

Р. В. Василенко, Т. В. Паращенко

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ АЕРОМЕТРИЧНИХ ПРИЛАДІВ БАГАТОЦІЛЬОВОГО ЛІТАКА ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ MEMS- ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. Розглянуто питання удосконалення системи живлення аерометричних приладів багатоцільового літака на основі впровадження MEMS-технологій. Проаналізовано особливості функціонування систем повного та статичного тисків, які забезпечують формування інформації про висоту, швидкість польоту та інші аерометричні параметри, необхідні для безпечного пілотування та функціонування бортових пілотажно-навігаційних комплексів. Визначено основні недоліки традиційних пневмомеханічних і електромеханічних елементів, зокрема інерційність пневматичних магістралей, можливість негерметичності, вплив температури та обмежені метрологічні характеристики штатних датчиків. Обґрунтовано доцільність застосування MEMS-датчиків тиску та цифрової обробки вимірювальної інформації для підвищення точності, швидкодії, вібростійкості та температурної стабільності аерометричної системи. Показано, що запропонований підхід створює передумови для зменшення впливу похибок пневматичних магістралей, реалізації автоматичного контролю технічного стану та підвищення достовірності інформації про параметри польоту без суттєвих конструктивних змін літака. Зроблено висновок щодо перспективності впровадження MEMS-технологій як складової модернізації систем аерометричного забезпечення багатоцільових літаків.

Ключові слова: аерометричні прилади, аерометричні параметри, багатоцільовий літак, система повного та статичного тисків, MEMS-технології.

Annotation. This paper examines ways to improve the power supply system for aerometric instruments on a multi-purpose aircraft through the implementation of MEMS technologies. The paper analyzes the operational characteristics of total and static pressure systems, which provide data on altitude, airspeed, and other aerometric parameters necessary for safe piloting and the operation of onboard flight and navigation systems. The main drawbacks of traditional pneumomechanical and electromechanical components have been identified, including the inertia of pneumatic lines, the possibility of leaks, the influence of temperature, and the limited metrological characteristics of standard sensors. The feasibility of using MEMS pressure sensors and digital processing of measurement data to improve the accuracy, response time, vibration resistance, and temperature stability of the aerometric system is substantiated. It is shown that the proposed approach creates the conditions for reducing the impact of errors in pneumatic lines, implementing automatic monitoring of technical condition, and improving the reliability of flight parameter data without significant structural changes to the aircraft. A conclusion is drawn regarding the promise of implementing MEMS technologies as a component of the modernization of aerometric support systems for multi-purpose aircraft.

Keywords: aerometric instruments, aerometric parameters, multi-purpose aircraft, total and static pressure system, MEMS technology.

Сучасний розвиток авіаційної техніки висуває підвищені вимоги до точності, швидкодії та надійності вимірювання параметрів польоту. Однією з базових інформаційних систем повітряного судна (ПС) є система повного та статичного тисків, за сигналами якої визначаються висота, повітряна швидкість та інші параметри, що використовуються пілотажно-навігаційними комплексами, системами автоматичного керування та засобами індикації. Достовірність цієї інформації безпосередньо впливає на якість пілотування та безпеку польоту.

Система повного та статичного тисків являє собою сукупність приймачів повітряного тиску, пневматичних магістралей, вимірювальних перетворювачів та засобів обробки інформації. Приймач повного тиску формує сигнал, пропорційний повному тиску P_{Π} , а приймач

статичного тиску – сигнал, що відповідає статичному тиску P_c . Різниця цих величин визначає динамічний тиск ΔP . Саме величина ΔP є основою для визначення повітряної швидкості.

У реальній бортовій системі визначення швидкості потребує врахування методичних та інструментальних похибок, а також параметрів атмосфери та характеристик конкретного вимірювального каналу. На значній частині ПС, що перебувають в експлуатації, вимірювальні канали аерометричної системи сформовані на основі пневмомеханічних, електромеханічних або аналогових елементів. Для таких систем характерні інерційність пневматичних магістралей, вплив негерметичності, температурна залежність характеристик перетворювачів, накопичення похибок у процесі експлуатації та обмежені можливості оперативного контролю достовірності вимірювальної інформації. Вплив зазначених факторів особливо суттєвий під час зміни режимів польоту, зокрема на етапах зльоту, набору висоти, маневрування та посадки.

Перспективним напрямом модернізації таких систем є застосування мікроелектромеханічних систем – MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) – як первинних перетворювачів тиску з подальшим цифровим опрацюванням вимірювальної інформації. Сучасні MEMS-датчики характеризуються малими масогабаритними параметрами, можливістю інтеграції чутливого елемента з електронною схемою обробки, високою швидкодією та можливістю реалізації температурної компенсації. Сучасні дослідження MEMS-датчиків тиску також спрямовані на підвищення точності, довготривалої стабільності, температурної стійкості та придатності до роботи в складних умовах експлуатації.

Запропонований підхід передбачає формування цифрового вимірювального каналу, структурно до складу якого можуть входити приймачі повного та статичного тисків, MEMS-датчики, аналоговий тракт підготовки сигналів, аналого-цифровий перетворювач, мікропроцесорний модуль та інтерфейс передавання даних до бортових систем. Така структура дає можливість перенести значну частину функцій корекції, фільтрації та контролю вимірювальної інформації з традиційних апаратних елементів на програмно-апаратний рівень.

Алгоритм цифрового опрацювання доцільно побудувати за послідовністю: вимірювання P_n та $P_c \rightarrow$ первинна фільтрація сигналів $\rightarrow$ контроль допустимого діапазону $\rightarrow$ визначення динамічного тиску $\Delta P \rightarrow$ контроль швидкості зміни вимірюваних величин $\rightarrow$ температурна та систематична корекція $\rightarrow$ розрахунок аерометричних параметрів $\rightarrow$ формування та передавання вихідної інформації.

На етапі первинного контролю здійснюється перевірка відповідності вимірюваних значень заданому робочому діапазону. Подальший контроль швидкості зміни сигналу дає змогу виявляти стрибкоподібні зміни, які можуть бути спричинені перешкодами, порушенням роботи вимірювального каналу або іншими аномальними процесами. Для підвищення достовірності результату доцільно також здійснювати контроль узгодженості сигналів повного та статичного тисків. Виявлення невідповідності встановленим критеріям повинно формувати ознаку недостовірності або несправності відповідного каналу.

Окремим напрямом удосконалення є температурна компенсація. Температура може впливати як на чутливий елемент MEMS-датчика, так і на його електронний тракт, спричиняючи зміщення нульового сигналу та зміну коефіцієнта перетворення. Тому до складу вимірювального каналу доцільно включати засіб вимірювання температури та алгоритм корекції характеристики датчика. Сучасні дослідження підтверджують доцільність поєднання фільтрації, моделювання характеристики та температурної компенсації для зменшення похибок MEMS-систем вимірювання тиску.

Перевагою цифрової архітектури є також можливість реалізації функцій вбудованого контролю технічного стану. Аналіз тренду вихідного сигналу, швидкості його зміни та відповідності сигналів встановленим фізичним обмеженням може використовуватися для виявлення ознак деградації датчика або порушення роботи вимірювального каналу. При цьому слід розмежовувати контроль достовірності вимірювальної інформації та повну діагностику пневматичної системи, оскільки сам алгоритм цифрової обробки не може безпосередньо виявити всі види негерметичності без додаткових діагностичних ознак.

Запропонована структура дозволяє реалізувати модульний принцип модернізації аерометричної системи. Первинні MEMS-перетворювачі забезпечують вимірювання тиску, аналого-цифровий тракт формує цифрове представлення сигналів, а мікропроцесорний модуль виконує їх фільтрацію, корекцію, контроль достовірності та обчислення необхідних параметрів

польоту. Такий підхід створює можливість поступового оновлення вимірювального каналу з максимальним використанням наявної бортової інфраструктури.

Водночас впровадження MEMS-технологій не повинно розглядатися як автоматичне усунення всіх похибок аерометричної системи. Під час проєктування необхідно враховувати похибки первинного перетворювача, температурний дрейф, нелінійність характеристики, гістерезис, нестабільність нульового сигналу, похибки аналого-цифрового перетворення, а також вплив пневматичних магістралей. Тому ефективність модернізації має оцінюватися за сукупністю характеристик усього вимірювального каналу, а не лише за паспортними параметрами окремого MEMS-датчика.

Очікуваним результатом модернізації є підвищення швидкодії та достовірності формування аерометричної інформації, зменшення впливу систематичних і температурних похибок, розширення можливостей автоматичного контролю вимірювальних каналів та створення передумов для інтеграції аерометричної системи з сучасними цифровими бортовими комплексами. Застосування MEMS-технологій також відповідає загальній тенденції розвитку високоточних мініатюризованих датчиків для авіаційних технічних систем.

Таким чином, удосконалення системи вимірювання повного та статичного тисків ПС на основі MEMS-датчиків і цифрового опрацювання інформації є перспективним напрямом модернізації аерометричного обладнання. Запропонований підхід дозволяє перейти від переважно апаратної реалізації вимірювального каналу до програмно-апаратної архітектури, у якій поряд із вимірюванням тиску реалізуються фільтрація, температурна та систематична корекція, контроль достовірності та формування цифрових аерометричних параметрів. Це створює технічні передумови для підвищення надійності та інформаційної ефективності аерометричного забезпечення ПС без принципової зміни його функціональної структури.

Список використаних джерел:

1. Han X., Huang M., Wu Z. et al. Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*. 2023. Vol. 9. Article 156. DOI: 10.1038/s41378-023-00620-1.
2. Review on pressure sensors: a perspective from mechanical to micro-electro-mechanical systems. *Sensor Review*. 2021.
3. Javed Y., Mansoor M., Shah I. A. A review of principles of MEMS pressure sensing with its aerospace applications. *Sensor Review*. 2019. Vol. 39, No. 5. P. 652–664. DOI: 10.1108/SR-06-2018-0135.
4. Deepu B. R., Pavithra B., Nayak M. M., Bhat K. N. Advancement in Micromachining Techniques of MEMS Piezoresistive Pressure Sensors to Minimize Offset Drift Due to Humidity and Temperature. In: *Micromachining – New Trends and Applications*. 2024. DOI: 10.5772/intechopen.113339.

Василенко Роман Вікторович – старший викладач кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів інженерно-авіаційного факультету Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська 77/79, email: spike75.rv@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7683-7526>.

Паращенко Тимур Васильович – доктор філософії, провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, м. Черкаси, email: Liberian2009@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-9908-4408>.

Information about the authors

Roman Viktorovich Vasylenko – senior lecturer, Faculty of Aviation Engineering of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St. 77/79, email: spike75.rv@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7683-7526>.

Timur Vasilyovich Parashchenko – Doctor of Philosophy, leading scientific scientist at the State Scientific Research Institute for Testing and Certification of New and Modern Technology, Cherkassy, email: Liberian2009@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9908-4408>.