УДК 629.7.05

О. С. Лиходєєв, В. В. Герасімюк

ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АЕРОМЕТРИЧНИХ СИСТЕМ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Анотація. *Доповідь присвячена дослідженню перспективних технологій розвитку аерометричних систем повітряних суден, спрямованих на підвищення точності, швидкодії та відмовостійкості формування аерометричної інформації. Досліджено сучасні підходи до вдосконалення архітектури аерометричних систем на основі цифрового перетворення, розподіленого вимірювання та комплексування інформації від різних джерел. Проаналізовано перспективи застосування оптичних лідарних технологій LADS, розподілених статичних сенсорів, удосконалених модулів аерометричних даних ADM та синтетичних аерометричних каналів. Особливу увагу приділено використанню даних INS і GNSS, математичних моделей польоту, фільтра Калмана та методів машинного навчання для формування резервної аерометричної інформації. Обґрунтовано доцільність поєднання фізичних і віртуальних каналів вимірювання, що дає змогу підвищити достовірність даних та стійкість системи до відмов окремих елементів. Визначено перспективність поетапної модернізації існуючих аерометричних систем із переходом до цифрової та розподіленої архітектури.*

Ключові слова: *аерометрична система, повітряне судно, модуль аерометричних даних, ADM, LADS, розподілені сенсори, синтетичні аерометричні дані.*

Abstract: *The paper is devoted to the study of prospective technologies for the development of aircraft air data systems aimed at improving the accuracy, response speed, and fault tolerance of air data generation. The study investigates modern approaches to improving air data system architecture based on digital conversion, distributed measurement, and the integration of information from different sources. The prospects of applying optical lidar technologies (LADS), distributed static pressure sensors, improved Air Data Modules (ADM), and synthetic air data channels are analyzed. Particular attention is paid to the use of INS and GNSS data, flight mathematical models, Kalman filtering, and machine learning methods for generating redundant air data information. The feasibility of combining physical and virtual measurement channels is substantiated, which makes it possible to improve data reliability and system resilience to individual component failures. The prospects of phased modernization of existing air data systems with a transition to digital and distributed architecture are determined.*

Keywords: *air data system, aircraft, Air Data Module, ADM, LADS, distributed sensors, synthetic air data.*

Розвиток аерометричних систем повітряних суден безпосередньо пов’язаний із підвищенням вимог до точності, швидкодії та достовірності польотної інформації. Сучасні повітряні судна використовують багатоканальні цифрові комплекси, інтегровані з навігаційними, інерціальними та іншими бортовими системами. Водночас традиційні пневматичні приймачі та магістралі залишаються джерелом низки обмежень: аеродинамічних похибок, динамічного запізнення, впливу обледеніння та залежності від технічного стану первинних приймачів [1]. Тому подальше вдосконалення аерометричних систем потребує переходу від локального підвищення точності окремих датчиків до комплексної зміни архітектури вимірювального тракту.

Аналіз еволюції аерометричних систем показує, що їх удосконалення відбувалося від автономних механічних та електромеханічних приладів до цифрових інтегрованих комплексів. Важливим етапом такого переходу стало застосування модулів ADM, які перетворюють сигнали тиску в цифрову форму безпосередньо поблизу первинних приймачів [2]. У запропонованій у роботі архітектурі ADM поєднує первинне вимірювання тиску, температурну корекцію, аналого-цифрове перетворення, взаємний контроль каналів і цифрову передачу інформації. Такий підхід створює основу для подальшої цифровізації аерометричного комплексу та його інтеграції з бортовими системами.

Одним із ключових напрямів подальшого розвитку є вдосконалення способу отримання швидкісної інформації за рахунок застосування оптичних лідарних систем LADS [3]. На відміну від традиційних пневматичних приймачів, у цьому випадку вимірювання швидкості ґрунтується на доплерівському зсуві лазерного випромінювання, розсіяного частинками атмосфери. Використання такого принципу дає змогу зменшити залежність аерометричної системи від механічних елементів, які піддаються впливу зовнішнього середовища. Особливого значення це набуває з огляду на проблему обледеніння традиційних приймачів. Отже, оптичні технології можуть стати одним із шляхів формування альтернативного каналу аерометричної інформації.

Іншим перспективним напрямом є створення розподілених мереж поверхневих сенсорів Smart Static Ports [4]. Замість використання одного приймача статичного тиску передбачається розміщення множини мініатюрних датчиків на поверхні фюзеляжу. Сигнали від окремих сенсорів можуть об'єднуватися для отримання більш достовірної оцінки параметра та виявлення локальних несправностей. Така архітектура відповідає загальній тенденції переходу до розподілених вимірювальних систем, у яких відмова окремого елемента не повинна призводити до втрати всієї інформації. У поєднанні з цифровим ADM це створює можливість побудови гнучкого багатоканального вимірювального середовища.

Водночас перспективи розвитку не обмежуються удосконаленням первинних сенсорів. Важливим напрямом є формування синтетичних, або віртуальних, каналів аерометричних даних [5]. Їх принцип полягає в математичному оцінюванні висоти, швидкості та інших параметрів за інформацією від інерціальної навігаційної системи, GNSS, кутів атаки та математичної моделі польоту. Для підвищення достовірності такої оцінки можуть застосовуватися нейромережеві алгоритми та фільтр Калмана. У результаті створюється резервне джерело інформації, здатне підтримувати формування аерометричних параметрів у разі відмови традиційних фізичних датчиків.

Застосування віртуальних каналів особливо доцільно розглядати в комплексі з резервуванням фізичних вимірювальних каналів. У дослідженні розглянуто структуру з трьома незалежними ADM та мажоритарною логікою «2 з 3». У разі відмови одного каналу результат може формуватися за даними двох справних каналів, тоді як несправний канал виключається з обробки. Подальше поєднання такої архітектури з інерціальними та супутниковими даними розширює можливості взаємного контролю та підвищує стійкість системи до одиничних відмов. Важливою умовою реалізації такого підходу є узгодження нових технологій із вимогами до надійності, інформаційної сумісності та можливістю поступової модернізації існуючих повітряних суден. Саме тому запропонований ADM може розглядатися не як ізольований елемент, а як базовий компонент переходу до цифрової аерометричної архітектури. Поетапне впровадження дає змогу спочатку модернізувати окремі канали, перевірити їх характеристики, а

надалі розширювати функціональність системи за рахунок резервування та комплексування.

При цьому кожна з перспективних технологій має власне призначення. LADS орієнтована на формування альтернативного фізичного способу вимірювання, Smart Static Ports – на підвищення просторової достовірності інформації про статичний тиск, а синтетичні сенсори – на математичне відновлення необхідних параметрів. Їх спільне застосування дозволяє сформувати багаторівневу структуру резервування, у якій фізичні та віртуальні джерела інформації взаємодіють між собою. Це особливо важливо для систем, від яких залежить робота автоматичних і навігаційних комплексів повітряного судна.

Отже, основна тенденція подальшого розвитку полягає не в заміні одного типу датчика іншим, а у створенні інтегрованого інформаційного середовища. У такому середовищі дані різних джерел проходять цифрову обробку, взаємний контроль і оцінювання достовірності. Саме комплексування дає можливість компенсувати обмеження окремих технологій і підвищити загальну стійкість аерометричної системи. Інтеграція перспективних технологій з ADIRU, автопілотом, TAWS та TCAS дає змогу використовувати єдину достовірну інформаційну основу для різних бортових комплексів. Для підтвердження ефективності таких рішень необхідне проведення послідовних наземних і льотних випробувань із оцінюванням точності, швидкодії та відмовостійкості.

За результатами дослідження можливо зробити наступні висновки:

1. Перспективний розвиток аерометричних систем пов’язаний із переходом від традиційної пневматичної архітектури до цифрових, розподілених і комплексованих вимірювальних систем.

2. Застосування ADM поблизу первинних приймачів створює основу для скорочення пневматичних трас, зменшення динамічного запізнення та безпосереднього цифрового передавання аерометричних даних.

3. Оптичні лідарні системи LADS є перспективним альтернативним засобом визначення швидкості, оскільки зменшують залежність від традиційних механічних приймачів.

4. Розподілені мережі Smart Static Ports можуть підвищити достовірність вимірювання статичного тиску та забезпечити виявлення локальних несправностей.

5. Синтетичні сенсори на основі INS, GNSS, математичної моделі польоту, нейромереж і фільтра Калмана формують додатковий резервний канал аерометричної інформації.

6. Поєднання незалежних ADM, мажоритарної логіки та комплексування з інерціальними й супутниковими даними підвищує відмовостійкість аерометричного комплексу.

7. Практичне впровадження перспективних технологій доцільно здійснювати поетапно, із розробленням вітчизняних модулів ADM та проведенням наземних і льотних випробувань.

8. Комплексування нових технологій має формувати єдине цифрове інформаційне середовище, у якому фізичні та віртуальні канали взаємно контролюють достовірність аерометричних даних.

9.

Список використаних джерел:

1. Paul Freeman, Peter Seiler, Gary J. Balas. Air data system fault modeling and detection. Control Engineering Practice, 2013. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2013.05.007.

2. SAE. ARINC 738-3: Air Data and Inertial Reference System (ADIRS) – Characteristic.

3. NASA. Advanced Air Data Systems for Commercial Aircraft. NASA Spinoff, 2006. https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/T_3.html.

4. Goswami, R., Kelkar, A., Vogel, J., & Chaussee, D. Real-time aerodynamic load estimation using flush air data sensors. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA, 2019. https://doi.org/10.2514/6.2019-2109.

5. Lie, F. A. P., Gebre-Egziabher, D. Synthetic air data system. Journal of Aircraft, 2013. https://doi.org/10.2514/1.C032177.

Лиходєєв Олександр Сергійович *– кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерно-авіаційного забезпечення Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: lihas2201@gmail.com ORCID https://orcid.org/ 0009-0009-9509-2940.*

Герасімюк Віталій Валерійович *– здобувач освітнього рівня магістр кафедри інженерно-авіаційного забезпечення Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: gerasimyukzzz@gmail.com.*

Lykhodieiev Oleksandr Serhiiovych *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering and Aviation Support, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., building 77/79, ind. 61023, e-mail: lihas2201@gmail.com ORCID https://orcid.org/ 0009-0009-9509-2940.*

Herasimiuk Vitalii Valeriovych *– Master's Degree Student of the Department of Engineering and Aviation Support, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., building 77/79, ind. 61023, e-mail: gerasimyukzzz@gmail.com.*