

Зилевіч М.О.

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

Олійник Р.С.

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

КОНТРОЛЕР ПОЛЬОТУ З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ ТЯГОЮ НА БАЗІ STM32

У даній статті розглянуто принцип роботи системи векторного керування тягою для безпілотного літального апарата на базі мікроконтролера STM32. Проведено аналіз існуючих підходів до керування БПЛА та визначено обмеження класичних конструкцій, що працюють виключно за рахунок зміни швидкості обертання двигунів. Обґрунтовано доцільність впровадження механізму повороту двигунів у горизонтальній площині для підвищення маневровості, стабільності та швидкодії системи керування.

Досліджено апаратну реалізацію системи на основі мікроконтролера STM32F407, який завдяки своїй високій продуктивності, великій кількості периферійних інтерфейсів та підтримці роботи в реальному часі є одним із найоптимальніших рішень для задач керування динамічними об'єктами. Розглянуто вибір датчиків (інерціальний модуль ICM-20948), засобів зв'язку (LoRa-приймач ELRS 2.4G), силових драйверів та стабілізаторів живлення. Проведено детальний аналіз механічної частини поворотного блоку, включаючи сервопривід MG995-360, систему передачі зусиль та монтажних елементів, виготовлених методом 3D-друку.

Здійснено порівняння різних серій мікроконтролерів STM32 та підтверджено доцільність вибору серії F4. Визначено, що розроблена система здатна забезпечити точне та надійне керування рухом БПЛА за рахунок комбінованого використання змінного вектору тяги та класичних методів регулювання обертів. Живлення системи реалізовано на основі 4S Li-Po акумулятора з багаторівневим перетворенням напруги.

Завдяки модульній структурі, використанню стандартних компонентів та відкритих протоколів, дана система може бути використана як основа для створення експериментальних зразків БПЛА з розширеними функціональними можливостями у сферах спостереження, досліджень та автоматизованої логістики.

Ключові слова: контролер польоту, STM32, вектор керування, безколекторний двигун, сервопривід, стабілізація, MEMS, LoRa, друкована плата.

Постановка проблеми. У сучасному світі безпілотні літальні апарати (БПЛА) відіграють дедалі важливішу роль у багатьох сферах – від оборонної промисловості до цивільного використання. Особливо актуальними стають задачі підвищення маневровості, стабільності та енергоефективності таких систем, зокрема в умовах складного середовища, обмеженого простору, поривчастого вітру або необхідності виконання нестандартних маневрів.

Класична конструкція квадрокоптера передбачає зміну орієнтації апарата шляхом регулювання обертів кожного з безколекторного двигуна. Такий підхід, хоч і є широко поширеним, має низку обмежень. Зокрема, керування за рахунок зміни обертів є інерційним проце-

сом, що знижує швидкість реакції на команди керування.

Актуальною інженерною задачею є реалізація концепції векторного керування тягою, яка передбачає зміну напряму дії сили тяги без необхідності змінювати швидкість обертання двигуна. Такий підхід дозволяє досягти більш високої точності позиціонування, швидкої стабілізації та розширеної маневровості без істотного збільшення обчислювального або енергетичного навантаження [1].

Найбільше практичне значення має реалізація векторного керування на апаратах з невеликою масою та розмірами, які можуть використовуватись у приміщеннях, в обмежених зонах, для рятувальних місій, технічної розвідки, або точ-

ного позиціонування в складних умовах. Однак більшість існуючих рішень з векторним керуванням обмежуються переходом між режимами зльоту/посадки та горизонтального польоту, як у VTOL системах та тейлсітер дронах, або потребують складної механіки, непридатної для компактних дронів.

Особливу складність представляє забезпечення надійної роботи всієї системи в режимі реального часу з урахуванням обробки IMU-даних, формування PWM-сигналів до ESC і сервоприводів, а також взаємодії з пультом керування через бездротовий зв'язок. Для цього потрібен потужний і водночас енергоефективний обчислювальний модуль, зокрема мікроконтролер STM32, здатний обробляти сигнали з високою швидкістю і мінімальними затримками.

Таким чином, розробка компактного та адаптивного контролера польоту з механізмом повороту двигунів, реалізованого на базі STM32, є актуальним інженерним завданням, що відкриває нові можливості для створення високотехнологічних, швидкодіючих та гнучких платформ у сфері безпілотних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття спостерігається стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА), особливо у сфері стабілізації польоту, оптимізації енергоспоживання та реалізації векторного керування тягою. Розвиток сучасної мікроелектроніки, MEMS-сенсорів і засобів бездротового зв'язку дозволяє виводити на новий рівень точність і гнучкість керування дронами в складних умовах.

Одним з важливих напрямів є застосування систем векторного керування тягою (Thrust Vector Control, TVC), які активно досліджуються як у традиційній авіації, так і в малій безпілотній техніці. В дослідженні [2] подано концепцію системи керування швидкістю моторів БПЛА на базі мікроконтролера STM32, що дозволяє реалізувати прецизійне керування з мінімальними затримками у реальному часі.

У праці [3] представлено аналіз апаратної реалізації платформи з поворотними двигунами для квадрокоптера типу VTOL. У роботі показано переваги використання сервоприводів для досягнення стабільності у польоті при маневруванні у складних умовах.

Актуальним також є використання MEMS-інерційних сенсорів у системах стабілізації. Наприклад, у дослідженні [4] розглянуто реалізацію системи стабілізації польоту з викорис-

танням акселерометра і гіроскопа, з алгоритмами фільтрації шумів і комплементарним фільтром, що близьке до реалізації стабілізації в проєкті.

Також важливо відзначити дослідження в галузі керування безколекторними двигунами та їх драйверами. У праці [5] проведено огляд методів комутації і реалізації ШІМ-регулювання з урахуванням теплових режимів ESC та ефективності енергоспоживання.

Таким чином, наявні наукові публікації підтверджують актуальність досліджень у напрямках систем стабілізації на базі STM32, інтеграції MEMS-сенсорів, реалізації векторного керування за допомогою поворотних механізмів та енергозберігаючого керування тягою у багатороторних платформах. Результати цих досліджень створюють теоретичну основу для побудови більш гнучких, стабільних та адаптивних БПЛА, що підтримують керування вектором тяги в реальному часі, як це реалізовано у даній роботі.

Постановка завдання. З метою підвищення маневровості, стабільності та ефективності керування безпілотними літальними апаратами, особливо в умовах обмеженого простору та впливу зовнішніх збурень, постає необхідність створення системи керування, яка дозволяє змінювати напрям вектору тяги без зміни швидкості обертання двигунів. Одним з перспективних рішень є розробка контролера польоту з функцією механічного повороту двигунів у горизонтальній площині, що дозволяє змінювати напрям сили тяги в режимі реального часу.

Виклад основного матеріалу. Системи векторного керування тягою (англ. thrust vector control, TVC) дозволяють змінювати напрям прикладання сили тяги без зміни положення всього літального апарата.

Принцип дії таких систем полягає у зміні орієнтації двигунів або сопел, що створюють реактивну силу в будь-який необхідний момент в польоті, а не тільки на зліт/посадку. У випадку багатороторних БПЛА це може бути реалізовано механічним поворотом мотор-групи або окремих двигунів у горизонтальній або вертикальній площині. На відміну від класичної схеми керування, де зміна орієнтації апарата досягається шляхом регулювання обертів кожного з двигунів, векторне керування тягою дозволяє швидко змінити напрямок дії сили без інерційних затримок, характерних для електромеханічної інерції роторів.

Однією з переваг систем векторного керування є підвищена динамічна стабільність, осо-

бливо в умовах, коли традиційне керування виявляється малоефективним – наприклад, під час зависання в обмеженому просторі або при виконанні складних маневрів на низькій швидкості. Зміна вектору тяги дозволяє зменшити навантаження на систему стабілізації, підвищити точність позиціонування та покращити відгук системи керування.

У реалізованому проєкті система векторного керування реалізована шляхом синхронного повороту передньої та задньої пар безколекторних двигунів за допомогою сервоприводів. Поворот здійснюється в межах 90° у горизонтальній площині, що дозволяє змінювати напрям прикладеної тяги та реалізовувати додаткові ступені свободи в керуванні апаратом.

Таким чином, керування положенням і рухом БПЛА здійснюється не тільки шляхом зміни швидкості обертання пропелерів, а й за рахунок зміни напрямку дії сили тяги, що значно розширює функціональні можливості системи.

На рисунку 1 зображено структурну схему контролеру польоту, а далі розглянуто створення та аналіз структурної схеми.

Пристрій умовно можна поділити на шість частин.

Двигуни: Безколекторні двигуни відповідають за створення тяги, необхідної для підйому, руху та маневрування квадрокоптера.

Сервоприводи: Крокові двигуни відповідають за зміну кута нахилу пар безколекторних двигунів для більшого маневрування.

Регулятори швидкості: Регулятори швидкості забезпечують точне керування швидкістю обертання кожного безколекторного двигуна, що впливає на потужність і напрямок тяги.

Гіроскоп і акселерометр: Використовуються для вимірювання кутової швидкості та прискорення квадрокоптера, відповідно. Ці дані необхідні для стабілізації польоту.

Контролер: Мікроконтролер STM32 обробляє дані від датчиків, приймає команди з пульта управління і генерує сигнали для керування двигунами та іншими компонентами системи, є саме контролером польоту.

LoRa приймач: Для забезпечення дистанційного керування безпілотним літальним апаратом використовується модуль прийому даних за технологією LoRa. LoRa-приймач здійснює прийом команд з універсального пульта керування БПЛА і передає їх у мікроконтролер STM32 через UART-інтерфейс.

Вибір мікроконтролера. Використання мікроконтролерів сімейства STM32 є обґрунтованим з ряду важливих причин.

Широка лінійка моделей: сімейство STM32 включає велику кількість моделей із різними характеристиками – від ультраекономічних до

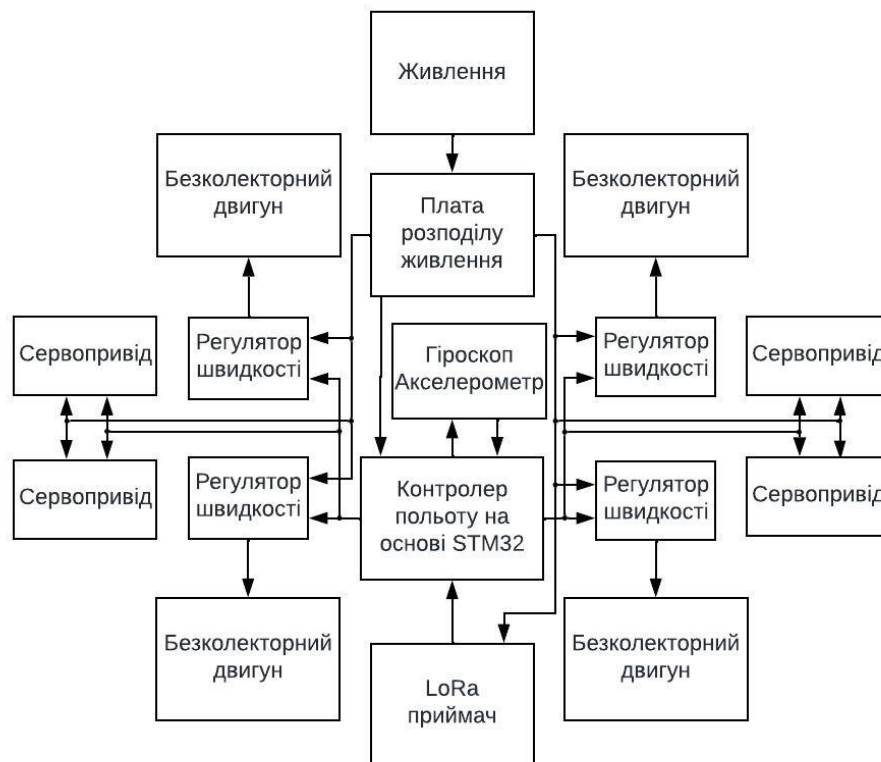


Рис. 1. Структурна схема пристрою

високопродуктивних, що дозволяє обрати оптимальне рішення для будь-якого застосування, включаючи проекти підвищеної складності, такі як безпілотні літальні апарати.

Продуктивність і обчислювальні можливості: мікроконтролери STM32 забезпечують ефективну обробку даних від численних сенсорів та надійне керування виконавчими механізмами. Крім того, STM32 оснащені широким набором вбудованих периферійних модулів: високошвидкісними ADC, PWM-таймерами, інтерфейсами UART, SPI, I2C, CAN, що істотно розширює їх функціональність.

Широкий вибір інтерфейсів: підтримка SPI, I2C, UART, USB, а також можливість роботи із зовнішніми сенсорами, сервоприводами і радіомодулями робить STM32 універсальним рішенням для інтеграції різних компонентів у єдину систему.

Надійність і довговічність: мікроконтролери STM32 мають високу стабільність роботи та великий середній час безвідмовної роботи (понад 20 років за нормальних умов), що є критичним для вбудованих систем, призначених для тривалої автономної експлуатації.

Серед розглянутих серій мікроконтролерів STM32 найоптимальнішим вибором для реалізації системи керування польотом з механізмом повороту двигунів є серія STM32F4. Вона забезпечує оптимальний баланс між продуктивністю (180 МГц), обсягом пам'яті (192 КБ ОЗП), енергоспоживанням та підтримкою периферійних інтерфейсів (PWM, I²C, UART, DMA), необхідних для обробки сенсорних даних і керування двигунами в режимі реального часу. На відміну від серій STM32H7 або STM32L4, які є або над-

мірно потужними і дорогими, або орієнтованими на енергоефективність, STM32F4 ідеально підходить для задач вбудованого керування динамічними об'єктами з високими вимогами до швидкодії [6].

Цей контролер має відмінний баланс між продуктивністю, ресурсами пам'яті та кількістю периферійних інтерфейсів, необхідних для керування двигунами, сервоприводами та обробки даних від сенсорів [6].

Отже, STM32F407VGT6 є оптимальним вибором для проекту розробки безпілотного літального апарата з системою змінного вектору тяги, оскільки поєднує в собі потужність, гнучкість, широку підтримку периферії та прийнятний рівень енергоспоживання для задач реального часу.

Вибір IMU модуля. ICM-20948 є 9-осьовим інерціальним датчиком, який інтегрує акселерометр, гіроскоп і магнітометр в одному корпусі [7].

ICM-20948 забезпечує всі необхідні вимірювання для роботи БПЛА:

- Акселерометр: для вимірювання лінійного прискорення у трьох вимірах, що використовується для стабілізації і контролю положення;
- Гіроскоп: для вимірювання кутових швидкостей, які дозволяють підтримувати орієнтацію у просторі;
- Магнітометр: для визначення напрямку відносно магнітного поля Землі, що може бути використано як компас для навігації.

Датчик має достатню обчислювальну потужність і ресурси для обробки даних із сенсора в реальному часі і водночас низьке енергоспоживання на рівні 2,5 мВт при напрузі 1.71–3.6 В.

Таблиця 1

Порівняння серій мікроконтролерів STM32

Серія	Ядро	Макс. частота (МГц)	Flash-пам'ять (КБ)	ОЗП (КБ)	DMA	ADC (розрядність)	Призначення
STM32F1	Cortex-M3	72	1024	96	Так	12-bit	Загального призначення
STM32F4	Cortex-M4	180	1024	192	Так	12-bit	Складні задачі реального часу, DSP
STM32H7	Cortex-M7	480	2048	1024	Так	16-bit	Високопродуктивні застосування
STM32L4	Cortex-M4	80	1024	320	Так	12-bit	Ультранизьке споживання
STM32G4	Cortex-M4	170	512	128	Так	12-bit	Керування аналоговими системами

Технічні характеристики ICM-20948 [6]:

- Акселерометр: $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ g;
- Гіроскоп: $\pm 125/\pm 250/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000$ dps;
- Магнітометр: ± 4900 μ T.

Блок розподілення живлення. Даний блок виконує ключову роль у системі, забезпечуючи стабільне живлення всіх компонентів пристрою та контроль руху. Він розподіляє напругу на декілька рівнів:

- Вхідна напруга від джерела живлення: від 11В до 22В, для безколекторних моторів та у DC-DC перетворювачі на периферію;
- Рівень 7 В: для компонентів середньої потужності;
- Рівень 3.3 В: для живлення низьковольтної електроніки, включаючи мікроконтролери та датчики.

Вибір датчика струму. Для вимірювання струму дрона обрано датчик INA139NA через його ключові переваги:

- Висока точність вимірювання малих і великих струмів;
- Широкий діапазон робочої напруги (від 2,7 В до 40 В), що дозволяє використовувати його з джерелами живлення для квадрокоптерів;
- Простота інтеграції завдяки низькій кількості зовнішніх компонентів;
- Невисока вартість, що робить його оптимальним для прототипу.

INA139NA забезпечує надійний контроль струму, необхідний для моніторингу та оптимізації енергоспоживання квадрокоптера [8].

Вибір операційного підсилювача. Використовується для побудови схеми зворотного зв'язку, забезпечуючи точність і стабільність регулювання вихідної напруги. Для цього було обрано операційний підсилювач LM358P, за наступні переваги:

- Низьке споживання струму та широкий діапазон робочих напруг (3–40 В), що забезпечує стабільну роботу в межах вхідної напруги перетворювача;
- Підходить для роботи у складі компенсаційної схеми стабілізації;
- Доступність і широке застосування в схемах DC-DC перетворювачів.

Вибір імпульсного перетворювача напруги. Даний компонент служить основним елементом DC-DC перетворення, виконуючи імпульсне зниження вхідної напруги до заданого рівня з високою ефективністю. Для цього було обрано імпульсний перетворювач напруги XL4016E1, за наступні переваги:

- Здатність працювати з вхідною напругою до 40 В та вихідним струмом до 8 А, що забезпечує необхідний запас потужності для живлення крокових двигунів;

- Високий ККД до 96% з мінімальними втратами енергії;

- Інтегровані функції захисту від перевантаження, перегріву та короткого замикання, що підвищує надійність роботи схеми.

Вибір лінійного стабілізатора напруги. Даний компонент забезпечує стабільне живлення для чутливих до напруги компонентів керування та логіки схеми. Для цього було обрано лінійний стабілізатор напруги AS78L05Z, за наступні переваги:

- Забезпечує стабільне живлення елементів керування, наприклад, мікросхем та логіки перетворювача;

- Компактний розмір і простота інтеграції у схему;

- Низька вартість і висока стабільність вихідної напруги.

Вибір прецизійного регулятора напруги. Такий регулятор використовується для точного налаштування напруги в ланцюзі зворотного зв'язку, підтримуючи стабільність і точність вихідної напруги. Для цього було обрано прецизійний регулятор напруги AZ431, за наступні переваги:

- Висока точність (відхилення $\leq 1\%$), що критично важливо для стабільної роботи перетворювача;

- Невеликий розмір і висока надійність.

Вибір сервопривода. Для реалізації механізму повороту двигунів у системі векторного керування тягою використано сервопривід MG995-360. Його завдання – забезпечити синхронний поворот двигунів у горизонтальній площині в межах 90°, з достатньою точністю, крутним моментом і надійністю.

MG995-360 є модифікацією класичного сервопривода MG995, яка дозволяє повертати вал на повні 360°. Завдяки цьому він може працювати як у позиційному режимі (з обмеженням кута програмно), так і в безперервному режимі обертання – залежно від прошивки та режиму керування.

Причини вибору MG995-360: високий крутний момент, достатній для обертання блоку з двигуном та пропелером без прослизання чи люфту, металева передача, доступність і низька вартість.

Вибір LoRa приймача. Для реалізації стабільного і далекого зв'язку між оператором

і безпілотним літальним апаратом (БПЛА) обрано LoRa-приймач SpeedyBee ELRS 2.4G Nano. Цей приймач працює за протоколом ExpressLRS, який забезпечує низьку затримку і високу надійність передачі команд на великі відстані.

Вибір обумовлено такими перевагами:

- Компактність і мала маса, що критично важливо для авіаційних систем;
- Підтримка UART-протоколу, що дозволяє легко інтегрувати приймач з мікроконтролером STM32;
- Висока дальність зв'язку (до кількох кілометрів) навіть у складних умовах радіозавад;
- Гнучке конфігурування та сумісність з універсальними пультами керування БПЛА;

Вбудована телеметрія та можливість роботи в асинхронному режимі. Модуль підключається до контролера польоту через UART-інтерфейс і передає керуючі сигнали для управління всіма функціями апарата [9].

Живлення. Реалізовано на основі акумуляторної батареї типу 3S-6S (літій-полімерна, LiPo), яка забезпечує номінальну напругу від 11.1 до 22.2 В. Акумулятори цього типу є стандартом

у авіамоделізмі завдяки високій питомій енергоємності, здатності до швидкого віддавання струму (високий C-рейтинг) і стабільній роботі навіть при значних навантаженнях.

Проектування друкованого вузла. З урахуванням конструктивної складності проєкту – наявності мікроконтролера, сервоприводів, ESC, LoRa-приймача та IMU-сенсора – оптимальним варіантом є двошарова друкована плата. Вона забезпечує достатній простір для трасування, дозволяє виділити окремі зони для живлення, сигналів керування і чутливих ліній сенсорів, при цьому залишаючись доступною за ціною та простою у виробництві.

Для розробки друкованої плати в межах цього проєкту використано сучасне середовище автоматизованого проектування Altium Designer. Це професійна САПР-система, яка широко застосовується у промисловості, наукових дослідженнях та освітніх проєктах для створення схематичних рішень і трасування друкованих плат.

На рисунках 2 і 3 показано 3D вигляд розробленої друкованої плати для запропонованого контролеру польоту.

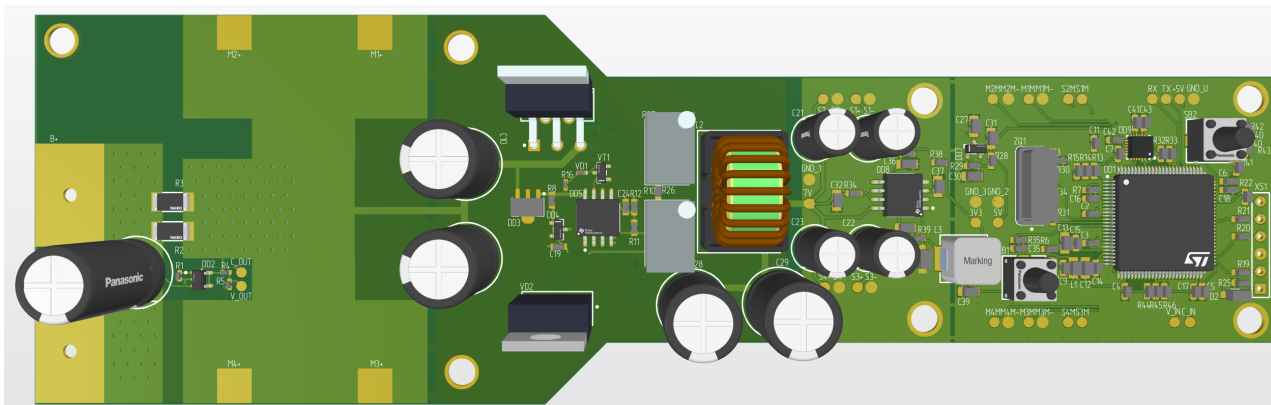


Рис. 2. 3D вигляд ДП зверху

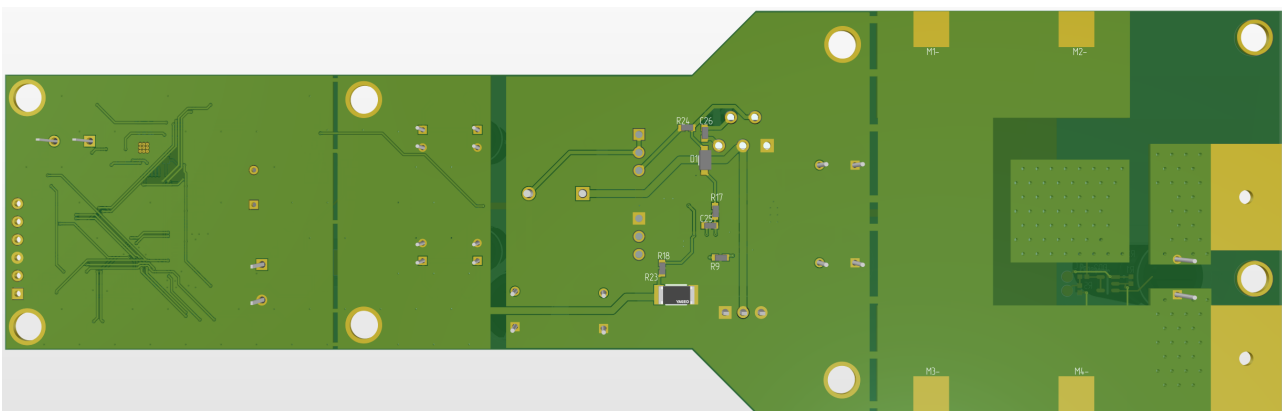


Рис. 3. 3D вигляд ДП знизу

Висновки. У роботі представлено розробку системи векторного керування тягою для безпілотного літального апарата з використанням контролера польоту на базі STM32. Актуальність теми обґрунтована потребою у підвищенні маневровості, точності стабілізації та швидкодії керування в складних умовах експлуатації БПЛА. Застосування механізму повороту двигунів дозволяє реалізувати зміну напрямку вектору тяги без необхідності зміни обертів пропелерів, що знижує інерційність системи та покращує її реактивність.

На основі аналізу літературних джерел, технічної реалізації та експериментального моделювання зроблено такі висновки:

1. Контролер STM32F407VGT6 вибрано як оптимальний варіант завдяки поєднанню високої продуктивності, достатнього обсягу пам'яті та широкого набору інтерфейсів для роботи з сенсорами, сервоприводами та модулями зв'язку. Його використання дозволило забезпечити стабільну обробку даних у реальному часі та формування керуючих сигналів з мінімальною затримкою.

2. Механізм векторного керування тягою, реалізований за допомогою сервоприводів MG995-360, дозволяє змінювати орієнтацію двигунів у горизонтальній площині. Це відкриває

нові можливості для керування апаратом при зависанні, швидкому повороті та переміщенні в обмеженому просторі.

3. Обраний IMU-модуль ICM-20948 забезпечує вимірювання лінійних прискорень, кутових швидкостей та орієнтації в просторі з високою точністю при низькому енергоспоживанні, що критично для автономних авіаційних систем.

4. Підсистема живлення, зібрана на базі імпульсного перетворювача XL4016E1 та стабілізаторів AS78L05Z, забезпечує живлення для мікроконтролера, датчиків, сервоприводів та іншої периферії у відповідному діапазоні напруг.

5. Інтеграція LoRa-приймача на базі SpeedyBee ELRS 2.4G Nano дозволила реалізувати надійний та далекобійний канал зв'язку з оператором, що забезпечує гнучке дистанційне керування та телеметрію.

Таким чином, запропонована система поєднує гнучкість векторного керування, ефективність сенсорної обробки та надійність апаратної реалізації. Вона є перспективною для застосування в автономних БПЛА, що працюють у динамічному або обмеженому середовищі, та може бути основою для подальших розробок у сфері адаптивного керування літальними платформами.

Список літератури:

1. Thrust vectoring https://en.wikipedia.org/wiki/Thrust_vectoring (дата звернення 18.05.2025)
2. C. Zhao and Z. Hua, "Design of Motor Speed Control System Based on STM32 Microcontroller", 2022 International Conference on Computation, Big-Data and Engineering (ICCBDE), Yunlin, Taiwan, 2022, P. 274–276, DOI: 10.1109/ICCBDE56101.2022.9888225.
3. J. Li, J. Sugihara and M. Zhao, "Servo Integrated Nonlinear Model Predictive Control for Overactuated Tilttable-Quadrotors", in IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 9, No. 10, P. 8770–8777, Oct. 2024, DOI: 10.1109/LRA.2024.3451391.
4. A. -L. Chan, S. -L. Tan and C. -L. Kwek, "Sensor data fusion for attitude stabilization in a low cost Quadrotor system", 2011 IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), Singapore, 2011, P. 34–39, DOI: 10.1109/ISCE.2011.5973778.
5. P. K. Sharma and A. S. Sindekar, "Performance analysis and comparison of BLDC motor drive using PI and FOC", 2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC), Jalgaon, India, 2016, P. 485–492, DOI: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955350.
6. STM32F405xx STM32F407xx Datasheet <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf> (дата звернення 12.05.2025)
7. World's Lowest Power 9-Axis MEMS MotionTracking™ Device <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2016/06/DS-000189-ICM-20948-v1.3.pdf> (дата звернення 12.05.2025)
8. S.A. Vaheed, D. Vaddavalli, A. Muralikrishna and B. Mathew, "Onboard Power Distribution and Measurement for Launch Vehicle Avionics System with reduced Umbilical Interface", 2024 IEEE Space, Aerospace and Defence Conference (SPACE), Bangalore, India, 2024, P. 634–637, DOI: 10.1109/SPACE63117.2024.10668309.
9. Z. J. R. Kamona and M. Ilyas, "Investigating the Performance of LoRa Communication for Nominal LoRa and Interleaved Chirp Spreading LoRa", 2022 International Conference on Artificial Intelligence of Things (ICAIoT), Istanbul, Turkey, 2022, P. 1–7, DOI: 10.1109/ICAIoT57170.2022.10121818.

**Zylevich M.O., Oliinyk R.M. FLIGHT CONTROLLER WITH THRUST VECTORING
BASED ON STM32**

This paper examines the operating principles of a thrust vectoring system for an unmanned aerial vehicle (UAV) based on the STM32 microcontroller. An analysis of existing UAV control approaches is presented, highlighting the limitations of classical configurations that rely solely on varying the motor rotation speed. The feasibility of introducing a mechanism for horizontal motor deflection is substantiated to improve maneuverability, system stability, and control responsiveness.

The hardware implementation of the system is explored using the STM32F407 microcontroller, which offers high performance, a wide range of peripheral interfaces, and real-time operation support—making it one of the most optimal solutions for dynamic object control tasks. The paper discusses the selection of sensors (ICM-20948 inertial measurement unit), communication modules (ELRS 2.4G LoRa receiver), power drivers, and voltage regulators. A detailed analysis of the mechanical part of the thrust vectoring block is provided, including the MG995-360 servo motor, force transmission mechanisms, and mounting components produced via 3D printing.

A comparison of different STM32 microcontroller series has been conducted, confirming the suitability of the F4 series. The developed system is determined to enable precise and reliable UAV movement control through the combined use of thrust vectoring and traditional motor speed regulation. The power supply is implemented using a 4S Li-Po battery with multi-level voltage conversion.

Thanks to its modular architecture, standard components, and open protocols, the proposed system can serve as a foundation for developing experimental UAV prototypes with enhanced surveillance, research, and automated logistics capabilities.

Key words: flight controller, STM32, thrust vectoring, brushless motor, servo motor, stabilization, MEMS, LoRa, PCB.