

КОНЦЕПЦІЯ КОМПАКТНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ АВІАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗА СКЛАДОМ АВІАЦІЙНОГО ПАЛИВА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі представлено концепцію компактного пристрою для дистанційного визначення типу авіаційної системи за складом авіаційного палива Jet A-1. Запропоновано структурну схему системи, що включає оптичний блок збору інфрачервоного випромінювання, спектрометричний модуль, газові фільтри та обчислювальний блок для класифікації літаків за спектральними ознаками продуктів згоряння. Розроблено алгоритм роботи пристрою, який передбачає реєстрацію ІЧ-сигналу, виділення маркерних смуг (CO_2 , H_2O , SO_2 , NO_x , органічні сполуки), порівняння з еталонною базою даних та визначення типу авіаційної техніки. Окремо розглянуто вплив зовнішніх чинників (вологість, температура, атмосферні гази, відстань до літака, кут огляду) на точність вимірювань та методи їх компенсації, зокрема фонове віднімання, моделювання атмосферних умов та застосування алгоритмів машинного навчання. Отримані результати підтверджують перспективність використання інфрачервоного спектрального аналізу для створення портативних систем моніторингу авіаційних викидів та ідентифікації літаків або БПЛА на великих відстанях.

Ключові слова: інфрачервона спектроскопія, БПЛА, Jet A-1, ідентифікація літаків, продукти згоряння, спектральний аналіз, алгоритм класифікації

Abstracts

This paper presents a concept for a compact device designed to remotely identify the type of aircraft system based on the composition of Jet A-1 aviation fuel. A block diagram of the system is proposed, comprising an optical unit for collecting infrared radiation, a spectrometric module, gas filters and a computing unit for classifying aircraft based on the spectral characteristics of combustion products. An algorithm for the device's operation has been developed, which involves recording the IR signal, identifying characteristic bands (CO_2 , H_2O , SO_2 , NO_x , organic compounds), comparing these with a reference database, and determining the type of aircraft. The influence of external factors (humidity, temperature, atmospheric gases, distance to the aircraft, viewing angle) on measurement accuracy and methods for their compensation—in particular, background subtraction, modelling of atmospheric conditions and the application of machine learning algorithms—are considered separately. The results obtained confirm the potential of using infrared spectral analysis to create portable systems for monitoring aviation emissions and identifying aircraft or UAVs at long distances.

Keywords: infrared spectroscopy, UAV, Jet A-1, aircraft identification, combustion products, spectral analysis, classification algorithm

Вступ

Авіація (сфера глобальної мобільності та військової тактики) [1] залишається одним із ключових чинників сучасного розвитку. Поряд із традиційними завданнями контролю повітряного простору дедалі більшої актуальності набуває ідентифікація літаків та дронів (визначення типу авіаційної техніки за паливом) [2] та безпілотних систем. Сьогодні відсутні компактні пристрої (портативні системи для аналізу палива у реальному часі) [3], здатні визначати тип авіаційної системи на основі хімічного складу продуктів згоряння авіаційного палива Jet A-1. Це створює обмеження для систем спостереження та ускладнює роботу підрозділів радіоелектронної боротьби (РЕБ) (комплекс заходів для виявлення та протидії авіаційним об'єктам) [4], які потребують точних даних для класифікації цілей на великих відстанях.

Використання інфрачервоної спектроскопії (метод аналізу газів за їхнім ІЧ-випромінюванням) [5] продуктів згоряння Jet A-1 відкриває можливість створення пристрою, що здатний реєструвати

характерні маркерні смуги газів (CO_2 , H_2O , SO_2 , NO_x , органічні сполуки) та на їх основі визначати тип літака чи дрона. Такий підхід дозволяє інтегрувати систему у комплекси РЕБ, забезпечуючи оперативне виявлення та класифікацію авіаційних об'єктів без необхідності прямого візуального контакту.

Таким чином, розробка компактного пристрою для дистанційної ідентифікації авіаційної системи за паливом Jet A-1 є актуальним завданням, що поєднує інфрачервону спектроскопію, алгоритми класифікації та потреби сучасної оборонної інфраструктури.

Результати дослідження

Структура розроблюваного пристрою для дистанційної ідентифікації авіаційної системи за паливом Jet A-1 базується на принципах інфрачервоної спектроскопії [5] та враховує обмеження існуючих рішень. Прикладом сучасного портативного аналізатора є NY-LiTE® Jet A1 Fuel Test Kit (набір для контролю якості авіаційного палива, що використовується для виявлення мікробного забруднення та води) [3]. Його головна проблема полягає у необхідності прямого дотику з паливом, що робить неможливим застосування у сфері моніторингу літальних апаратів у польоті чи у системах радіоелектронної боротьби [4]. На рисунку 1 наведено приклад такого пристрою, який демонструє сучасний рівень портативних систем контролю палива, але не вирішує завдання дистанційного аналізу.



Рисунок 1 — пристрій Jet A1 Fuel Test Kit

У запропонованій архітектурі кожен модуль виконує окрему функцію, але лише у взаємодії вони утворюють цілісну систему. Такий підхід дозволяє не тільки реєструвати продукти згоряння Jet A-1 у вихлопному шлейфі літака, але й здійснювати їхню класифікацію у реальному часі.

Описана у таблиці 1 структура демонструє архітектуру розроблюваного пристрою для дистанційної ідентифікації авіаційної системи за паливом Jet A-1. Вона складається з шести основних модулів, кожен з яких виконує свою функцію у загальному процесі: від збору інфрачервоного випромінювання вихлопу до його спектрального аналізу, селекції маркерних газів, реєстрації сигналу, обробки даних та передачі результатів. Такий підхід забезпечує логічну послідовність роботи системи та дозволяє інтегрувати її у комплекси моніторингу й радіоелектронної боротьби.

Таблиця 1 - Структура пристрою для дистанційної ідентифікації літаків за паливом Jet A-1

Модуль	Опис	Принцип роботи
Оптична система [5]	Первинний приймач інфрачервоного випромінювання від вихлопного шлейфу літака. Складається з телескопа або коліматора, які збирають і фокусують випромінювання на вхід спектрометра.	Концентрація слабого інфрачервоного випромінювання у вузький пучок для мінімізації втрат та впливу атмосфери.
ІЧ-спектрометр [5]	Центральний елемент системи, що розкладає сигнал на спектральні компоненти у діапазоні 2–15 мкм.	Перетворення складного сигналу на набір спектральних ліній, які зіставляються з еталонними даними.
Газові фільтри [2]	Селективне виділення маркерних смуг поглинання продуктів згоряння Jet A-1 (CO_2 , H_2O , SO_2 , NO_x , органічні сполуки).	Пропускання лише цільових довжин хвиль, що підвищує точність ідентифікації.
Детектори [5]	Сенсори (фотодіоди або болометри), які реєструють інтенсивність інфрачервоного випромінювання після спектрометра та фільтрів.	Перетворення оптичного сигналу на електричний для подальшої обробки.
Обчислювальний модуль [4]	«Мозок» пристрою, реалізований на мікропроцесорі або FPGA.	Аналіз спектрів, порівняння з еталонною базою та класифікація типу літака за алгоритмами розпізнавання образів.
Комунікаційний блок [1]	Модуль передачі даних на наземну станцію чи мобільний пристрій.	Використання бездротових каналів (Wi-Fi, LTE, радіо) для інтеграції у систему моніторингу та РЕБ.

Алгоритм функціонування розроблюваного пристрою для дистанційної ідентифікації базується на послідовній взаємодії його структурних модулів та враховує вплив атмосферних і експлуатаційних чинників.

Для програмної реалізації першого етапу — збору інфрачервоного випромінювання вихлопного шлейфу літака — необхідно створити модуль попередньої обробки сигналу, який працює з даними, отриманими від оптичної системи [5]. У цьому модулі реалізуються алгоритми цифрової фільтрації шумів, що компенсують вплив атмосферних чинників (хмарність, пил, вологість). Для цього застосовуються адаптивні фільтри, які автоматично змінюють параметри залежно від поточних умов середовища. Додатково програмно реалізується стабілізація сигналу, що компенсує коливання оптичної системи при зміні положення пристрою. Таким чином формується нормалізований потік даних, який є придатним для подальшого спектрального аналізу.

Другий етап — робота ІЧ-спектрометра [5] — реалізується програмно через алгоритми спектрального розкладу. Основним інструментом є перетворення Фур'є [6], яке дозволяє розкласти складний сигнал на окремі частотні компоненти у діапазоні 2–15 мкм. У програмному забезпеченні передбачено модуль калібрування, що враховує експлуатаційні чинники, зокрема температуру навколишнього середовища. При низьких температурах інтенсивність випромінювання зменшується, тому програмний модуль автоматично коригує коефіцієнти підсилення сенсорів. Крім того, реалізується функція порівняння отриманих спектральних ліній з еталонною базою даних, яка містить характерні смуги поглинання продуктів згоряння Jet A-1. Це дозволяє виділити маркерні гази навіть за умов низької інтенсивності сигналу.

На етапі роботи газових фільтрів [2] програмна реалізація передбачає створення модуля селекції спектральних даних. Після того як ІЧ-спектрометр [5] розклав сигнал на спектральні компоненти, програмний модуль виконує порівняння отриманих довжин хвиль із заданими діапазонами поглинання цільових газів (CO_2 , H_2O , SO_2 , NO_x , органічні сполуки). Це реалізується через алгоритми спектральної маски: програмно формується набір «вікон» у спектрі, які пропускають лише потрібні діапазони. Таким чином, відсікаються фонові шуми атмосфери, що не відповідають маркерним газам. Важливим експлуатаційним чинником є висота польоту літака: на великих висотах концентрація газів у вихлопі змінюється, тому програмний модуль має враховувати поправки на тиск і температуру, використовуючи базу даних атмосферних моделей, зокрема стандартну атмосферу ICAO [7]. Це дозволяє адаптувати алгоритм селекції до реальних умов польоту.

На етапі реєстрації сигналу детекторами [5] програмна реалізація полягає у перетворенні оптичного сигналу на електричний та його цифровій обробці. Для цього створюється модуль аналого-цифрового перетворення [8], який оцифровує сигнал із фотодіодів або болометрів. Далі застосовуються алгоритми компенсації температурних коливань: програмний модуль постійно контролює температуру сенсорів і коригує їхні характеристики, щоб уникнути дрейфу сигналу. Крім того, враховуються електромагнітні завади, які можуть виникати у зоні дії систем радіоелектронної боротьби [4]. Для цього реалізується програмний блок фільтрації високочастотних перешкод та алгоритми виявлення аномалій у сигналі. У результаті формується стабільний цифровий потік даних, який надходить до обчислювального модуля для подальшого аналізу.

На етапі обчислювального модуля [4] програмна реалізація передбачає створення комплексу алгоритмів для аналізу спектральних даних. Отримані від детекторів [5] цифрові потоки сигналів зіставляються з еталонною базою даних, яка містить характерні смуги поглинання продуктів згоряння Jet A-1. Для цього застосовуються алгоритми класифікації та машинного навчання, зокрема методи багатовимірної регресії, нейронні мережі та алгоритми розпізнавання образів. Важливим аспектом є врахування атмосферних чинників: зміна складу повітря при різних погодних умовах (вологість, температура, тиск) може впливати на інтенсивність спектральних ліній. Тому програмний модуль має включати блок нормалізації даних, який коригує спектри відповідно до параметрів навколишнього середовища. Експлуатаційні чинники також відіграють ключову роль: різні режими роботи двигуна (зліт, крейсерський політ, посадка) змінюють склад вихлопу, що враховується у програмному забезпеченні шляхом створення окремих моделей для кожного режиму. Це дозволяє підвищити точність класифікації та зменшити ймовірність хибних результатів.

Завершальним етапом є робота комунікаційного блоку [1], який забезпечує передачу результатів аналізу на наземну станцію або мобільний пристрій у режимі реального часу. Програмна реалізація цього етапу включає модуль кодування та захисту даних, що гарантує їхню цілісність і конфіденційність. Для передачі можуть використовуватися різні канали зв'язку — Wi-Fi, LTE або

спеціалізовані радіоканали. Важливо враховувати експлуатаційні чинники, пов'язані з якістю каналу: перешкоди, завади чи обмежена пропускна здатність можуть впливати на швидкість та точність передачі даних. Тому програмний модуль має реалізовувати адаптивні протоколи зв'язку, які автоматично змінюють параметри передачі залежно від умов середовища. Додатково передбачено механізми дублювання пакета даних та контрольні суми, що дозволяють виявляти та виправляти помилки під час передачі. У результаті користувач отримує достовірну інформацію про ідентифікацію літака за паливом Jet A-1 у реальному часі, навіть за умов дії зовнішніх завад.

Алгоритм роботи такого пристрою забезпечує послідовний технологічний ланцюг, що охоплює всі етапи — від збору інфрачервоного випромінювання до спектрального аналізу, селекції маркерних газів, реєстрації сигналу, його обробки та передачі результатів у реальному часі. Кожен етап має власну програмну реалізацію, яка враховує атмосферні та експлуатаційні чинники, що гарантує точність і надійність роботи системи навіть у складних умовах.

Схема архітектури пристрою (рисунок 2) відображає логічну структуру системи, що забезпечує узгоджену взаємодію апаратних і програмних компонентів. Вона складається з чотирьох основних блоків: сенсорного, обчислювального, комунікаційного та користувацького. Сенсорний блок включає ІЧ-спектрометр, газові сенсори (CO_2 , HC , NO_x) та температурно-тискові датчики, які формують первинні сигнали для аналізу складу палива. Обчислювальний модуль містить ADC-перетворювачі та FPGA-процесор, що виконують спектральний аналіз і класифікацію палива Jet A-1 у реальному часі. Комунікаційний інтерфейс забезпечує передачу даних через Wi-Fi або LoRa-мережі з використанням AES-шифрування, а інтерфейс користувача містить дисплей для візуалізації результатів та елементи керування для налаштування параметрів. Така архітектура дозволяє здійснювати збір, обробку та передачу даних у реальному часі з високою точністю та стабільністю навіть за складних атмосферних умов.

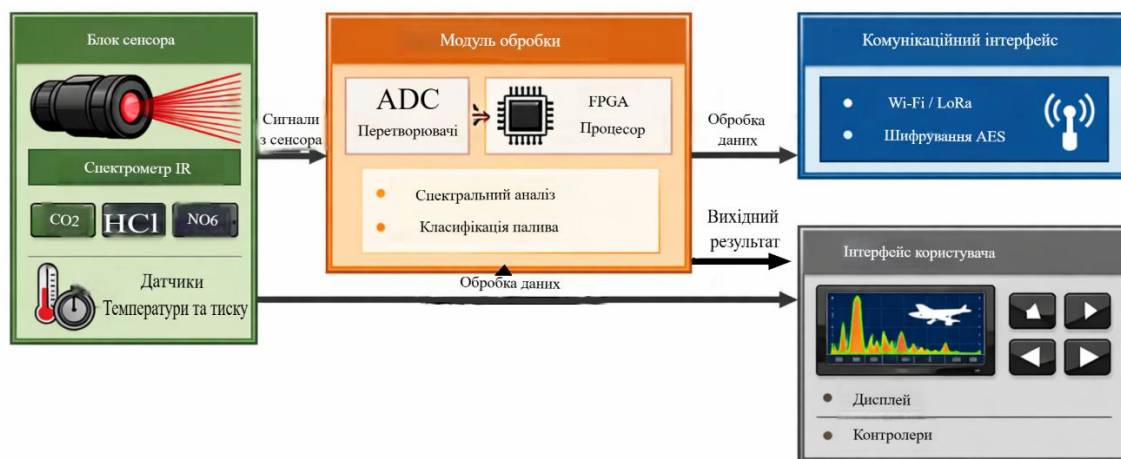


Рисунок 2 – Схема архітектури пристрою для дистанційної ідентифікації літаків.

Для реалізації програмного забезпечення доцільно використовувати комбінацію мов та інструментів. Python [9] є оптимальним для реалізації алгоритмів спектрального аналізу [6], машинного навчання та обробки великих масивів даних. Завдяки бібліотекам NumPy, SciPy, TensorFlow та PyTorch він забезпечує швидку розробку та гнучкість. C++ [10] доцільно застосовувати для модулів, що потребують високої продуктивності та роботи у реальному часі, зокрема для аналого-цифрового перетворення [8] та низькорівневої взаємодії з сенсорами. FPGA [11], реалізовані мовами опису апаратури VHDL або Verilog, ефективні для паралельної обробки спектральних даних у обчислювальному модулі [4], що дозволяє зменшити затримки та підвищити точність класифікації. Для комунікаційного блоку [1] доцільно використовувати Java [12] або C# [13], оскільки вони мають розвинені бібліотеки для роботи з мережевими протоколами, шифруванням та інтеграцією у системи моніторингу.

Висновки

У ході дослідження було сформовано повний алгоритм роботи пристрою для дистанційної авіаційної системи за паливом Jet A-1 та аналогами. Він охоплює всі етапи — від збору інфрачервоного випромінювання та спектрального аналізу до селекції маркерних газів, реєстрації сигналу, його обробки та передачі результатів у реальному часі. Така структура забезпечує комплексний підхід до аналізу вихлопних газів і дозволяє отримувати достовірні дані навіть у складних умовах.

Дослідження показало, що точність роботи системи значною мірою залежить від врахування атмосферних та експлуатаційних чинників. Вологість, температура, тиск, режими роботи двигуна та електромагнітні завади впливають на якість сигналу, тому програмна реалізація повинна включати адаптивні алгоритми компенсації та нормалізації даних.

З точки зору програмного забезпечення оптимальним є використання гібридної архітектури. Python забезпечує ефективний спектральний аналіз і машинне навчання, C++ — продуктивність у реальному часі та взаємодію з сенсорами, FPGA (VHDL, Verilog) — паралельну обробку спектральних даних, а Java та C# — стабільну роботу комунікаційного блоку з мережевими протоколами та шифруванням.

Такий пристрій матиме важливе застосування у військовій сфері. Система може використовуватися для ідентифікації літаків та БПЛА противника за типом палива, що підвищує ефективність радіоелектронної боротьби та розвідки. Завдяки здатності працювати у реальному часі навіть за умов перешкод, пристрій стає універсальним інструментом для сучасних оборонних технологій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. International Air Transport Association. Fuel Quality Pool (IFQP). Офіційний сайт. URL: <https://www.iata.org> (дата звернення: 12.05.2026).
2. ASTM International. ASTM D1655 – Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. Офіційний сайт. URL: <https://www.astm.org> (дата звернення: 12.05.2026).
3. HY-LiTE Fuel Testing. Jet A-1 Fuel Test Kit. Офіційний сайт. URL: <https://www.hy-lite.com> (дата звернення: 12.05.2026).
4. NATO Standardization Office. Electronic Warfare Doctrine. Брюссель, 2023.
5. Infrared Spectroscopy Basics. Educational resource. URL: <https://www.sciencedirect.com> (дата звернення: 12.05.2026).
6. Перетворення Фур'є. Вікіпедія — вільна енциклопедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворення_Фур%27е (дата звернення: 12.05.2026).
7. International Civil Aviation Organization (ICAO). *Official website*. — Режим доступу: <https://www.icao.int/> (дата звернення: 12.05.2026).
8. Лекція 3. Вимірювальні комп'ютерні системи. Вінницький національний технічний університет. URL: <https://mpa.vntu.edu.ua/fdb/2428/Лекція3Вимірювальнікомп.системи.pdf> (дата звернення: 12.05.2026).
9. Python Software Foundation. *Python Documentation*. — Режим доступу: <https://docs.python.org/3/> (дата звернення: 12.05.2026).
10. ISO C++ Foundation. *Standard C++ Documentation*. — Режим доступу: <https://isocpp.org/> (дата звернення: 12.05.2026).
11. IEEE Standards Association. *IEEE Standards for VHDL and Verilog*. — Режим доступу: <https://standards.ieee.org/> (дата звернення: 12.05.2026).
12. Oracle Corporation. *Java SE Documentation*. — Режим доступу: <https://docs.oracle.com/javase/> (дата звернення: 12.05.2026).
13. Microsoft Corporation. *C# Documentation*. — Режим доступу: <https://learn.microsoft.com/dotnet/csharp/> (дата звернення: 12.05.2026).

Заболотний Олександр Іванович – студент групи 2ПІ-256, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: zoleksandr06@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** кандидат технічних наук, доцент, Кафедра загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Oleksandr I. Zabolotnyi – a student of 2SE-25b group, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: zoleksandr06@gmail.com

Scientific Supervisor:

Martyniuk Volodymyr Valeriiovych PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua