh apparatov. CHast' 1. Sistemnaya harakteristika boevykh kompleksov bespilotnyh letatel'nyh apparatov. Nauchno-metodicheskie materialy / Pod red. A.N. Maksimova. M.: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2005. 159 p. (in Russian).
2. Volobuev M.F. Klassifikatsiya bespilotnyh letatel'nyh apparatov po urovnyu trebuemoy nadezhnosti //Aviakosmicheskoe priborostroenie, 2016. Vyp. 9. P. 39–48. (in Russian).
3. GOST 27.301-95 Nadezhnost' v tekhnike. Raschet nadezhnosti. Osnovnye polozheniya. (in Russian).
4. Komplekсы s bespilotnymi letatel'nymi apparatami Kniga 1 Printsipy postroeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA / pod red. chl.-korr. RAN, d.t.n., prof. V.S. Verby, d.t.n., prof. B.G. Tatarskogo – M. Radiotekhnika, 2016. 325 p. (in Russian).
5. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya bespilotnyh aviatsionnyh sistem XXI veka. Analiticheskiy obzor po materialam zarubezhnyh informatsionnyh istochnikov / pod red. E.A. Fedosova. M.: NITS FGUP GosNIIAS, 2012. 215 p. (in Russian).
6. Aviatsionnye pravila. CHast' 23. Normy letnoy godnosti grazhdanskih legkih samoletov (AP-23). Mezhdunarodnyy aviatsionnyy komitet. M.: Aviaizdat, 2013. (in Russian).



7. Lazarenko D.A., Lebedev D.M. SHaryy YU.I. Analiz nadezhnosti mnogofunktional'nogo kompleksa s bespilotnym letatel'nyim apparatom maloy dal'nosti «Orlan-10» // Problemy ehkspluatatsii aviatsionnoy tekhniki v sovremennykh usloviyakh: Sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Lyubertsy, 24-25 noyabrya 2016 g. Lyubertsy: NITS (g. Lyubertsy) TSNII VVS Minoborony Rossii, 2016. P. 177–180. (in Russian).

8. Operatsionnye sistemy real'nogo vremeni dlya avioniki: obzor [EHlektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: http://rnd.cnews.ru/reviews/index_science.shtml?2008/05/05/299461_1, yaz. rus. (data obrashheniya: 15.02.2018). (in Russian).

9. Volobuev M.F. Metod obosnovaniya trebovaniy k kompleksu s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami i ego podsistemam po urovniam bezotkaznosti // Aviakosmicheskoe priborostroenie, 2017. Vyp. 10. P. 44–51. (in Russian).

© Агеев А.М., Попов А.С., 2018

Агеев Андрей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, начальник 31 отдела научно-исследовательского научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ageev_bbc@mail.ru.

Попов Александр Сергеевич, адъюнкт научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, saga30@yandex.ru.