

Актуальные аспекты разработки системы управления перспективными беспилотными летательными аппаратами

© С.Н. Илюхин, А.Г. Топорков, В.В. Корянов,
Р.Э. Аюпов, Н.Г. Павлов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Изложены актуальные аспекты разработки системы управления беспилотными летательными аппаратами на примере перспективных летательных аппаратов. Рассмотрены общие принципы построения бортового комплекса управления, в частности аппаратной реализации системы автоматического управления на микроконтроллерных платформах Arduino и Raspberry Pi. Кроме того, представлены наиболее распространенные и перспективные пути по обеспечению бесперебойной и надежной связи беспилотных летательных аппаратов с командным пунктом, а также пути парирования рассмотренных и нерассмотренных нештатных ситуаций.

Ключевые слова: система управления, стабилизация, навигация, беспилотный летательный аппарат, система связи, нештатная ситуация.

Введение. В настоящее время задача создания беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного назначения и конфигурации является крайне актуальной и перспективной. Между тем данная тематика весьма привлекательна для молодых конструкторских коллективов ввиду ее востребованности и инновационности. Гражданские БПЛА применяют для аэрофотосъемки, патрулирования районов, инспекций, доставки грузов, обеспечения связью заданных областей, контроля воздушного пространства и т. п.

В современных условиях практическая составляющая в создании конструкции и систем управления БПЛА уже не представляет собой столь сложный наукоемкий процесс, каким был ранее. Системы управления БПЛА имеют идентичную морфологию, но в зависимости от назначения летательных аппаратов (ЛА) архитектура их системы управления (органы управления, состав бортовых систем, система связи, датчиковая аппаратура и т. п.) может быть сформирована по-разному в соответствии с конкретными задачами.

В связи с этим можно отметить следующие актуальные задачи, которые должны быть решены в процессе разработки системы управления:

- простота и надежность конструкции;
- простота эксплуатации и обслуживания;
- невысокая стоимость;
- низкие значения массогабаритных характеристик;
- высокая универсальность, обеспечивающая возможность размещения на других типах ЛА, в том числе пилотируемых;

- высокая степень отказоустойчивости системы к нештатным ситуациям.

Разработка полноценной иерархической структуры системы управления требует детализации конкретных подсистем с учетом всех взаимосвязей [1]. В рамках данной работы изложены некоторые основы синтеза такой структуры в ходе конструкторского аванпроекта по созданию принципиально нового типа БПЛА, в частности, архитектура контура управления, методы построения каналов внутренней и внешней систем связи, а также этапы полунатурных и натуральных испытаний системы стабилизации.

Аванпроект перспективного БПЛА. В МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках научно-исследовательской деятельности ведется работа над молодежными проектами, одним из которых является проект «Суборбитальный ракетоплан» [2]. Указанный проект особо интересен тем, что система управления в этом случае создавалась с чистого листа, без использования элементов экспертного оценивания [3], поскольку не был собран достаточный массив статистических данных, полученных в результате анализа свойств существующих образцов. Следует также отметить, что в отличие от большинства любительских проектов по созданию БПЛА в данной работе проводили структуризацию и синтез не командной, а комбинированной системы управления.

Суборбитальный ракетоплан представляет собой перспективный многоразовый БПЛА с разгонными блоками, расположенными по тандемной схеме. Летательный аппарат служит для выведения полезных грузов на высоту низких орбит искусственных спутников Земли, проведения исследовательских опытов в условиях микрогравитации, выполнения функций связи и дистанционного зондирования Земли.

Схема полета суборбитального ракетоплана (рис. 1) на первом участке представляет собой типичную программу выведения с продолжительным вертикальным участком и вершиной траектории в нижних слоях термосферы (~ 100 км). Однако второй участок полета, в отличие от типовых ракет-носителей, для последней ступени ракетоплана не является этапом баллистического спуска. Перед входом в более плотные слои атмосферы изменяется геометрическая конфигурация БПЛА путем разворота несущей аэродинамической поверхности, что приводит к трансформации компоновки аппарата от ракетной к планерной схеме. Последующий участок полета является планирующим. По первоначальным оценкам, дальность полета суборбитального ракетоплана может достигать 1000 км. Следует упомянуть, что на начальном этапе проектирования полет ЛА на конечном участке предполагается пассивным, однако дальнейшее введение активного участка разработчиками не исключается. Приземление аппарата представляет собой неуправляемый парашютный спуск.

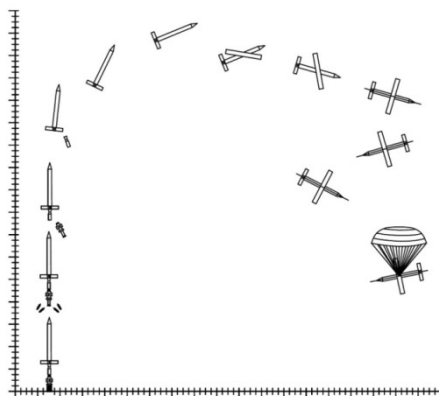


Рис. 1. Схема полета суборбитального ракетоплана

Ракетоплан (подобно любому автоматическому ЛА) имеет в составе своей системы управления ряд подсистем низшего иерархического уровня (рис. 2). К ним относятся чувствительные элементы *1, 6, 8, 10* (MEMS-датчики, датчики температуры, тензодатчики), источники электропитания *3* бортовых систем, гиродины *4* (двухступенные силовые гиросtabilизаторы), исполнительные механизмы *5, 7, 9, 11* (механизм раскрытия крыла, пиросистемы, сервоприводы), система связи *12* и основной элемент проектируемой системы управления — бортовой комплекс управления (БКУ) *2*.

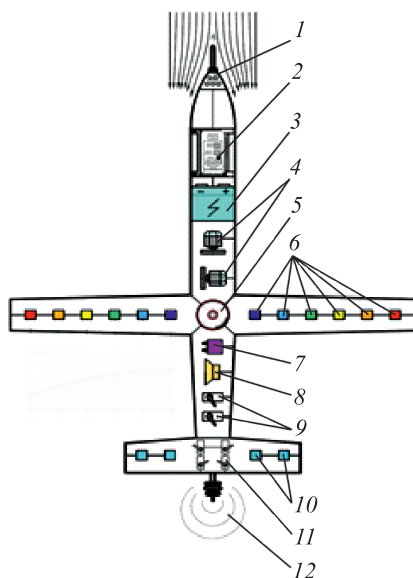


Рис. 2. Состав бортовых систем БПЛА:

1 — датчики телеметрии; *2* — бортовой комплекс управления; *3* — источник электропитания; *4* — гиродины; *5* — механизм раскрытия крыла; *6* — тензодатчики состояния крыла; *7* — пиротолкатель парашютной системы; *8* — сирена звукового оповещения; *9* — сервоприводы створок; *10* — тензодатчики состояния рулей; *11* — сервоприводы рулей; *12* — система связи

Иерархия подсистем БКУ. Бортовой комплекс управления является основной системой, контролирующей ЛА, в частности связь, навигацию, напряженное состояние конструкции и т. п. Комплекс также непосредственно выполняет полетное задание в соответствии с алгоритмами наведения и стабилизации, образующими контур управления движением ЛА [4].

В рамках рассматриваемого проекта проектируемый БКУ должен обладать относительной универсальностью, т. е. иметь возможность гибкой настройки под различные типы ЛА. Для достижения этого требования необходимы модульная систематизация строения комплекса управления и использование относительно легко адаптируемого программного кода.

Бортовой комплекс управления суборбитального ракетоплана состоит из шести блоков МК1–МК6 (рис. 3). Среди них следует особо выделить блок управления (БУ), который обрабатывает поступающую от остальных блоков информацию и выдает управляющие сигналы. Блок управления проводит циклическую процедуру опроса подконтрольных систем, формирует команду информационным блокам и контролирует их функционирование. Например, при опросе системы связи (СС) БУ обновляет полетное задание и в соответствии с ним отправляет команды автомату стабилизации (АС) для отработки следования по курсу.

На рис. 3 показаны также взаимосвязи всех блоков в общей структуре разрабатываемого БКУ. Для различных ЛА и выполняемых ими задач предусмотрена возможность изменения количества и состава блоков, а также перераспределения их задач. Разбитую на блоки систему можно масштабировать экстенсивно, выделяя на каждый блок собственный процессор, либо интенсивно, оптимизируя алгоритмы блоков. Особенно актуально выделение процессора для блока стабилизации, в котором оперативная обработка и интегрирование данных, полученных от датчиков инерциальной навигационной системы, должны осуществляться в строго определенные интервалы времени. В связи с этим можно использовать отдельный процессор, задачей которого является исключительно интегрирование данных.

Такой подход позволяет также внедрить аппаратную систему резервирования, необходимую в случае отказа БУ. При отказе автомата стабилизации система перенаправит задачи этого блока на процессор управления внешней шиной, что позволит обеспечить частичное выполнение миссии или безопасную посадку ЛА.

Разделение бортовой коммутации на внутреннюю и внешнюю шины (рис. 4) позволяет обособить программы для работы с внешним и внутренним оборудованием, что также повышает гибкость системы. К примеру, программное обеспечение для некоего прибора

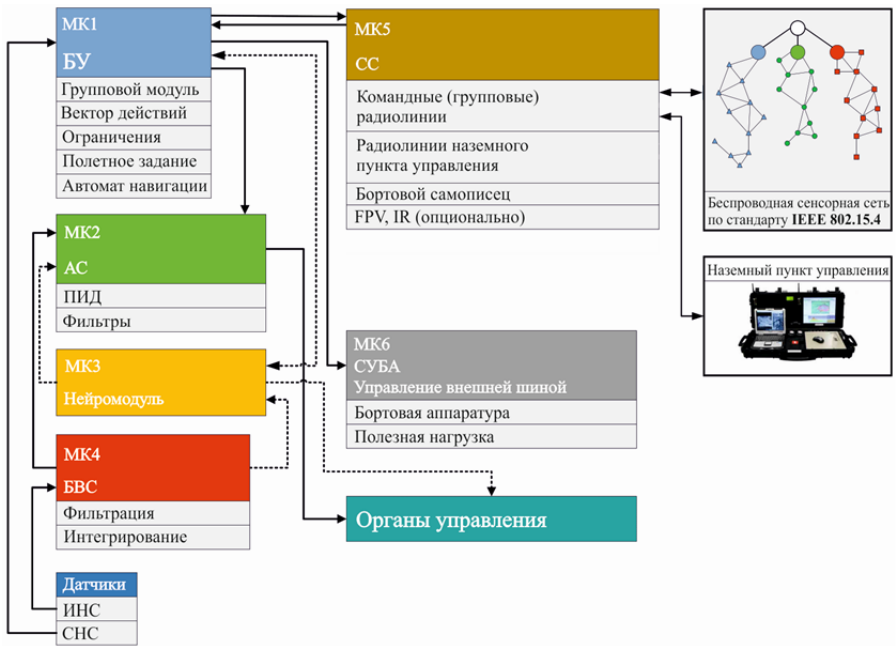


Рис. 3. Блок-схема состава БКУ перспективного БПЛА:

МК — микроконтроллер; БУ — блок управления; АС — автомат стабилизации; БВС — бортовая вычислительная система; СС — система связи; ИНС — инерциальная навигационная система; СНС — спутниковая навигационная система; СУБА — система управления бортовой аппаратурой

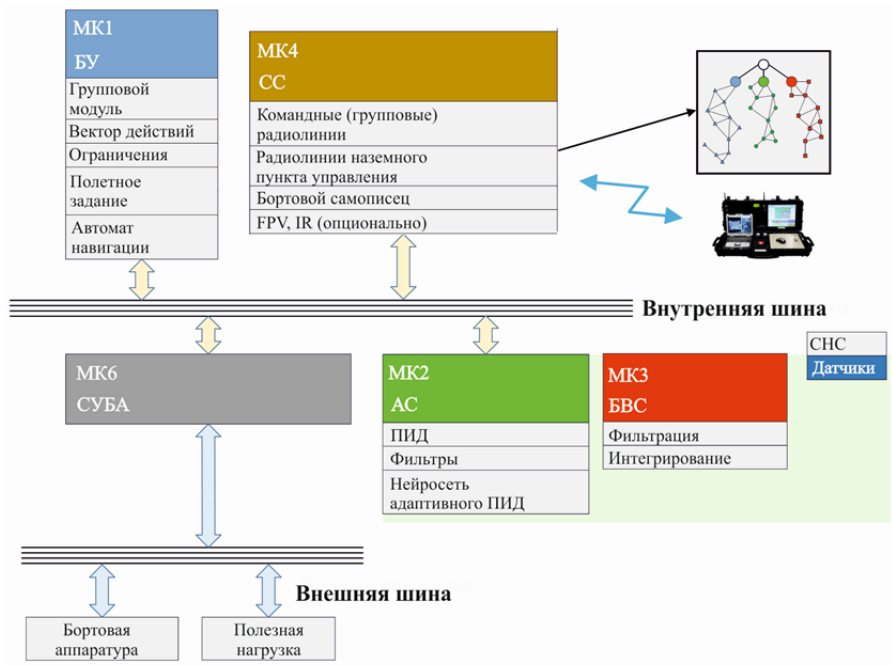


Рис. 4. Блок-схема бортовой коммутации БКУ

(телескопа, спектрометра и т. п.), выступающего в качестве полезной нагрузки, может подготовить, опираясь на международный стандарт, фирма-производитель. Операторы перспективного БПЛА подключат данный прибор к внешней шине, которая согласовывает параметры, установленные международными стандартами, с параметрами, используемыми в бортовых системах. Для взаимодействия блоков БКУ используется внутренняя шина.

Проблемы функционирования системы связи. В контуре управления полетом перспективного БПЛА, несмотря на его высокую автоматизацию, особое место занимает система связи (СС). Система связи обеспечивает обмен данными между наземным пунктом и ЛА. Она предназначена для приема указаний с наземного пункта в случае кардинальных изменений плана полета, миссии и др. С наземного пункта можно изменять также приоритеты бортовых подпрограмм. Такой подход позволяет при необходимости оперативно провести масштабные изменения в системе. Например, можно изменить логику работы любого модуля без перепрограммирования. Для этого программа модуля разбита на подпрограммы, которые имеют свои уровни приоритета выполнения. Если необходимо изменить работу модуля, то в зависимости от цели повышают уровень приоритета определенных подпрограмм. Для такого действия вместо целой прошивки требуется всего один «кадр» информации с данными о подпрограмме и уровне ее приоритета.

При проектировании перспективной СС следует учитывать современные угрозы для ее номинального функционирования.

1. Сигналы GPS- и ГЛОНАСС-навигаторов, как и любые сигналы, принимаемые или отсылаемые БПЛА, можно перехватывать и подменять, а сами приемники можно вывести из строя так же, как и любые другие электронные устройства.

2. В управлении БПЛА есть одно уязвимое звено — необходимость постоянного обмена информацией с наземными пунктами управления. Большой объем передаваемых данных требует достаточно больших каналов радиосвязи, для которых очень сложно (практически невозможно) обеспечить высокий уровень надежности. В частности, один БПЛА типа Global Hawk требует скорости передачи данных 500 Мбайт/с. В простейшем случае их можно попросту перекрыть поставленными помехами.

3. В 2012 г. американскими учеными из Техасского университета в г. Остин (США) была доказана практическая возможность взлома и перехвата управления БПЛА путем так называемого GPS-спуфинга. Под GPS-спуфингом подразумевают передачу на диапазоне частот спутниковой навигационной системы ложных сигналов навигационного обеспечения высокой интенсивности, которые бортовая навигационная аппаратура ЛА принимает за истинные. Однако исследователи

отметили, что успешный GPS-спуфинг можно провести только для тех аппаратов, которые используют незашифрованный, гражданский сигнал GPS.

В СС, разработанной для суборбитального ракетоплана, в целях максимального снижения вероятности потери связи с аппаратом предусмотрено многократное дублирование средств связи (рис. 5).

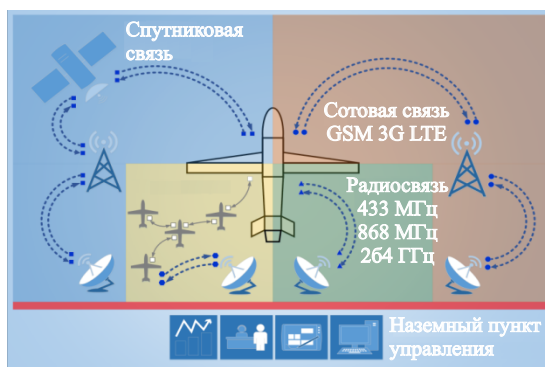


Рис. 5. Иллюстративная схема дублированной СС

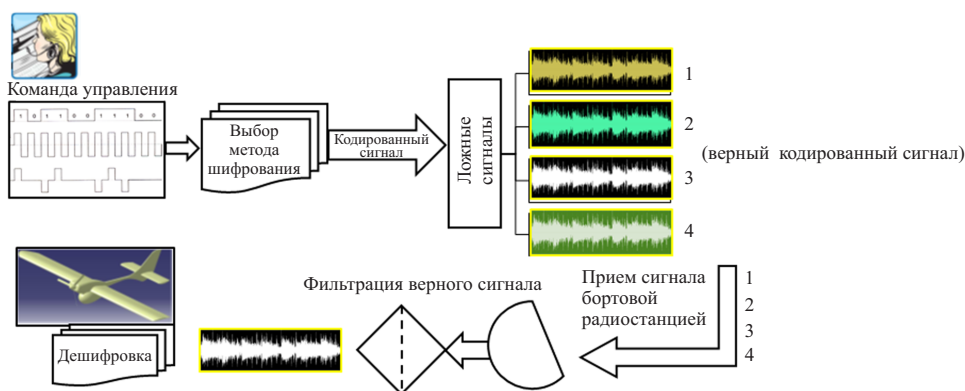


Рис. 6. Принцип шифрования с использованием ложных сигналов

На борту ЛА устанавливают систему радиосвязи на частотах 433/868/2400 МГц, спутниковый модем, а также аппаратуру сотовой связи. Предусмотрена также возможность ретрансляции сигнала через БПЛА-ретрансляторы. Для этого необходимо иметь несколько БПЛА, следовательно, при построении стратегии выполнения полетного задания требуется обеспечить их групповое взаимодействие. Для выполнения этой задачи предполагается использовать беспроводную сенсорную сеть. В целях защиты канала связи планируется применить относительно простой способ шифрования с использованием ложных сигналов (рис. 6). При этом способе проводится кодирование основного управляющего (полезного) сигнала, затем форми-

руются измененные ложные сигналы. На аппарат поступают все сигналы, но только полезный сигнал проходит отбор по заложенным критериям и декодируется.

Однако даже такая система связи не может всецело гарантировать постоянный контакт ЛА с наземным пунктом. Возможны перебои с радиосвязью, а также выход спутника из зоны покрытия СС. Для таких случаев необходимо предусмотреть варианты алгоритмов автономного управления БПЛА при отсутствии контроля со стороны оператора.

Нештатные ситуации. Беспилотный ЛА, обладающий большой дальностью полета и находящийся долгое время в автономном режиме без полетного задания, может представлять потенциальную угрозу для людей вблизи населенных пунктов, а также для инфраструктуры или промышленных объектов. К тому же полезная нагрузка БПЛА может иметь особую ценность, как и сама конструкция ЛА. По этим причинам вероятность неконтролируемого падения аппарата должна быть минимизирована, а эффективность выполнения полетного задания приближена к максимально возможной всеми методами и средствами.

Для современных ЛА наибольшую опасность представляет комплексное воздействие эксплуатационных факторов, таких как:

- отказы механических узлов ЛА;
- ошибки работы бортовых систем на уровне алгоритмов и логики функционирования;
- сильные ветровые нагрузки, в частности турбулентность среды;
- дождь, оледенение и другие метеорологические факторы.

В связи с этим проблему возникновения НШС целесообразно рассматривать для двух принципиально различных случаев.

К первому случаю относятся ситуации, когда при потере связи с наземным пунктом полет БПЛА проходит в штатном режиме — реализуется автономное управление. При таком варианте предусматриваются специальные законы управления, по которым ЛА выполняет некоторые заложенные программы управления, а также реализует алгоритмы возврата ЛА в зону покрытия сигнала наземного пункта управления.

Во втором случае при потере связи возникают штатные ситуации (НШС). Как известно, по отношению к плану полета их можно подразделить на рассмотренные и нерассмотренные [5, 6]. Рассмотренными НШС являются такие, вероятность появления которых была определена на этапе планирования полета. В этом случае можно написать программы и алгоритмы работы бортовых систем для парирования таких ситуаций.

Однако при любой глубине анализа и любом объеме априорной информации всегда существует некий массив НШС, появление кото-

рых предусмотреть невозможно. Для работы в таких условиях следует параллельно использовать модуль, архитектура которого основана либо на генетических алгоритмах, либо на экспертных системах, либо на «обученных» нейросетях. В частности, нейросети [7] «обучаются» нивелировать последствия НШС, например, таких, как полет с одним крылом или полет без закрылка. В случае возникновения НШС нейросети проводят анализ и поиск решения и, если оно не противоречит заложенной логике, его используют непосредственно в процессе управления. На данном этапе проектирования системы управления для орбитального ракетоплана ведется работа только с рассмотренными НШС, а создание нейросетевых модулей планируется на последующих этапах.

Разработка инструкции для парирования рассмотренных НШС начинается с составления наиболее полной базы данных всех подсистем ЛА, вплоть до конкретных узлов и деталей. Затем проводится статистический анализ вероятностей и причин возможных отказов подсистем. Кроме того, необходима разработка методик выявления возможной поломки и устранения проблемных ситуаций.

Нештатные ситуации при полете перспективного БПЛА устраняются в три этапа (переход к каждому последующему из них осуществляется в случае, если работа на текущем этапе не позволяет устранить проблему):

1) алгоритм, ориентируясь на показания датчиков, внедренных в различные системы, выявляет штатные режимы и пытается найти указания по устранению обнаруженной НШС;

2) алгоритм устраняет наиболее вероятные причины проблемы, при этом используется база рассмотренных НШС, классифицированных по вероятности возникновения;

3) алгоритм адаптируется под НШС, максимально снижая негативный эффект от ее наличия.

Декомпозиция рассмотренной НШС также носит иерархическую структуру. Например, отказ закрылка может быть вызван рядом причин: отказом сервопривода, заклиниванием поворотного механизма, ошибкой программного обеспечения и др. В то же время каждая из этих причин также может быть вызвана рядом факторов, а именно поломкой или заклиниванием механизма привода, нехваткой мощности источника питания, потерей контакта кабелей и др.

Отслеживание всех параметров состояния ЛА объективно невозможно, однако контроль некоторых факторов вполне реализуем. В частности, можно измерить напряжение непосредственно на сервоприводе и установить факт обрыва контакта или разрядки источника питания. Факторы, которые невозможно отследить, следует маркировать неким уровнем приоритета, определяемым из анализа вероятности данного отказа. При парировании НШС в первую оче-

редь идет работа над факторами с наибольшей вероятностью отказа. Например, если вероятность заклинивания высока, то прежде всего будет кратковременно подано повышенное напряжение на сервопривод, чтобы попытаться повернуть его на нужный угол.

Если предусмотренные алгоритмы не приводят к устранению НШС, необходимо адаптировать систему управления под текущие условия, в частности, к полету ЛА без использования неисправного закрылка. Для этого необходимо максимально унифицировать ключевой алгоритм управления ЛА — алгоритм стабилизации.

Системы управления движением и навигации. Любая эффективная система автоматического управления (САУ) представляет собой следящий контур, поэтому каждая такая система обладает неким набором измерительных средств. Система угловой стабилизации основана на ПИД-регуляторе, качество работы которого напрямую зависит от точности заданных коэффициентов. Перспективным направлением развития САУ являются адаптивные системы управления. Например, при различных погодных условиях коэффициенты ПИД-регулятора будут иметь разные значения. Эти коэффициенты также будут различаться, если БПЛА транспортирует грузы различной массы и габаритов. В связи с этим была применена автоматизированная настройка «ПИД-коэффициентов». Такая настройка проводится непосредственно во время полета путем анализа реакции БПЛА при имеющихся возмущениях. Настройка может проводиться либо в определенные интервалы времени, либо при фиксировании существенного изменения параметров внешней среды.

Для решения задачи навигации используется информация с датчиков GPS и ГЛОНАСС, которая затем фильтруется и анализируется в программе полета. Эта навигационная информация алгоритмически обрабатывается, и в соответствии с полетным заданием формируются команды на органы управления для ориентации ЛА по курсу. В суборбитальном ракетоплане используются MEMS-датчики: акселерометры, гироскопы и компасы. Данные, поступающие с этих датчиков, подвергаются линейной фильтрации на основе фильтра Калмана. Для устранения накапливаемой ошибки интегрирования данных гироскопа используется комплементарный фильтр, дополняющий данные гироскопа показаниями акселерометра и рассчитывающий истинные углы ориентации ЛА. Также применяются датчики, которые расположены в различных бортовых системах и узлах и позволяют отслеживать состояние ЛА в текущий момент времени. Так, тензодатчики, установленные в крыле, позволяют отслеживать его напряженно-деформированное состояние, а дифференциальный датчик давления (датчик давления набегающего потока, определяющий скорость ЛА) — корректировать показания инерциальных MEMS-датчиков и датчика GPS, отслеживающих ориентацию ЛА и положение его центра масс в пространстве.

При аппаратной реализации САУ (рис. 7) в данном проекте использованы широко распространенные микроконтроллерные платформы, такие как Arduino и Raspberry Pi с достаточно простым, интуитивным уровнем взаимодействия с программистом. Платформы имеют малую массу, развитую инфраструктуру и хорошую производительность. В частности, Arduino [8] используется для блока системы стабилизации, где платформа интегрирует показания датчиков и в соответствии с командами блока управления выдает управляющие воздействия на исполнительные органы для ориентации по заданному курсу. Функции остальных блоков на данный момент выполняет Raspberry Pi, так как эта платформа обладает высокой тактовой частотой процессора и имеет операционную систему Linux.

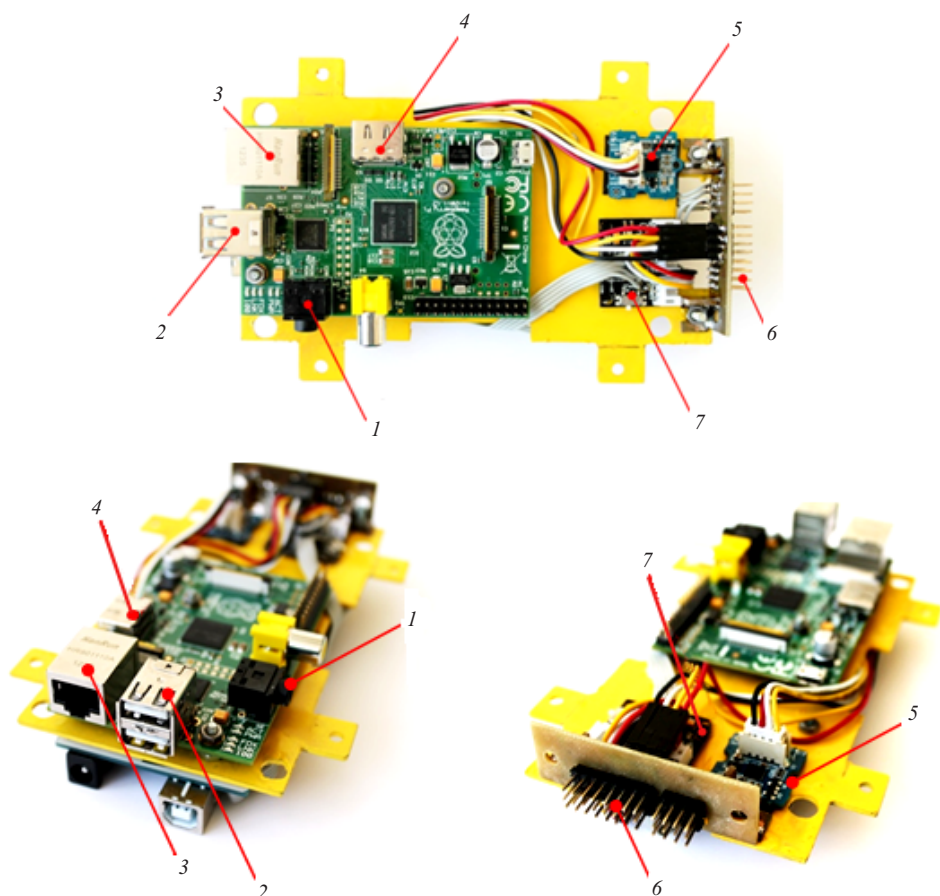


Рис. 7. Опытный образец блока системы управления движением:
1 — разъем поисково-спасательного устройства; 2 — USB-интерфейс; 3 — Ethernet-интерфейс; 4 — «выход» для отладки программы БВС; 5 — гироскоп; 6 — разъем управления периферией; 7 — акселерометр

Еще одно достоинство этих платформ заключается в том, что за время их существования появился большой массив практических данных и алгоритмов, доступный для адаптации и сравнительного анализа.

Летные испытания и полунатурное моделирование. Испытания алгоритма стабилизации для суборбитального ракетоплана проводились методом натуральных телеметрических испытаний, т. е. на авиамодели с записью телеметрической информации. Итоги испытаний выявили необходимость уже упоминавшейся адаптивной настройки ПИД-регулятора, поскольку модель стабилизировалась с различной эффективностью при разных погодных условиях.

Схема проведения испытаний имела упрощенную структуру. Оператор выводил аппарат в заданную точку и переключал его в режим автопилота. Далее моделью управлял алгоритм стабилизации с предварительно настроенными «ПИД-коэффициентами». Алгоритм был настроен на выдерживание прямолинейного движения ЛА на постоянной высоте по заданному курсу. Датчики, расположенные на модели, позволяли оценить степень отклонения от прямой линии и соответственно получить информацию для оценки эффективности алгоритма. После проведения эксперимента оператор вновь переключал модель в режим ручного управления и осуществлял посадку ЛА. Следует отметить, что подобные испытания имеют ряд недостатков, поэтому для отработки алгоритмов также был создан стенд полунатурного моделирования [9].

Стенд передает в БКУ сигналы, имитирующие показания датчиков, и анализирует поведение САУ. Таким образом, можно моделировать различные нештатные режимы полета, в частности сваливание в штопор, отказ закрылка. На стенде выполняют также предполетную проверку различных систем (сервоприводов, датчиков, двигателя и др.). Программная составляющая стенда реализована в среде Matlab R2014b.

Заключение. В работе представлены основные аспекты систем управления перспективными БПЛА на примере конкретного аванпроекта. На данном этапе разработки система управления обладает такими свойствами, как:

1) *квазиавтономность* — позволяет минимизировать участие оператора наземного пункта управления от момента взлета до момента успешной посадки даже при возникновении НШС;

2) *модульность* — позволяет при необходимости быстро изменять и расширять конфигурацию и функционал системы, тем самым своевременно повышать отказоустойчивость всего объекта управления в целом, а также снижать значения массогабаритных и стоимостных характеристик, что немаловажно при эксплуатации системы

управления на различных ЛА в разных метеорологических условиях с учетом требований заказчика;

3) *универсальность* — система разрабатывалась для суборбитального ракетоплана, который мог иметь различные конструктивные реализации крыла. В перспективе система будет способна управлять аппаратами вертолетного типа, мультироторными системами, автожирами и др. Архитектура и модульность системы позволят в дальнейшем осуществлять управления не только ЛА, но и объектами наземного и морского базирования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Строгалев В.П., Толкачева И.О. Системный подход к проектированию сложных технических систем. *Оборонная техника*, 2013, № 9–10, с. 28–32.
- [2] Топорков А.Г., Муллин Н.А., Павлов Н.Г. Инновационный проект «Суборбитальный ракетоплан». *Актуальные проблемы космонавтики: Тр. XXXIX академических чтений по космонавтике, посвященных памяти акад. С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 367, 368.
- [3] Илюхин С.Н. Метод импульса силы для оценки энергетики управления полетом. *Молодежный научно-технический вестник*, 2013, № 8, с. 3.
- [4] Илюхин С.Н. Синтез системы наведения и контура стабилизации методом ЛАХ на примере произвольной модели ЗУР. *Молодежный научно-технический вестник*, 2012, № 7, с. 3.
- [5] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полетами*. Т. 1. Лысенко Л.Н., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 476 с.
- [6] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полетами*. Т. 2. Лысенко Л.Н., ред. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010, 426 с.
- [7] Еремин Д.М., Гарцеев И.Б. *Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления*. Москва, Изд-во МИРЭА, 2004, 75 с.
- [8] Blum J. *Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry*. Wiley, 2013, 384 p.
- [9] Недогарок А.А., Топорков А.Г., Гарбузов З.С. Имитационно-моделирующий комплекс для отладки тестирования системы автоматического управления «Суборбитального ракетоплана». *Актуальные проблемы космонавтики: Тр. XXXIX академических чтений по космонавтике, посвященных памяти акад. С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, с. 372, 373.

Статья поступила в редакцию 15.09.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Илюхин С.Н., Топорков А.Г., Корянов В.В., Аюпов Р.Э., Павлов Н.Г. Актуальные аспекты разработки системы управления перспективными беспилотными летательными аппаратами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/arise/adb/1450.html>

Илюхин Степан Николаевич родился в 1990 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013 г. Ассистент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 17 научных и научно-популярных работ в области баллистики, динамики полета, управления движением летательных аппаратов и истории оружия. e-mail: iljukhin.stepan@rambler.ru

Топорков Алексей Геннадьевич родился в 1990 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2014 г. Ассистент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области баллистики и динамики движения космических и спускаемых аппаратов. e-mail: kafsm3@bmstu.ru

Корянов Всеволод Владимирович родился в 1982 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2006 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Баумана. Автор более 20 научных работ в области моделирования баллистики и динамики движения космических и спускаемых аппаратов. e-mail: vkoryanov@bmstu.ru

Аюпов Родион Эдуардович родился в 1993 г. Студент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: теория и методы проектирования, эффективность функционирования, надежность и отказоустойчивость, диагностика состояния и испытания технических систем. e-mail: ayrodion@yandex.ru

Павлов Николай Геннадьевич родился в 1991 г. Студент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: разработка беспилотных летательных аппаратов, разработка аппаратных и программных средств управления беспилотными летательными аппаратами.

Actual aspects of control system development for advanced unmanned aerial vehicles

© S.N. Ilukhin, A.G. Toporkov, V.V. Koryanov,
R.E. Ayupov, N.G. Pavlov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Discussing the advanced unmanned aerial vehicles (UAVs) the article considers the actual aspects of the development of the control system for them. Since current and future UAVs are focused on the implementation of a wide range of tasks and taking into account the use of several types of payload, this paper discusses the general principles of the onboard control complex construction. The automatic control system hardware has been implemented in the Arduino and Raspberry Pi microcontroller platforms. Furthermore, the paper presents the most common and promising ways of ensuring the smooth and reliable communication of the command post with the UAVs as well as the ways of managing of considered and pending emergency situations.

Keywords: control system, stabilization, navigation, UAV, communications system, emergency situation.

REFERENCES

- [1] Strogalev V.P., Tolkacheva I.O. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 2013, no. 9–10, pp. 28–32.
- [2] Toporkov A.G., Mullin N.A., Pavlov N.G. Innovatsionnyy proyekt “Suborbitalnyy raketoplan” [Innovation Project “Suborbital rocket glider”]. *Aktualnye problemy kosmonavtiki: Trudy XXXIX akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoyeniya kosmicheskogo prostranstva* [Proceedings of XXXIX Academic Space Conference “Actual Problems of Space Exploration” dedicated to the memory of academician Korolev S.P. and other prominent Russian scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, BMSTU Publ., 2015, pp. 367–368.
- [3] Ilukhin S.N. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik — Youth Science and Technology Gazette*, 2013, no. 8, pp. 1–13. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/606165.html>
- [4] Ilukhin S.N. *Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik — Youth Science and Technology Gazette*, 2012, no. 7, pp. 1–7. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/467279.html>
- [5] Solovyev V.A., Lysenko L.N., Lubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Control of space flights]. Vol. 1. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 476 p.
- [6] Solovyev V.A., Lysenko L.N., Lubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Control of space flights]. Vol. 2. Moscow, BMSTU Publ., 2010, 426 p.
- [7] Eremin D.M., Gartseev I.B. *Iskusstvennye neyronnye seti v intellektualnykh sistemakh upravleniya* [Artificial Neural Networks in Intelligent Control Systems]. Moscow, MIREA Publ., 2004, 75 p.
- [8] Blum J. *Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry*. Wiley, 2013, 384 p.
- [9] Nedogarok A.A., Toporkov A.G., Garbuzov Z.S. *Imitatsionno-modeliruyushchiiy kompleks dlya otladki i testirovaniya sistemy avtomaticheskogo upravleniya “Suborbitalnogo raketoplana”* [Simulation and Modeling System

for Debugging and Testing Automated Control System "Suborbital Rocket Glider"]. *Aktualnye problemy kosmonavtiki: Trudy XXXIX akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoyeniya kosmicheskogo prostranstva* [Proceedings of XXXIX Academic Space Conference "Actual Problems of Space Exploration" dedicated to the memory of academician Korolev S.P. and other prominent Russian scientists — pioneers of space exploration]. Moscow, BMSTU Publ., 2015, pp. 372–373.

Ilyukhin S.N. (b. 1990) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2013. Assistant Lecturer, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University. Author of 17 scientific and popular science papers in the field of ballistics, flight dynamics, motion control of aircrafts and weapons history. e-mail: iljukhin.stepan@rambler.ru

Toporkov A.G., postgraduate student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts, Bauman Moscow State Technical University. Author of four published works in the field of ballistics and dynamics of motion of space and descent vehicles. e-mail: kafsm3@bmstu.ru

Koryanov V.V., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecrafts, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 15 publications in the field of ballistics simulation and dynamics of motion of space and descent vehicles. e-mail: kafsm3@bmstu.ru

Ayupov R.E., student, Department of Spacecrafts and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: theory, design techniques, performance, reliability and robustness of engineering systems, fault diagnostics and tests. e-mail: ayrodion@yandex.ru

Pavlov N.G., student, Department of Spacecrafts and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: development of unmanned aerial vehicles, development of hardware and software for drone control.