

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни

«Загальні знання дистанційно пілотованих суден:

Схемотехніка безпілотних літальних апаратів»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

за темою № 2 – Польотний контролер

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1.

Розробник: викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист
Волканін Є.Є.

Рецензенти:

1. Доцент кафедри електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», к.т.н. Шокарьов Д.А.
2. Професор циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., спеціаліст вищої категорії Гаврилюк Ю.М.

План лекції:

1. Польотний контролер.
2. Принцип роботи інтегрального гіроскопу.
3. Принцип роботи інтегрального акселерометра.
4. Принцип роботи інтегрального магнітометра (компас).
5. Улаштування інтегрального барометра.
6. Улаштування ультразвукового сонару.
7. Польотний контролер MultiWii AIOP.

Рекомендована література:

Основна література:

1. Теорія і практика застосування безпілотних літальних апаратів (дронів) / КНТ, 2023. – 126 с.
2. МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ “КОМАНДИРУ ПІДРОЗДІЛУ ПО ЗАСТОСУВАННЮ БпАК ТАКТИЧНОГО РІВНЯ” (за досвідом проведення ООС (раніше АТО), О.О. Павлишен (керівник розробки), Г.М. Тимчук, Т.В. Цокур, 2018. – 72 с.
3. UAV Based Remote Sensing, Volume 2, Special Issue Editors Felipe Gonzalez, Toro Antonios Tsourdos, 2017. – 406 p.
4. Aircraft General Knowledge 2 - Electrics and Electronics - 2014

Допоміжна література:

1. Unmanned aircraft systems : UAVS design, development and deployment / Reg Austin. This edition first published 2010. – 365 p.
2. Theory, design, and applications of unmanned aerial vehicles / A. R. Jha. Boca Raton, FL : CRC Press / Taylor & Francis Group, [2016]. 317 p.
3. SMART AUTONOMOUS AIRCRAFT Flight Control and Planning for UAV. Yasmina Bestaoui Sebbane, Université d'Evry, France. 2016 by Taylor & Francis Group, LLC – 434 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті:

1. [https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/\[bpla\]_ua_dynamic_s_brochure.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/[bpla]_ua_dynamic_s_brochure.pdf)
2. [https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/\[bpla\]_zastosuvannya_bpak_takty%60chnogo_rivnya.pdf](https://nvkarta.com/project/library/uploads/military/bpla/[bpla]_zastosuvannya_bpak_takty%60chnogo_rivnya.pdf)
3. <https://defence-ua.com/tags/389/>

Текст лекції

1. Пільотний контролер.

Навіщо взагалі потрібний спеціальний пільотний контролер — обчислювальна система, яка працює в реальному часі за досить складними алгоритмами? Очевидно, що квадрокоптер необхідно безперервно стабілізувати, парируючи пориви вітру та неоднорідність повітряних мас, а можливостей людського організму для цього недостатньо. Сучасний пільотний контролер оснащений набором мініатюрних інтегральних сенсорів, що безперервно відстежують положення рами в просторі, кутові прискорення, що впливають на неї, атмосферний тиск і напрямок силових ліній магнітного поля. Класичним пристроєм для стабілізації об'єкта у просторі чи виміру кутових прискорень є гіроскоп. Всі ми зі шкільних уроків фізики знаємо про механічний гіроскоп-дзига або про маховик, що обертається у вільному підвісі. При спробі змінити кутове положення осі маховика, що обертається, виникає протидіюча сила. У тривимірному просторі довільна зміна положення рами квадрокоптера можна розкласти на обертання по трьох взаємно ортогональних осях. Відповідно, виникають миттєві кутові прискорення щодо кожної з цих осей. Ці прискорення можуть бути виміряні та використані для вироблення компенсуючої реакції в системі зі зворотним зв'язком, яким у нашому випадку є квадрокоптер, оснащений пільотним контролером. Сучасні датчики положення та прискорень є інтегральними мікросхемами розмірами в кілька міліметрів. Усередині них знаходиться складна електромеханічна структура з пружних підвісів, грузиків, пружин, конденсаторів та електронної частини для посилення та обробки сигналів. Такі пристрої прийнято позначати аббревіатурою МЕМС (MEMS - MicroElectroMechanical System).

2. Принцип роботи інтегрального гіроскопу.

Чутливим елементом інтегрального гіроскопа зазвичай є два мініатюрні грузики, що коливаються на пружному підвісі в протилежних напрямках (рис. 1). Джерелом коливань грузиків є гребінчасті електростатичні двигуни. Вантажі, разом з електродами, розташованими на підкладці, утворюють конденсатори, що входять до складу диференціальної схеми, що виробляє сигнал, пропорційний різниці ємностей конденсаторів. Лінійне прискорення однаково впливає на обидва грузики та підкладку, тому сигнал на виході диференціальної схеми не з'являється. Коли виникає обертальне прискорення по осі z , то на вантажі починає діяти сила Коріоліса F_C , відхиляючи вантажі в протилежних напрямках. Відповідно, ємність одного конденсатора збільшується, а іншого зменшується, що породжує різницевий сигнал, пропорційний величині кутового прискорення. Спочатку, при включенні, різницевий сигнал на виході гіроскопа не нульовий, тому потрібна процедура стартового калібрування, коли мікроконтролер опитує показання гіроскопів у стані спокою і приймає їх за нульові. Під час калібрування не можна рухати коптер.

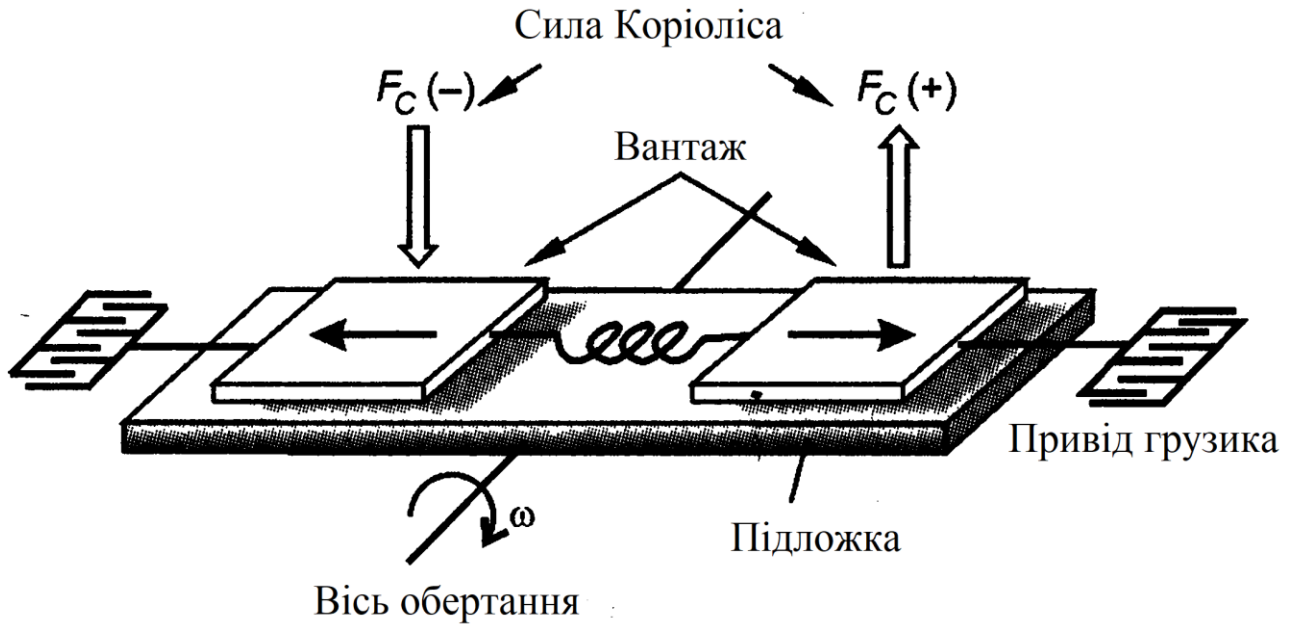


Рисунок 1. Улаштування інтегрального гіроскопа

Але чому конструкції квадрокоптера не можна обійтися найпростішою системою стабілізації на основі гіроскопів, по одному на кожну вісь обертання? Навіщо потрібні інші датчики та мікроконтролер зі складною програмою? У реальних умовах квадрокоптер не відхиляється ідеально лише по одній осі. У випадку відхилення комбіноване, з певним співвідношенням між осями. З цієї причини необхідно пристрій, який оброблятиме сигнали від усіх гіроскопів і формуватиме керуючі сигнали для регуляторів обертів моторів. Наприклад, під впливом випадкового пориву вітру квадрокоптер відхилився по діагоналі назад праворуч. Отже, керуюча система має збільшити обороти правого заднього мотора і зменшити лівого переднього, відхиляючи раму вперед ліворуч. Але мотори, регулятори та пропелери не ідеально однакові, і команду вони відпрацюють по-різному. Виникне некомпенсований реактивний момент, що крутить. Отже, одночасно з вирівнюванням квадрокоптера в обрій польотний контролер повинен оперативно внести корективи в обороти іншої пари моторів, щоб компенсувати обертання за курсом. І це найпростіший приклад, в якому ми не враховуємо, що в той же час з пульта можуть надходити сигнали управління. Втім, з обчислювальним завданням для системи з трьома гіроскопами здатний впоратися недорогий мікроконтролер початкового рівня. Зараз за таким принципом влаштовані прості іграшкові квадрокоптери.

Такі іграшки непогано літають у приміщенні, але для керування ними необхідно постійно візуально контролювати, в якому положенні знаходиться квадрокоптер. Нагадаємо, що інтегральний гіроскоп - це всього лише датчик кутового прискорення. Для нього немає поняття "верх" або "низ", і йому байдуже, в якому статичному положенні щодо горизонту він знаходиться. Він лише показує миттєве кутове прискорення щодо початкового становища. Як тільки зовнішній вплив почне повертати раму квадрокоптера навколо однієї з

осей, від відповідного гіроскопа негайно надійде сигнал на процесор польотного контролера. У відповідь контролер скоригує обороти моторів так, щоб компенсувати прискорення. Але як тільки зовнішня дія припиниться, кутове прискорення стане рівним нулю, і на підставі сигналів лише гіроскопів контролер не дізнається, чи повернувся квадрокоптер у вихідне положення. Це завдання оператора, яке він може вирішувати лише за візуальної контролю.

А тепер уявіть, що командою з пульта відхилили квадрокоптер на п'ять градусів вправо, а потім повернули рукоятку пульта в нейтральне положення. Відповідно до сигналу пульта контролер зробить обороти всіх моторів однаковими, але це зовсім не означає, що квадрокоптер повернеться в горизонтальне положення. Гіроскопам наявний статичний нахил буде байдужим. Немає кутового прискорення - на виході гіроскопа нульове значення. Крім того, гіроскоп має обмежену чутливість: повільне обертання просто не помітить. У разі гіроскопічної стабілізації оператор повинен вирівняти коптер вручну. Насправді, квадрокоптер, оснащений лише гіроскопами, неспроможна стабільно висіти більше хвилини навіть у приміщенні. Далі потрібно вручну парити його дрейф. Свій вплив на показання гіроскопів мають зміна температури корпусу та кутові прискорення, що виникають при обертанні Землі. Отже, для більш просунутої конструкції польотного контролера необхідний датчик, що показує положення квадрокоптера щодо земної поверхні (якщо точніше, то щодо вектора прискорення вільного падіння; який завжди спрямований перпендикулярно до земної поверхні, до центру Землі). Такий датчик є у кожному сучасному смартфоні чи планшеті та називається акселерометром.

3. Принцип роботи інтегрального акселерометра.

Акселерометр - це МЕМС-пристрій, який вимірює лінійні прискорення. До складу інтегрального акселерометра входять чутливий елемент та електронна частина, що здійснює попередню обробку сигналу. У дуже спрощеному вигляді чутливий елемент являє собою струмопровідний вантаж на гнучкому підвісі, поміщений між двома електродами (рис. 2.).

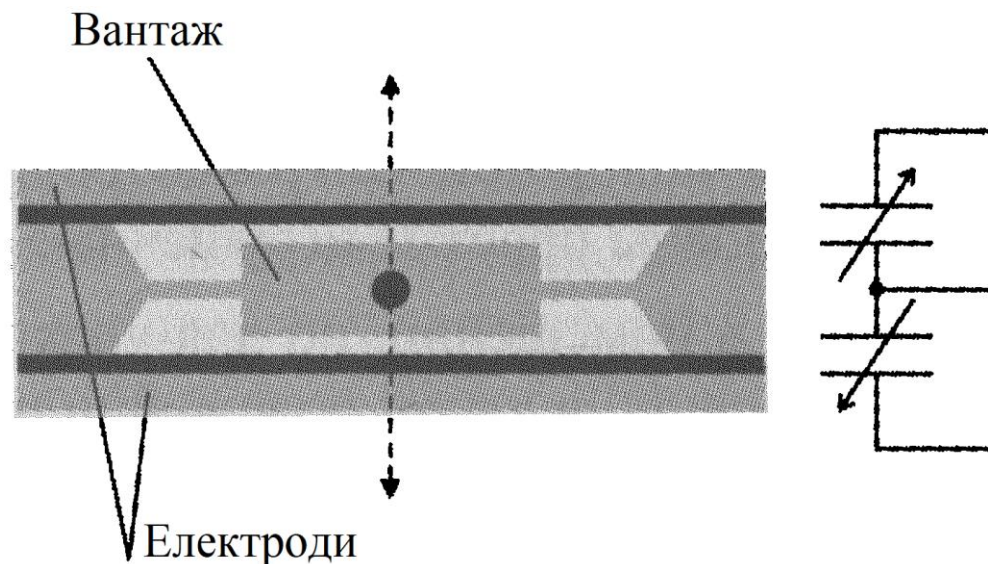


Рисунок 2. Улаштування чуттєвого елемента акселерометра і його еквівалентна електрична схема

Грузик і електроди утворюють два конденсатори. При зміщенні вантажу під впливом прискорення ємність одного конденсатора зменшується, а іншого збільшується. Так як заряд конденсаторів постійний, змінюється напруга на висновках конденсаторів. Ця зміна вимірюється вбудованою електронною схемою, результат вимірювання в цифровому вигляді видається у відповідь запит зовнішнього обчислювального пристрою. Результат може бути як позитивним, і негативним залежно від напрямку вектора прискорення.

Реальний сенсор акселерометра влаштований значно складніше, у ньому деталі конструкції виконують кілька функцій одночасно. Але для розуміння принципу роботи спрощеної схеми достатньо.

Усі сучасні інтегральні акселерометри, як правило, триосьові. Три сенсори розташовані всередині одного корпусу мікросхеми перпендикулярно до осей x , y і z . Вектор діючого на пристрій прискорення обчислюється мікроконтролером через проєкції вектора на три осі. Навіть якщо пристрій перебуває у спокої, на нього діє прискорення вільного падіння g . Вектор спрямований вертикально вниз, до центру Землі. Якщо корпус акселерометра розташований строго горизонтально, вектор земного тяжіння збігається з віссю z і прискорення діє тільки на один сенсор. Але варто нахилити акселерометр, як з'являться складові вектора g по осях x і y , а складова по осі z пропорційно зменшиться. З величин проєкцій вектора земного тяжіння на осі та його знака мікроконтролер обчислює нахил квадрокоптера. Саме за таким принципом ваш смартфон чи планшет визначає орієнтацію екрана.

Оскільки датчики акселерометра не ідеально однакові і друкована плата може бути змонтована не рівно, перед початком експлуатації акселерометр необхідно відкалібрувати: помістити пристрій строго горизонтально і повідомити бортового контролера, що поточні показання акселерометра відповідають горизонталі. Відповідні коригувальні константи записуються у вбудовану пам'ять мікроконтролера. У цьому полягає відмінність між

процедурами калібрування гіроскопа та акселерометра: гіроскоп калібрують після кожного включення живлення, а також при тривалій перерві між зльотами, а акселерометр одноразово після закінчення зборки коптера. Після зміни версії прошивки контролера або зміни конструкції квадрокоптера необхідно відкалібрувати акселерометр заново!

Істотним недоліком MEM8-акселерометрів є висока чутливість до вібрацій. Але вібрації — постійний супутник гвинтокрилих апаратів, тому потрібно вживати особливих заходів щодо віброізоляції, також балансування повітряних гвинтів і моторів.

Саме поява доступних за ціною триосьових акселерометрів визначила вибухове зростання популярності квадрокоптерів. Ще кілька років тому акселерометри були переважно двоосьовими, а триосьові коштували дуже дорого і були рідкістю. З появою ігрової приставки Nintendo Wii та ігрових маніпуляторів WiiMotionPlus та Nunchuk ситуація кардинально змінилася. Малогабаритні триосьові інтегральні акселерометри та гіроскопи стали доступними за цілком розумними цінами. Перші ентузіасти купували плати маніпуляторів Nintendo та підключали їх до обчислювача на основі модуля Arduino. Потім до процесу підключилися китайські виробники, які почали масове виробництво польотних контролерів з повним набором сенсорів "на борту". Звідси історично походить назва однієї з найпопулярніших відкритих прошивок MultiWii та плати контролера MultiWii All-In-One (MWI AIOP).

Завдяки тому, що акселерометр визначає положення квадрокоптера щодо горизонталі, стає можливим автоматичне вирівнювання пристрою (автогоризонт). Як тільки ручки керування на пульті повернулися в нейтральне положення, політний контролер сприймає це як команду вирівняти квадрокоптер у горизонтальне положення, яке ви задали під час калібрування. Є й інші позитивні моменти використання акселерометра. Припустимо, командою з пульта ми нахилили квадрокоптер для польоту вперед. Щоб компенсувати зменшення вертикальної тяги, необхідно рівномірно збільшити обороти всіх двигунів пропорційно нахилу. За відсутності акселерометрів можна приблизно обчислити нахил квадрокоптера через кутове прискорення, його тривалість і величину сигналу, що управляє, з пульта. Але простіше і точніше кут нахилу обчислюється за даними з акселерометрів.

Зрозуміло, акселерометри вимірюють не тільки прискорення вільного падіння, але й лінійні прискорення по кожній осі при русі квадрокоптера. У ряді випадків ця інформація теж корисна.

З іншого боку, коли треба швидко визначити швидкість і знак кутового прискорення, простіше використовувати гіроскоп, який також видає ці дані точніше і в готовому вигляді. Таким чином, кожен сенсор добрий для свого завдання. У сучасних MEMS-мікросхемах триосьові гіроскопи та триосьові акселерометри часто об'єднують в одному корпусі з розмірами близько 3x3x1 мм. У цьому корпусі знаходиться електронна схема для попередньої цифрової обробки даних, із зовнішнім протоколом обміну SPI чи I²C.

Щоб визначити курсовий напрямок рами квадрокоптера, потрібен ще один датчик - інтегральний компас, або магнітометр. Квадрокоптер може летіти як завгодно, вбік, назад, або по діагоналі, тому "вперед" у нашому випадку - це умовний напрямок рами та контролера, щодо якого визначається фактичний напрямок польоту. На платі контролера напрямок "вперед" зазвичай позначається стрілкою.

4. Принцип роботи інтегрального магнітометра (компаса).

В основі конструкції інтегрального магнітометра (рис. 3.) лежить анізотропний магніторезистивний ефект. Чутливий елемент виготовляється з пермал лівой плівки, здатної змінювати свій опір в залежності від напрямку струму, що протікає через неї, і напрямки вектора її намагніченості. У свою чергу, вектор намагніченості плівки визначається напрямом силових ліній магнітного поля, в якому знаходиться чутливий елемент.

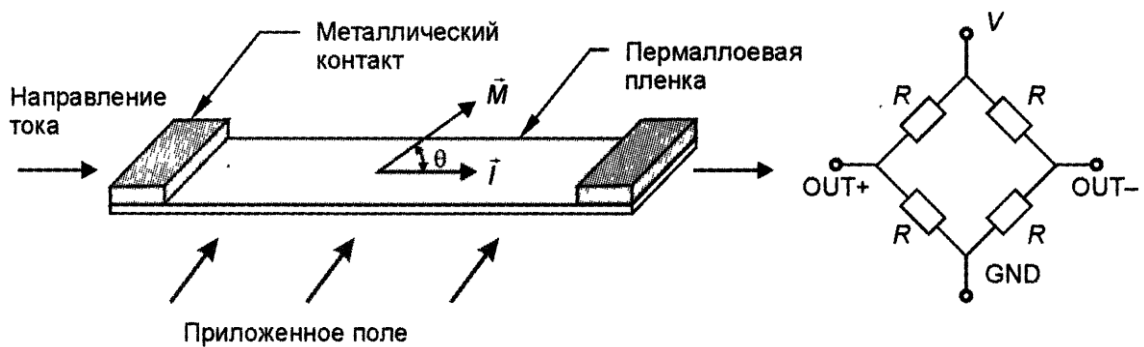


Рисунок 3. Улаштування інтегрального магнетометра

Чотири пермалоеві елементи з'єднуються у вимірювальний міст (див. рис. 3). При подачі постійної напруги на міст датчик починає вимірювати інтенсивність зовнішнього магнітного поля, спрямованого вздовж чутливої осі. Мостовий датчик має вісь кращого намагнічування, так звану легку вісь, і найбільш чутливий до полів, спрямованих перпендикулярно до цієї осі. У квадрокоптерах застосовуються триосьові інтегральні магнітометри, що складаються з трьох незалежних датчиків, орієнтованих по трьох ортогональних осях та електронної схеми. У специфікації магнітометра завжди вказують напрямок осей щодо корпусу (рис. 4).

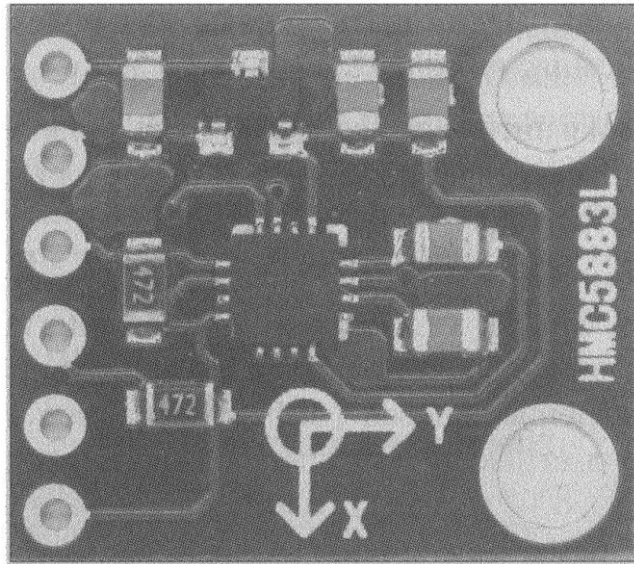


Рисунок 4. Магнітометр HMC5883L на платі розширення

Магнітометри не схильні до вібрації, але на їх показання впливають зовнішні близько розташовані металеві предмети. Перешкоди можна поділити на три основні класи.

- "Спотворення твердого заліза" (Hard Iron Distortion) - до магнітного поля землі додається постійне магнітне поле від намагнічених предметів, наприклад магніту звуковипромінювача. Намагніченими можуть бути навіть висновки радіодеталей, виготовлені із лудженого заліза. Ця постійна складова може бути виключена при калібруванні.

- "Спотворення м'якого заліза" (Soft Iron Distortion) - магнітне поле спотворюється сторонніми предметами, що не мають власної намагніченості. Наприклад, сплави нікелю пермалою спотворюють силові лінії поля. Такі спотворення залежать від положення об'єкта у просторі та важче компенсуються. На щастя, у конструкції квадрокоптера зазвичай немає таких предметів. Деталі зі сплавів алюмінію та міді не вносять спотворення.

- Динамічні чи вихрові перешкоди. Це специфічна особливість електричних літальних апаратів, особливо коптерів. Потужні струми, що протікають через провідники силових ланцюгів та батарею, породжують магнітні поля у навколишньому просторі. Причому напруженість цих полів постійно змінюється залежно від навантаження на двигуни.

Іноді магнітні перешкоди настільки сильні, що унеможливають використання компаса і навіть здатні призвести до аварії. На жаль, змінні магнітні поля неможливо компенсувати програмно і доводиться застосовувати спеціальні конструктивні заходи. Для зменшення наведень мікросхему компаса намагаються виносити з плати контролера і піднімати нагору на 10-20 см над рамою. При укладанні силових проводів слід уникати утворення петель, всі дроти повинні мати мінімальну довжину. Силові дроти рекомендується перекручувати. Втім, у квадрокоптерах початкового рівня цілком можна

обходитися без компаса і за наявності магнітних перешкод просто вимикати його в налаштуваннях.

Малогабаритні контролери, призначені для польотів усередині приміщення, очевидно компас не містять.

Перед початком польотів магнітометр необхідно калібрувати, провівши процедуру обертання коптера по всіх осях. Деталі цієї процедури можуть залежати від застосовуваної прошивки контролера.

Перед початком польотів магнітометр необхідно калібрувати, провівши процедуру обертання коптера по всіх осях. Деталі цієї процедури можуть залежати від застосовуваної прошивки контролера.

Завдяки наявності компаса можливий цікавий режим польоту, що називається Headfree. У цьому режимі фіксується курсове положення квадрокоптера на момент активації моторів. Якщо в процесі польоту розгорнути раму квадрокоптера Yaw, то умовний напрямок "вперед", зафіксований при зльоті, не зміниться. При нахилі правого етика пульта вперед квадрокоптер завжди летітиме вперед, при нахилі вправо завжди вправо і т. д., незалежно від того, як в даний момент розгорнута рама. Вважається, що цей режим зручний для пілота-початківця, а також при польотах на великому видаленні, без відеоканалу і засобів телеметрії, коли візуальний контроль над положенням рами утруднений. Якщо пілот випадково розгорнув квадрокоптер, це не позначиться на управлінні і допоможе уникнути аварії.

Використовуючи компас, при налаштуванні квадрокоптера не забудьте вказати такий параметр, як магнітне відмінювання (не плутайте з магнітним способом) для своєї місцевості. Магнітне відмінювання - це кут між географічним і магнітним меридіанами в точці земної поверхні. Магнітне відмінювання вважається позитивним, якщо північний кінець магнітної стрілки компаса відхилений на схід від географічного меридіана, і негативним - якщо на захід. Значення магнітного відмінювання використовується визначення справжнього меридіана за показанням магнітного компаса. Дізнатися значення магнітного відхилення своєї місцевості можна на сайті www.magnetic-declination.com або <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>. Зауважте, що послуги дають значення в градусах і хвилинах, але при налаштуванні компаса використовується значення в градусах і десяткових частках градуса.

Залишився ще один важливий параметр польоту – висота. Стабілізація висоти важлива як для комфортного керування квадрокоптером, так і для безпечного польоту, особливо в режимі автоматичного повернення до точки старту GPS. Для вимірювання висоти в квадрокоптерах використовують або інтегральний барометр, або зовнішній ультразвуковий сонар, або обидва пристрої одночасно. Оскільки вони обидва виконують однакове завдання, ми трохи забіжимо вперед і розглянемо переваги та недоліки ультразвукового сонара у цьому розділі, хоч сонар і є додатковим обладнанням.

5. Улаштування інтегрального барометра.

Вимір висоти польоту барометричним методом заснований на залежності атмосферного тиску від висоти. Чим більша висота, тим нижчий атмосферний тиск. У мініатюрних інтегральних барометрах застосовується, як правило, тензорезисторний або п'єзореzonансний датчик. У першому випадку чутливим елементом є тензорезистор (рис. 5), що змінює опір в залежності від ступеня деформації під впливом атмосферного тиску. У другому випадку на п'єзоелемент подають змінну електричну напругу, змушуючи її коливатися під дією зворотного п'єзоефекту. Власна резонансна частота елемента, при якій напруга на електродах п'єзоелемента максимально, залежить від ступеня деформації елемента.

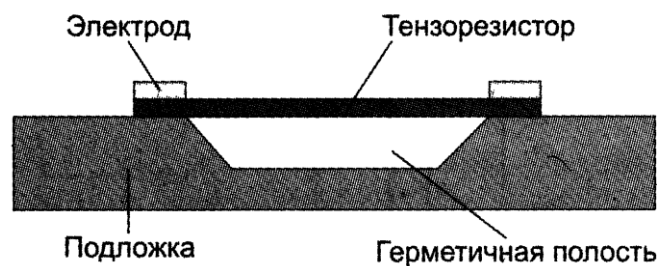


Рисунок 5. Улаштування тензорезистивного датчика атмосферного тиску

Істотним недоліком цих датчиків є виражена залежність результатів вимірювання від температури навколишнього середовища та великий розкид вихідних даних між екземплярами. Для термокомпенсації всередину корпусу вбудовують терморезистор і при вимірюваннях враховують його опір як компенсуючий параметр. Для усунення конструктивної неоднорідності кожен екземпляр інтегрального барометра калібрують на заводі, записуючи в його пам'ять калібрувальні константи.

На виході барометра ми отримуємо не абсолютне значення тиску, а таке собі "сире" значення, з якого тиск розраховується шляхом обчислень з плаваючою точкою, враховуючи калібрувальні константи і поточну температуру корпусу. Формули для розрахунків наводяться у специфікації мікросхеми.

Стосовно квадрокоптерів нас зазвичай цікавить не висота над рівнем моря, а висота щодо точки зльоту. Тому в момент активації двигунів перед зльотом поточний тиск повітря приймається відповідним нульовою висотою. На жаль, навіть протягом одного 10-хвилинного польоту атмосферний тиск може змінитися настільки сильно, що це буде відповідати перепаду висоти 2-3 м. Особливо це характерно для нестійкої передгрозової погоди.

Барометр слід захищати від прямих потоків повітря. Зазвичай для цього використовують шматочок крупнопористого поролону, яким прикривають отвір сенсора, або поміщають польотний контролер у захисний кожух. Також слід захищати барометр від попадання прямого сонячного проміння на сенсор через отвір у корпусі. Теоретично сучасні інтегральні барометри здатні вимірювати висоту з точністю в кілька сантиметрів, проте коли барометр

змонтований, на квадрокоптері і поряд з ним гвинти, що несуть, прокачують потоки повітря, а на це накладаються флуктуації щільності повітряних мас різної температури, таку точність реалізувати практично неможливо. До вібрацій барометри нечутливі.

6. Улаштування ультразвукового сонару.

Ультразвуковий сонар (датчик відстані) складається з генератора ультразвуку, випромінювача, приймача та підсилювача-формуєвача вихідного сигналу (рис. 6).

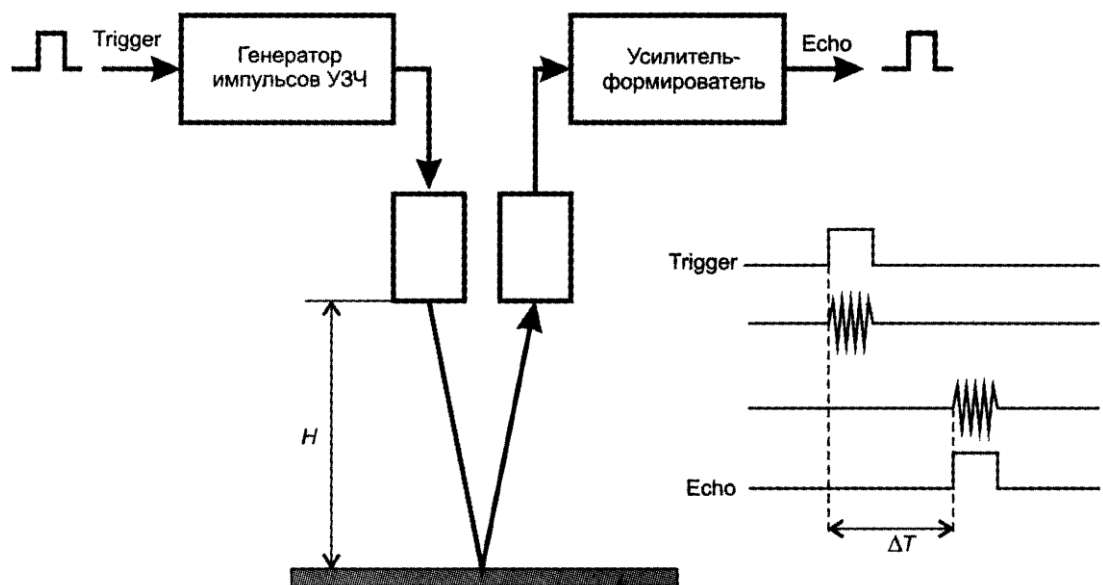


Рисунок 6. Улаштування ультразвукового сонару

Найпростіші сонари не містять власного мікроконтролера і працюють під керуванням зовнішнього пристрою. Коли на вхід Trigger приходить пусковий імпульс, електронна схема сонара генерує короткий пакет коливань ультразвукової частоти, що надходить на випромінювач. Відбившись від твердої поверхні, коливання надходять на приймач і далі на підсилювач формуєвач, на виході якого формується імпульс Echo (луна) з логічним рівнем. Зовнішній пристрій обчислює відстань до поверхні через інтервал часу між фронтами пускового імпульсу та луни за формулою

$$H = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta T}{v},$$

де v - швидкість звуку, ΔT - різниця часу між фронтами пуску і луни. Оскільки звук двічі проходить відстань H ми беремо $1/2$ обчисленого значення. Більш складні сонари містять вбудований контролер, самостійно виконують процес вимірювання, роблять фільтрацію та усереднення результатів вимірювання та видають готове значення відстані за протоколом I²C або SPI.

Як барометр, так і сонар мають специфічні недоліки. При польоті на малій висоті квадрокоптер створює не лише ефект повітряної подушки, а й зону завихрень та нестабільного тиску навколо себе. Чим більший квадрокоптер, тим

помітніший цей ефект. Як показує досвід, барометр квадрокоптера середнього розміру починає працювати стабільно на висоті понад п'ять діагоналі рами, тобто більше 2 м від земної поверхні.

Популярні ультразвукові сонари вимірюють дистанцію з точністю до одного-двох сантиметрів, але працюють на дуже обмеженій відстані до поверхні, що відбиває, як правило, не більше 3-4 м. Сонарам байдужі потоки повітря, але вони вкрай чутливі до якості поверхні, що відбиває. Трава, орана земля, сніг, бриж на воді - такі поверхні розсіюють ультразвуковий імпульс або вносять великі спотворення. Тому застосування сонара виправдане при польотах у закритих залах, де висота польоту якраз відповідає робочій дальності сонара, а підлога добре відбиває ультразвук. Слід також враховувати, що сонар правильно показує висоту при горизонтальному положенні коптера. Щойно рама нахиляється і імпульс ультразвуку відбивається убік під кутом до підлоги, сонар стає марним.

В даний час навіть у відкритих прошивках вирішено проблему стабільного утримання висоти за допомогою комбінації барометра та акселерометра. При утриманні висоти логічно припустити, що й показання барометра змінилися, але акселерометр показує вертикальне прискорення, то напевно це флуктуація показань барометра. Насправді алгоритм досить складний, треба враховувати кінцеву чутливість акселерометра і барометра, тривалість і швидкість зміни показань сенсорів, правильно задати вагові коефіцієнти впливу цих сенсорів при розрахунках і т. д. Міркування на цю тему виходять за рамки книги, обмежимося лише констатацією факту, що використання барометра дозволяє в безвітряну погоду "підвісити" правильно налаштований квадрокоптер, і він стабільно висітиме без участі пілота, дрейфуючи по висоті максимум ± 20 см.

Використання сонара є виправданим для автоматичного включення посадкових вогнів при заході на посадку. Зазвичай потрібно, щоб підсвічування посадкового майданчика включалося на висоті близько 2-3 м. Барометр на цій висоті матиме велику похибку, особливо якщо під час польоту змінився атмосферний тиск, а точності сонара цілком достатньо для включення вогнів. Як приклад використання повного набору сенсорів розглянемо плату популярного польотного контролера CRIUS All-In-One Pro (AIOP) версія 2 (рис. 7).

7. Польотний контролер MultiWii AIOP.

Мікроконтролер (1) виконує обробку сигналів керуючих від радіоапаратури і показань сенсорів і формує керуючі сигнали для регуляторів обертів моторів. Найчастіше застосовуються мікроконтролери Atmel, досить швидкодіючі, недорогі та з низьким енергоспоживанням. Однак останнім часом, з удосконаленням та ускладненням обчислювальних алгоритмів, розробники все частіше упираються в обмеження швидкодії процесора та обсягу програмної пам'яті. Існують потужніші рішення, наприклад на ARM-контролерах від ST Microelectronics, і навіть екзотичні конструкції на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi.

Вбудований стабілізатор напруги 3,3 (7) необхідний для живлення мікроконтролера і сенсорів. Як правило, джерело бортового живлення має напругу 5 В, тому що саме ця напруга потрібна для живлення радіо і різних додаткових модулів.

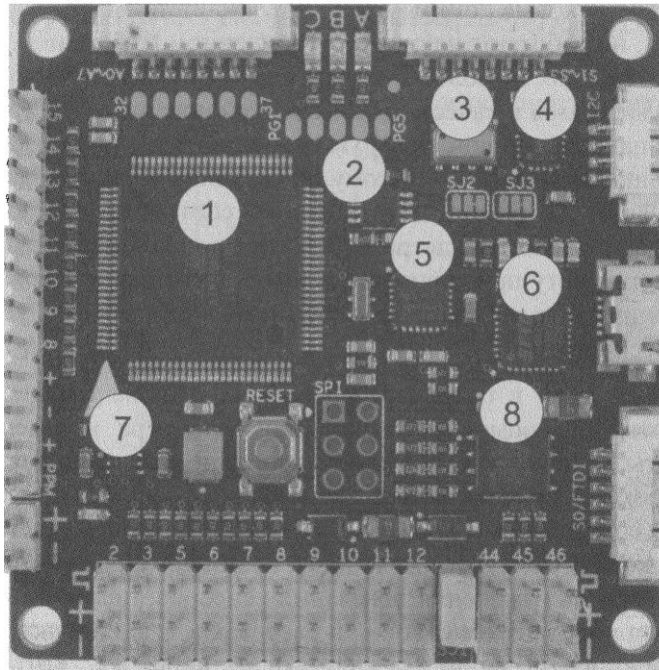


Рисунок 7. Польотний контролер MultiWii AIOP v.2:

1 – мікроконтролер ATMEGA2560; 2 – конвертер логічних рівней шини I²C PCA 9306DP1; 3 – барометр MS5611; 4 – магнітометр HMC5883L; 5 – гіроскоп + акселерометр MPU6050; 6 – адаптер USB/UART FT232RQ; 7 – стабілізатор +3.3V; 8 – флеш-пам'ять 16Mbit AT45DB161D

Конвертер рівнів шини I²C (2) використовується для узгодження логічних рівнів мікроконтролера та зовнішніх пристроїв, підключених до шини. Мікроконтролер живиться напругою 3,3 і підтримує відповідні низьковольтні логічні рівні на шині. Але деякі зовнішні пристрої, такі як модулі GPS, виносні компаси, дисплеї, можуть житися напругою 5 В. Різниця логічних рівнів між три- та п'ятивольтовими схемами може вивести з ладу мікроконтролер.

Вбудований конвертер USB-UART (6) не потрібний у процесі польоту, але він дозволяє підключити польотний контролер безпосередньо до роз'єму USB стаціонарного комп'ютера або ноутбука для запису прошивки або налаштування. Мікроконтролер обмінюється даними з комп'ютером через протокол послідовної передачі даних UART, а комп'ютерний COM-порт це одна з реалізацій протоколу UART, звана RS-232. Але навіть якщо у вашому комп'ютері ще залишився апаратний COM-порт, то безпосередньо підключати до нього висновки мікроконтролера не можна! Електричні параметри порту RS-232 істотно відрізняються від рівнів стандартної три або п'ятивольтної TTL-логіки. У протоколі RS-232 логічний нуль лежить в діапазоні від +3 до +12, а одиниця-від -3 до -12 В. Проміжок від -3 до +3 вважається зоною

невизначеності. Побутові ноутбуки взагалі не містять стандартних фізичних COM-портів. Загальноприйнятим та найзручнішим рішенням є використання спеціальних мікросхем-кон вертерів. При підключенні такої мікросхеми до USB-порту операційна система комп'ютера створює віртуальний COM-порт, який з точки зору прикладних програм нічим не відрізняється від фізичного. Через цей порт можна записувати прошивку в мікроконтролер або налаштовувати різні параметри.

Використовувати конвертер, вбудований на плату, зручніше ніж постійно підключати зовнішній. Але є важливий нюанс: як показав досвід багатьох користувачів, якщо забути відключити від контролера провід USB, можна легко вирвати з плати роз'єм microUSB. Це не означає незворотну поломку плати, в крайньому випадку можна буде використовувати зовнішній адаптер. Але все одно, будьте обережні та уважні.

Вбудована флеш-пам'ять для ведення логів (8) не є на кожному польотному контролері і для звичайних польотів також не потрібна. Але її наявність зручно в складніших випадках, коли треба проаналізувати в динаміці бортову напругу живлення, маршрут і параметри польоту або налагодити прошивку.

На плату контролера можуть бути вбудовані приймач радіоуправління, приймач GPS, передавачі відеосигналу та/або телеметрії, LCD-дисплеї і т. д., але це вже комбіновані пристрої.