

О. С. Лиходєєв, А. Р. Мілейко

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ГІРОСКОПІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ ТА НАВІГАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ ЛІТАКІВ

Анотація. Доповідь присвячена аналізу сучасних гіроскопічних технологій для модернізації систем орієнтації та навігації військових літаків. Досліджено принципи роботи механічних, лазерних і волоконно-оптичних гіроскопів. Проаналізовано їхні основні характеристики, зокрема точність вимірювань, дрейф нуля, масогабаритні параметри та експлуатаційну надійність. Обґрунтовано перспективні напрями вдосконалення гіроскопічних систем на основі застосування сучасних оптичних технологій, цифрового оброблення даних і комплексування інерціальних та супутникових навігаційних засобів.

Ключові слова: гіроскопічні технології, системи орієнтації, інерціальна навігація, лазерний гіроскоп, волоконно-оптичний гіроскоп, модернізація авіоніки.

Abstract: The paper is devoted to the analysis of modern gyroscopic technologies for upgrading the attitude and navigation systems of military aircraft. The operating principles of mechanical, ring laser, and fiber-optic gyroscopes are investigated. Their main performance characteristics, including measurement accuracy, zero drift, size and weight parameters, and operational reliability, are analyzed. Promising directions for improving gyroscopic systems through the application of advanced optical technologies, digital data processing, and the integration of inertial and satellite navigation systems are substantiated.

Keywords: gyroscopic technologies, attitude determination systems, inertial navigation, ring laser gyroscope, fiber-optic gyroscope, avionics modernization.

Сучасні системи орієнтації та навігації військових літаків є важливими складовими авіоніки, від функціонування яких залежать точність визначення просторового положення повітряного судна, стабільність польоту та ефективність виконання поставлених завдань. Особливого значення ці системи набувають за умов інтенсивного маневрування, дії зовнішніх збурень, обмеженої видимості та можливого погіршення доступності супутникових навігаційних сигналів. За таких обставин інерціальні навігаційні системи забезпечують автономне визначення параметрів руху літака, використовуючи інформацію про його кутові переміщення та лінійні прискорення.

Основу вимірювання кутового руху в інерціальних системах становлять гіроскопи, технологічний розвиток яких сприяв переходу від традиційних механічних конструкцій до оптичних приладів. Найбільш поширеними напрямками вдосконалення є застосування механічних, лазерних і волоконно-оптичних гіроскопів, що відрізняються фізичними принципами функціонування, точністю, стабільністю характеристик, енергоспоживанням і конструктивним виконанням. Водночас вибір конкретної технології потребує комплексного врахування умов експлуатації, вимог до надійності та можливостей інтеграції з іншими навігаційними засобами.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення точності та автономності навігаційного обладнання військових літаків, а також зменшення його масогабаритних характеристик і експлуатаційних витрат.

При аналізі принципів роботи сучасних гіроскопічних технологій насамперед доцільно розглянути механічні гіроскопи, які історично стали основою розвитку інерціальних навігаційних систем [1]. Принцип їхньої роботи ґрунтується на збереженні напрямку осі обертання ротора відповідно до закону збереження кінетичного моменту. Під час зміни орієнтації корпусу приладу виникають відповідні реакції гіроскопічного ротора, за якими визначають кутові переміщення повітряного судна. Перевагами таких пристроїв є відпрацьованість конструкції та можливість забезпечення високої точності. Однак наявність рухомих механічних компонентів зумовлює тертя, зношування опор, чутливість до вібрацій і температурних змін. Унаслідок цього виникають похибки вимірювання та обмежується ресурс експлуатації. Зазначені недоліки стимулювали пошук альтернативних технологічних рішень.

Подальшим етапом розвитку стали лазерні гіроскопи, зокрема кільцеві лазерні гіроскопи (Ring Laser Gyroscope, RLG) [2]. Їхня робота ґрунтується на ефекті Саньяка, відповідно до якого під час обертання замкненого оптичного контуру змінюється різниця фаз або частот двох світлових хвиль, що поширюються в протилежних напрямках. Вимірювання цієї різниці дає змогу визначати кутову швидкість без використання ротора. Відсутність традиційних рухомих механічних вузлів підвищує довговічність і сприяє стабільності вимірювань. Водночас лазерні гіроскопи потребують точного виготовлення оптичного резонатора, стабілізації робочих параметрів і компенсації ефекту блокування зустрічних хвиль за малих кутових швидкостей. Додатковими чинниками є складність конструкції та вимоги до електронних систем оброблення сигналів.

Іншим перспективним різновидом оптичних приладів є волоконно-оптичні гіроскопи (Fiber-Optic Gyroscope, FOG) [3]. Їхній принцип функціонування також базується на ефекті Саньяка, проте замість жорсткого резонатора використовується оптичне волокно, намотане у вигляді котушки. Світлові хвилі проходять волокном у протилежних напрямках, а під час обертання системи між ними виникає фазова різниця, пропорційна кутовій швидкості. Завдяки відсутності рухомих деталей такі гіроскопи характеризуються високою експлуатаційною надійністю, конструктивною гнучкістю та можливістю створення компактних вимірювальних модулів. Їхні характеристики залежать від довжини волокна, якості оптичних компонентів і алгоритмів компенсації похибок. До основних джерел нестабільності належать температурні впливи, поляризаційні ефекти та зворотне розсіювання світла.

Порівняння розглянутих технологій свідчить, що їхні переваги й обмеження визначаються як фізичними принципами вимірювання, так і конструктивними особливостями. Механічні гіроскопи можуть забезпечувати високу точність, однак потребують регулярного технічного контролю та врахування старіння рухомих елементів. Лазерні гіроскопи відзначаються високою точністю й стабільністю коефіцієнта перетворення, що робить їх придатними для високоточних інерціальних систем. Волоконно-оптичні гіроскопи забезпечують широкий діапазон конструктивних рішень і можуть досягати навігаційного рівня точності залежно від реалізації. Водночас некоректно визначати універсального лідера за точністю без зазначення класу приладу та умов випробувань [3, 4].

Важливим критерієм оцінювання є дрейф нуля, тобто зміна вихідного сигналу за відсутності відповідного кутового руху. Навіть незначний систематичний дрейф призводить до накопичення похибки визначення орієнтації, а згодом – і навігаційних параметрів. У механічних приладах він може бути пов'язаний із тертям, дисбалансом і температурною нестабільністю. У лазерних гіроскопах істотними є характеристики оптичного резонатора та нелінійні ефекти, тоді як у волоконно-оптичних – термооптичні й поляризаційні явища. Отже, зменшення дрейфу потребує не лише вдосконалення чутливого елемента, а й точного калібрування, температурної компенсації та цифрового коригування вимірювань [3, 4].

За масогабаритними характеристиками оптичні гіроскопи загалом мають переваги порівняно з традиційними механічними системами, хоча фактичні розміри визначаються всією конструкцією навігаційного блока. Волоконно-оптична технологія є особливо перспективною для створення компактних модулів, тоді як лазерна потребує стабільного оптичного резонатора та відповідних допоміжних вузлів. Надійність також не можна оцінювати виключно за відсутністю рухомих частин: необхідно враховувати ресурс джерела випромінювання, стійкість електроніки, оптичних компонентів і з'єднань до вібрацій, ударних навантажень та температурних коливань.

З огляду на зазначені особливості, перспективним напрямом модернізації військової авіації є поетапне впровадження високоточних волоконно-оптичних і лазерних гіроскопів із використанням сучасних цифрових засобів оброблення даних. Вибір між ними повинен здійснюватися на основі технічних вимог до конкретного повітряного судна, допустимого дрейфу, маси, енергоспоживання, вартості та життєвого циклу обладнання.

Наступним напрямом є інтеграція гіроскопічних датчиків з акселерометрами та супутниковими навігаційними приймачами в єдину інерціально-супутникову систему. Такий підхід дає змогу об'єднати автономність інерціальних вимірювань із можливістю зовнішнього коригування накопичених похибок. Для підвищення стійкості до втрати або спотворення

супутникових сигналів необхідно передбачати автономні режими роботи, контроль достовірності даних і резервування критичних компонентів.

Окрему перспективу становлять інтегрована фотоніка, вдосконалені оптичні волокна та алгоритми адаптивної компенсації дрейфу. Застосування компактних фотонних компонентів може сприяти зменшенню маси, габаритів і енергоспоживання навігаційного обладнання. Водночас практична реалізація цих рішень потребує експериментальної перевірки точності, температурної стабільності та стійкості до зовнішніх впливів. Отже, модернізація має передбачати комплексне вдосконалення чутливих елементів, електроніки, програмного забезпечення й системи технічного контролю.

За результатами дослідження можливо зробити наступні висновки:

1. Механічні гіроскопи мають відпрацьовану конструкцію, проте рухомі елементи зумовлюють зношування, додаткові похибки та обмеження експлуатаційного ресурсу.
2. Лазерні гіроскопи забезпечують високу точність і стабільність вимірювань, тому залишаються перспективними для високоточних інерціальних навігаційних систем.
3. Волоконно-оптичні гіроскопи поєднують високу надійність, відсутність рухомих деталей і можливість створення компактних навігаційних модулів.
4. Вибір гіроскопічної технології необхідно здійснювати комплексно, враховуючи точність, дрейф нуля, масогабаритні характеристики, енергоспоживання та вартість життєвого циклу.
5. Подальше вдосконалення систем орієнтації та навігації військових літаків доцільно спрямувати на підвищення автономності, стійкості до зовнішніх впливів, достовірності навігаційних даних і надійності обладнання.

Таким чином, комплексне впровадження сучасних гіроскопічних технологій створює передумови для підвищення ефективності навігаційного обладнання військової авіації.

Список використаних джерел:

1. Passaro VMN, Cuccovillo A, Vaiani L, De Carlo M, Campanella CE. Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective. *Sensors*. 2017; 17(10):2284. <https://doi.org/10.3390/s17102284>.
2. Lefèvre, H. C. The fiber-optic gyroscope: Challenges to become the ultimate rotation-sensing technology. *Optical Fiber Technology*. Volume 19, Issue 6, Part B, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2013.08.007>.
3. Smailov N., Tashtay Y., Komada P. Fiber-Optic Gyroscopes in Modern Navigation Systems: A Comprehensive Review. *Network*, 2026. <https://doi.org/10.3390/network6020028>.
4. Mahudapathi S., R S.N., R G., Srinivasan B. The Challenges and Opportunities for Performance Enhancement in Resonant Fiber Optic Gyroscopes. *Sensors*, 2025. <https://doi.org/10.3390/s25010223>.

Лиходєєв Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів інженерно-авіаційного факультету 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>.

Мілейко Анна Вадимівна – здобувач освітнього рівня бакалавр кафедри авіаційного обладнання літаків і вертольотів Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: anyastarkon777@gmail.com.

Lykhodieiev Oleksandr Serhiiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Aircraft and Helicopter Avionics, Aviation Engineering Faculty, 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>.

Mileiko Anna Vadymivna – Bachelor's Degree Holder of the Department of Aircraft and Helicopter Avionics, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., building 77/79, ind. 61023, e-mail: anyastarkon777@gmail.com.