

УДК 681.5

ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЗАДАЧ ЩОДО МОНІТОРИНГУ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

Яровий О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проведено аналіз різних класів і типів існуючих безпілотних літальних апаратів. Розглянуто ряд переваг безпілотних літальних апаратів перед пілотованими. Наведено варіант використання безпілотного літального апарату для передачі даних між наземним центром управління та базовим блоком системи моніторингу. Розглянуто структуру компоновки безпілотного літального апарату з роботизованим пристроєм. Надано рекомендації щодо вибору оптимальних моделей безпілотних літальних апаратів та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, мультикоптер, система управління, бортовий контролер, радіоканал, роботизований пристрій.

Постановка проблеми. На сьогодні більшість існуючих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) пілотуються вручну, за допомогою пультів дистанційного керування, що працюють на радіоканалах. При ручному управлінні БПЛА виникають труднощі, пов'язані зі спеціальною підготовкою операторів, що будуть ними керувати, недостатньою робочою дальністю БПЛА, обмеженнями, пов'язаними з погодними умовами тощо. Управління БПЛА є завданням для підготовленого професіонала. Наприклад, в армії США операторами БПЛА стають діючі пілоти військово-повітряних сил (ВПС) після річної підготовки та тренінгу. У багатьох аспектах це іноді є складнішим, ніж пілотування літаком. Більшість аварій БПЛА виникають через помилки операторів і механічних відмов. За офіційними даними на 2017 рік у ВПС США за весь час були розбиті 120 літаків безпілотників [1].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Новим технічним напрямком у світі є побудова мультикоптерів – БПЛА з парною кількістю роторів, що обертаються діагонально в протилежних напрямках. У разі, коли двигунів чотири, такий БПЛА називається квадрокоптер. Сам по собі БПЛА є лише частиною складного багатофункціонального комплексу. На відміну від пілотованої авіації для БПЛА потрібні додаткові елементи системи забезпечення. До них відносяться сам безпілотний апарат, робоче місце оператора, програмне забезпечення, лінії передачі даних і елементи, необхідні для виконання цілей польоту. На сьогодні головним трендом є створення невеликого безпілотного квадрокоптера. Основними причинами такого стану речей є можливість простого управління, надійність і маневреність. Квадрокоптери мають великий попит серед авіамоделістів, а також знаходять своє застосування і в професійній сфері, наприклад в цивільному секторі, сільському господарстві, армії, поліції та інших силових структурах. В цьому сенсі постає питання щодо вибору оптимальних моделей БПЛА та систем управління з метою здійснення моніторингу наземних об'єктів.

Мета статті. Основною метою статті є проведення аналізу існуючих БПЛА (дронів, мульти-

коптерів, квадрокоптерів, гексакоптерів) різних класів і типів з метою вибору оптимальних моделей БПЛА та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Спектр застосування безпілотних літальних апаратів в цивільному секторі не обмежений, але при нинішньому стані правової бази щодо використання повітряного простору виконання польотів ускладнено. В інтересах народного господарства БПЛА можуть застосовуватися в наступних областях:

- ведення пошукових робіт;
- виконання геологічної розвідки;
- аерозйомка місцевості;
- виконання авіаційних хімічних робіт;
- моніторинг територій і об'єктів;
- ведення відеоспостереження.

Безпілотні літальні апарати мають ряд переваг перед пілотованими, а саме:

– для виконання одних і тих же завдань, легкі безпілотні апарати обходяться набагато дешевше пілотованих літаків, які потрібно оснащувати системами життєзабезпечення, захисту, кондиціонування тощо;

– треба готувати пілотів, а це коштує великих грошей і значного часу. У підсумку виходить, що відсутність екіпажу на борту істотно знижує витрати на виконання того чи іншого завдання, а також підвищується корисне навантаження апарату;

– на відміну від пілотованих літаків, машинам без пілота не потрібні аеродроми;

– важливою перевагою при використанні систем автоматичного і напівавтоматичного управління можна вважати виключення людського фактору при виконанні поставленого завдання.

Для забезпечення завдань спостереження за поверхнею Землі в реальному масштабі часу в процесі польоту і цифрового фотографування обраних ділянок місцевості, включаючи важкодоступні ділянки, а також визначення координат досліджуваних ділянок місцевості БПЛА повинен містити в своєму складі:

- супутникову навігаційну систему (GPS);
- пристрої командно-навігаційної радіолінії з антенно-фідерним пристроєм;

- пристрій обміну командною інформацією;
- бортову цифрову обчислювальну машину.

Залежно від класу БПЛА корисне навантаження може доповнюватися різними видами радіолокаційних станцій (РЛС), датчиками екологічного, радіаційного та хімічного моніторингу. Комплекс управління БПЛА є складною системою, яка має багаторівневу структуру і основне завдання якої є забезпечення виведення БПЛА у заданий район і виконання операцій відповідно до польотного завдання, а також забезпечення доставки інформації, отриманої бортовими засобами БПЛА, на пункт управління.

Розглянемо БПЛА, контроль і управління якого здійснюється на базі контролера Ardupilot mega 2560, створеного для застосування в автономних літальних апаратах, автомобілях або судах [2]. Бортовий комплекс «Ardupilot» є повнофункціональним засобом навігації, контролю і управління безпілотного літального апарату літакової схеми.

Комплекс забезпечує: визначення навігаційних параметрів, кутів орієнтації і параметрів руху БПЛА (кутових швидкостей і прискорень), навігацію і управління БПЛА при польоті по заданій траєкторії; стабілізацію кутів орієнтації БПЛА в польоті, видачу в канал передачі телеметричної інформації про навігаційні параметри та кути орієнтації БПЛА.

Центральним елементом бортового комплексу «Ardupilot» є малогабаритна інерціальна навігаційна система (ІНС), інтегрована з приймачем супутникової системи навігації. Побудована на базі мікроелектромеханічних датчиків (гіроскопів і акселерометрів) за принципом ІНС, система є унікальним високотехнологічним виробом. Вбудований датчик статичного тиску забезпечує динамічне визначення висоти і швидкості. Типовий варіант бортового контролера для мультикоптера наведено на рис. 1.

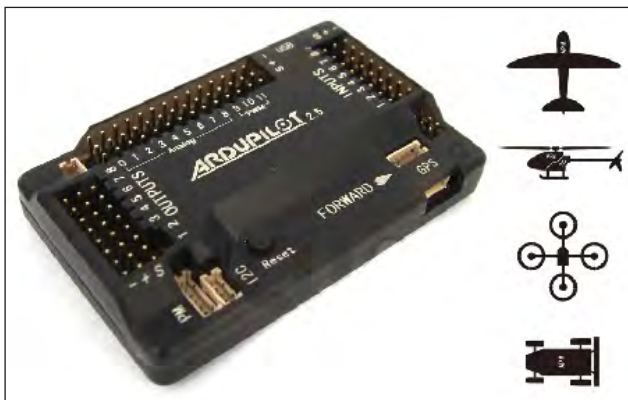


Рис. 1. Бортовий контролер для мультикоптера

Склад бортового комплексу:

- блок інерціальної навігаційної системи;
- приймач супутникової навігаційної системи (СНС);
- блок автопілота;
- накопичувач льотних даних;
- датчик повітряної швидкості.

Комплекс сумісний з радіоканалом імпульсно-кодової модуляції (ІКМ) і дозволяє управляти БПЛА як в ручному режимі зі стандартного пульта дистанційного керування, так і в автоматичному по командам автопілота.

Автопілот здатний одночасно стабілізувати політ і управляти навігацією, що усуває необхідність в окремій системі стабілізації. Автопілот підтримує режим "дистанційно керованого польоту" ("fly-by-wire"). Плата розроблена на базі 16 МГц мікроконтролера Atmega. Зв'язок з контролером здійснюється за допомогою аналогового приймача «НІТЕС RCD 9500». «Ardupilot» обраний через можливість вільно коригувати код і вносити зміни в алгоритм. Також однією з причин його обрання є доступність на ринку. Забезпечення автоматичного зльоту і посадки це зручний спосіб упорядкування. Є також повна підтримка симуляторів Xplane [3] і Flight Gear [4].

Міжнародною асоціацією по безпілотним системам AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) була запропонована універсальна класифікація БПЛА, яка об'єднує багато критеріїв.

Для здійснення моніторингу наземних об'єктів найбільше підходять мультикоптери, які мають високу маневреність та керованість, просту конструкцію і можуть виконувати багато різних функцій, потребують досить простих навичок керування при відносно невисокій вартості.

На рис. 2, рис. 4–7 показані різні варіанти конструкцій квадрокоптерів із підвіскою для відеокамер. На рис. 3 демонструється схема мультикоптера з шістьма гвинтами – гексакоптер. Максимальна кількість несучих гвинтів принципово не обмежується, але в реалії обмежується вісьма силовими двигунами з міркування оптимального використання живлення бортовими пристроями та гвинтомоторною групою [5].



Рис. 2. Приклад серійної моделі квадрокоптера для цивільних задач моніторингу



Рис. 3. Приклад гексакоптера класу «mini» з зовнішньо підвішеним вантажем



Рис. 4. Приклад квадрокоптера із зовнішньою підвіскою з курсовою камерою



Рис. 5. Приклад конструкції БПЛА рамкового типу



Рис. 6. Приклад мініквадрокоптера без відеокамери і підвіски



Рис. 7. Квадрокоптер Inspire 1 V2.0 з відеокамерою на керованій платформі

Чим більше двигунів – тим більше живлення потребує апарат і тим більша повинна бути ємність батарей. Але чим більше двигунів, тим більше вантажопід'ємність апарату та менше польотний час і тим меншу дальність може подолати безпілотник. В той же час, чим більше обертів двигунів в одиницю часу, тим більше вантажопід'ємність і тим вище може піднятися БПЛА. В протилежність останнього, чим більше двигунів, тим складніше керування апаратом, збільшуються його габарити, а як наслідок збільшується «парусність». Пориви вітру на висоті можуть частіше перевертати літальний апарат, «здувати» його з курсу і для підтримки заданого напрямку польоту буде витрачатися більше живлення.

Для мультикоптерів важливою характеристикою є кількість гвинтів. Вважалося, що кількість гвинтів впливає на стабільність польоту. Так коптери з 8-ю гвинтами літали набагато стабільніше 4-х і 6-ти гвинтових, але на сьогоднішній день, завдяки розвитку алгоритмів польоту, всі коптери літають однаково стабільно, навіть в разі відмови одного з гвинтів. Більшість моделей БПЛА використовують електродвигуни. Характеристики двигуна відповідають за максимальну дальність і час польоту. Електродвигуни живляться від акумуляторних батарей різного типу і залежать від розмірів БПЛА. Компактні моделі можуть провести в повітрі 40 хвилин, а великі моделі до 4 годин, долаючи відстань до 300 км.

Максимальна і крейсерська швидкість впливають на можливість використання БПЛА в вітряну погоду і на продуктивність зйомки. Середня крейсерська швидкість невеликих моделей становить близько 50-60 км/год., швидкість більших моделей становить близько 100 км/год. Обмеження використання БПЛА за швидкістю вітру при старті і посадці в середньому складають близько 10 м/с.

Для зв'язку з БПЛА під час польоту використовуються радіоканали. Частоти таких каналів варіюються від 433 МГц до 2,4 ГГц. Іноді за допомогою радіоканалу передають відео та фотоматеріали, отримані під час зйомки. Розмір і кількість антен, їх конструкція впливають на аеродинаміку, в першу чергу для Платформи тактичної підтримки (ПТП).

Основним критерієм вибору схеми БПЛА і ПТП повинні бути перелік їх функцій і завдань, що вони повинні виконувати, дальність і висота польотів, а таж вимоги до вантажопід'ємності корисного вантажу та можливого бортового обладнання.

На БПЛА може встановлюватися платформи з відео обладнанням і роботизований пристрій для виконання наземних операцій із об'єктами сервісного маніпулювання. В останньому варіанті використовується робот-маніпулятор, який може захопити об'єкт і перемістити його завдяки квадрокоптеру в задану точну простору або на базу управління, може заміряти його вагу, габарити, температуру, інші фізико-хімічні показники чи визначити радіологічні характеристики навколишнього середовища [5].

Крім фотокамер на борт БПЛА можуть бути встановлені інші прилади, такі наприклад як те-

пловізор, лазерний сканер, відеокамера. Використовуючи ці прилади є можливість вирішувати виробничі завдання, пов'язані з моніторингом та технічним діагностуванням об'єктів.

Критерії вибору можна визначити також виходячи з виду робіт щодо моніторингу заявлених об'єктів. Якщо розглядаються моделі для високоточних вимірювань, то відеоматеріал повинен відповідати чинній нормативній документації для фотограмметричних, геодезичних та землевпорядних робіт.

Після виготовлення робочого зразка роботизованого пристрою, вага якого не повинна перевищувати 800 г, оснащення БПЛА курсовою камерою та камерою наземного моніторингу, підбору для них підвісок, визначення з батареями живлення, антенними блоками, які використовуються для передачі відеопотоків і потоків даних та телеметрії на НЦУ, вибору реальних двигунів, можна буде конкретизувати всі параметри базового блоку.

При таких обумовлених даних можемо обрати схему квадрокоптера, яка задовольняє означені вимоги при заданих обмеженнях для БПЛА.

Блок ПТП повинен відповідати меншій кількості критеріїв – максимальний польотний час, стабільність висоти «баражування», можливість ретрансляції потоків управління на БПЛА з НЦУ та ретрансляції відео і телеметрії у зворотному напрямку, включаючи загоризонтний варіант. У цьому випадку можна зазначити, що оптимальним варіантом для реалізації ПТП є квадрокоптер вагою 1-2 кг, швидкістю польоту 50-60 км/год, максимально досяжною висотою польоту 4-5 км, з підняттям корисної ваги до 2-2,5 кг.

Для ПТП важливим є також аеродинамічні характеристики, які можуть впливати на польотну стійкість і, відповідно на стабільність ретрансляції потоків даних та відео між БПЛА і НЦУ.

Для створення безпілотних мобільних засобів моніторингу наземних об'єктів і загоризонтного керування, що включають роботизовані пристрої з інтелектуальними компонентами, необхідно розробити:

- нові методи оптимізації польотних маршрутів з урахуванням результатів комп'ютерного моделювання на емуляторі режимів пілотування, тестових параметрів базового модуля та його наявної компоновки;

- нові методи аеромобільного збору моніторингових даних з вибором оптимального методу, з точки зору комплексної ефективності виконання моніторингового завдання, з метою зменшення впливу різноманітних дестабілізуючих впливів і зовнішніх факторів;

- нові способи і засоби загоризонтного керування БПЛА з використанням функціонально спеціалізованої ПТП, включаючи можливість віддаленої корекції чи зміни польотного

завдання з пункту наземного керування безпосередньо під час польоту БПЛА;

- нові компоненти системи аеромоніторингу на основі серійного БПЛА чи квадрокоптера і наземної підсистеми збору, обробки та накопичення моніторингової інформації та проведенні випробування системи;

- нові алгоритми та програмні продукти по загоризонтному пілотуванню, по первинній обробці моніторингових даних, по накопиченню, індексації та збереженню даних;

- методичні рекомендації по проведенню випробувань та ефективному використанню систем моніторингу наземних об'єктів на основі безпілотних аеромобільних засобів з використанням ПТП.

У разі використання загоризонтного принципу управління і моніторингу, базова схема буде мати вигляд, який представлено на рис. 8.

Для управління у випадку відсутності прямого зв'язку між БПЛА і НЦУ, або входу в зону нестійкого зв'язку, виникає необхідність у використанні високої мачти антени НЦУ або використання супутникових каналів зв'язку. Потрібен додатковий аналіз ефективності наземних антен в залежності від їх конструкції, висоти підйому та діапазону частот.

Треба зазначити, що доступні канали супутникових хабів, як правило, малошвидкісні і дорогі.

Можливий варіант використання іншого БПЛА для передачі потрібних даних між НЦУ та базовим блоком системи моніторингу. Така схема показана на рис. 9 і пропонується для вирішення цієї проблеми.

Можливо вирішення також задачі управління роботизованим пристроєм, коли об'єкт сервісної роботи знаходиться, наприклад, за будівлею, яка екранує радіопромінь, чи на дні впадини, коли можуть бути відлуння радіопромінів керування.

Спрямувавши ПТП в іншу зону його баражування, можна відновити стійкий зв'язок між НЦУ та БПЛА і виконати заявлені програмні завдання.

Таку схему загоризонтного управління можна використовувати для оптимізації зони вильо-

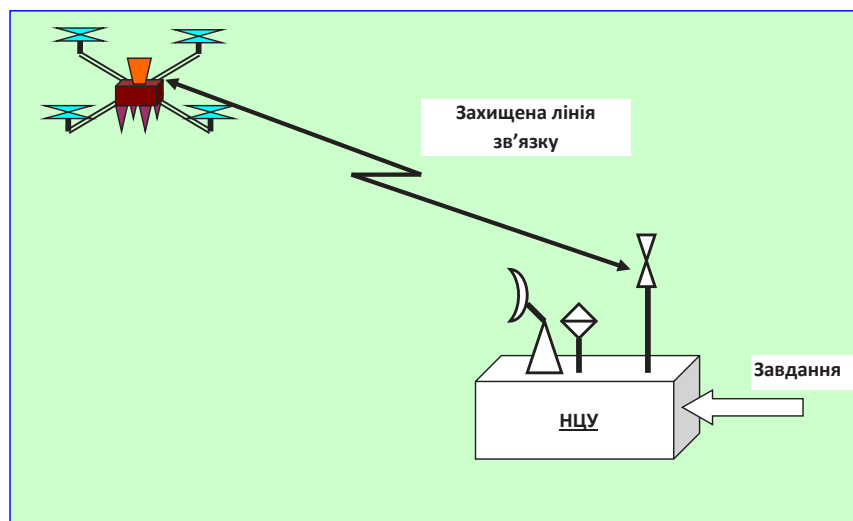


Рис. 8. Базова схема загоризонтного принципу управління і моніторингу

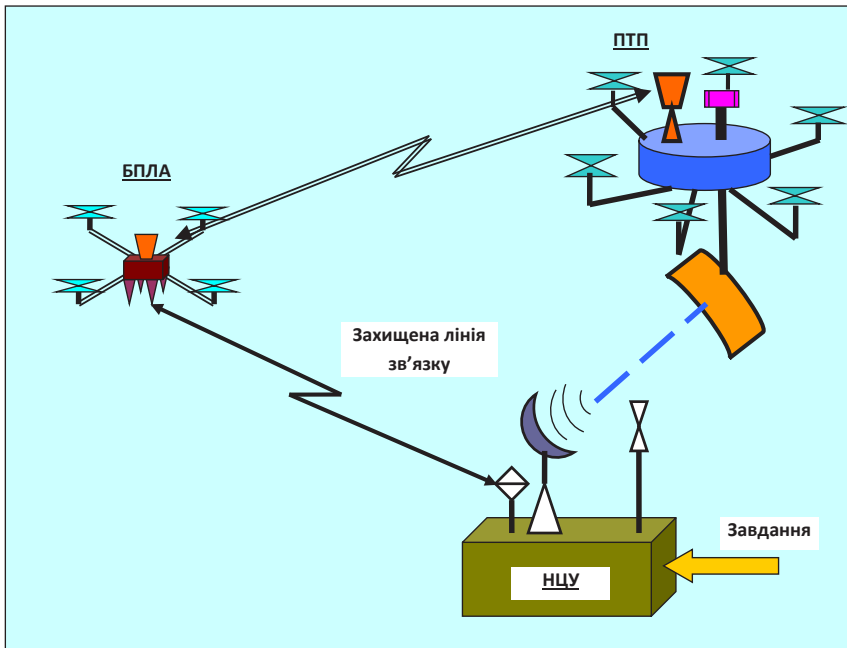


Рис. 9. Загальна інформаційна структура управління і моніторингу

ту БПЛА за межі зони стійкого зв'язку з ПТП, якщо перебазувати ПТП по мірі віддалення БПЛА в нову зону баражування, чим можна значно збільшити дальність польоту БПЛА і розширити зону його застосування в задачах моніторингу наземних об'єктів і для виконання роботом відповідних сервісних робіт.

Розробка компоновки БПЛА з роботизованим пристроєм полягає у наступному:

По-перше, БПЛА з роботизованим пристроєм має традиційні блоки та системи, якими оснащуються такі пристрої: 3-х осевий гіроскоп, 3-х осевий акселерометр та барометричний висотомір, які через АЦП надають сигнали про режим польоту до головного процесора обробки даних та управління, до якого через блок комутації також поступають сигнали з GPS приймача, магнітометра та радіомодема. Останній через антену отримує з НЦУ команди управління оператора на частоті 2,4 ГГц.

По-друге, для усунення можливості зіткнення квадрокоптера з Землею, до блока комутації підключено ультразвуковий висотомір.

Головний процесор здійснює інтеграцію отриманих сигналів та управляє регуляторами обертів двигунів, керуючи польотом БПЛА. Він отримує дані безпосередньо від процесора управління роботом. Крім того, головний процесор і процесор управління роботом взаємодіють для забезпечення автономної роботи роботизованого пристрою, коли неможливе дистанційне керування роботом.

Блок телеметрії формує потік телеметричних даних щодо параметрів і режимів роботи БПЛА та роботизованого пристрою. Цей блок передає потік даних через передавач телеметрії і антенну систему телеметрії. Телеметрична інформація не потребує широкого каналу зв'язку, тому можна використовувати в якості каналів передачі даних відносно низькочастотні канали.

Через антенну систему з широкополосною смугою потоки змішаних даних та відео з кур-

сової камери, а також потік з відеокамери моніторингу наземних об'єктів, передаються з високою швидкістю на НЦУ. Відеодані з обох камер проходять попередню обробку зображень і форматування у відео-процесорах.

Для управління роботою відеокамер БПЛА для кожної камери використовуються своя система керування, які управляються командами, що формуються в головному процесорі на основі команд оператора та оперативних даних про наземні об'єкти моніторингу [5].

БПЛА також комплектується одним чи двома акумуляторами для живлення описаних пристроїв та роботизованого пристрою. В комплекті може бути також радіомаяк для полегшення розшуку БПЛА при аварійних посадках та, нештатних ситуаціях з роботизованим

пристроєм.

На рис. 10 показано основні компоненти БПЛА, а також структуру компонентів роботизованого пристрою, яка складається з процесора управління роботом, систем управління маніпулятором і управління безпосередньо виконавчим органом, а також системою агрегації сигналів з сенсорів. У разі необхідності базовий блок оснащується тепловізором та відповідним контролером для обробки його даних.

Процесор управління роботом отримує сигнали від сенсорної системи робота і формує, відповідно до закладених в нього алгоритмів, команди управління для сервоприводів маніпулятора та системи управління виконуючим пристроєм робота. У випадку реалізації автономного режиму роботи робота використовуються типові програми керування роботом, які зберігаються в спеціальній кеш-пам'яті процесора управління роботизованого пристрою і завантажуються в цей процесор на період дії автономного режиму роботи. В такому режимі роботи обмін даними між головним процесором обробки даних і управління БПЛА та процесором управління роботом не переривається, а навпаки, збільшується в сторону інтенсивності взаємодії.

Висновки і пропозиції. Проведений в статті аналіз різних класів і типів існуючих БПЛА, а також ряд переваг безпілотних літальних апаратів перед пілотованими, дає можливість надати рекомендації щодо вибору оптимальних моделей БПЛА та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів. Варіант використання БПЛА для передачі даних між наземним центром управління та базовим блоком системи моніторингу, а також структура компоновки БПЛА з роботизованим пристроєм, які наведені в статті, пропонується також вважати базовими при виборі оптимальних моделей БПЛА.

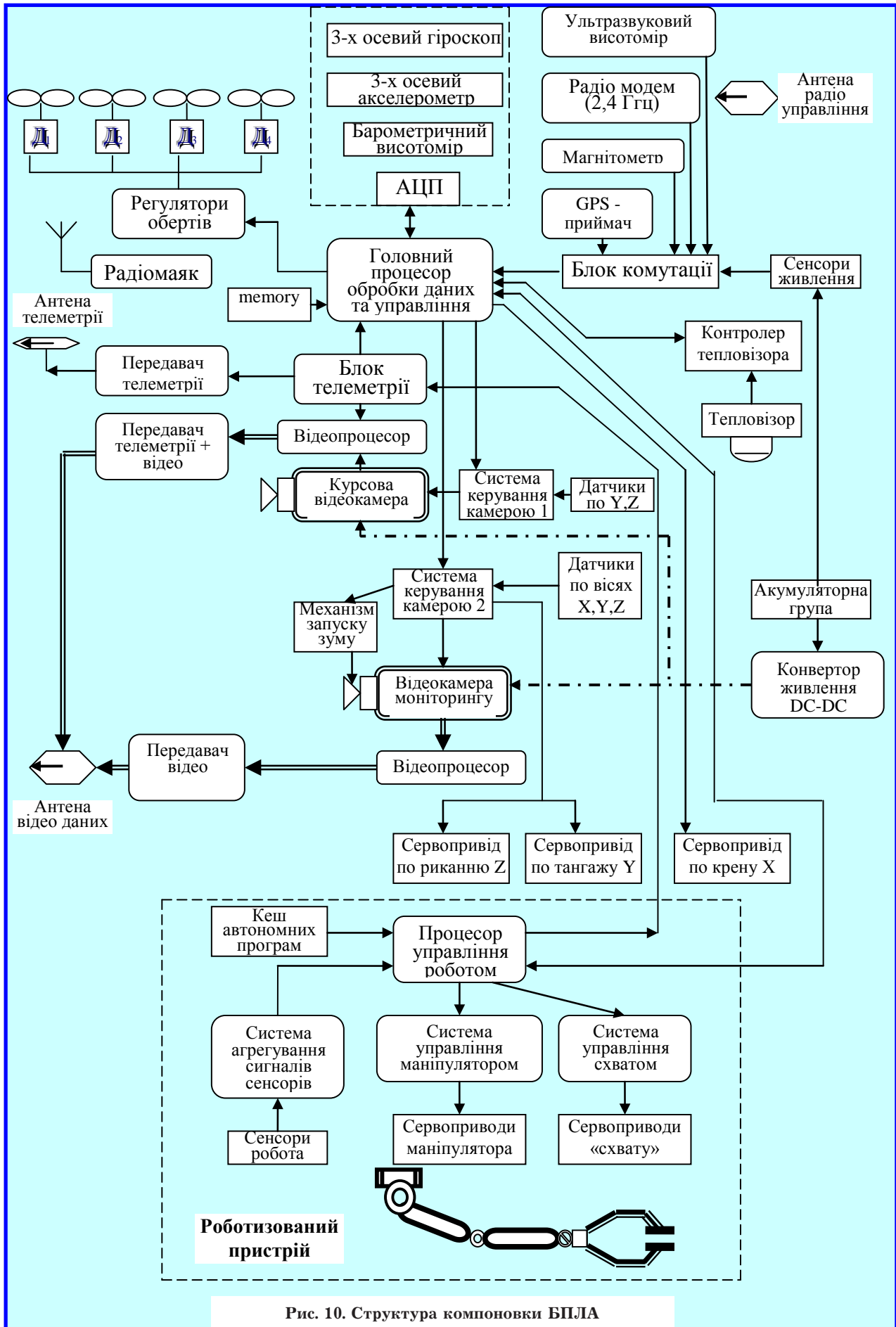


Рис. 10. Структура компоновки БПЛА

Список літератури:

1. Класифікація UVS International. Електронний ресурс: <http://helpiks.org/6-70010.html>.
2. Електронний ресурс: <http://droneport.com.ua>.
3. Haas E. Aeronautical channel modeling // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2012. V. 51. № 2. P. 254–264.
4. Richard V.N., Prasad R. OFDM wireless multimedia communication. Artech House Boston London. 2010. P. 260.
5. Зинченко О.Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования [Электронный ресурс] / О.Н. Зинченко. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=681>.

Яровой А.В.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ БЕСПИЛОТНОГО
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ ПО МОНИТОРИНГУ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ****Аннотация**

Проведен анализ различных классов и типов существующих беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрен ряд преимуществ беспилотных летательных аппаратов перед пилотируемыми. Приведен вариант использования беспилотного летательного аппарата для передачи данных между наземным центром управления и базовым блоком системы мониторинга. Рассмотрена структура компоновки беспилотного летательного аппарата с роботизированным устройством. Даны рекомендации по выбору оптимальных моделей беспилотных летательных аппаратов и систем управления для выполнения задач по мониторингу наземных объектов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, система управления, бортовой контроллер, радиоканал, роботизированное устройство.

Yaroviy A.V.

National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute»

**THE CHOICE OF THE OPTIMAL MODEL OF A UNMANNED FLIGHTING
UNIT AND CONTROL SYSTEMS FOR IMPLEMENTATION
OF TASKS FOR MONITORING GROUND OBJECTS****Summary**

The analysis of various classes and types of existing unmanned aerial vehicles is carried out. A number of advantages of unmanned aerial vehicles in front of manned aircraft are considered. A version of the use of an unmanned aerial vehicle for data transmission between the ground control center and the base unit of the monitoring system is given. The structure of the layout of an unmanned aerial vehicle with a robotic device is considered. Recommendations are given on the selection of optimal models of unmanned aerial vehicles and control systems for performing tasks to monitor land-based facilities.

Keywords: unmanned aerial vehicle, multicopter, control system, on-board controller, radio channel, robotic device.