

УДК 681.51

В. И. КОРТУНОВ¹, А. В. МАЗУРЕНКО¹, ВАТИК МУХАММЕД АЛИ ХУСЕЙН²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Политехнический университет, г. Духок, Ирак*

СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ МИНИ И МИКРО-БПЛА

Рассмотрены и проанализированы основные средства управления мини и микро-БПЛА, в частности системы автоматического управления - автопилоты (АП) и средства связи. Приведены результаты анализа современных автопилотов представленных на рынке авионики мини и микро-БПЛА, их технические характеристики, аппаратные особенности, функциональные возможности. Дано их сравнение по различным техническим характеристикам – вычислительной мощности центральной бортовой электронно-вычислительной машины, точности позиционирования, интерфейсным связям между модулями, каналам управления и поддерживаемым типам ЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; система автоматического управления; автопилот; микромеханические датчики; наземная станция управления; полезная нагрузка.

Введение

Применение БПЛА открывает возможность оперативного и недорогого способа выполнения ряда специфических задач [1]:

- разведка труднодоступных районов, в которых получение информации обычными средствами, включая обычную авиаразведку, затруднено или же подвергает опасности здоровье и даже жизнь людей, либо экономически не выгодно;

- периодическое наблюдение за заданными районами, где требуется наблюдение за местностью и объектами на ней с воздуха, в том числе и с высокоточным определением координат объектов (мониторинг состояния энергетических коммуникаций, газо- и нефтепроводов, авиалесоохрана и т.д.);

- цифровое фотографирование для использования в геодезических работах и в случаях чрезвычайных ситуаций;

- доставка грузов и выполнение специфических видов работ (обработка химикатами сельскохозяйственных посевов, участие в спасательных операциях) и т.д.

Комплекс управления современных мини и микро-БПЛА состоит из бортовой системы автоматического управления (САУ) или автопилота и наземного оборудования – наземной станции управления (НСУ). В их состав входят различные датчики и вычислительные устройства со специализированным программным обеспечением, аппаратура контроля, управления и связи, электропитания.

САУ современных мини и микро-БПЛА основывается на микромеханических датчиках давления, угловых скоростей и ускорений (MEMS-сенсорах),

а так же микромагнетометрах (магнитных компасах) и приемниках спутниковых радионавигационных [2-4]. Такие сенсоры позволяют проектировать микро-мини системы измерения параметров движения (бесплатформенные инерциальные навигационные системы – БИНС) и системы управления различными ЛА от самолета с классической компоновкой до оригинальных аппаратов вертикального взлета и посадки. Объединение БИНС, навигационной системы (НС) и системы управления в единое устройство дало понятие автопилота, как многофункционального устройства по управлению мини и микро-БПЛА.

В данной работе анализируются возможности современных автопилотов различных фирм-производителей, а также нерешенные для них задачи технического и математического характера. Приведены основные параметры средств связи и их коммуникативные возможности для АП.

Бортовое оборудование для управления БПЛА

В состав бортового оборудования пилотируемых и беспилотных ЛА входит САУ, как совокупность устройств и систем измерения, вычисления, управления и наведения [3]. Основные функциональные задачи САУ следующие:

- определение параметров ориентации и скоростных параметров ориентации (угловых скоростей);
- определение пространственных (широта, долгота и высота) и скоростных (путевой и воздушной скорости) координат ЛА, а также путевого угла;
- определение параметров траекторного управ-

ления – наведения на промежуточный пункт маршрута (ППМ) (заданный курс, заданная высота и заданная скорость);

- хранение и смена маршрута по команде с НСУ;

- определение и выработка управляющих сигналов на органы управления (сервоприводы - СП) на этапах взлета, выполнения маршрута и посадки в полуавтоматическом и автоматическом режимах полета;

- контроль исполнения маршрута (выход за зону полета, снижение до критической высоты, потери приема сигналов спутниковой навигационной системы (СНС));

- контроль состояния бортового оборудования (электропитание, уровень топлива, потеря связи с НСУ);

- контроль действий оператора БпЛА и обеспечение функций безопасности при снижении электропитания, полета в запретной зоне, пропадания сигнала СНС.

Формирование большинства параметров для управления производится БИНС с использованием алгоритмов инерциальной навигации. Реализация БИНС в САУ для мини и микро-БпЛА основана на применении недорогих малогабаритных MEMS-сенсоров. Этим датчикам свойственны значительные уровни шумов и смещения нуля, что приводит к большим погрешностям исходной информации от БИНС. Для уменьшения медленно изменяющихся погрешностей БИНС ее параметры корректируются от внешних измерителей: приемника СНС (GPS, ГЛОНАСС), который измеряет компоненты векторов положения и путевой скорости; системы воздушных сигналов (СВС), которая измеряет барометрическую высоту и воздушную скорость; магнитометра, который измеряет магнитный курс. Интеграция или комплексирование данных от БИНС, СВС, магнитного компаса и СНС осуществляется с помощью алгоритмов фильтрации, в частности и калмановской фильтрации. Полученные в БИНС оценки параметров полета являются входной информацией для системы управления полетом (СУП). Навигационная информация также передается на НСУ с помощью двустороннего канала радиосвязи – командно-телеметрической линии (КТЛ).

Система управления состоит из программно-аппаратной части по вычислению и выработке сигналов управления непрерывного типа (ШИМ-сигнал – сигнал с широтно-импульсной модуляцией) и дискретного типа. Программно-алгоритмическая часть системы управления определяет отклонения текущих навигационных параметров полета БпЛА (угловой ориентации, координат положения и проекций скорости) от заданных параметров, определяе-

мых полетным заданием, и формирует сигналы управления для СП с целью уменьшения этих отклонений. Как правило, архитектура законов управления каналами многоуровневая, да и число каналов управления может достигать до пяти и более. Например, система управления мультироторным (МР) БпЛА, включает каналы управления местоположением, горизонтальной скоростью, углами наклона, а также высотой, вертикальной скоростью, курсом. Выделяют также вертикальный, продольный и боковой каналы управления МР и самолета.

Кроме функций формирования и выработки сигналов, САУ включает множество функций настройки-калибровки передаточных функций датчиков, коэффициентов каналов управления, исполнительных механизмов. Одна группа коэффициентов устанавливается на предполетном этапе, а другая может быть подобрана только в полете в определенном режиме, например, крейсерский полет на заданной высоте, посадка и др.

Большинство автопилотов поддерживают мультирежимность – управление в ручном и полуавтоматическом режимах от пульта радиоуправления (джойстика) и автоматическом режиме через НСУ. Переход из режима в режим, как правило, доступен оператору. Система управления поддерживает мягкие переходы между режимами, к чему особенно чувствительно управление в вертикальном канале для мультироторов.

В ручном режиме сигналы с пульта радиоуправления проходят через автопилот на СП.

В полуавтоматическом режиме для мультироторов и самолетов стабилизируется курс, высота, скорость.

Автоматический режим обеспечивает полет по заранее заданному, с помощью промежуточных контрольных точек, маршруту. В этом режиме управление осуществляется по принципу «наведение-стабилизация». При этом в автоматическом режиме БпЛА может выполнять автономный полет без связи с НСУ.

Современные автопилоты мини и микро-БпЛА имеют простую конструкцию и легко могут быть реализованы, однако не все автопилоты являются оптимальными и имеют высокую надежность. Кроме того, для некоторых режимов полета настройка параметров системы управления может вызвать серьезные трудности. Поэтому в настоящее время проводятся активные исследования относительно применения современных методов теории управления для синтеза законов управления и появляются новые САУ мини и микро-БпЛА.

При создании новых образцов БпЛА возникает первый вопрос – как управлять ЛА во всех режимах и на всех этапах полета. Поэтому вопрос выбора

САУ или автопилота становится центральным, так как необходимо выполнить требования по функциям и исполнению. Сравнительной информации о возможностях автопилотов практически не представлено в публикациях, на форумах идет поверхностное обсуждение, а детальная информация имеется только в руководстве пользователя после приобретения. В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» разработка САУ для БПЛА проводится с 2006 года [5-7] и в последних версиях был учтен широкий спектр требований по функциям автопилота, применяемого для мониторинга, разведки, аэрофотосъемки или доставки грузов с обеспечением безопасности полетов.

Сравнительный анализ современных автопилотов

Рассмотрим особенности некоторых автопилотов, которые представлены на свободном рынке авионики БПЛА.

Автопилоты серии MP2x28 фирмы Micropilot (Канада). Фирма Micropilot является одним из мировых лидеров по производству автопилотов для БПЛА (более 850 клиентов в 70 странах мира). Выпускает серию автопилотов MP2x28 предназначенных для использования на мини-БПЛА самолетного, вертолетного, а также мультироторного типов [8]. Автопилоты этой серии интегрируют в себе трехосевую БИНС, приемник спутниковой навигационной системы, датчик дифференциального давления (для самолетной версии автопилота). Дополнительно автопилот поддерживает работу с трехосевым магнетометром (магнитным компасом). Разработана также версия автопилота с троекратным резервированием (три параллельных автопилота серии MP2x28).

Стоимость автопилотов серии MP2x28 для БПЛА самолетной схемы колеблется от \$1700 до \$8000 [8-10].

Размеры автопилота MP2128 в базовом одноплатном бескорпусном исполнении составляют 100x40x15 мм при весе всего 24 грамма [8].

Автопилот «Vector» фирмы UAV Navigation (Испания). Компанией UAV Navigation разработан и с 2014 года производится профессиональный автопилот «Vector», который пришёл на смену «AP04», выпускавшемуся с 2004 по 2014 гг. Он может использоваться на мини-БПЛА самолетного, вертолетного и мультироторного типа [11]. АП может использоваться как на БПЛА, оснащенных двигателями внутреннего сгорания, так и электрическими и реактивными двигателями.

«Vector» – это полностью интегрированный ав-

топилот с возможностью ручного управления БПЛА, встроенным радиоканалом и возможностью управления полезной нагрузкой. Данный автопилот обеспечивает автоматический взлет, полет по заданному маршруту и автоматическое приземление. Встроенный радиоканал позволяет передавать данные на расстояние до 100 км. Механизм ручного управления позволяет оператору на земле полностью управлять БПЛА с помощью стандартного джойстика или стандартной аппаратуры управления, предназначенной для авиамodelей. АП «Vector» содержит дублирующий микропроцессор, который обеспечивает высокий уровень безопасности и отказоустойчивости, самотестирование датчиков. Фактически «Vector» может быть единственной аппаратурой управления на борту для большинства БПЛА. Автопилот позволяет управлять шестнадцатью рулевыми машинками или другой периферией. Он обеспечивает автоматический полет по маршруту в виде контрольных точек, которые имеют три измерения (широта, долгота, высота).

Ориентировочная стоимость автопилота «Vector» составляет от 6000 евро.

Автопилоты серии Piccolo фирмы Cloud Cap Technology, Inc. (США). Компания Cloud Cap Technology – также является одной из ведущих компаний в области технологий БПЛА. Семейство автопилотов Piccolo включает несколько модификаций, и все они разработаны для управления БПЛА самолетного, вертолетного и мультироторного типов. «Piccolo II» является полнофункциональным автопилотом с интегрированной БИНС, GPS-приемником, системой воздушных сигналов и радиомодемом в облегченном карбоновом корпусе.

АП поддерживает все основные функции автопилотов профессионального класса: автоматический взлет, посадка, прохождение по маршруту т.д., а также обладает широкими возможностями по управлению периферийными устройствами (полезная нагрузка, приемо-передатчики спутниковой связи) и поддерживает дифференциальный режим работы GPS-приемника, что обеспечивает сантиметровую точность определения местоположения ЛА [12]. Как и АП «Vector» может быть единственной аппаратурой управления на борту БПЛА.

Недостаток – относительно большие размеры: 142x46x63 мм и масса (200 г), что затрудняет его использование, по крайней мере, на микро-БПЛА. Более подходящими для использования на мини и микро-БПЛА являются модификации «Piccolo SL» и «Piccolo Nano».

«Piccolo SL» представляет собой упрощенный вариант «Piccolo II» с меньшими массогабаритными показателями (размеры: 131x57x19 мм и масса 110г) при тех же основных функциях. Изго-

тавливается в алюминиевом корпусе. Инерциальные датчики калиброваны для рабочих температур от -40°C до $+80^{\circ}\text{C}$.

«Piccolo Nano» оптимальный по размерам автопилот для небольших электрических БПЛА и представляет собой модульный автопилот в бескорпусном исполнении с размерами модуля БЦВМ – $77 \times 46 \times 11$ мм. По сравнению со «старшими» братьями семейства имеет несколько более узкий температурный диапазон калибровки датчиков ($-30^{\circ}\text{C} \dots +80^{\circ}\text{C}$) и немного более широкий диапазон питающих напряжений ($+6\text{В} \dots +30\text{В}$).

Аппаратура Piccolo позволяет осуществлять управление несколькими автопилотами с помощью одной наземной станции управления.

Базовая цена автопилотов Piccolo не менее \$8000. Ограничение автопилота – необходимость авторизации клиента (получение разрешения) при экспорте автопилота за пределы территории США.

Автопилот «GNC1000» фирмы Moog Crossbow's (США). Комплект автопилота «GNC1000» для средних БПЛА производится фирмой Moog Crossbow's [13]. Содержит достаточно производительный процессор MPC5674F с тактовой частотой 264 МГц и широкий набор сетевых интерфейсов (RS-485, CAN, Ethernet и др.). Мощные вычислительные возможности гарантируют выполнение в реальном времени алгоритмов расширенной Калмановской фильтрации и реализацию алгоритмов управления.

Конструктивное исполнение соответствует уровню защиты от внешних воздействий по стандарту IP67, также соответствует военным стандартам США (MIL-STD-461F, MIL-STD-810G, DO-160G) по электромагнитной совместимости, вибрационным и ударным нагрузкам и электростатической защите.

Недостатки небольшое количество (шесть) выходов для управления сервоприводами с ШИМ-сигналом, относительно большие размеры ($100 \times 15 \times 75$ мм) и масса (около 1,4 кг), возможно необходимо разрешение на экспорт за пределы территории США. Базовая цена, к сожалению, не известна.

Автопилоты «Kestrel» фирмы Procerus Technologies (США). Автопилот «Kestrel» разработан фирмой Procerus Technologies одним из отделений известной американской фирмы Lockheed Martin. Версия 2х этого АП имеет относительно небольшие габариты ($51 \times 35 \times 12$ мм) и вес (16 г), что важно для микро-БПЛА. Размеры третьей версии автопилота уже больше и составляют $127 \times 57 \times 36$ мм при весе в бескорпусном варианте всего 21 г. При этом автопилот интегрирует производительный вычислитель (для версии v2.x – процессор Rabbit3000, для версии v3.0 – цифровой сигнальный процессор),

БИНС, магнетометр, радиомодем и систему воздушных сигналов. Дополнительно подключается модуль GPS-приемника [14, 15].

Автопилот ориентирован на самолетный вариант БПЛА, но также может использоваться и на БПЛА вертолетного и мультироторного типа. Может выполнять автоматические взлет/посадку, полет по маршруту, также предусмотрена предполетная проверка датчиков. Алгоритм работы базируется на традиционном PID-регуляторе с возможностью расширенной настройки коэффициентов.

Также автопилот поддерживает совместную работу с цифровыми системами обработки видеоизображения (OnPoint™ Vision Systems) той же фирмы-разработчика.

Недостатки – в версии v2.x только четыре канала управления стандартными сервоприводами (4 ШИМ-выхода), для увеличения – нужно использовать дополнительную плату расширения, в версии v3.0 таких выходов одиннадцать, три из них – высокоскоростные, но при этом основной модуль значительно больших размеров. Кроме того, АП «Kestrel» поддерживает управление только ограниченным количеством типов мультироторных аппаратов – трикоптером и квадрокоптером. А также высокая цена – от \$5000. АП также проходит по программе США контроля за экспортом.

Автопилоты серии «YS» фирмы Zero UAV Intelligent Technology Co., Ltd. (Китай). Автопилот ориентирован на БПЛА мультироторного типа [16]. Относительно недавно появился на рынке авионики БПЛА. Имеет неплохие массогабаритные параметры – размеры основного модуля – $71 \times 41 \times 25$ мм, вес – 119 г, встроенный демпфер для БИНС, хорошую функциональность (кроме стандартного набора функций – поддержка гиростабилизированной платформы полезной нагрузки и управление цифровой фотоаппаратурой для решения задач в составе геоинформационной системы, управления с помощью смартфона и т.д.). Существует также версия с двукратным резервированием (два параллельных АП работающих совместно).

Достоинство этого АП в его относительно не высокой стоимости при достаточно широкой функциональности. Ориентировочная стоимость базового комплекта порядка \$900. Недостатки заключаются в том, что он поддерживает управление только БПЛА мультироторного типа, использует в качестве КТЛ только Wi-Fi модуль, количество промежуточных точек маршрута ограничено только пятьюдесятью. Кроме того, как показывает практика, к продукции китайских компаний часто возникают претензии по качеству продукции и технической поддержке.

Автопилот «Pixhawk» (PX-4) компании 3D-robotics, Inc. (США). Автопилот «Pixhawk» (PX-4) это один из лучших на сегодняшний день так называемых «открытых проектов» (open source project), то есть проектов с открытым кодом и схемами [17]. Является развитием таких открытых проектов как Ardupilot, APM. Разрабатывается, поддерживается и тестируется большим количеством независимых разработчиков со всего мира. Изготавливается промышленно и продвигается на рынке авионики компанией 3D-robotics [18]. Имеет хорошие массогабаритные показатели: размеры основного модуля – 82x50x16 мм, вес – 38 г. В составе АП используется мощный современный ARM-микроконтроллер с вычислительным ядром CortexM-M4 с тактовой частотой 168 МГц. Реализована стандартная для такого класса АП функциональность. Ориентировочная стоимость базового комплекта \$450-\$500.

В открытости проекта есть и плюсы и минусы. Достоинства заключаются в доступности исходных кодов, которые «продвинутый» потребитель может адаптировать под свои задачи, а также то, что при большом количестве независимых разработчиков есть возможность оперативно расширять функциональность, тестировать АП и устранять ошибки (но и добавлять свои). Расширяемость проекта для других пользователей приводит к повышенному уровню ошибок, так как не гарантируется 100%-я тестовая проверка внесенных изменений. Использование такого АП предполагает тщательное тестирование опытного образца в полете, выявление недоработок.

Другая сторона открытости проекта таит в себе его недостаток. Он заключается в том, что управление БПЛА с открытым кодом можно «перехватывать», что недопустимо при их использовании для решения специальных задач. Кроме того, «открытые» проекты, как правило, не обеспечивают достаточной технической поддержки пользователя, который остается «один на один» с приобретенным АП или ищет «друзей» на форумах для решения возникшей проблемы.

Автопилот «АП-АВИА» ООО «КБ АВИА» (Украина). Конструкторским бюро «АВИА» разработан отечественный автопилот АП-АВИА (рис. 1), получен опыт его эксплуатации на БПЛА отечественного и зарубежного производства.

Автопилот «АП-АВИА v3.x» выполнен на основе бесплатформенной инерциальной навигационной системы на интегрированных микромеханических датчиках с использованием оригинальных собственных алгоритмов управления БПЛА. Построен по мини-модульной легко расширяемой структуре с использованием помехоустойчивого CAN-интерфейса связи между модулями. Модульная структура его конструкции позволяет легко размещать автопи-

лот в свободных местах не только мини-, но и микро-БПЛА.

«АП-АВИА» обеспечивает режимы автоматического взлета, посадки, автоматического полета по заданному маршруту, а также автоматического возврата в район взлета при превышении заданной дальности, при снижении напряжения питания ниже критического уровня для всех типов БПЛА. Включает легко модифицируемое, под потребности заказчика, программное обеспечение нижнего и верхнего уровней отечественной разработки. Поддерживаются различные типы ЛА от мультироторов с 3-мя моторами, до самолетно-вертолетных-гибридных ЛА. Достоинством также является постоянная техническая поддержка на территории Украины.

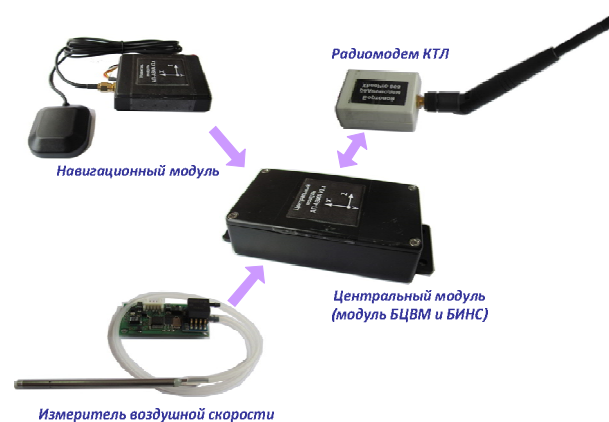


Рис. 1. Комплект автопилота «АП-АВИА v3.x»

Кроме вышеперечисленных существует большое количество коммерческих автопилотов, таких как, например, автопилоты серий Naza и WooKong фирмы DJI [19], «Panda» фирмы FeiYu Electronic Technology Co., Ltd. [20], автопилоты серий 35x1, 36x1 компании UNAV [21], автопилот RVOSD компании и RangeVideo [22] и т.д. Разработка собственного автопилота мини и микро-БПЛА является не простой научно-технической задачей для различных специалистов от математиков, программистов до механиков и испытателей.

Обзор радиоканалов связи и управления используемых современными АП

В зависимости от режимов полета и решаемых задач, которые может обеспечивать АП, для его функционирования на борту БПЛА могут использоваться следующие типы каналов связи:

– канал ручного радиоуправления – радиоканал пульта управления (или джойстика) для управления БПЛА в ручном или полуавтоматическом режимах полета. В автоматическом режиме может использо-

ваться на этапе предполетной подготовки БпЛА или для перехода в ручной/полуавтоматический режим полета;

– канал командно-телеметрической радиолнии – используется во всех АП мини и микро-БпЛА, основной канал связи БпЛА с НСУ. Через этот канал управления и связи с борта БпЛА в режиме реального времени передаются текущие полетные параметры, а с НСУ могут передаваться команды управления для БпЛА во всех режимах полета;

– радиоканал полезной нагрузки – может использоваться при решении некоторых пользовательских задач для передачи видео изображения в реальном масштабе времени на наземную приемную аппаратуру.

В качестве пульта ручного управления мини и микро-БпЛА, как правило, используются унифицированные авиамодельные пульты [23, 24], которые передают ШИМ-сигналы управления ручных манипуляторов (ручек управления, дискретных переключателей) с помощью широкополосной модуляции несущей. Как правило, используется диапазон частот 2,4 ГГц. Используется также диапазон 30-40 МГц, а в некоторых случаях для увеличения дальности действия применяются ВЧ-усилители с переносом на несущую частоту 433 МГц.

Радиус действия стандартного пульта ручного управления составляет десятки – сотни метров, при использовании ВЧ-усилителей может увеличиваться до 3-50 км.

В качестве основного канала КТЛ применяются низко- и среднескоростные радиомодемы различных диапазонов частот, мощности, модуляции, технологии передачи данных. Наиболее часто используемые диапазоны частот – безлицензионные (в большинстве стран) диапазоны 2,4 ГГц, 900 МГц, 433 МГц, 868 МГц. При этом, как правило, используются промышленные радиомодемы, подключаемые по интерфейсу UART, например [25, 26].

Для передачи видео по радиоканалу чаще всего используются аналоговые радиомодемы. Их достоинство – малые габариты и цена. Недостатки – небольшой радиус действия (порядка нескольких километров, в зависимости от мощности передатчика) и низкое качество изображения (высокий уровень помех). В случае использования цифровых видеоканалов качество изображения существенно лучше, но возрастают цена и массогабаритные параметры.

Для увеличения дальности действия радиоканалов АП кроме увеличения мощности радиопередающих устройств могут использоваться направленные антенны наземной аппаратуры с большим коэффициентом усиления. В этом случае требуется применение так называемого следающего антенноповоротного устройства (АПУ).

Разработанное в Национальном аэрокосмическом университете им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» АПУ позволяет отслеживать угловое местоположение БпЛА с точностью $\pm 3^\circ$, по информации бортового GPS-приемника, получаемой по каналу КТЛ. Разработанное АПУ способно вращать две антенны (КТЛ и видеоканала) общей массой до 2,5 кг.

Функциональное обеспечение АП

Современные мини и микро-БпЛА выдвигают достаточно жесткие требования не только к техническим параметрам автопилотов, а также их функциональности.

Функции САУ направлены на решение основных задач комплекса – выполнение полетного задания (ПЗ) и обеспечение безопасности при эксплуатации. Однако различные сферы применения диктуют и различное исполнение по функциям вследствие следующих причин:

– ограничение стоимости, так как на «дешевый» БпЛА логично установить «дешевый» АП с ограниченными функциями;

– готовность к обучению операторов АП, их образовательный уровень определяет не только уровень пользовательского интерфейса, но и перечень функций и их содержательность. Например, выполнение геодезических задач с помощью БпЛА требует тщательной подготовки ПЗ, необходимо учесть возможности ЛА, погодных условий, рельефа поверхности съемки, характеристик фотокамеры. Как правило, эту задачу решают высокопрофессиональные специалисты, для которых упрощение САУ является несущественным даже в части интерфейса. Но если необходимо упростить управление БпЛА и применять непродолжительное обучение операторов, как в случае со специальным применением, то перечень функций АП расширяется как при выполнении миссии, так и при подготовке к полету;

– необходимость длительного хранения, когда требуется не только заменить аккумуляторы после хранения, но и провести калибровки основных датчиков АП. В этом случае АП должен иметь набор функций по их самотестированию и калибровке;

– разнообразие используемых карт, также изменяет набор функций по подготовке миссии. Иногда можно обойтись онлайн-картами, но при специальном применении БпЛА необходима электронная карта высокого разрешения в памяти компьютера НСУ;

– необходимостью вмешательства оператора в выполнение ПЗ, например, прервать полет по погодным условиям, остановить БпЛА в текущей точке маршрута, а потом продолжить полет, обеспечение безопасности при снижении электропитания,

потери связи, превышения дальности полета и др.

Функции ПЗ обеспечиваются пользовательским интерфейсом подготовки к полету, набор специальных команд управления, а также интерфейсом управления БПЛА на этапе выполнения ПЗ. Они включают предполетную диагностику бортового оборудования и прекращение выполнения ПЗ при возникших отказах в АП с выполнением возврата домой или экстренной посадки.

Например, в разработке «КБ АВИА» для мультироторного БПЛА используется семь команд (автоматический взлет, полет на точку и зависание, полет на точку с заданным курсом, полет на точку с вращением вокруг своей оси, облет точки с заданным радиусом, возврат домой, автоматическая посадка), которые позволяют организовать фотосъемку одиночных и площадных объектов. Также предлагаются

дополнительные функциональные возможности: адаптируемое ПО наземной станции (с возможностью настройки интерфейса под заказчика); отсутствие ограничений по дальности применения; модульный принцип построения с возможностью разнесения модулей (связь модулей по CAN интерфейсу); возможность написания нетиповых команд по желанию заказчика; возможность настройки АП под различные радиомодемы (с интерфейсами UART, USART, CAN); сохранение полетных данных на microSD-карту памяти с частотой 20 Гц; возможность адаптации ПО АП под любой тип аппарата (самолет/вертолет/мультиротор/конвертоплан и др.).

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика некоторых современных АП по основным техническим и функциональным характеристикам.

Таблица 1

Сравнительная характеристика некоторых современных автопилотов

Характеристика	АП-АВИА	Pixhawk	MP2128 ^{g2}	Kestrel v3.0	YS-X4V2
Поддерживаемые типы БПЛА	самолет, вертолет, трикоптер, квадро-, гекса-, октокоптер	самолет, вертолет, трикоптер, квадро-, гекса-, октокоптер	самолет, трикоптер, квадро-, гекса-, октокоптер, вертолет (отдельная версия)	самолет, вертолет, трикоптер, квадрокоптер	квадро-, гекса-, октокоптер
Режимы управления	ручной, полуавт., авт. полет по маршруту	ручной, полуавт., авт. полет по маршруту	ручной, полуавт., авт. полет по маршруту	ручной, полуавт., авт. полет по маршруту	ручной, полуавт., авт. полет по маршруту
Точность определения позиции (для MP)	1,5 m (горизонт.) 0,5 m (верт.)	1,5 m (горизонт.) 0,5 m (верт.)	неизвестн.	неизвестн.	1,5 m (горизонт.) 0,5 m (верт.)
Точность определения углового положения	$\pm 0,3^\circ$ (крен, тангаж) $\pm 0,5^\circ$ (курс)	$\pm 0,3^\circ$ (крен, тангаж) $\pm 0,5^\circ$ (курс)	$\pm 2^\circ$	$\pm 5^\circ$ (крен, тангаж)	неизвестн.
Частота обновления сигналов управления	100 Гц (200 Гц, 300Гц, 400 Гц)	200 Гц	30 Гц, 400 Гц	неизвестн.	100 Гц
Поддерживаемые каналы КТЛ	Безлиценз. (433, 868, 900МГц, 2,4ГГц), GSM (GPRS/3G)	Безлиценз. (433, 868, 900МГц, 2,4ГГц)	Безлиценз. (433, 868, 900МГц, 2,4ГГц), Inmarsat	Безлиценз. (433, 868, 900МГц, 2,4ГГц)	WiFi
Поддержка гиростабилизированного подвеса	да	да	да	да	да
Интегрированный симулятор БПЛА	да	нет	неизвестн.	да	нет
Оценивание ветра	да	нет	неизвестн.	да	нет
Возврат домой при отказе GPS	да	да	неизвестн.	да	да
Интегрированный демпфер	да	нет	нет	нет	да
Рабочая температура	-5°C .. +60°C	-5°C .. +60°C	-20°C .. +65°C	-40°C .. +80°C	-5°C .. +60°C

Анализ возможностей современных АП

Анализируя представленные данные по указанным АП, можно сделать следующие выводы.

Все АП можно условно разделить на несколько классов:

- «профессиональные»: «Vector» (UAV Navigation), «Piccolo SL» (Cloud Cap Technology), «MP2x28» (Micropilot), «GNC1000» (Moog Crossbow's), «Kestrel» (Procerus Technologies), «АП-АВИА» (ООО «КБ АВИА»);

- «среднего» класса: «Pixhawk (PX-4)» (3D-robotics), «Naza» (DJI), «YS» (Zero UAV Intelligent Technology), «Panda» (FeiYu Electronic Technology Co).

- «любительского» уровня: 35x1, 36x1 (UNAV), RVOSD (RangeVideo) и др.

Для большинства профессиональных решений требуется разрешение на экспорт из страны производителя и достаточно высокая цена.

Большинство существующих АП используют однотипные (или одинаковые) микромеханические и радиоэлектронные сенсоры, поэтому качество решения навигационных задач зависит от алгоритмов работы АП, наличия температурной компенсации и качества калибровки датчиков. Чтобы не зависеть от поставки датчиков, а также для возможности дальнейшего расширения функциональности АП желательно иметь возможность установки нескольких типов датчиков. Такой возможностью на сегодняшний день обладают автопилоты «АП-АВИА» и, в меньшей степени, – «Pixhawk», для других АП такая возможность либо отсутствует, либо отсутствует точная информация об этом.

Для БПЛА малых размеров важны не только размеры модулей АП, а также возможность раздельной установки модулей (в свободном месте ЛА). Такую возможность, среди представленных АП, имеет только «АП-АВИА».

Для динамичных («быстрых») БПЛА (особенно для ЛА мультироторного типа), безусловно, важна скорость реакции АП на изменяющуюся полетную обстановку, поэтому важным параметром является частота дискретизации (частота решения задачи управления). Чем она выше, тем лучше, хотя для динамики современных БПЛА увеличивать частоту дискретизации выше 1кГц особого смысла не имеет. Для большинства представленных АП частота дискретизации не превышает 200 Гц, хотя некоторые АП, такие как «MP2x28», «АП-АВИА», позволяют устанавливать частоту дискретизации до 400 Гц.

Этот параметр непосредственно связан с частотой обновления данных датчиков. У «АП-АВИА», например, она составляет 800Гц. Это позволяет производить дополнительную обработку (например,

дополнительную фильтрацию) сигналов датчиков.

Частота дискретизации также зависит от быстродействия (тактовой частота работы) БЦВМ, которая должна за один такт дискретизации выполнять все операции по обработке сигналов датчиков и выработке сигналов управления. По производительности БЦВМ бесспорным лидером является АП «Pixhawk», который использует в качестве БЦВМ микроконтроллер с процессорным ядром ARM Cortex™-M4 с тактовой частотой 168МГц. Это позволяет реализовать очень сложные и требовательные к вычислительной мощности алгоритмы обработки и управления, хотя по результатам практического тестирования загрузка центрального процессорного устройства АП «Pixhawk» (даже с учетом использования в нем операционной системы реального времени) не превышает 30-40%. То есть БЦВМ этого АП выбрана с значительным запасом по вычислительной мощности (на перспективу).

Выполнение полетов в сложных климатических условиях (при температурах ниже 0°C и выше +35°C) возможно только при наличии термокомпенсации сигналов датчиков. Для этого на этапе производства должна производиться температурная калибровка датчиков. Расширенным диапазоном рабочих температур обладают только АП профессиональной серии, например, «MP2x28» и «Kestrel».

Точность управления БПЛА определяется точностью датчиков, которые используются в АП. С учетом того, что большинство АП используют однотипные (часто одинаковые) датчики качество управления в первую очередь и функциональные возможности определяются алгоритмами обработки сигналов датчиков и выработки сигналов управления. И здесь уже на первый план выходит программное обеспечение вычислительных устройств (БЦВМ и вспомогательных микропроцессорных устройств). Точность определения угловой ориентации для «АП-АВИА» и «Pixhawk» почти на порядок выше, чем для «MP2x28» и «Kestrel».

Расширение функциональных возможностей АП может осуществляться при наличии достаточного количества интерфейсов для подключения внешних устройств. Для большинства БПЛА достаточным для управления является наличие 4-5 входных и выходных каналов с управлением ШИМ-сигналами, но в некоторых случаях могут понадобиться дополнительные каналы управления (например, для управления полезной нагрузкой). Среди рассмотренных наибольшим количеством (24 выходных канала) обладает «MP2x28» с дополнительным модулем расширения, хотя в «АП-АВИА» также возможно увеличение количества ШИМ-выходов при использовании дополнительных плат расширения. Также отличительной чертой «MP2x28» и

«АП-АВИА» является возможность использования дополнительного канала телеметрии – радиоканала спутниковой связи и GPRS/3G-канала, соответственно.

Заключение

Рассмотренный состав бортового оборудования БПЛА позволяет обеспечить решение широкого круга задач по мониторингу местности и других задач в интересах человека. Однако специфика задач по применению БПЛА требует вариативности, как по функциональному обеспечению, так и техническому исполнению. Одни задачи требуют упрощенного исполнения (для дешевых ЛА), другие выдвигают жесткие условия эксплуатации, третьи требуют защищенности каналов связи и т.д. Поэтому разнообразие по исполнению, функциональным возможностям автопилотов расширяет сферы использования БПЛА.

Развитие или совершенствование бортового оборудования современных БПЛА авторам видится уже не в расширении аппаратных возможностей, так как используемые микроконтроллеры с запасом «справляются» с разнообразным программным обеспечением, а в расширении функциональных возможностей, в том числе функций безопасности БПЛА.

Литература

1. Руснак, І. С. Безпілотна авіація у сфері цивільного захисту України. Стан і перспективи розробки та застосування [Текст] / І. С. Руснак, В. В. Хижняк, В. І. Ємець // Наука і оборона. – 2014. – № 2 – С. 34 – 39.
2. Jang, Soon Jung. Automation of small UAVs using a low cost MEMS sensor and embedded computing platform [Text] / Soon Jung Jang, D. Liccardo // 25th Digital Avionics Systems Conference, 2006 IEEE/AIAA, October 2006. – P. 1–9.
3. Jose, A. Rios. Fusion filter algorithm enhancements for a MEMS GPS/IMU [Электронный ресурс] / A. Rios Jose, E. White, Crossbow Technology, Inc. – Режим доступа: http://www.moog-crossbow.com/Literature/Application_Notes_Papers/Fusion_Filter_Algorithm_Enhancements_for_a_MEMS_GPS-IMU.pdf. – 20.05.2015.
4. Inertial Sensors, IMU and AHRS [Электронный ресурс] / CrossBow Company, Aerospace and Defense Systems. – Режим доступа: <http://www.moog-crossbow.com/products/inertial-products/> – 20.05.2015.
5. Integrated MimiINS Based on MEMS Sensor for UAV Control [Text] / V. I. Kortunov, I. Yu. Dybska, G. A. Proskura, A. S. Kravchuk // IEEE A&E System magazine. – January 2009. – P. 41–43.
6. Кортунов, В. И. Экспериментальное исследование точности коррекции интегрированной миниатюрной БИНС [Текст] / В. И. Кортунов,

Г. А. Проскура, А. С. Кравчук // *Електроніка та системи управління*. – 2008. – № 1(15) – С. 26 – 33.

7. Кортунов, В. И. Наблюдаемость инструментальных погрешностей интегрированной бесплатформенной инерциальной навигационной системы и методика их оценивания [Текст] / Г. А. Проскура, В. И. Кортунов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 6(53). – С. 47–52.

8. MP2x28 Series Autopilots [Электронный ресурс] / MicroPilot Company. – Режим доступа: <http://www.micropilot.com/products-mp2028-autopilots.htm>. – 20.05.2015.

9. Bahat, M. Furkan. Autopilot [Электронный ресурс] / M. Furkan Bahat. – *Anadolu University*, 2013, December 7. – P. 1-3. – Режим доступа: <http://www.suasanadolu.com/autopilot/>. – 19.05.2015.

10. Chao, Hai Yang. Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles: A Survey [Электронный ресурс] / Hai Yang Chao, Yong Can Cao, Yang Quan Chen // *International Journal of Control, Automation, and Systems*. – 2010. – No. 8(1). – P. 36–44. – Режим доступа: <http://www.springer.com/12555DOI10.1007/s12555-010-0105-z>. – 20.05.2015.

11. VECTOR. Autonomous Flight Control Unit [Электронный ресурс] / UAV Navigation. – Режим доступа: <http://uavnavigation.com/products/uav-autopilot-vector>. – 20.05.2015.

12. Piccolo Autopilots [Электронный ресурс] / CloudCap Technology. – Режим доступа: <http://www.cloudcaptech.com/products/auto-pilots/>. – 21.05.2015.

13. Flight Management Systems - Vehicle Management Computers [Электронный ресурс] / CrossBow Company, Aerospace and Defense Systems. – Режим доступа: <http://www.moog-crossbow.com/products/flight-management-systems-vehicle-management-computers/products-gnc1000/>. – 20.05.2015.

14. Procerus Family of Products: Autopilots, Vision Systems, Gimbals [Электронный ресурс] / Procerus Technologies. – P. 1-2. – Режим доступа: <http://www.procerus.com>. – 22.05.2015.

15. Kestrel Autopilot System User Guide. Document Version 1.5 [Электронный ресурс] / Procerus Technologies. – 20 March 2007. – P. 139. – Режим доступа: <http://www.procerus.com>. – 22.05.2015.

16. YS-X4V2 Professional flight controller [Электронный ресурс] / Zero UAV Intelligent Technology. – Режим доступа: <http://www.zerouav.com/en/products/dxyfkxt/X4V2/>. – 22.05.2015.

17. Pixhawk Autopilot [Электронный ресурс] / Pixhawk Community. – Режим доступа: <https://pixhawk.org/modules/pixhawk>. – 23.05.2015.

18. 3DR Pixhawk Autopilot [Электронный ресурс] / 3D Robotics, Inc. – Режим доступа: <https://store.3drobotics.com/products/3dr-pixhawk>. – 23.05.2015.

19. Flight Controllers [Электронный ресурс] / DJI. – Режим доступа: <http://www.dji.com/products/flight-controllers>. – 22.05.2015.

20. Panda Autopilot [Электронный ресурс] / FeiYu Electronic Technology Co., Ltd. – Режим доступа: <http://www.feiyu-tech.com/product-en.php?mlist=3&id=26&step=2>. – 20.05.2015.

21. UNAV autopilots [Электронный ресурс] / UNAV, LLC. – Режим доступа: <http://u-nav.com/autopilots.aspx>. – 20.05.2015.

22. RVOSD Autopilot & Telemetry [Электронный ресурс] / RangeVideo. – Режим доступа: <http://www.rangevideo.com/osd-and-autopilot-rvosd/117-rvosd-autopilot-telemetry.html>. – 20.05.2015.

23. 8J-2.4GHz, 8-channel radio control system. Instruction manual [Электронный ресурс] / Futaba Corporation. – Режим доступа: <http://manuals.hobbico.com/fut/8j-manual.pdf>. – 5.03.2015.

24. DX8. 8-Channel DSM Radio System with Integrated Telemetry for Airplanes and Helicopters. Instruction Manual [Электронный ресурс] / Horizon Hobby, Inc. – Режим доступа: http://www.spektrumrc.com/ProdInfo/Files/SPM8800-Manual_EN.pdf. – 5.03.2015.

25. XBee ZigBee. XBee and XBee-PRO ZigBee RF Modules [Электронный ресурс] / Digi International. – Режим доступа: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/rf-modules/xbee-zigbee#specifications>. – 6.03.2015.

26. XTend 900 MHz. 1 Watt Long-Range OEM RF modules [Электронный ресурс] / Digi International. – Режим доступа: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/modules/xtend-module#specifications>. – 6.03.2015.

References

1. Rusnak, I. S., Khyzhnyak, V. V., Yemets', V. I. Bezpilotna aviatsiya u sferi tsyvil'noho zakhystu Ukrainy. Stan i perspektyvy rozrobky ta zastosuvannya [Unmanned aircraft in the sphere of civil protection of Ukraine. The state and prospects of development and application]. *Nauka i oborona*, 2014, no. 2, pp. 34-39.

2. Jang, Soon Jung, Liccardo, D. Automation of small UAVs using a low cost MEMS sensor and embedded computing platform, *25th Digital Avionics Systems Conference*, 2006 IEEE/AIAA, October 2006, pp. 1-9.

3. Jose, A. Rios, White E. Fusion filter algorithm enhancements for a MEMS GPS/IMU, *Crossbow Technology, Inc.*, Available at: http://www.moog-crossbow.com/Literature/Application_Notes_Papers/Fusion_Filter_Algorithm_Enhancements_for_a_MEMS_GPS-IMU.pdf. (accessed 20.05.2015).

4. Inertial Sensors, IMU and AHRS, *CrossBow Company, Aerospace and Defense Systems*, Available at: <http://www.moog-crossbow.com/products/inertial-products/> (accessed 21.05.2015).

5. Kortunov, V. I., Dybska, I. Yu., Proskura, G. A., Kravchuk, A. S. Integrated MimiINS Based on MEMS Sensor for UAV Control, *IEEE A&E System magazine*, 2009, January, pp. 41-43.

6. Kortunov, V. I., Proskura, G. A., Kravchuk, A. S. Eksperimental'noe issledovanie tochnosti korrektsii integrirovannoy miniatyurnoy BINS [Experimental investigation of the accuracy of the correction of integrated miniature IMU]. *Elektronika ta systemy upravlinnya*, 2008, no. 1(15), pp. 26-33.

7. Kortunov, V. I., Proskura, G. A. Nablyudaemost' instrumental'nykh pogreshnostey integrirovannoy besplatfornennoy inertsiyal'noy navigatsionnoy sistemy i metodika ikh otsnivaniya [The observability of the instrumental errors of integrated strapdown inertial navigation system and a method for their estimation]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 6(53), pp.47-52.

8. MP2x28 Series Autopilots, *MicroPilot Company*, Available at: <http://www.micropilot.com/products-mp2028-autopilots.htm> (accessed 20.05.2015).

9. Bahat, M. Furkan. Autopilot, *Anadolu University*, 2013, December 7, pp.1-3, Available at: <http://www.suasanadolu.com/autopilot/> (accessed 19.05.2015).

10. Chao, Hai Yang, Cao Yong Can, Chen Yang Quan. Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles: A Survey, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2010, 8(1), pp.36-44, Available at: <http://www.springer.com/12555DOI10.1007/s12555-010-0105-z> (accessed 20.05.2015).

11. VECTOR. Autonomous Flight Control Unit, *UAV Navigation*, Available at: <http://uavnavigation.com/products/uav-autopilot-vector> (accessed 20.05.2015)

12. Piccolo Autopilots, *CloudCap Technology*, Available at: <http://www.cloudcaptech.com/products/auto-pilots/> (accessed 21.05.2015).

13. Flight Management Systems – Vehicle Management Computers, *CrossBow Company, Aerospace and Defense Systems*, Available at: <http://www.moog-crossbow.com/products/flight-management-systems-vehicle-management-computers/products-gnc1000/> (accessed 20.05.2015).

14. Procerus Family of Products: Autopilots, Vision Systems, Gimbal, *Procerus Technologies*, pp. 1-2, Available at: <http://www.procerus.com> (accessed 22.05.2015).

15. Kestrel Autopilot System User Guide. Document Version 1.5, *Procerus Technologies*, 2007, March 20, p.139, Available at: <http://www.procerus.com> (accessed 22.05.2015).

16. YS-X4V2 Professional flight controller, *Zero UAV Intelligent Technology*, Available at: <http://www.zerouav.com/en/products/dxyfxt/X4V2/> (accessed 22.05.2015).

17. Pixhawk Autopilot, *Pixhawk Community*, Available at: <https://pixhawk.org/modules/pixhawk> (accessed 23.05.2015).

18. 3DR Pixhawk Autopilot, *3D Robotics, Inc.*, Available at: <https://store.3drobotics.com/products/3dr-pixhawk> (accessed 23.05.2015).

19. Flight Controllers, *DJI*, Available at: <http://www.dji.com/products/flight-controllers> (accessed 22.05.2015).

20. Panda Autopilot, *FeiYu Electronic Technology Co., Ltd.*, Available at: <http://www.feiyu-tech.com/product-en.php?mlist=3&id=26&step=2> (accessed 20.05.2015).

21. UNAV autopilots, *UNAV, LLC*, Available at: <http://u-nav.com/autopilots.aspx> (accessed 22.05.2015)

22. RVOSD Autopilot & Telemetry, *RangeVideo*, Available at: <http://www.rangevideo.com/osd-and-autopilot-rvosd/117-rvosd-autopilot-telemetry.html> (accessed 20.05.2015).

23. 8J-2.4GHz, 8-channel radio control system. Instruction manual, *Futaba Corporation*, Available at: <http://manuals.hobbico.com/fut/8j-manual.pdf> (accessed 5.03.2016).

24. DX8. 8-Channel DSM Radio System with Integrated Telemetry for Airplanes and Helicopters. Instruction Manual, *Horizon Hobby, Inc.*, Available at: http://www.spektrumrc.com/ProdInfo/Files/SPM8800-Manual_EN.pdf (accessed 5.03.2016).

25. XBee ZigBee. XBee and XBee-PRO ZigBee RF Modules, *Digi International*, Available at: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/rf-modules/xbee-zigbee#specifications> (accessed 6.03.2016).

26. XTend 900 MHz. 1 Watt Long-Range OEM RF modules, *Digi International*, Режим доступа: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/modules/xtend-module#specifications> (accessed 6.03.2016).

Поступила в редакцию 4.02.2016, рассмотрена на редколлегии 18.02.2016

ЗАСОБИ КЕРУВАННЯ МІНІ ТА МІКРО-БПЛА

В. І. Кортунів, О. В. Мазуренко, Ватік Мухаммед Алі Хусейн

Розглянуто й проаналізовано основні засоби керування міні та мікро-БПЛА, зокрема системи автоматичного керування - автопілоти і засоби зв'язку. Наведено результати аналізу сучасних автопілотів представлених на ринку авіоніки міні-мікро-БПЛА, їх технічні характеристики, апаратні особливості й функціональні можливості. Дано порівняння за різними технічними характеристиками – обчислювальною потужністю центральної бортової ЕОМ, точністю визначення параметрів місцерозташування й орієнтації, інтерфейсними зв'язками між модулями, каналами керування й підтримуваними типами ЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, система автоматичного керування, автопілот, мікромеханічні датчики, наземна станція керування, корисне навантаження.

CONTROL TOOLS OF MINI AND MICRO-UAV

V. I. Kortunov, O. V. Mazurenko, Watheq Mohammed Ali Hussein

Basic mini and micro-UAVs equipments, particularly the automatic control systems – autopilot (AP) and communication interfaces were considered and analyzed in the paper. The analysis results of the modern autopilots on the avionics mini and micro-UAVs market, their technical characteristics, hardware features, functionality were given. There is a comparison of the various technical characteristics we give in the paper. There are processing power of the central board computer, a positioning accuracy, interfaces between the modules, control channels and supported aircraft types.

Key words: unmanned aircraft vehicle, automatic control system, autopilot, micromechanical sensors, ground control station, payload.

Кортунів Вячеслав Іванович – д-р техн. наук, зав. каф. производства радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: vkortunov@yandex.ru.

Мазуренко Александр Владимирович – канд. техн. наук, доц. каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: al_maz@ukr.net.

Ватік Мухаммед Алі Хусейн – канд. техн. наук, доцент, Политехнический университет г. Духок, Ирак, e-mail: dr.wathiq_2004@yahoo.com.

Kortunov Vyacheslav Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Production of Aircraft Radioelectronic Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vkortunov@yandex.ru.

Mazurenko Aleksandr Vladimirovich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Department of Development of Aircraft Radioelectronic Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: al_maz@ukr.net.

Watheq Mohammed Ali Hussein – Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Duhok Technical Institute, Polytechnic University, Duhok, Iraq, e-mail: dr.wathiq_2004@yahoo.com.